

Estimación de la vida útil remanente de un generador eléctrico aplicada en la central
hidroeléctrica URRÁ I

Carlos Luis Iglesias Puente

Carlos Andres Anibal Rojas

Monografía para Optar al Título de especialista en Gerencia de Mantenimiento

Director

Mario José Sierra Flórez

Magister en gerencia de mantenimiento

Universidad Industrial de Santander UIS

Escuela de Ingeniería Mecánica

Comité de Postgrados Escuela de Ingeniería Mecánica

Especialización en Gerencia de Mantenimiento

Bucaramanga - Santander

2025

Dedicatoria Carlos Luis Iglesias Puente

A Dios sea la gloria.

Dedicado con todo mi corazón a mi familia y, en especial, a mi madre, cuyo amor incondicional y lucha constante han forjado en mí el carácter de un verdadero guerrero. A mi tío Luis (Q.E.P.D.), quien ha sido una fuente invaluable de inspiración, y a mis maestros, el Ing. Mario S. y la Ing. Lina T., a quienes agradezco profundamente por su guía y por ser pilares fundamentales en mi formación profesional.

Dedicatoria Carlos Andres Anibal Rojas

A Dios por ser mi guía, mi fuerza en cada momento, a mi familia por su amor incondicional, su apoyo incansable y sus palabras de aliento en cada paso de este proceso y a mi novia por motivarme, por confiar en mi y ser el impulso invaluable en este camino.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Planteamiento del problema.....	12
2. Objetivos	14
2.1. Objetivo general.....	14
2.2. Objetivos específicos	14
3. Justificación	15
4. Marco teórico	16
4.1. Generador electrico	16
4.2. Funcionamiento de un hidrogenerador	177
4.3. Factores que inciden en la vida util de un generador electrico	17
4.4. Técnicas de monitoreo de condición.....	18
4.5. Modelos de estimación y pronósticos en mantenimiento.....	20
5. Hipótesis	22
6. Metodología	22
6.1. Acopio de la información.....	22
6.1.1. Selección del generador a estimarle la vida útil remanente.....	22
6.1.2. Informacion de pruebas y ensayos de los equipos de monitoreo.....	23
6.2. Selección de un metodo de prediccion.....	24
6.3. Elaboracion de ensayos	25
6.3.1. Ensayos al estator	25
6.3.2. Ensayos al rotor.....	26

ESTIMACIÓN VIDA ÚTIL REMANENTE GENERADORES URRÁ I

	5
6.3.3. Polos del rotor.....	26
6.3.4. Ensayos Mecánico.....	26
6.3.5. Otros Ensayos.....	26
6.4. Selección de parametros	26
6.5. Metodo de puntuacion y ponderacion.....	30
6.5.1. Estructura, Metodo de estimacion de vida util remanente	32
6.5.2. Aplicacion del metodo de prediccion de la vida util.....	33
7. Conclusiones	35
Referencias Bibliográficas	36

Lista de tablas

	Pag
Tabla 1. <i>Datos técnicos del generador</i>	23
Tabla 2. <i>Matriz de evaluación, selección método de predicción</i>	24
Tabla 3. <i>Resultados de encuestas, valoración de expertos</i>	27
Tabla 4. <i>Valores de entrada del método para estimar la vida útil remanente del generador</i>	29
Tabla 5. <i>Matriz de ponderación de los ensayos de entrada del método</i>	30
Tabla 6. <i>Plantilla para la recolección de datos de entrada al método</i>	31
Tabla 7. <i>Método de puntuación y ponderación para estimar la vida útil remanente del generador de la central hidroeléctrica Urra I</i>	32
Tabla 8. <i>Ensayos y estado actual unidad 3 -2025</i>	34
Tabla 8a. <i>Estimación de la vida útil remanente unidad 3- 2025</i>	34

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1_ <i>Casa de Maquinas C.H URRÁ I</i>	12
Figura 2_ <i>Croquis del sistema C.H. URRÁ I</i>	16

Glosario

Furanos: son indicadores de la degradación de la celulosa en un transformador. El 2 furfuraldehído es el compuesto más estable y de mayor cantidad de los 5 furanos formados a partir de la descomposición del papel por sobrecalentamiento general de la celulosa.

Grado de polimerización: DP (por sus siglas en inglés) es uno de los parámetros más importantes para determinar las propiedades físicas de un polímero como la celulosa, y se define como el número de unidades monoméricas por cadena lineal de polímero.

Inteligencia artificial: técnicas que imitan el comportamiento del cerebro humano, y que mediante algoritmos creados en un entorno dinámico de computación utilizan una cantidad de datos para realizar un aprendizaje automático y tomar decisiones. Se aplica en muchos campos como el financiero, económico, ingeniería, etc.

Papel Kraft: Material construido a partir de una delgada lamina de celulosa y otros elementos, sirve como medio aislante de los conductores dentro de los transformadores rellenos de aceite.

Vida útil: es el tiempo durante el cual se espera que un activo funcione y por tanto genere ingresos a la compañía dueña del activo, y por lo cual, es utilizado para amortizar el activo en la medida que se va desgastando.

Resumen

Título: Estimación de la vida útil remanente de un generador eléctrico aplicada en la central hidroeléctrica URRÁ I

Autores: Carlos Luis Iglesias Puente y Carlos Andrés Aníbal Rojas

Palabras claves: Vida útil remanente, Hidrogenerador, ponderación y puntuación, valoración de expertos

Descripción: Este trabajo de grado tiene como objetivo estimar la vida útil remanente de un generador eléctrico en la central hidroeléctrica URRÁ 1. Para ello, se llevó a cabo una recopilación exhaustiva de datos sobre el generador y sus componentes principales. Posteriormente, se aplicó un método de evaluación basado en ponderación y puntuación, el cual clasifica y valora diversos factores que influyen en el envejecimiento y desempeño del equipo. Mediante la realimentación del método con la incidencia de cada factor sobre la vida útil, se obtuvo una estimación aproximada de la vida útil remanente del generador, permitiendo así aportar información relevante para la toma de decisiones en mantenimiento y operación.

