

MODELO DE VARIABLES DE OPERACIÓN PARA MITIGAR PARADAS NO
PROGRAMADAS Y AMPLIAR EL CICLO DE VIDA EN LAS TURBINAS SGT A05
KB7S SIEMENS Y SU PAQUETE TURBOGENERADOR

JOSE FERNANDO OROZCO ARANGO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2020

MODELO DE VARIABLES DE OPERACIÓN PARA MITIGAR PARADAS NO
PROGRAMADAS Y AMPLIAR EL CICLO DE VIDA EN LAS TURBINAS SGT A05
KB7S SIEMENS Y SU PAQUETE TURBOGENERADOR.

JOSE FERNANDO OROZCO ARANGO

Monografía de Grado para optar el título de “Especialista en Gerencia de
Mantenimiento”

Director

NICOLÁS ÁLVAREZ ZÁRRATE

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE MANTENIMIENTO
BUCARAMANGA

2020

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar un enorme agradecimiento a mi familia que me apoyó y acompañó en este proceso tan importante para crecer como persona y profesional. Siempre han estado ahí para ver los logros que poco a poco voy alcanzando. Mi madre Cristina Arango, mi hermano Jaime Andrés Orozco y mi padre Jaime Orozco; son una fuerza que me impulsa todos los días.

A la empresa Termomorichal S.A.S y Genser Power por confiar en mí y apoyarme para realizar la especialización en Gerencia de Mantenimiento.

Agradecer a mi director de monografía, jefe y amigo Nicolás Álvarez que gracias a su apoyo y exigencia he logrado crecer profesionalmente y mejorar cada día.

Por último; agradecer a Esteban Flórez que fue la persona guía sobre mi decisión para escoger la especialización que quería y me ayudara en mi futuro profesional.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	10
1. MARCO CONTEXTUAL	12
1.1 HISTORIA DE LA EMPRESA	12
1.1.1 Genser Power.....	12
1.2 HISTORIA DEL MANTENIMIENTO Y LAS TURBINAS.....	17
1.2.1 Mantenimiento.....	17
1.2.2 Turbina.....	19
1.3 PAQUETE TURBOGENERADOR.....	22
1.3.1 Sistema de admisión de aire.....	23
1.3.2 Reductor de velocidad.....	23
1.3.3 Generador eléctrico.....	23
1.3.4 Sistema de lubricación.....	24
1.3.5 Sistema contraincendios.....	24
1.3.6 Turbina.....	24
1.3.6.1 Turbinas a gas.....	24
1.4 MANTENIMIENTO EN TURBINAS DE GAS	27
1.4.1 Mantenimiento basado en condición.....	27
1.4.2 Mantenimiento preventivo.....	27
1.5 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO EN TURBINAS DE GAS.....	27
1.5.1 Actividades de mantenimiento rutinarias.....	27
1.5.2 Inspecciones y seguimiento.....	28
1.5.3 Grandes revisiones o mantenimiento mayores.....	29
1.6 ENERGÍA ELÉCTRICA.....	30
1.6.1 Generación distribuida.....	30
1.6.2 Generación centralizada.....	31
1.7 SISTEMAS DE PROCESAMIENTO.....	31
1.8 FUNCIONES PARA PROCESAR DATOS.....	32
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	34
3. OBJETIVOS.....	36
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	36

3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	36
4.	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS.....	37
4.1	RUTINAS DE INSPECCIÓN Y TOMA DE DATOS.....	37
4.1.1	Inspección diaria.....	37
4.1.1.1	Variables diarias de operación.....	37
4.1.2	Inspección mensual.....	39
4.1.2.1	Variables mensuales de operación.....	39
4.2	RUTINAS DE MANTENIMIENTO.....	40
4.2.1	Mantenimiento preventivo.....	40
4.2.1.1	Compresores de aire.....	40
4.2.1.2	Compresores de gas.....	41
4.2.1.3	Generador.....	42
4.2.1.4	Gearbox.....	42
4.2.1.5	Sistema de lubricación.....	43
4.2.1.6	Sistema de CO2.....	43
4.2.1.7	Turbina.....	43
4.2.1.8	General.....	44
4.2.2	Mantenimiento correctivo.....	44
4.2.3	Histórico de fallas y eventos.....	44
4.2.4	Vibraciones.....	48
4.2.5	Heat Rate.....	50
5.	MODELO PROPUESTO.....	52
5.1	SELECCIÓN DE VARIABLES.....	52
5.1.1	Modelo HOLT-WINTER.....	58
5.1.2	Suavización exponencial doble.....	59
5.1.3	Aspectos relevantes a tener en cuenta.....	61
5.2	PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.....	61
6.	CONCLUSIONES.....	63
	BIBLIOGRAFIA.....	64

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Modelo de variables definidas para seguimiento y prevención de fallas..	52
Tabla 2. Análisis de tendencia.	54
Tabla 3. Análisis de tendencia.	55
Tabla 4. Análisis de tendencia.	56
Tabla 5. Guía para seleccionar una técnica adecuada.	57
Tabla 6. Aplicación con el modelo de HOLT-WINTER.....	59
Tabla 7. Aplicación con el modelo de suavización exponencial doble.	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribución del grupo con respecto al mercado de energía.	13
Figura 2. Trayectoria de los proyectos de generación.	13
Figura 3. Pequeña Central Hidroeléctrica Doña Teresa.	14
Figura 4. Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén.....	15
Figura 5. Paquete Turbogenerador - turbina SGT A05 KB7S. Planta Empacor. ...	23
Figura 6. Turbina SGT A05 KB7S Siemens.....	26
Figura 7. Paquete Turbogenerador de la turbina SGT A05 KB7S.	34
Figura 8. Pareto de falla por frecuencia de tiempo - Empacor.....	46
Figura 9. Pareto de falla por número de eventos - Empacor.	46
Figura 10. Pareto de falla por frecuencia de tiempo - Corona.	47
Figura 11. Pareto de falla por número de eventos - Corona.....	48
Figura 12. Vibraciones de la turbina ubicada en Empacor.....	49
Figura 13. Heat Rate - Proyecto Corona.....	51
Figura 14. Heat Rate - Proyecto Empacor.	51

RESUMEN

TITULO:

MODELO DE VARIABLES DE OPERACIÓN PARA MITIGAR PARADAS NO PROGRAMADAS Y AMPLIAR EL CICLO DE VIDA EN LAS TURBINAS SGT A05 KB7S SIEMENS Y SU PAQUETE TURBOGENERADOR.

AUTOR:

JOSE FERNANDO OROZCO ARANGO

PALABRAS CLAVE:

MANTENIMIENTO PREDICTIVO, TURBINAS DE GAS AERODERIVADAS, HISTÓRICO DE EVENTOS, ANÁLISIS DE INFORMACIÓN, EVENTOS CORRECTIVOS, MANTENIMIENTO

CONTENIDO:

Esta monografía plantea un modelo de variables de operación basado en técnicas de mantenimiento predictivo y rutinas de mantenimiento a partir de los históricos de eventos, para turbinas de gas aeroderivadas SGT A05 KB7S Siemens con su paquete turbogenerador ubicadas en los proyectos de Empacor y Corona, que hacen parte del grupo empresarial: Proeléctrica S.A.S E.S.P., Termomorichal S.A.S., Genser Power Colombia y Genser Power S.A.S. E.S.P.

Empacor y Corona son proyectos de cogeneración, donde a partir de un mismo proceso, en este caso con turbina aeroderivadas y su paquete turbogenerador, convierten la energía mecánica en energía eléctrica y energía térmica. La única variación entre estas dos plantas es que en Empacor la energía térmica se produce a través de una caldera recuperadora de calor acuotubular y esta energía es entregada al cliente para su proceso; a su vez en Corona, la energía térmica es entregada directamente al cliente por medio de los gases calientes que genera la turbina y que van hacia su proceso.

Se plantea como respuesta a las falencias encontradas con respecto al análisis de información de ambas plantas y de no realizar una interrelación de las mismas, y con el objetivo de tener rutinas de mantenimiento que contribuyan con la mitigación o reducción de eventos correctivos.

Este desarrollo está soportado por la recolección de datos diarios, los históricos de eventos y la experiencia del personal que opera y mantiene a los mismos, soporte fundamental en la etapa de recolección de datos y planteamiento del modelo.

El resultado depende mucho del acompañamiento y seguimiento constante por parte del personal de operación y mantenimiento.

*Monografía de grado

**Facultad de ingenierías Físico – Mecánicas. Especialización en Gerencia de Mantenimiento.
Director: Nicolás Álvarez Zárrate. Ingeniero Mecánico – MSc. Gestión de Proyectos.

ABSTRACT

TITLE:

OPERATING VARIABLES MODEL TO MITIGATE NON-SCHEDULED SHUTDOWN AND EXTEND THE LIFE CYCLE IN SGT A05 KB7S SIEMENS TURBINES AND ITS TURBOGENERATOR PACKAGE.

AUTHOR:

JOSE FERNANDO OROZCO ARANGO

KEYWORDS:

PREDICTIVE MAINTENANCE, AERODERIVED GAS TURBINES, EVENT HISTORY, INFORMATION ANALYSIS, CORRECTIVE EVENTS, MAINTENANCE

CONTENT:

This monograph presents an operations variables model based on predictive maintenance techniques and maintenance routines from the event history, for Aerothermodynamic of gas turbines de gas SGT A05 KB7S Siemens with the turbogenerator package placed on the Empacor and Corona projects that are part of the Enterprise group Proeléctrica S.A.S E.S.P., Termomorichal S.A.S., Genser Power Colombia and Genser Power S.A.S. E.S.P.

Empacor and Corona are cogeneration projects where from the same process, in this case with an aeroderivative turbine and its turbogenerator package, convert the mechanical energy into electrical energy and thermal energy. The only variation between this two plants is that at Empacor the thermal energy is produced through a watertube heat recovery boiler and this energy is delivered to the client to his process, in the other hand, Corona delivers the thermal energy right to the client through hot gases generated by the turbine that goes to its process.

This paper is presented as an answer to the flaws founded on the information analysis in both plants and on the lack of interrelation between them, also, it is presented with the objective of having maintenance routines that contribute to the corrective events mitigation or reduction.

This development is supported on the daily data collection, event history and the experience of people who operate and do maintenance to the equipment, this information has been a fundamental support on the data collection stage and the model approach.

The result depends a lot on the accompaniment and constant follow up by the maintenance and operational staff.

* Monograph

** Physical – Mechanical Faculty. Maintenance Management Specialization.
Director: Nicolás Álvarez Zárrate. Mechanical Engineer – MSc. Projects management.

INTRODUCCIÓN

Genser Power Colombia y Genser Power S.A.S son empresas enfocadas a la generación y distribución de energía eléctrica y térmica en el sector Oil & Gas y sector industrial. Como parte del negocio se ofrecen diferentes modalidades que se adaptan a cualquier tipo de mercado, como lo son EPC: Engineering, Procurement and Construction, PPA: Power Purchase Agreement, BOMT: Build, Operate, Maintain and Transfer y O&M: Operation and Maintenance.

Actualmente se tienen clientes como Corona, Empacor, Cemex, Papeles Nacionales SA, Oxy (Occidental de Colombia).

Dentro de las diferentes tecnologías que se tienen actualmente en operación, están las turbinas aeroderivadas SGT A05 KB7S Siemens con su paquete turbogenerador especialmente adaptado, dichos equipos son ideales para la generación de energía eléctrica, y aún más de energía térmica, dado su alto aprovechamiento de los gases de escape hacia calderas o procesos del cliente.

Se evidencia actualmente en el reporte de información y variables operativas la falta de análisis entre plantas, además de no realizar una interrelación de las mismas para determinar fallas a temprana edad. Otro factor identificado fue la falencia identificando rápidamente variables fuera de rango que permitan tomar decisiones evitando una parada no programada.

Las paradas no programadas afectan la disponibilidad operativa, que se ve reflejado en la pérdida oportuna de energía térmica y eléctrica hacia los clientes, que trae consecuencias negativas en el factor económico de ambas partes, además del riesgo contractual que se genera.

Esta monografía plantea un modelo de parámetros y variables de operación para reducir las paradas no programadas en las turbinas SGT A05 KB7 de Siemens. Para el caso de estudio se tomará en cuenta los dos paquetes turbogeneradores

con lo que cuentan actualmente las empresas Genser Power Colombia, que tiene un contrato por operación de equipos para el suministro de Energía y Vapor con la empresa Empacor S.A; y Genser Power S.A.S E.S.P, con un contrato por suministro de Energía Eléctrica con la empresa Colcerámica S.A.

1. MARCO CONTEXTUAL

1.1 HISTORIA DE LA EMPRESA

1.1.1 Genser Power. Pionera en la cogeneración en Colombia, durante la historia se han instalado más de 150 MW, además del conocimiento y experiencia adquirida en el diseño, construcción, operación y mantenimiento permitiendo brindar soluciones en la entrega energía con diferentes opciones en combustibles y aplicaciones para la industria.

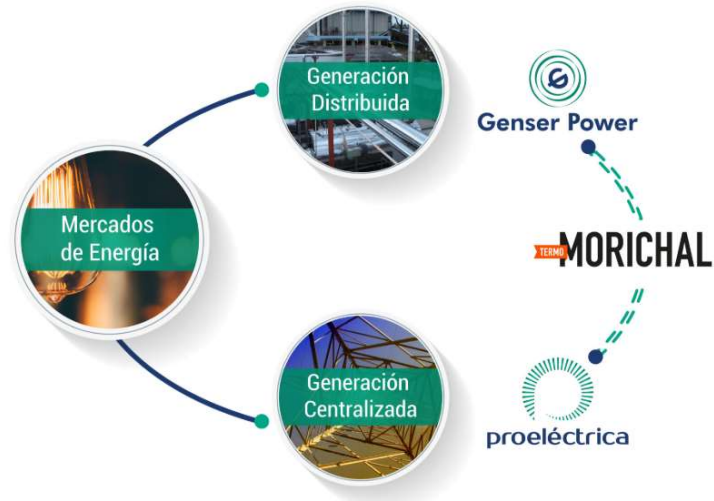
Este conjunto de oportunidades y beneficios se convierte en un aliado estratégico de energía.

La empresa Genser Power hace parte del siguiente grupo empresarial que está relacionado en el sector de energía: las sociedades Proeléctrica S.A.S E.S.P., Termomorichal S.A.S., Genser Power Colombia y Genser Power S.A.S. E.S.P.

Los mercados de energía en los que la compañía se ha enfocado a través de los años son.

- Generación Distribuida.
- Generación Centralizada.