Para la selección de los parámetros de entrada y la asignación de pesos a cada factor, se realizó una encuesta técnica que tomó en cuenta la experiencia y valoración de expertos en generadores eléctricos, así como de operadores de la central hidroeléctrica.

Este estudio tiene como objetivo desarrollar una metodología para estimar la vida útil remanente de un generador eléctrico perteneciente a una de las unidades de una central hidroeléctrica. Para ello, se emplean softwares comparativos que permiten ponderar los distintos factores involucrados y aplicar un método adecuado para la estimación precisa de dicha vida útil.

Inicialmente, se llevó a cabo un estudio de las distintas técnicas disponibles para la estimación de la vida útil remanente, con el objetivo de seleccionar la más adecuada en función de las características de los datos disponibles. A continuación, se recopilaron los datos de entrada y se determinó el nivel de incidencia de cada factor relevante. Posteriormente, se aplicó un método de puntuación y ponderación para estimar la vida útil remanente del generador. Finalmente, se realizó un análisis de los resultados obtenidos al aplicar el modelo propuesto. Este análisis permitió comprobar que es posible estimar de manera efectiva la vida útil remanente de un hidrogenerador, lo que facilita la trazabilidad de la información y la planificación de mantenimientos adecuados, contribuyendo así a la conservación y buen funcionamiento del equipo.

Abstract

Title: Estimation of the Remaining Useful Life of an Electric Generator Applied at the URRÁ I Hydroelectric Power Plant

Authors: Carlos Luis Iglesias Puente and Carlos Andrés Aníbal Rojas

Keywords: Remaining useful life, Hydrogenerator, weighting and scoring, expert assessment

Description: This undergraduate thesis aims to estimate the remaining useful life of an electric generator at the URRÁ I hydroelectric power plant. To achieve this, an exhaustive data collection was carried out on the generator and its main components. Subsequently, an evaluation method based on weighting and scoring was applied, which classifies and assesses various factors influencing the aging and performance of the equipment. By incorporating feedback on how each factor affects useful life, an approximate estimation of the generator's remaining useful life was obtained, thus providing valuable information for decision-making in maintenance and operation.

To select the input parameters and assign weights to each factor, a technical survey was conducted, taking into account the experience and assessments of experts in electric generators as well as operators of the hydroelectric plant.

This study aims to develop a methodology for estimating the remaining useful life of an electric generator belonging to one of the units at a hydroelectric power plant. Comparative software tools were used to weigh the various factors involved and apply an appropriate method for accurate estimation of the remaining life.

Initially, a study was conducted on the various available techniques for estimating remaining useful life, with the goal of selecting the most suitable one based on the characteristics of the available data. Subsequently, input data were collected, and the impact level of each relevant factor was determined. Afterwards, a scoring and weighting method was applied to estimate the generator's remaining useful life. Finally, an analysis of the results obtained from the proposed model was carried out. This analysis demonstrated that it is possible to effectively estimate the remaining useful life of a hydrogenerator, which facilitates information traceability and proper maintenance planning, thereby contributing to the preservation and optimal operation of the equipment.

Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Advisor: M.Sc. Mario José Sierra Florez

Introducción

En el contexto de la generación de energía hidroeléctrica, el mantenimiento adecuado y la gestión eficiente de los equipos son fundamentales para garantizar la continuidad del servicio y la optimización de los recursos. Uno de los componentes críticos en este tipo de instalaciones es el generador eléctrico, cuya vida útil está sujeta a diversos factores operativos, ambientales y de diseño. Por tanto, contar con una metodología confiable para estimar su vida útil remanente representa una herramienta clave para la planificación del mantenimiento y la toma de decisiones operativas.

Este trabajo de grado se enfoca en la estimación de la vida útil remanente de un generador eléctrico perteneciente a la central hidroeléctrica URRÁ 1. Para ello, se realizó una recopilación exhaustiva de datos técnicos del generador y sus principales componentes, y se aplicó un método de evaluación basado en la ponderación y puntuación de los factores que influyen en su envejecimiento. La metodología propuesta incorpora la experiencia de expertos y operadores mediante encuestas técnicas, lo cual permite asignar pesos adecuados a cada variable evaluada.

El estudio también incluyó la comparación de diversas técnicas de estimación de vida útil, seleccionando la más adecuada en función de la naturaleza de los datos disponibles. Los resultados obtenidos permiten estimar de forma efectiva el tiempo de operación restante del equipo, facilitando la planificación de mantenimientos preventivos y correctivos, y contribuyendo así a la conservación y funcionamiento eficiente del sistema hidroeléctrico.

1. Planteamiento del problema

La central hidroeléctrica URRÁ ubicada a 30 km al sur del municipio de Tierralta-Córdoba-Colombia, está conformada por 4 turbinas generadoras tipo Francis de 85 MW cada una, para una capacidad total de 340 MW. Constituye como fuentes y equipos principales: el embalse de 77.000 ha, estructura de tomas, 4 turbinas tipo francis, 4 generadores eléctricos, 4 transformadores de potencia, 2 subestaciones (110 kV y 230 kV) entrada en operación desde el año 2.000.

Figura 1: casa de máquinas C.H. URRÁ I



La operación eficiente de la central hidroeléctrica depende de equipos esenciales que tienen un alto costo de reparación y remplazo, caso de ellos es el generador eléctrico de cada unidad, que al presentar una falla podría afectar operacional, estructural y económicamente las actividades de la central. En atención a esto, en el año 2017, URRÁ S.A. E.S.P. la firma PWC asesores gerenciales Ltda., llevó a cabo un análisis exhaustivo de la gestión de activos de la Central Hidroeléctrica Urra

I. en conformidad con los estándares de la norma ISO 55001:2014. Este diagnóstico generó recomendaciones significativas, entre las cuales se destaca la implementación de métodos para identificar la vida remanente y la obsolescencia técnica de los activos críticos, como es el generador eléctrico, permitiendo así proyectar acciones preventivas como el posible reemplazo o la extensión de su vida útil.

Estimar la vida útil remanente de un generador es importante porque permitiría realizar acciones encaminadas a mejorar las condiciones del equipo o a planificar su cambio con suficiente tiempo, antes de ocurrir fallas de alto costo para los dueños. En la actualidad, en la Central Hidroeléctrica Urura I no se cuenta con una metodología que estime la vida útil de activos críticos como son los generadores.

¿Es posible establecer una metodología para estimar la vida útil remanente del generador de la central hidroeléctrica URRÁ I?

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

- Estimar la vida útil remanente de un generador de la central hidroeléctrica URRÁ

2.2. Objetivos específicos

- Establecer una metodología para la estimación de vida útil del generador
- Definir los parámetros que se usarán para estimar la vida útil de un generador eléctrico.
- Aplicar metodología para la estimación de la vida útil en un generador eléctrico de la C.H. URRÁ

3. Justificación

La central hidroeléctrica Urra comenzó su fase operativa en el año 2000, delegando la administración, operación y mantenimiento ("A.O.M.") a la empresa EMEC S.A.S. la cual es responsable de asegurar el correcto funcionamiento y gestión de todo el proceso de generación de energía. Por ende, se elaboran planes de mantenimiento para los equipos instalados, con el fin de preservar los activos y así lograr una productividad y disponibilidad efectivas en la planta. Estos planes están diseñados para cumplir con las normativas de calidad y medio ambiente, siguiendo estándares rigurosos para prevenir cualquier fallo. Uno de los componentes cruciales de la central es el generador eléctrico, cuya operación ininterrumpida es vital para el funcionamiento óptimo de la central hidroeléctrica Urra. Una falla en este equipo tendría un impacto significativo en la administración, operación y mantenimiento de la central, lo que podría incluso afectar el suministro nacional de energía eléctrica a los consumidores del sistema

La descripción anteriormente mencionada sirve de motivación para la implementación de una metodología específica destinada a estimar la vida útil remanente del generador eléctrico aplicado en la central hidroeléctrica Urra 1. Dado que el generador eléctrico es un activo crítico, definido como tal en el estudio diagnóstico a la gestión de activos de acuerdo con ISO 55001:2014 de la empresa PWS, estimar su vida útil permite planificar acciones de mantenimiento que prolonguen su funcionamiento óptimo y faciliten la toma de decisiones más acertadas en cuanto a las mejores prácticas de mantenimiento o modernización o remplazo del equipo

El generador eléctrico está constituido por partes esenciales; tales como:

Estator: parte externa fija de forma cilíndrica hueca, este constituye el sistema inducido

Rotor: parte interna rodante de forma cilíndrica, este constituye el sistema inductor

Sistema de Enfriamiento: Es crucial para disipar el calor generado durante la operación del generador y evitar el sobrecalentamiento, lo que puede reducir la vida útil del equipo.

Cojinetes: Son componentes importantes para soportar el rotor, permitiendo un funcionamiento suave y eficiente del generador.

4.2. Funcionamiento de un hidrogenerador

Un hidrogenerador opera según el principio de inducción electromagnética. Funciona de la siguiente manera: inicialmente, un movimiento mecánico generado por una fuerza externa impulsa el rotor, haciendo que este gire a una velocidad constante. El rotor, que contiene un campo magnético, gira dentro del estator, que es la estructura estacionaria. A medida que el rotor gira, su campo magnético induce un flujo de corriente eléctrica en el estator. Esta corriente excita un flujo de electrones, resultando en la generación de energía eléctrica.

4.3. Factores que inciden en la vida útil de un generador eléctrico

La vida útil remanente de un generador eléctrico en una central hidroeléctrica es un tema importante en la gestión de la infraestructura energética. Factores técnicos, ambientales y de operación pueden influir en esta medida, que determina el tiempo restante de operación efectiva del generador antes de requerir un reemplazo o una revisión mayor. Los siguientes son factores importantes que inciden en la vida útil remanente de un generador eléctrico

Fatiga por esfuerzos fluctuantes: las plantas de generación de energía hidroeléctrica deben operar a diferentes niveles de potencia e incluso sufrir varias iniciar y detener procesos. Esto produce cambios en la dinámica. condiciones de operación que crean tensiones fluctuantes en sus

componentes mecánicos. Por lo tanto, las máquinas son sometidos a ciclos de estrés diferentes a los producido por una operación constante con la mejor eficiencia operativa [3]

Desviaciones de frecuencia: Cuando hay desviaciones en frecuencia o tensión, se pueden presentar esfuerzos térmicos y dieléctricos que pueden causar grandes daños de manera rápida en el generador [4]

Sobreexcitación: Cuando la relación de V/Hz es excedida de un valor puede haber saturación en el núcleo magnético del generador, induciendo un flujo de dispersión en componentes no laminados que no están diseñados para soportarlo, y se producen pérdidas por corrientes parásitas en los componentes adyacentes al núcleo, como en cuñas de ranura o componentes de ensamblaje; este flujo puede producir un daño en segundos. Estas pérdidas producen un incremento de la temperatura del equipo, lo que ocasiona un deterioro del aislamiento en segundos.

Entorno y condición: factores como la corrosión debido a la exposición al agua y al aire y el mantenimiento inadecuado pueden acelerar el deterioro y reducir la vida útil de los componentes mecánicos y eléctricos del generador

4.4 Técnicas de monitoreo de condición

El monitoreo de la condición de un generador eléctrico es crucial para garantizar su operación eficiente y prolongar su vida útil las siguientes son técnicas de monitoreo

Cargas parciales: Una descarga parcial se define como una descarga eléctrica localizada, que une parcialmente el aislamiento entre los conductores, acompañada de: movimiento de cargas, emisión acústica, radiación de luz y una reacción química, Entre los métodos más utilizados está la detección de señales eléctricas, ya sea con pruebas fuera-de-línea (máquina fuera de operación), como monitoreo en-línea (máquina en operación). La medición en-

línea detecta directamente los pulsos eléctricos de las DPs del devanado del estator durante el funcionamiento normal del generador [5]

Análisis de aceite: Se realiza periódicamente para evaluar la presencia de partículas metálicas, agua, y otros contaminantes. Esto puede indicar desgaste anormal de los cojinetes de carga y guía del generador, uno de los métodos mas utilizados es el análisis en laboratorio de partículas sólidas inmersas en el aceite (ISO 4406), y ferrografía

Análisis de vibraciones: La utilización plena de las vibraciones como fuente de información para el monitoreo de condición exige de la medición de la amplitud, la frecuencia y la fase. Salvo algunas excepciones, la amplitud es el indicador primario de calidad de condición. Por su parte, frecuencia y fase constituyen parámetros síntomas para la identificación de defectos específicos, en elementos afectados y en algunos casos también puede indicar calidad de estado [6]

Termografía: La termografía se basa en la medición de la radiación infrarroja emitida por los objetos. Los componentes de un generador eléctrico como el estator, el rotor, los rodamientos y las conexiones eléctricas generan calor durante su funcionamiento normal. Problemas como conexiones flojas, desequilibrios, desgaste de rodamientos o problemas en los devanados pueden provocar un aumento anormal de temperatura en estas áreas.