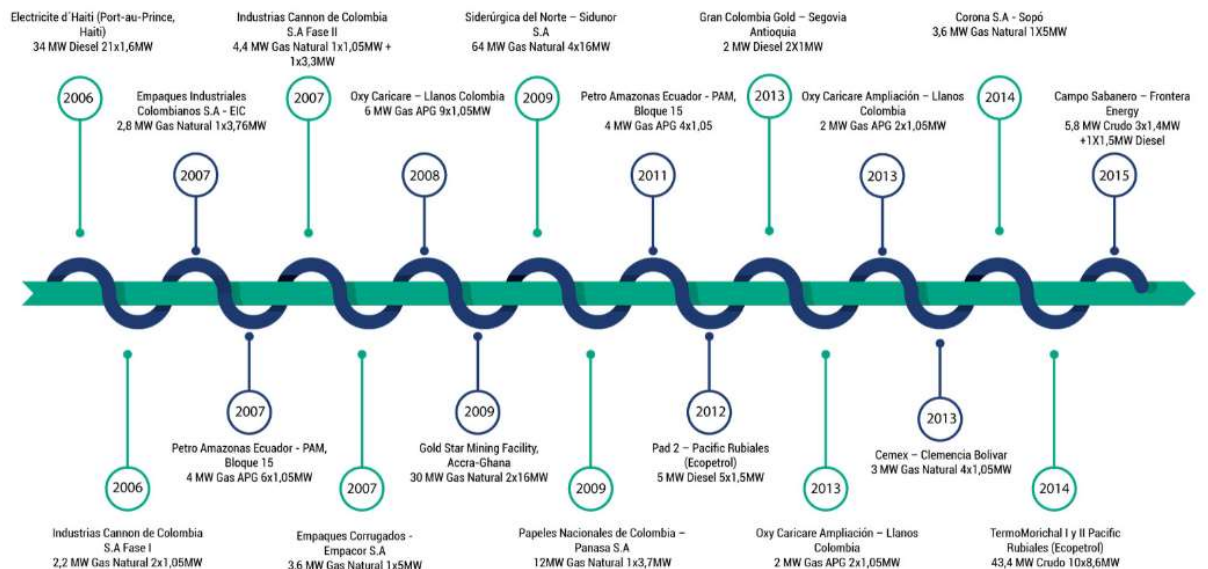
Figura 1. Distribución del grupo con respecto al mercado de energía.



Fuente. <https://genserpower.com/>

A continuación, un recuento de la trayectoria de los proyectos de generación instalados

Figura 2. Trayectoria de los proyectos de generación.



Fuente. <https://genserpower.com/>

Además de las que se observan en la gráfica anterior; Se ha iniciado operación en dos proyectos de Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH).

El primer proyecto se llama “PCH Doña Teresa”, ubicado en Segovia, Antioquia. Una Potencia instalada de 8,5 MW que es suministrada al cliente Grand Colombia Gold. (Ver Figura 3).

El segundo proyecto se llama “PCH El Edén”, ubicado en Manzanares, Caldas. Una Potencia instalada de 19,9 MW que es despachada al Sistema Eléctrico Colombiano XM. (Ver Figura 4).

Figura 3. Pequeña Central Hidroeléctrica Doña Teresa.



Fuente. Empresa Proeléctrica S.A.S E.S.P. - Proyecto Doña Teresa.

Figura 4. Pequeña Central Hidroeléctrica El Edén.



Fuente. Empresa Proeléctrica S.A.S E.S.P. - Proyecto El Edén.

¿QUÉ HACE EL GRUPO EMPRESARIAL?

Se enfoca en generar soluciones energéticas de mayor confiabilidad, eficiencia y que sean amigables con el medio ambiente.

A partir del combustible que maneja el cliente en su proceso, se plantean las soluciones.

- Biomasa.
- Solar.
- Biogás.
- Combustibles líquidos.
- Carbón.
- Gas de pozo.
- Gas Natural.

Además, se busca la mejor adaptación de la tecnología de acuerdo a las necesidades del cliente.

- Panel solar.
- Ciclo Rankine / combinado.
- Motores.
- Turbinas.

Y, se suministra la energía eléctrica y térmica que la empresa requiera.

- Industria.
- Minería.
- Petróleo y gas.
- Agroindustria.

¿CÓMO LO HACE?

Se trabaja en dos modos de operación.

1. Isla.

Operar en modo isla es para proyectos que trabajan apartados de la red de distribución eléctrica nacional o local.

2. Paralelo.

Como su nombre lo dice, operar en modo paralelo es para proyectos que trabajan unidos o de forma paralela a la red de distribución eléctrica nacional o local.

Esto trae un gran beneficio y es que le permite al cliente recibir la energía independientemente de si se presenta o no un evento en la red.

MODALIDADES DE NEGOCIO QUE SE MANEJAN

- EPC: Engineering, Procurement and Construction.

Se desarrolla la ingeniería, compra de equipos e instalación de toda la central, además, se le entrega al cliente el proyecto operando.

- PPA: Power Purchase Agreement.

Se desarrolla la ingeniería, compra de equipos, instalación de toda la central, se lleva a cabo la operación y mantenimiento y se realiza la entrega de energía (eléctrica y térmica) solicitada por el cliente durante el tiempo estipulado en el contrato. No se realiza la transferencia de equipos, es decir, al finalizar el contrato los equipos siguen siendo propiedad del grupo empresarial.

- BOMT: Build, Operate, Maintain and Transfer.

Se desarrolla la ingeniería, compra de equipos, instalación de toda la central, se lleva a cabo la operación y mantenimiento y se realiza la entrega de energía (eléctrica y térmica) solicitada por el cliente durante el tiempo estipulado en el contrato. Si se realiza la transferencia de equipos, es decir, al finalizar el contrato los equipos son propiedad del cliente.

- O&M: Operation and Maintenance.

El grupo empresarial brinda la opción de prestar solo el servicio de operación y mantenimiento para centrales de generación de energía (eléctrica y/o térmica).

Las turbinas sobre las que se realizará esta monografía se encuentran en los proyectos de Corona y Empacor ubicadas en Sopó y Fontibón respectivamente.

Ambas plantas tienen las mismas turbinas SGT A05 KB7S, donde su combustible es el gas natural, el mismo que llega a los hogares.

De acuerdo a lo anterior se realizará un énfasis en las turbinas a gas.

1.2 HISTORIA DEL MANTENIMIENTO Y LAS TURBINAS

1.2.1 Mantenimiento. Para hablar de mantenimiento es importante abarcar su historia que permita tener claro el panorama de lo que es actualmente.

A continuación, una descripción de la evolución y los hechos importantes que marcaron la historia.

Desde los inicios del mantenimiento se consideraba que las maquinas siempre debían trabajar correctamente y se les debía realizar intervención solo cuando ocurría una falla o este dejaba de funcionar.

Desde mucho antes de la primera guerra mundial, se trabajaba solo sobre actividades correctivas.

Aproximadamente desde el año de 1798, se inician labores para mejorar los mantenimientos correctivos pues entendieron que los tiempos estaban siendo extensos y requerían de mucho personal.¹

Sobre el año 1903 se da el paso a la producción industrial masiva para reducir los costos de los equipos de tal forma que pudiera ser comprado por cualquier persona; dicho avance aumentó considerablemente la demanda de producto, sobre todo para la industria de guerra, por lo que se formaron cuadrillas para realizar maniobras de mantenimiento correctivo, este hecho solo hizo que aumentaran las fallas cada día. Es por esto que durante la Primera Guerra Mundial (1914 – 1918) aparecen los primeros equipos para realizar maniobras preventivas en los equipos más importantes.