Inspección visual y bores copia: Técnica para realizar verificación de los elementos visibles del generador, tales como estados de tuberías del sistema de enfriamiento, estado de sensores, ausencia de defectos superficiales entre otros elementos presentes

Monitoreo de la corriente y el voltaje: se debe monitorear la corriente que entrega el generador para identificar la posible ocurrencia de una sobrecarga generando una señal de alarma con el fin de tomar los correctivos a que haya lugar [7]

4.5. Modelos de estimación y pronósticos en mantenimiento

La mayoría de los sistemas electromecánicos modernos son grandes, complejos, con características especiales y estructuras particulares. Cuando un sistema complejo falla, las consecuencias pueden ser dramáticas; por ejemplo, pueden ocurrir pérdidas económicas sensibles, afectación de la salud y bienestar de seres humanos y daños serios al ambiente. Para mitigar estos efectos, el mantenimiento industrial ha pasado de ser un asunto meramente técnico a uno de administración estratégica. Este nuevo rol implica brindar soluciones a problemas cada vez más complejos, como la predicción oportuna de fallas y la gestión eficiente de activos [8], los modelos de predicción y pronósticos juegan un papel crucial en la planificación y la gestión de activos. Estos modelos se centran en predecir cuándo ocurrirá una falla en un equipo o sistema, permitiendo así realizar mantenimiento preventivo de manera eficiente y minimizando tiempos de inactividad no planificados. A continuación, se menciona algunos de los más estudiados

Método de puntuación y ponderación: La operación confiable de un generador depende en gran medida de la condición del aislamiento del devanado del estator; por lo tanto, realizar una prueba diagnóstica periódica y encontrar un índice de salud del aislamiento del generador se ha vuelto obligatorio. Para calcular un índice de salud del aislamiento del devanado del generador se utiliza un método de puntuación y ponderación. Se asignan tres niveles de puntuación a cada prueba diagnóstica dieléctrica realizada en un devanado del estator. La puntuación se otorga después de establecer un criterio de aceptación refiriéndose a estándares relevantes. El peso de cada prueba se calcula utilizando el proceso de jerarquía analítica [9].

Método de Evaluación de Envejecimiento del Estator: se analizan los procesos de envejecimiento en los bobinados del estator de generadores hidroeléctricos, enfocándose en los factores de deterioro como el voltaje, la temperatura y las fuerzas mecánicas. Se analiza el impacto

de las operaciones de arranque-parada y los ciclos de carga, destacando su relevancia debido a la desregulación y la incorporación de energías renovables. Además, se describe la degradación del aislamiento cerca de los conductores de cobre, que es la principal causa de fallos en servicio. También se discuten las fuerzas mecánicas y térmicas que afectan la durabilidad del aislamiento. [10]

DiagConsole: el software web DiagConsole para el monitoreo y diagnóstico de equipos eléctricos, accesible remotamente a través de un navegador web. Este software recopila datos en línea y fuera de línea para estimar el índice de salud de los equipos, su vida útil restante y el tipo de mantenimiento necesario. [11]

Voltaje de ruptura residual: se calcula a partir de pruebas de diagnóstico y predice la vida útil restante comparando con el voltaje operativo normal. [12]

Método Test ACEC: Utiliza la magnitud de descargas parciales y el voltaje de ruptura para predecir la vida útil [12]

5. Hipótesis

La vida útil remanente del generador eléctrico en la Central Hidroeléctrica URRÁ I puede ser estimada mediante la integración de técnicas de monitoreo en línea y modelos predictivos, que consideren los factores críticos identificados en el funcionamiento y mantenimiento del generador.

6. Metodología

6.1 Acopio de la información

6.1.1. Selección del generador a estimar la vida útil remanente

El diseño original de la central hidroeléctrica URRÁ I incluye la instalación de cuatro generadores eléctricos tipo sombrilla de eje vertical síncrono trifásico. Cada generador está conectado directamente a una turbina Francis y está diseñado para producir energía eléctrica a partir del movimiento mecánico transmitido por el eje vertical. Estos generadores se encuentran ubicados en la casa de máquinas, la cual está expuesta a un clima tropical con temperaturas que varían entre 10°C a 40°C, y una humedad relativa promedio del 80%

Cada generador tiene un peso total de 735 toneladas, distribuido de la siguiente manera: 366 toneladas corresponden al rotor, 211 toneladas al estator y 158 toneladas a enfriadores y otros accesorios. Está equipado con 30 pares de polos, opera a una velocidad nominal de 120 rpm y puede alcanzar una sobre velocidad de 210 rpm. El generador entrega una tensión de 13.8 kV, una capacidad nominal de 92.7 MVA y un factor de potencia de 0.90, funcionando a una frecuencia de 60 Hz.

En la *tabla 1* ilustra los datos técnicos del generador

<i>Tabla1: Datos técnicos del generador</i>	
Tipo	Sombrilla
Peso total	735 toneladas
Peso del rotor	366 toneladas
Peso del estator	211 toneladas
Pares de polo	30
Velocidad nominal	120 rpm
Sobre velocidad	210 rpm
Tensión	13.8 Kv
Capacidad nominal	92.7 MVA
Factor de potencia	0.9
Frecuencia	60 Hz

6.1.2. Información de pruebas y ensayos de los equipos de monitoreo

En 1999, concluyó la etapa de montaje y comenzó la fase de pre-operación de la Central Hidroeléctrica URRÁ 1. Desde entonces, los cuatro generadores han estado en funcionamiento. Desde el inicio, se implementó un plan de mantenimiento para estos equipos, que inicialmente se basó en un enfoque de ensayo y error. Posteriormente, se desarrollaron planes de mantenimiento más avanzados, que incluían ensayos y monitoreos detallados para evaluar con precisión las condiciones de las máquinas, especialmente del generador eléctrico.

6.2 Selección de un método de predicción

Se busca implementar un método que ofrezca un marco claro y sistemático para evaluar la condición actual del generador y predecir de manera efectiva su vida útil remanente en la central hidroeléctrica URRÁ 1. A continuación, se presenta una lista de distintos métodos que podrían aplicarse para alcanzar este objetivo. Además, se elaborará una matriz de evaluación con el fin de determinar cuál de estos métodos es el óptimo para su aplicación.

Tabla 2: Matriz de evaluación – selección método de predicción								
Método	Criterio						Comentario	★
	C1	C2	C3	C4	C5	C6		
Método de puntuación y ponderación	85%	90%	90%	90%	80%	90%	Es el más favorecido en la mayoría de los criterios debido a su flexibilidad, capacidad para incorporar datos históricos y precisión estadística. También es más fácil de implementar y validar,	525
Método de Evaluación de Envejecimiento	70%	80%	75%	90%	70%	75%	Aporta un buen enfoque en cuanto a la observación directa de cómo envejece el generador, pero es más limitado en flexibilidad y precisión	460
Diag Console	65%	75%	70%	90%	70%	70%	Aunque es excelente para pruebas bajo condiciones extremas, su capacidad para estimar la vida útil es limitada y su implementación requiere equipos especializados	440
Voltaje de ruptura residual	75%	65%	60%	90%	70%	75%	Es útil para la evaluación de fallos y diagnóstico, pero su capacidad de estimación de vida útil es menos precisa. A pesar de ser flexible y relativamente fácil de implementar, no tiene la misma capacidad de validación	510
Método Test ACEC	60%	60%	70%	90%	90%	60%	Este método es más adecuado para la evaluación de materiales y la durabilidad estructural, pero no está optimizado para estimar la vida útil de generadores eléctricos	430
Criterio	C1: Implementación		C2: Precisión		C3: Data			
	C4: Compatibilidad		C5: Validez		C6: Adaptación			

Sea: **Facilidad de implementación (C1):** ¿Qué tan fácil es aplicar el método en condiciones prácticas, considerando el equipo y los recursos disponibles?

Precisión de la vida Útil (C2): ¿Qué tan precisa es la estimación de vida útil que proporciona el método en comparación con los datos históricos de fallos y mantenimiento?

Capacidad para Incorporar Datos Históricos (C3): ¿El método permite integrar de manera efectiva los datos históricos y los ensayos previos para ajustar las estimaciones?

Datos de entrada existentes (C4): ¿los datos existentes en la central Hidroeléctrica Urra y los ensayos al generador son suficientes para aplicar el método?

Validación y Verificación de Resultados (C5): ¿El método proporciona una forma clara de verificar o validar la precisión de sus estimaciones?

Capacidad de adaptación a normativas (C6): ¿El método es aplicable a diferentes tipos de generadores eléctricos y configuraciones sin requerir ajustes drásticos?

Los métodos fueron analizados y evaluados desde una perspectiva subjetiva por el autor, con el respaldo de la literatura especializada y la asesoría de expertos en mantenimiento de generadores eléctricos en centrales hidroeléctricas. Esta evaluación, realizada con un enfoque técnico, tiene como objetivo determinar el método más adecuado para aplicar al generador eléctrico de la central hidroeléctrica URRÁ

6.3 Elaboración de ensayos

En la Central Hidroeléctrica URRÁ se llevan a cabo mantenimientos con diversas periodicidades: mensuales, trimestrales, semestrales, anuales y un mantenimiento mayor cada cinco años en dichos escenarios se inspecciona y se realizan pruebas al generador eléctrico las cuales son:

6.3.1 Ensayos al estator

- a) Factor de potencia / tangente delta
- b) Resistencia de aislamiento índice de polarización (IP)

- c) Resistencia de aislamiento por paso de tensión
- d) Medida de resistencia de devanado
- e) Medidas de inductancia
- f) Descargas parciales

6.3.2 Ensayos al rotor

- a) Resistencia de aislamiento
- b) Factor de potencia / Tangente Delta
- c) Medidas de resistencia de devanado
- d) Medida de caída de tensión entre polos

6.3.3. Polos del rotor

- a) Medidas de resistencia de devanado
- b) Medidas de inductancia

6.3.4 Ensayos mecánico

- a) Análisis de vibraciones a los rodamientos y carcasas
- b) desalineamiento del eje y balanceo
- c) inspección de rodamientos, visual
- d) fugas de aceite y lubricación

6.3.5. Otros Ensayos

- a) Temperatura de los devanados del estator y rotor durante la operación
- b) Análisis de aceite dieléctrico
- c) Presencia de contaminación por polvo, aceite o carbono

6.4: Selección de parámetros

Los ensayos son actividades que te entregan resultados los cuales te dan información sobre el equipo, algunos de estos datos te dejan percibir el estado actual del equipo, así como hacer una predicción del estado futuro del mismo. Es claro saber que algunos datos son relevantes para el fin de tu investigación otros no toman ninguna importancia por la poca incidencia que tienen para el logro del objetivo final.