A partir de ahí iniciaron varios acontecimientos en la evolución del mantenimiento preventivo como lo fueron: usar la estadística como una herramienta en la producción (1927), el control de la economía con respecto a la calidad del producto manufacturado (1931), llevar a cabo mantenimientos preventivos a partir de resultados obtenidos por la estadística (1939), establecimiento del control estadístico de calidad en Japón (1950), en Estados Unidos de América se desarrolla el Mantenimiento Productivo (PM) (1950), se da a conocer el “análisis de Weibull” (1951), se desarrolla el mantenimiento centrado en la confiabilidad (RCM) (1960), se desarrolló el análisis- causa- raíz (RCA) (1965), la difusión del uso de la computadora para la administración de Activos (CMMS) (1970), se desarrolló el

¹ Evolución del mantenimiento industrial.

<http://ugmamantenimiento12011.blogspot.com/2011/10/evolucion-del-mantenimiento.html>. Publicado el 28 de octubre de 2011. Publicado por **yrmeric gonzalez**.

mantenimiento productivo total (TPM) (1971), también el desarrollo de la optimización del mantenimiento planificado (PMO) (1980), la aplicación del RCM-2 en toda clase de industrias (1981), el desarrollo del proceso de los 5 Pilars of the Visual Workplace (5S's) (1995) y el estudio de la filosofía de la Conservación Industrial (IC) (2005).²

A partir de lo anterior se puede evidenciar los cambios en conceptos y técnicas de mantenimiento. Actualmente se cuenta con centenares y cada día van apareciendo nuevas técnicas:

- Técnicas De "Condition Monitoring"
- Sistemas Expertos.
- Técnicas De Gestión De Riesgos
- Modos De Fallos Y Análisis De Los Efectos
- Fiabilidad Y Mantenibilidad.³

Para esta investigación se espera el aporte de estas y otras técnicas con el fin de reducir las paradas no programadas; además del uso de sistemas de procesamiento que se mencionará más adelante ya que en un punto fundamental en el análisis y toma de decisiones confiables.

1.2.2 Turbina. Hoy en día, el diseño de las turbinas está básicamente compuesto por un compresor que le fluye el aire de manera axial a través de diferentes etapas para aumentar la presión, una cámara interna donde se produce la combustión (Liner's) y la propia sección de turbina de expansión con diferentes etapas, que se

² Evolución del mantenimiento industrial. <https://prezi.com/sjnw7wnvqj7a/linea-del-tiempo-mantenimiento-industrial/>. Publicado el 5 de febrero de 2014. Publicado por Abraham Aguilera Mora.

³ Nuevas técnicas de mantenimiento. <http://ugmamantenimiento12011.blogspot.com/2011/10/evolucion-del-mantenimiento.html>. Publicado el 28 de octubre de 2011. Publicado por yrmeric gonzalez.

construye como un solo paquete de forma compacta de tal forma que se hable de un solo equipo.⁴

La primera referencia de las turbinas fue en los años 150 A.C que hace referencia al filósofo egipcio Herón, que ideó la llamada “Eolípila”, aunque no se tiene pruebas científicas pues solo fue tratada como un juguete o entretenimiento, pero era un equipo que producía su giro gracias al vapor generado por una caldera.

La primera turbina construida fue concebida por J.F. Stolze en 1872 a partir de una patente de Fernlhougs, y construida realmente entre 1900 y 1904. Contaba de un compresor que le fluye el aire de manera axial a través de diferentes etapas, un equipo para intercambiar calor utilizando los gases de escape que permitía aumentar la temperatura del aire antes de entrar a la cámara interna donde se produce la combustión y una turbina de expansión con diferentes etapas. Con el pasar de los años no se alcanzó un gran éxito debido a su bajo rendimiento en el compresor y en la turbina, por las bajas relaciones de compresión del aire y la temperatura máxima no era óptima para alcanzar una mejor eficiencia. Esto se presentó ya que los materiales de la época no eran los más adecuados para este tipo de equipos.

Es por esto que la relación de compresión se convierte en uno de los mayores retos para los diseñadores de turbinas.

Durante el año de 1926 aparecen los primeros equipos turbocompresores con una eficiencia que podría considerarse como aceptable, donde se basan principalmente en un perfil aerodinámico para realizar el diseño de compresores y turbinas.

Esta etapa de la historia para los compresores y turbinas, fue de gran relevancia y se marcó como un hecho histórico, ya que se logró conseguir que los equipos fueran eficientes y de alto rendimiento.

⁴ Diseño de las turbinas. <http://www.plantasdecogeneracion.com/>.

El uso de las turbinas aerodinámicas empezó a reflejarse en la industria poco tiempo antes de empezar la Segunda Guerra Mundial, ya que, al contar con un menor peso y volumen en comparación de los motores, les permitió posesionarse en el mercado para su desarrollo.

De esta forma, hizo que Gran Bretaña patentara el uso de un reactor como medio de propulsión. Alemania, por su parte, desarrolló en paralelo su primer motor a reacción (turbina de gas) para la aviación. En 1939 la empresa alemana Heinkel hizo volar el primer avión utilizando una turbina de gas.

No todo eran buenas noticias, ya que a medida que iban creciendo y aumentando las velocidades, también fueron apareciendo problemas aerodinámicos y es por esto que solo hasta el año de 1945 aproximadamente, no se había logrado volar de forma eficiente.

El auge de las turbinas de gas unida a los conocimientos y experiencia que se había ganado en la aerodinámica, permitió las nuevas turbomáquinas de alto rendimiento. Como consecuencia positiva, en la década de los 70 una gran parte de la industria de la aviación tenían a su flota impulsada por turbinas.⁵

En el transcurso de los años fueron apareciendo diferentes problemas con respecto a las turbinas, que llevó a desarrollar tres pilares en beneficio de la industria.

El primero fue desarrollar un compresor axial apoyándose en el avance de la aerodinámica, de tal forma que se obtuviera un equipo de mayor rendimiento debido a las altas relaciones de compresión. El segundo ha sido el descubrimiento de nuevos materiales y la aplicación de estos, como lo ha sido recubrimientos cerámicos. El tercero y no menos importante fue el desarrollo de la tecnología en la informática, permitiendo las simulaciones a diferentes condiciones y

⁵ Historia de las turbinas. Nombre del documento "energizaseptiembre2011_HISTORIA DE LAS TURBINAS". Publicado en septiembre de 2011 por la empresa "energiza.org".

comportamientos, que se ve reflejado en mejores diseños, además de las mejoras en la parte de control.

Se debe resaltar que la primera instalación de 50MW se dio hacia el año 1974 y hasta el 2002, en España se puso en marcha la primera turbina de gran tamaño con 260 MW.

1.3 PAQUETE TURBOGENERADOR.

El paquete turbogenerador es un conjunto de equipos en un sistema compacto que se encarga de generar la energía eléctrica y térmica.

No solo se habla de turbina en un paquete turbogenerador, si no de otros equipos que lo componen, los cuales son:

- Turbina.
- Sistema de admisión de aire.
- Reductor de velocidad.
- Generador eléctrico.
- Sistema de lubricación.
- Sistema contraincendios.