	Factor de potencia / Tangente delta	5	3	5	4	4	4	5	5	5	5	5	5
	Medidas de resistencia de devanado	4	4	5	4	3	4	5	3	5	4	3	5
	Medida de caída de tensión entre polos	4	4	4	5	4	4	5	4	5	4	4	5
Mecánicos	Análisis de vibraciones en cojinetes y carcasa	5	5	5	4	3	4	5	5	5	5	5	5
	Desalineación de ejes / desbalanceo dinámico	5	3	5	5	4	4	5	5	5	5	5	5
	Inspección de rodamientos (visual / NDT)	4	5	2	3	3	4	5	4	5	5	4	5
	Fugas de aceite o lubricación deficiente	5	5	5	4	5	5	5	5	5	4	5	5
Otros	Temperatura del devanado del estator y rotor durante operación	4	5	5	4	5	4	5	5	5	5	5	5
	Análisis de aceite dieléctrico / lubricante	5	3	5	3	3	3	5	5	5	4	5	5
	Presencia de contaminación por polvo, aceite o carbón	3	3	5	3	3	3	5	3	5	4	4	5

Para esta investigación, es fundamental establecer el tiempo de experiencia de cada experto en el trabajo con hidrogeneradores, ya que esto garantiza un respaldo técnico confiable. Esta información permitirá seleccionar datos clave relevantes que se aplicarán en el método previamente definido, contribuyendo a una estimación precisa de la vida útil del generador. A continuación, se presentan los criterios utilizados para seleccionar los datos de entrada del método de predicción, con base en la valoración de expertos.

- Se seleccionan aquellos ensayos que cuenten con al menos un 80 % de valoraciones en las categorías de “extremadamente relevante” (5) y “muy relevante” (4), según la evaluación de los expertos.
- Según los comentarios de algunos expertos, el ítem “Análisis de vibraciones en cojinete y carcasa” está directamente relacionado con el ítem “Desalineamiento de ejes / Desbalanceo dinámico”; es decir, el primero es una consecuencia del segundo. Por este motivo, los expertos recomiendan conservar únicamente el análisis de vibraciones en cojinete y carcasa, asignándole una alta relevancia como dato de entrada en el método de estimación de vida útil remanente del generador mediante el enfoque de puntuación y ponderación.

Teniendo en cuenta los anteriores criterios los ensayos seleccionados como valores de entrada al método de puntuación y ponderación para estimar la vida útil remanente del generador de la central hidroeléctrica URRÁ 1 se muestran en la tabla 4:

Tabla 4: valores de entrada al método para estimar la vida útil remanente del generador

#	Ensayo	Puntuación
1	<i>Estator / Factor de potencia</i>	53
2	<i>Estator / Resistencia de aislamiento</i>	56
3	<i>Estator / Resistencia de aislamiento por paso de tensión</i>	54
4	<i>Estator / Resistencia del devanado</i>	52
5	<i>Rotor / Resistencia de aislamiento</i>	58
6	<i>Rotor / Factor de potencia</i>	55
7	<i>Rotor / Medida de caída de tensión entre polos</i>	52
8	<i>Elementos Mecánicos / Análisis de vibraciones en cojinetes y carcasas</i>	56
9	<i>Elementos Mecánicos / Fugas de aceite</i>	58
10	<i>Otros / temperaturas del devanado</i>	57
<i>Nota: la puntuación es el consecuente a la suma de las respuestas de los expertos por ítem</i>		

La puntuación asignada a cada ítem permite determinar su nivel de importancia, siendo más relevante aquel con mayor puntaje en comparación con los que obtienen una suma inferior, La Tabla 5 presenta una matriz de comparación en la que se pondera cada ensayo según su nivel de importancia.

Tabla 5: Matriz de ponderación de los ensayos de entrada del método

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	0.25	0.50	2.00	0.17	0.33	2.00	0.25	0.17	5.00
2	4.00	1	3.00	5.00	0.33	2.00	5.00	1.00	0.33	0.50
3	2.00	0.33	1	3.00	0.20	0.50	3.00	0.33	0.20	0.25
4	0.50	0.20	0.33	1	0.14	0.25	1.00	0.20	0.14	0.17
5	6.00	3.00	5.00	7.00	1	4.00	7.00	4.00	1.00	2.00
6	3.00	0.50	2.00	4.00	0.25	1	4.00	2.00	4.00	3.00
7	0.50	0.20	0.33	1.00	0.14	0.25	1	0.20	0.14	0.17
8	4.00	1.00	3.00	5.00	0.25	0.50	5.00	1	0.33	0.50
9	6.00	3.00	5.00	7.00	1.00	0.25	7.00	3.00	1	2.00
10	0.20	2.00	4.00	6.00	0.50	0.33	6.00	2.00	0.50	1

Tenga en cuenta que cada número corresponde, en orden, a los ensayos de entrada seleccionados que se presentan en la Tabla 4. Estos valores reflejan la proporción comparativa de incidencia entre factores, aplicando el criterio del Proceso Analítico Jerárquico (AHP, por sus siglas en inglés), y se utilizan para estimar la vida útil remanente del generador.

6.5. Método de puntuación y ponderación

Ya seleccionado el método “puntuación y ponderación”, y una clara alimentación con i Con base en información técnicamente sustentada, es posible aplicar el método de estimación de vida útil del generador de la central hidroeléctrica URRÁ 1, el cual requiere únicamente valores reales obtenidos de las pruebas actuales. En la Tabla 6 se presenta la plantilla utilizada para la recolección

de datos, la cual está vinculada al método de estimación y sirve como medio para la recepción de dicha información.

Tabla 6: plantilla para la recolección de datos de entrada al método

Entradas de datos del método				
Estator	Factor de potencia (test a 8 kv)	B,C	C,A	A,B
	Resultado del Fp (%)			
	Resistencia de aislamiento Índice de poarizacion (test 5 kv)	Fase A	Fase B	Fase C
	Resultado en G Ω a 10 minutos			
	Resistencia de aislamiento por paso de tension (test +/- 5100 v)	Fase A	Fase B	Fase C
	Resultados en G Ω a 5 minutos			
Rotor	Resistencia del devanado	Fase A	Fase B	Fase C
	corregido en m Ω	1	1	1
	Resistencia de aislamiento (test a 500 v)	Corregido M Ω		
	Resultado a 10 min			
	Factor de potencia	Watts		
	Tesnion del ensayo 500 V			
Mecánicos	Medida de caída de tensión	Desviacion +		Desviaciior
	Resultados,% mayor desviación			
	Análisis de vibraciones	Promedio		
	Fugas de aciete	Ausencia	Prente min	Presente max
Otros	Existen fugas	no	no	no
	Temperaturas en el devanado durante la operación	Temperatura °C		
	Temperatura en operación			

En la plantilla anterior se detalla el proceso de recepción de datos para la aplicación del método. Es importante destacar que cada dato se solicita con las unidades correspondientes a los ensayos realizados en la central hidroeléctrica URRÁ 1. Para facilitar su digitalización, estos datos son traducidos y acondicionados para ser ingresados como parámetros de entrada en la columna (Valor del parámetro) de la Tabla 7 (ver a continuación).

Es importante aclarar que los valores mostrados seguidamente corresponden a un ejemplo en el que se han ingresado ceros en la plantilla de entrada. Esta sección tiene un propósito ilustrativo, permitiendo visualizar la estructura y funcionamiento del método.

Tabla 7: Método de puntuación y ponderación para estimar la vida útil actual del generador de la central hidroeléctrica URRÁ 1

ESTIMACIÓN VIDA UTIL REMANENTE DEL GENERADOR										
Área	Indicador	Factor	Valor del parametro	Índice de salud del factor	% Peso del parametro (expertos)	# Índice de salud del factor	#ponderación ideal del factor	# Índice de ponderación del factor	Salud de equipos	
Estator	Estado del aislamiento - Sobrecalentamiento	Factor de potencia	0,0	Excelente	6,7	5,0	33,50	6,700	59,04	Salud del estator
		Resistencia de aislamiento	0,00	Malo	10,6	1,0	53,00	2,120		
		Resistencia de aislamiento por paso de tensión	0,00	Malo	4,5	1,0	22,50	0,900		
		Resistencia del devanado	100,00	Malo	2	1,0	10,00	0,400		
Rotor	Estado del aislamiento - Sobrecalentamiento	Resistencia de aislamiento	0,0	Malo	23	1,0	115,00	4,600	62,53	Salud del rotor
		Factor de potencia	0,00	Excelente	15,5	5,0	77,50	15,500		
		Medida de caída de tensión entre polos	0,0	Excelente	2	5,0	10,00	2,000		
Mecánicos	Vibraciones mecánicas - sobrecalentamiento	Analisis de vibraciones		Excelente	8,6	5,0	43,00	8,600	100	Salud de elementos mecanicos
		Fugas de aceite	0,00	Excelente	17,5	5,0	87,50	17,500		
otros	Temperatura - desgaste por fricción	Temperatura del devanado	0,00	Excelente	9,6	5,0	48,00	9,600		
							500,00		67,920	Salud del generador
									35 AÑOS	Vida util

6.5.1. Estructura, Tabla 7: método de estimación de vida útil remanente generador eléctrico C.H.H URRÁ 1

Columna B, Área: Indica el sector o elemento específico al que corresponde el parámetro a evaluar.

Columna D, Factor: indica el nombre del ensayo o parámetro a evaluar

Columna E, Valor del parámetro: En este espacio se muestra la traducción de los datos de entrada en la plantilla de la tabla 6 (directamente relacionado)

Columna F, Índice de salud del factor: Indica la condición actual del factor (malo, aceptable, bueno y excelente)

Columna G, % peso del parámetro (expertos): se indica porcentualmente la incidencia que tiene cada parámetro para la estimación de vida útil del generador eléctrico

Columna H, # índice de salud del factor: Es la traducción del índice de salud del factor de alfanumérico a numérico siendo; excelente= 5, bueno = 4, aceptable = 3 y malo= 1

Columna I, # Ponderación ideal del Factor: valor si el factor esta en un estado de excelencia al momento de tomar la lectura del ensayo

Columna J, % Índice de ponderación del factor: Indica el índice de salud del factor actual

Columna K, salud del equipo: indica la salud de los distintos elementos sectorizado, así como un diagnóstico general del generador eléctrico

6.5.2. Aplicación del método predicción de la vida útil

La Central Hidroeléctrica URRÁ I dispone de cuatro unidades generadoras, identificadas como unidades 1, 2, 3 y 4. Para el desarrollo de este trabajo, se aplicará el método de predicción de vida útil únicamente a una de ellas. Se ha seleccionado la unidad 3, ya que es la que cuenta con los ensayos más recientes entre las cuatro, lo que permite obtener una estimación más precisa y representativa de su condición actual. En la Tabla 8 se presentan los valores de entrada utilizados para la estimación de la vida útil remanente del generador de la unidad 3, con base en los ensayos realizados y su estado durante el año 2025.

Tabla 8: ensayos y estado actual unidad 3 – 2025

Estator	Factor de potencia (test a 8 kv)	B,C	C,A	A,B
	Resultado del Fp (%)	1,9	1,95	1,94
	Resistencia de aislamiento Índice de poarizacion (test 5 kv)	Fase A	Fase B	Fase C
	Resultado en G Ω a 10 minutos	2,23	2,28	2,28
	Resistencia de aislamiento por paso de tension (test +/- 5100 v)	Fase A	Fase B	Fase C
	Resultados en G Ω a 5 minutos	1,2	1,22	1,26
Rotor	Resistencia del devanado	Fase A	Fase B	Fase C
	corregido en mΩ	11,602	11,602	11,602
	Resistencia de aislamiento (test a 500 v)	Corregido MΩ		
	Resultado a 10 min	8,58		
	Factor de potencia	Watts		
	Tesnsion del ensayo 500 V	4,92		
Mecánicos	Medida de caída de tensión	Desviacion +		Desviacion -
	Resultados,% mayor desviación	6,64		-6,71
	Analisis de vibraciones	Promedio		
	ampliacion de onda (mm/s"2)	6		
Otros	Fugas de aciete	Ausencia	Prente min	Presente max
	Existen fugas	no	si	no
	Temperaturas en el devanado durante la operación	Temperatura °C		
	Temperatura en operación	72		

Los siguientes datos nos dan como resultado la Tabla 8a, la cual es la estimación de la vida útil remanente del generador eléctrico de la unidad 3 de la central hidroeléctrica URRÁ 1 en el año 2025