Figura 5. Paquete Turbogenerador - turbina SGT A05 KB7S. Planta Empacor.



Fuente. Empresa Genser Power Colombia - Proyecto Empacor.

1.3.1 Sistema de admisión de aire. Tiene como función, filtrar el aire que ingresa al paquete turbogenerador para refrigerar todo el sistema, y, además filtrar el aire para que ingrese en óptimas condiciones al compresor.

1.3.2 Reductor de velocidad. Como su nombre lo dice, por medio de un juego de engranajes reduce la velocidad a la que trabaja la turbina, en este caso de las KB7s es de 14.600 r.p.m, a la velocidad de trabajo del generador, que es de 1.800 r.p.m.

1.3.3 Generador eléctrico. Encargado de convertir la energía mecánica que se transmite desde la turbina en energía eléctrica. Este proceso se debe a la rotación de electrones en un campo magnético.

1.3.4 Sistema de lubricación. Su función es lubricar todas las secciones donde se presenta la interacción entre dos materiales produciendo una película de seguridad. Lubrica los cojinetes entre la turbina, reductor y generador. Además de lubricar, también se encarga de enfriar todos los componentes.

1.3.5 Sistema contra incendios. Encargado de la protección del paquete turbogenerador ante la presencia de radiación ultravioleta y presencia de gas. Cuando este equipo se activa, hermetiza todo el paquete y acciona las válvulas de CO₂.

1.3.6 Turbina. Es el equipo encargado de transformar la energía cinética que viene desde una corriente de fluido como agua, vapor o gas, en energía mecánica. Este fluido está pasando de forma continua a través de los álabes fijos y álabes móviles.

Como las turbinas SGT A05 KB7S trabajan con gas natural (igual al que llega a los hogares colombianos), se realizará un énfasis en las turbinas a gas.

1.3.6.1 Turbinas a gas. Las turbinas a gas, son máquinas motoras de reacción, donde el fluido de trabajo (combustible) es un gas y son consideradas como turbomáquinas térmicas. Normalmente las turbinas a gas están por separado de las turbinas ya que, sus características de diseño son diferentes y en las turbinas a gas no se espera un posible cambio de fase (hablando en términos de gases).⁶

⁶ Turbinas a gas. <http://esimios-energia.blogspot.com/>. Definición sobre las turbinas a gas.

Las turbinas a gas están compuestas por 5 secciones o módulos principales y hace parte de lo que se conoce como paquete turbogenerador:

- Admisión del aire, que básicamente es la entrada del aire hacia el sistema.
- Compresor, responsable de la elevación de la presión del fluido de trabajo (aire).
- Etapa de combustión, donde se produce la combustión entre el aire y el combustible (gas).
- Turbina, sección propiamente donde están los alabes fijos y móviles Elemento expansor.
- Escape, donde se produce la liberación de los gases.

Las turbinas de gas trabajan en función del principio del ciclo Brayton, en donde el aire que se comprime por el compresor es mezclado con el combustible en la cámara de combustión para poder ser quemado bajo condiciones de presión constante. El gas caliente producido por la combustión, permite expandirse a través de las diferentes etapas de la turbina para hacerla girar y generar trabajo.

En una turbina de gas la eficiencia es aproximadamente del 30% al 35%, el cual 2/3 del trabajo producido se usa comprimiendo el aire. El otro 1/3 está disponible para generar electricidad, impulsar un dispositivo mecánico, etc.⁷

Las turbinas a gas pueden clasificarse según el origen para el cual van a ser utilizadas, por el diseño de su cámara de combustión y por su número de ejes.

- Turbinas de gas aeroderivadas.
- Turbina de gas industriales.
- Turbina de cámara de combustión tipo silo.
- Turbina de cámara de combustión anular.

⁷ Operación de las turbinas a gas. <http://www.turbinasdegas.com/rendimiento-de-turbinas>. Explicación de todo lo relacionado sobre las turbinas de gas. Pagina con toda la información necesaria para aumentar los conocimientos.

- Turbina de cámara de combustión tubo anular.
- Turbina mono eje.
- Turbina multi eje.

Para el caso de estudio, se hablará sobre las “Turbinas de gas aeroderivadas”.

Figura 6. Turbina SGT A05 KB7S Siemens.



Fuente. <https://new.siemens.com/global/en.html>.

Proviene del diseño de las turbinas aeronáuticas, que se han adaptado a la industria para la producción de su energía eléctrica. Se caracterizan por su gran fiabilidad y su alta relación potencia/peso, además cuentan con una gran versatilidad de operación y su arranque no se considera crítico a diferencia de los otros tipos de turbinas de gas. Pueden alcanzar potencias de hasta 50 MW, moviendo los gases a una gran velocidad, pero bajo caudal. Su compacto diseño facilita las operaciones de sustitución y mantenimiento, lo que hace viable que se lleven a cabo revisiones completas en menores intervalos de tiempo.⁸

⁸ Turbinas de gas aeroderivadas. <http://www.turbinasdegas.com/tipos-de-turbinas-de-gas>. . Explicación de todo lo relacionado sobre las turbinas de gas. Pagina con toda la información necesaria para aumentar los conocimientos.

1.4 MANTENIMIENTO EN TURBINAS DE GAS

El mantenimiento de las turbinas de gas tiene se divide principalmente en dos secciones:

1.4.1 Mantenimiento basado en condición. Consiste en observar el comportamiento de la máquina e inspeccionar regularmente sus partes internas, de forma que se pueda actuar rápidamente en caso de alguna anomalía, como lo puede ser un parámetro fuera de rango.

1.4.2 Mantenimiento preventivo. Donde se planifica adecuadamente las inspecciones en las que se toman decisiones de cambio de partes o el equipo continúa trabajando con las actuales ya que se encuentran en buen estado.

1.5 ACTIVIDADES DE MANTENIMIENTO EN TURBINAS DE GAS

Se pueden dividir en tres tipos de actividades de mantenimiento para llevar un adecuado plan de mantenimiento preventivo:

- Actividades de mantenimiento rutinarias.
- Inspecciones y seguimiento.
- Grandes revisiones o mantenimientos mayores.

1.5.1 Actividades de mantenimiento rutinarias. Se tienen ciertas actividades establecidas en la operación para mantener una rutina adecuada de prevención.

- Revisión y seguimiento a las variables de operación, donde estas siempre estén en su rango de parámetros establecidos. Dentro de las variables que se revisan están: temperatura en los Liner's o etapa de combustión, la presión y temperatura a la entrada del compresor, vibración de la turbina y del generador,

temperatura y nivel del aceite, diferencia de presión de los filtros de aceite, niveles de saturación de los filtros de aire en las diferentes etapas de filtración.

- Seguimiento del listado de alarmas.
- Seguimiento a la eficiencia de la turbina (Heat Rate).
- Limpieza y/o sustitución de los filtros del aire de admisión al compresor de la turbina.
- Limpieza y lavado a la turbina y el compresor periódicamente para eliminar partículas que puedan afectar internamente a los equipos y poner en riesgo la operación. Esta actividad se realiza normalmente con la turbina girando en vacío y también se le conoce como limpieza on-line.
- Calibración y/o verificación de los instrumentos de medición y control del paquete turbogenerador. Esta actividad debe corresponder a la matriz de calibración establecida por la empresa.
- Revisión y verificación de fugas de aceite, gas y aire.
- Inspección a ruidos anormales de los equipos en operación.
- Pruebas al sistema contra incendios.