Tabla 8a: estimación de la vida útil actual unidad 3 - 2025

ESTIMACIÓN VIDA UTIL REMANENTE DEL GENERADOR										
Área	Indicador	Factor	Valor del parametro	Indice de salud del factor	% Peso del parametro (expertos)	# Indice de salud del factor	#ponderacion ideal del factor	# Indice de ponderacion del factor	Salud de equipos	
Estator	Estado del aislamiento - Sobrecalentamiento	Factor de potencia	2,0	Aceptable	6,7	3,0	33,50	4,020	76,59	Salud del estator
		Resistencia de aislamiento	2,28	Aceptable	10,6	3,0	53,00	6,360		
		Resistencia de aislamiento por paso de tension	1,26	Bueno	4,5	4,0	22,50	3,600		
		Resistencia del devanado	1,57	Excelente	2	5,0	10,00	2,000		
Rotor	Estado del aislamiento - Sobrecalentamiento	Resistencia de aislamiento	8,6	Excelente	23	5,0	115,00	23,000	71,73	Salud del rotor
		Factor de potencia	4,92	Aceptable	15,5	3,0	77,50	9,300		
		Medida de caída de tensión entre polos	6,6	Aceptable	2	3,0	10,00	1,200		
Mecánicos	Vibraciones mecánicos - sobrecalentamiento	Analisis de vibraciones	6,0	Malo	8,6	1,0	43,00	1,720	60,23	Salud de elementos mecanicos
		Fugas de aceite	2,00	Bueno	17,5	4,0	87,50	14,000		
otros	Temperatura - desgaste por fricción	Temperatura del devanado	72,00	Excelente	9,6	5,0	48,00	9,600		
							500,00		74,800	Salud del generador
									38 AÑOS	Vida util

Con fines predictivos, se analizó el comportamiento del generador en años anteriores, lo que permitió proyectar su desempeño a lo largo del tiempo. Los resultados de este análisis se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: estimación de datos históricos 2021 – 2025

Unidad 3			
Año	% de vida	Vida Útil	
2021	79,14	40	Años
2022	75,3	38	Años
2023 - marzo	79,14	40	Años
2023 - nov	77,84	39	Años
2025	74,8	38	Años

Los ensayos correspondientes a 2024 se realizaron en noviembre de 2023

En la tabla 9a podemos visualizar el comportamiento de la vida útil de los últimos 5 años

Tabla 9a grafica comportamiento vida útil



Tomando como referencia la línea que representa el porcentaje de vida útil, se puede realizar una proyección de los puntos mediante la función $Y = -1.16(x) + 2423$. Esta permite visualizar el valor futuro del estado de la vida útil del generador. Considerando

una operatividad eficiente con vida útil remanente estimada mayor a 20 años, es posible establecer lo siguiente:

Estado actual del generador: 38 años vida remanente

Comportamiento en el tiempo: **$VuR = - 1.16(x) + 2423$** . (x, valor del año)

7. Conclusión

A lo largo de este trabajo de grado, se desarrolló y aplicó una metodología eficaz para estimar la vida útil remanente de un generador eléctrico en la central hidroeléctrica URRÁ 1. Esta metodología integró criterios técnicos con el conocimiento experto del personal operativo. Mediante el uso del método de ponderación y puntuación, sustentado en datos reales y análisis comparativos, se logró establecer una estimación confiable del estado actual del equipo.

Gracias a los ensayos adicionales realizados a lo largo del tiempo, fue posible fortalecer la trazabilidad de la información y validar la consistencia de las estimaciones. Esto no solo permitió predecir con mayor precisión el comportamiento futuro del generador, sino también planificar de forma proactiva los mantenimientos requeridos, garantizando así la continuidad operativa, la integridad del activo y la optimización de los recursos técnicos y financieros.

En definitiva, este estudio no solo aporta una herramienta práctica para la gestión del mantenimiento del generador evaluado, sino que también sienta las bases para su aplicación en otros equipos similares dentro del sistema hidroeléctrico, promoviendo una cultura de mantenimiento predictivo basada en datos y análisis técnico riguroso.

Referencias Bibliográficas

- [1] PWS, “Diagnóstico a la gestión de activos de acuerdo a ISO 55001:2014“ Estudio en gestión de activo, 2018.
- [2] EMEC, “Manual "AOM", Central hidroeléctrica URRÁ 1,” 1999.
- [3] Casanova García, G. F., Andrés Felipe Cardona Gutiérrez, & Carlos Alberto Mantilla Viveros, “Análisis de fatiga de los componentes estructurales del rotor de un hidrogenerador/Structural component fatigue analysis of a hydrogenerator rotor” Dyna Medellín, Colombia, 2000.
- [4] Caicedo Delgado, N. G., & Andrade Alegria, “Ajuste protección de sobreexcitación ANSI 24 de un generador sincrónico para un relé Siemens,” Antioquia Colombia, 2019.
- [5] Oscar Nuñez Mata, & Jonathan Rodríguez Campos, “Caracterización de descargas parciales en ranuras y por vibración presentadas en estatores de hidrogeneradores,” Costa Rica, 2021.
- [6] Palomino-Marín, E., Cabrera-Gómez, J., & Cepero-Aguilera, Y, “ Monitorado de condición en grupos electrógenos basado en análisis de vibraciones por bandas espectrales,” Ingeniería Mecánica, 130–137. la habana Cuba, 2021.
- [7] Duarte, J. E., & Fernández Morale, “Monitoreo de las variables eléctricas relacionadas con un generador trifásico,” Universidad libre Colombia, 2014.
- [8] Piedra Santamaría, C., Loría García, A. L., & Villalobos Granados, E. M, “ Modelo de toma de decisiones de mantenimiento basado en la predicción de vida útil para componentes de sistemas eólicos en Costa Rica”, Costa Rica, 2017.

- [9] Electric software systema engineering, the sirindhorn international, “Condition assessmeent of generator insulation using diagnostic tests,” Thailandia,2019.
- [10] Bert Milano, Consultant, "Hydrogenerator Stator Winding Aging Processes and the Associated Synergies ".
- [11] "Gabriel Tanasescu, Bogdan Gorgan, Stefan Busoi, Andrei Badita ", "Monitoring and diagnosis of electrical equipment using a web software. Health index and remaining lifetime estimation "Bucharest, Romania.
- [12] G.C. Stone , I. Culbert, "Prediction of Stator Winding Remaining Life From Diagnostic Measurements "Canada.