1.5.2 Inspecciones y seguimiento. Boroscopías al compresor y la turbina.

- Se realiza periódicamente la inspección boroscópica a la turbina y el compresor para revisar el estado sus partes internas. En esta inspección se suele revisar y comprobar el estado de las diferentes etapas de alabes fijos y móviles del compresor y de la turbina, y además se revisa la etapa de combustión (Liner's, Clamp's y carcaza).

Las secciones o etapas mencionadas anteriormente se encuentran sometidas a condiciones más extremas de funcionamiento por las temperaturas o presiones tan elevadas, hasta el punto de generar posibles desprendimientos de material, es por esto que las inspecciones boroscópicas deben ser rigurosas y ejecutarse en la periodicidad establecida.

En la boroscopía se trata de buscar deformaciones de las partes, posibles grietas, desprendimiento de material, impactos de objetos extraños contra los

álabes, el estado de la capa cerámica de los álabes y posibles rozamientos entre partes en movimiento y partes estáticas.

- Alineación de la turbina, gearbox y generador, si es necesario.

1.5.3 Grandes revisiones o mantenimiento mayores. En los mantenimientos mayores o también conocidos como grandes revisiones se plantea desarme de la turbina según la sección que se requiera y el cambio de partes desgastadas porque ya cumplieron su ciclo de vida.

Dependiendo de la sección que se requiera desarmar y las piezas a reemplazar, puede realizarse en campo o de lo contrario, la turbina debe ser enviada al taller autorizado del fabricante.

Las actividades que se contemplan en estos mantenimientos mayores son:

- El reemplazo de álabes fijos y/o móviles.
Se realiza normalmente con personal especializado y autorizado por fabricantes, pues es de la parte principal del trabajo.
Se sustituyen tanto los álabes fijos como los móviles de la turbina (no del compresor) que estén desgastados y hayan cumplido su ciclo de vida. En algunos casos particulares estas partes pueden ser reacondicionadas para reducir los costos del servicio.
- Se reemplaza las partes según aplique de la etapa de combustión.
Se puede realizar el cambio total de los liner's o solo los que hayan cumplido su ciclo de vida.
Los clamp's que son los que sujetan el juego de liner's, se revisan en las boroscopías y se determina si deben ser reemplazados.
- Calibración y/o verificación de todos los instrumentos de medición y control del paquete turbogenerador (manómetros, sensores, transmisores y cableado). Esta actividad debe corresponder a la matriz de calibración establecida por la empresa.

- Revisión y/ cambio de rodamientos según aplique.
- Inspección al sistema de lubricación, cambio o reacondicionamiento de aceite, inspección y mantenimiento de bombas y limpieza de todo el paquete turbogenerador.
- Equilibrado del conjunto rotor.
- Alineación de la turbina, gearbox y generador.⁹

1.6 ENERGÍA ELÉCTRICA.

La energía eléctrica o electricidad es la corriente de energía que se origina por la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos determinados, cuando se los pone en contacto mediante un transmisor eléctrico.¹⁰

La energía eléctrica puede obtenerse de muchas fuentes como lo son: proyectos solares, eólicos, hidroeléctricos, térmicos, nucleares y/o mediante la biomasa o quema de compuesto de la naturaleza como combustible.

Los mercados de energía están separados por la Generación Distribuida y Generación Centralizada.

1.6.1 Generación distribuida. Consiste en la generación de energía eléctrica mediante por medio de pequeñas fuentes de generación que están dentro de las instalaciones o muy cercado del consumidor el cual está conectado a la red de distribución de energía eléctrica.

Al tener esta opción se brinda la oportunidad de reducir pérdidas en la red. Como hay pequeñas fuentes de generación repartidas por el territorio, el fallo de

⁹ Diferentes tipos de intervenciones en las turbinas con respecto a su mantenimiento. Nombre del documento "Energizafebrero2012_TURBINAS A GAS". Publicado en febrero de 2012 por la empresa "energiza.org".

¹⁰ Concepto de energía eléctrica. <https://www.definicionabc.com/tecnologia/energia-electrica.php>. Hay muchas definiciones sobre energía, por lo que en mi concepto acá se define la mejor forma.

una de las fuentes no supone un grave problema para el sistema eléctrico, por lo cual mejora la fiabilidad, calidad y seguridad del sistema eléctrico. Se cuenta con la presencia de energías renovables lo que ayuda a reducir las emisiones de CO₂.¹¹

Las turbinas de gas aeroderivadas SGT A05 KB7S Siemens mencionadas en este caso de estudio funcionan dentro del mercado de generación distribuida.

1.6.2 Generación centralizada. La Generación de Energía Centralizada es el tipo de producción energética tradicional en donde una compañía establece sus plantas de producción y distribuye a todos los usuarios.¹²

1.7 SISTEMAS DE PROCESAMIENTO.

Los sistemas de procesamiento se encargan de transformar simples datos en información útil, lo cual permite la toma de decisiones, hasta el punto de prevenir una falla. Es por esto que se debe establecer ciertos parámetros que aporten en la evaluación de los resultados que se están obteniendo en el área de operación y mantenimiento. Lo que significa que, con una serie de datos, se obtiene información confiable y una serie de indicadores en los se debe basar para tomar decisiones sobre la evolución del mantenimiento.

Primero se debe revisar y analizar que los datos suministrados sean confiables, posteriormente hay que elegir correctamente los indicadores que den un valor útil a

¹¹ Generación distribuida. <https://www.smartgridsinfo.es/generacion-distribuida>. Aporte sobre los conceptos y definiciones de lo que llamamos generación distribuida.

¹² Generación centralizada. <https://solaresenergia.com/uncategorized/sabes-que-es-la-generacion-de-energia-centralizada/>. Se quiere dejar en mención el concepto, pues nuestro enfoque va hacia la generación distribuida.

la información que se busca o se corre el riesgo de caer en un círculo de información sin respuestas.¹³

1.8 FUNCIONES PARA PROCESAR DATOS.

Los datos por si solo consiste en hechos organizados o no organizados que para ser convertidos en información confiables debe cumplir ciertos pasos o funciones de tal forma que sean confiables y a partir de ellos se puedan tomar decisiones.

A continuación, se listan las funciones o etapas a cumplir para convertir simples datos en información confiable.

- **Recopilación:** El primer paso para transformar simples datos en información confiable es la recopilación. Para obtener los datos requeridos se debe contar con diferentes fuentes de información disponibles, archivos o documentos de la operación, históricos de datos. Cabe resaltar que todas estas fuentes de información que están disponibles, deben estar bien construidas, ser confiables y tener un correcto manejo.
- **Preparación:** Posterior a la recopilación de datos, se procede a su preparación o también denominada "preprocesamiento". Acá en esta etapa se filtran y organizan los datos. El principal objetivo de este paso es la depuración de los datos incorrectos o fuera de lo normal y generar datos confiables para el análisis deseado.
- **Entrada:** una vez que solo queda los datos correctos y confiables, se ingresan en la herramienta deseada o de mejor manejo, por ejemplo: Excel, y ya puede irse traduciendo en información entendible y fácil de comprender. Cabe resaltar que la entrada de datos es la primera etapa en donde los datos ya empiezan a mostrar información confiable y que se puede utilizar.

¹³ Datos e información útil. <http://www.renovetec.com/590-mantenimiento-industrial/110-mantenimiento-industrial/300-indicadores-en-mantenimiento>. Publicado por Santiago García Garrido.

- **Procesamiento:** Durante esta etapa, los datos ingresados en la etapa anterior se procesan para su interpretación. Hay diferentes técnicas para realizar este proceso como lo son: filtrado, análisis y visualización de datos e incluso con algoritmos de aprendizaje automático, aunque el proceso en sí puede variar ligeramente dependiendo de la fuente de datos que se procesa (base de datos, redes sociales, dispositivos conectados, etc.) y su uso previsto (examen de patrones de publicidad, diagnóstico de dispositivos conectados, determinar las necesidades del cliente, etc.).
- **Interpretación:** Es la etapa de salida. Aquí finalmente los datos ya son información utilizable para los usuarios o personal a cargo.
- **Almacenamiento:** Es la etapa final. Una vez que se procesan todos los datos, se almacenan para su uso a futuro. Si bien es posible que alguna información se use de inmediato, gran parte de ella tendrá un propósito más adelante.
- **Análisis:** En esta etapa ya se coordina la colección, organización, análisis, interpretación y presentación de los datos.
- **Información:** Es la etapa final con la información al detalle o resumen de los datos de información. ¹⁴

¹⁴ Procesamiento de datos. <https://www.tecnologias-informacion.com/procesamientodatos.html>. Publicado por TECNOLOGÍAS INFORMACIÓN.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Genser Power Colombia y Genser Power S.A.S E.S.P son empresas enfocadas a la generación y distribución de energía eléctrica y térmica en el sector Oil & Gas y sector industrial. Como parte del negocio se ofrecen diferentes modalidades que se adaptan a cualquier tipo de mercado, como lo son EPC: Engineering, Procurement and Construction, PPA: Power Purchase Agreement, BOMT: Build, Operate, Maintain and Transfer y O&M: Operation and Maintenance. Actualmente se tienen clientes como Corona, Empacor, Cemex, Papeles Nacionales SA, Oxy (Occidental de Colombia). Dentro de las diferentes tecnologías que se tienen actualmente en operación, están las turbinas aeroderivadas SGT A05 KB7S Siemens con su paquete turbogenerador especialmente adaptado, dichos equipos son ideales para la generación de energía eléctrica, y aún más de energía térmica, dado su alto aprovechamiento de los gases de escape hacia calderas o procesos del cliente.

Figura 7. Paquete Turbogenerador de la turbina SGT A05 KB7S.



Fuente. Empresa Genser Power S.A.S - Proyecto Corona.

Se evidencia actualmente en el reporte de información y variables operativas la falta de análisis entre plantas, además de no realizar una interrelación de las mismas para determinar fallas a temprana edad. Otro factor identificado fue la falencia identificando rápidamente variables fuera de rango que permitan tomar decisiones evitando una parada no programada.

Las paradas no programadas afectan la disponibilidad operativa, que se ve reflejado en la pérdida oportuna de energía térmica y eléctrica hacia los clientes, que trae consecuencias negativas en el factor económico de ambas partes, además del riesgo contractual que se genera.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL.

Modelar parámetros y variables de operación para la reducción de paradas no programadas en las turbinas SGT A05 KB7S Siemens y su paquete turbogenerador.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

- Diseñar rutinas de Limpieza, Inspección, Lubricación y Apriete (LILA) para preservar y aumentar el ciclo de vida a las partes principales de las turbinas SGT A05 KB7S Siemens y su paquete turbogenerador.
- Definir las variables principales de seguimiento para prevenir fallas anticipadas.
- Establecer programa de mantenimiento preventivo basado en el seguimiento de las variables críticas de operación.

4. RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

4.1 RUTINAS DE INSPECCIÓN Y TOMA DE DATOS.

4.1.1 Inspección diaria. Se llevan rutinas de inspección diaria en las que se verifican las condiciones de los equipos y se realiza la toma de datos con un intervalo de tiempo de 2 a 3 horas.

Durante las rutinas los operadores se apoyan de los sentidos como el olfato, el oído y la vista para un monitoreo por condición, dado que es una herramienta esencial de mantenimiento predictivo/proactivo.

En las rutinas o rondas de operación se toman todas las variables físicamente y se llevan a un formato Excel, que posteriormente son analizadas al finalizar el día.

El análisis que se realiza busca hacer un seguimiento al comportamiento de las variables donde estas estén dentro de los rangos permitidos de tal forma que no genere afectaciones a los equipos.

4.1.1.1 Variables diarias de operación. Las variables de operación que son registradas y revisadas en las rondas de operación son las siguientes:

Con respecto al Generador:

- Carga actual en MW (Potencia).
- Tensión en Voltios.
- Frecuencia en Hertz.
- Factor de potencia en %.

- Contador de energía en kWh.
- Energía Entregada en kWh.
- Temperatura de las fases en °F (A, B y C).
- Vibraciones del generador en μm .
- Temperatura del aceite en °F.

Con respecto a la turbina.

- Presión del gas en PSI.
- Flujo instantáneo en kg/h.
- Contador de flujo en kg/h.
- Consumo de gas en kg/h.
- Heat Rate en BTU/kWh.
- Presión de aire de la instrumentación en PSI.
- Presión diferencial a la entrada de los filtros de aire de la etapa 1 y etapa 2 en mmH₂O.
- Temperatura entrada de la turbina calculada (CTIT) en °F.
- Temperatura del aceite reservorio en °F.
- Presión del aceite en PSI.
- Presión a la entrada del filtro de aceite del sistema de lubricación en PSI.
- Presión a la salida del filtro de aceite del sistema de lubricación en PSI.
- Presión diferencial de los filtros de aceite del sistema de lubricación en PSI.
- Vibraciones de la turbina en μm .
- Nivel del aceite en %.
- Temperatura del aceite en °F.

Con respecto al compresor.

- Presión en la descarga del compresor en PSIG.
- Temperatura del aire a la entrada del compresor (CIT) en °F.

Con respecto al gearbox

- Vibraciones del gearbox en μm .
- Temperatura del gearbox en $^{\circ}\text{F}$.

4.1.2 Inspección mensual. En la inspección se revisa y analiza los valores acumulados que surgen a partir de la inspección diaria. Datos finales para elaborar informes y revisar las tendencias mensualmente.

Se realiza una ronda con el personal responsable de la planta para identificar anomalías y establecer acciones en los siguientes meses.

4.1.2.1 Variables mensuales de operación. Las variables de operación que son registradas y revisadas en las rondas de operación son las siguientes:

Con respecto a energía.

- Energía total generada y entregada al cliente en kWh.
- Cumplimiento de energía entregada con respecto a la meta en %.
- Energía entregada por la red nacional al cliente en kWh.

Con respecto al gas (combustible de la turbina).

- Consumo total de gas en m^3 .

Con respecto a disponibilidad.

- Horas en falla.
- Horas en Stand-by.
- Disponibilidad diaria.
- Disponibilidad acumulada.
- Horómetro de la turbina.

Con respecto a la eficiencia de la turbina.

- Heat Rate diario en BTU/kWh.
- Heat Rate mensual en BTU/kWh.

- Cumplimiento del Heat Rate con respecto al target establecido en %.

4.2 RUTINAS DE MANTENIMIENTO.

4.2.1 Mantenimiento preventivo. Las rutinas de mantenimientos preventivos surgen como consecuencia de diferentes entradas o variables que se tienen en cuenta en el transcurso del tiempo y son definidas por los responsables de cada planta para la ejecución de las mismas.

Las entradas principales que se tienen en cuenta son: recomendaciones del fabricante, históricos de fallas o eventos en cada uno de los equipos y del análisis de los datos o variables que se toman diaria y mensualmente.

A partir de las entradas anteriormente mencionadas se establece el plan de mantenimiento para el año en curso y próximos años, donde periódicamente se va revisando y/o actualizando dependiendo de las anomalías que puedan encontrarse y representen un riesgo para la operación.

La ejecución del plan de mantenimiento se plantea de forma tal que mensualmente se realiza una parada en coordinación con el cliente para ejecutar las actividades planeadas del mes y se coordina una parada mayor en el año para las actividades que conllevan mayor tiempo de ejecución.

Las principales actividades para ejecutar en las rutinas de mantenimiento están distribuidas en el año y se relacionan a continuación.

4.2.1.1 Compresores de aire.

- Mantenimiento de válvulas automática para purga compresores de aire. Frecuencia anual
- Mantenimiento secador de aire. Frecuencia anual.
- Mantenimiento motor eléctrico compresor de aire 1 y 2. Frecuencia anual.

- Inspección de filtros unidades de mantenimiento. Por condición.
- Inspección y/o cambio del filtro de aire. Por condición.
- Inspección y/o cambio del filtro de aceite. Por condición.
- Inspección y/o cambio del filtro del separador de aire. Por condición.
- Inspección y corrección de fugas. Frecuencia mensual.
- Inspección de conexiones eléctricas y mecánicas. Frecuencia mensual.

4.2.1.2 Compresores de gas.

- Mantenimiento a los arrancadores suaves de ambos compresores. Frecuencia anual.
- Mantenimiento y cambio de baterías a sensores PROFLO. Frecuencia semestral.
- Inspección y/o cambio del filtro de aceite en los dos compresores. Por condición.
- Mantenimiento general a los dos compresores. Frecuencia de 8.000 horas.
- Mantenimiento al posicionador digital del sistema de regulación. Frecuencia semestral.
- Inspección y/o cambio de filtros en la estación de refrigeración de gas. Frecuencia anual.
- Inspección de guarda motores CCM (Compresores Aire, Auxiliares Gas y Blower). Frecuencia anual.
- Mantenimiento motor eléctrico compresor de gas. Frecuencia anual.
- Mantenimiento motor eléctrico enfriador de gas. Frecuencia anual.
- Mantenimiento motor eléctrico enfriador de aceite de los dos compresores. Frecuencia anual.
- Mantenimiento tableros control. Frecuencia semestral.
- Mantenimiento a la válvula de regulación de la entrada de gas (AMETEK). Frecuencia anual.

- Inspección boroscópica al estado del scruber. Frecuencia anual.
- Mantenimiento de termómetros en el sistema de líneas de gas y aceite. Frecuencia anual.
- Mantenimiento a bombas de prelubricación. Frecuencia anual.
- Mantenimiento del actuador neumático de la descarga del compresor A y B. Frecuencia anual.
- Inspección a los manómetros de las torres de enfriamiento. Por condición.
- Mantenimiento a las mirillas de inspección del nivel de condensados de gas. Frecuencia anual.
- Inspección y corrección de fugas. Frecuencia mensual.
- Inspección de conexiones eléctricas y mecánicas. Frecuencia mensual.
- Lavado al radiador del enfriador de gas. Por condición.

4.2.1.3 Generador.

- Diagnóstico, revisión y pruebas eléctricas al generador. Frecuencia anual.

4.2.1.4 Gearbox.

- Mantenimiento al motor eléctrico y la bomba de pre lubricación. Frecuencia anual.
- Mantenimiento a la bomba de lubricación principal. Frecuencia anual.
- Inspección y/o cambio de mangueras del sistema de lubricación. Por condición.
- Verificación en banco los transmisores de presión de las torres de filtro de lubricación. Frecuencia anual.
- Inspección y corrección de fugas. Frecuencia mensual.
- Inspección de conexiones eléctricas y mecánicas. Frecuencia mensual.
- Mantenimiento preventivo general. Frecuencia anual.

4.2.1.5 Sistema de lubricación.

- Microfiltrado del aceite y lavado del carter de la turbina. Frecuencia anual.

4.2.1.6 Sistema de CO2.

- Mantenimiento al sistema de CO2 y verificación de los sensores de gas. Frecuencia anual.
- Mantenimiento al dámper del sistema de CO2. Frecuencia anual.

4.2.1.7 Turbina.

- Mantenimiento al arnés TOT individual. Por condición.
- Mantenimiento al motor eléctrico del extractor de gases de la turbina. Frecuencia anual.
- Mantenimiento al motor eléctrico del enfriador de aceite. Frecuencia anual.
- Cambio del filtro de entrada de aire del generador. Semestral.
- Cambio de los filtros de etapa 1. Semestral o por condición.
- Cambio de los filtros de etapa 2. Anual o por condición.
- Cambio de los filtros de la torre 1 y 2 del tren de gas. Trimestral o por condición.
- Boroscopia a la turbina. Frecuencia trimestral.
- Mantenimiento a la válvula JAMESBURY. Frecuencia anual.
- Lavado del compresor de la turbina. Por condición.
- Mantenimiento del actuador neumático, control de las válvulas bleed's. Frecuencia anual.
- Verificación del transmisor de nivel de aceite del carter. Frecuencia anual.
- Mantenimiento a la bomba P-104 water wash system. Frecuencia anual.
- Inspección y/o cambio de mangueras y racores del sistema neumático. Por condición.

- Mantenimiento a los actuadores y solenoides del tren de gas de la turbina interior y exterior. Frecuencia anual.

4.2.1.8 General.

- Mantenimiento predictivo (vibraciones, termografía y ultrasonido). 3 rondas anuales.

4.2.2 Mantenimiento correctivo. Las actividades de mantenimiento correctivo surgen como consecuencia de los resultados en las diferentes inspecciones que se realizan diariamente con el fin de mitigar un evento no programado y por ende se coordina el plan de acción para la siguiente parada de mantenimiento que esté planeada, aunque también hay actividades correctivas de atención inmediata para solucionar una emergencia puesto que puede ocasionar un riesgo mayor a los equipos, las personas o el medio ambiente.

En la siguiente sección se hablará al detalle de los históricos de fallas y eventos para los equipos relacionados a las turbinas SGT A05 KB7s siemens y su paquete turbogenerador.

4.2.3 Histórico de fallas y eventos. La búsqueda de información correspondiente al histórico de fallas en las turbinas SGT A05 KB7s siemens y su paquete turbogenerador, se compone las siguientes fuentes de información: Reportes de fallas, Ordenes de trabajo correctivas que están diligenciadas en el software de mantenimiento Infor EAM, los reportes diarios, la bitácora que se lleva físicamente en planta y la herramienta de confiabilidad, creada internamente en Excel por la empresa donde está consolidado el histórico de información sobre mantenimientos preventivos, mantenimientos correctivos y paradas por Stand-by por cada uno de los equipos y sistemas; adicional, esta herramienta me permite calcular en tiempo

real la disponibilidad, confiabilidad, tiempo medio entre fallas (MTBF) y tiempo medio de reparación (MTTR).

La herramienta Excel mencionada anteriormente al ser el archivo más completo para la recolección de la información, es la base principal para revisar y analizar tendencias en cada uno de los equipos y la planta en general.

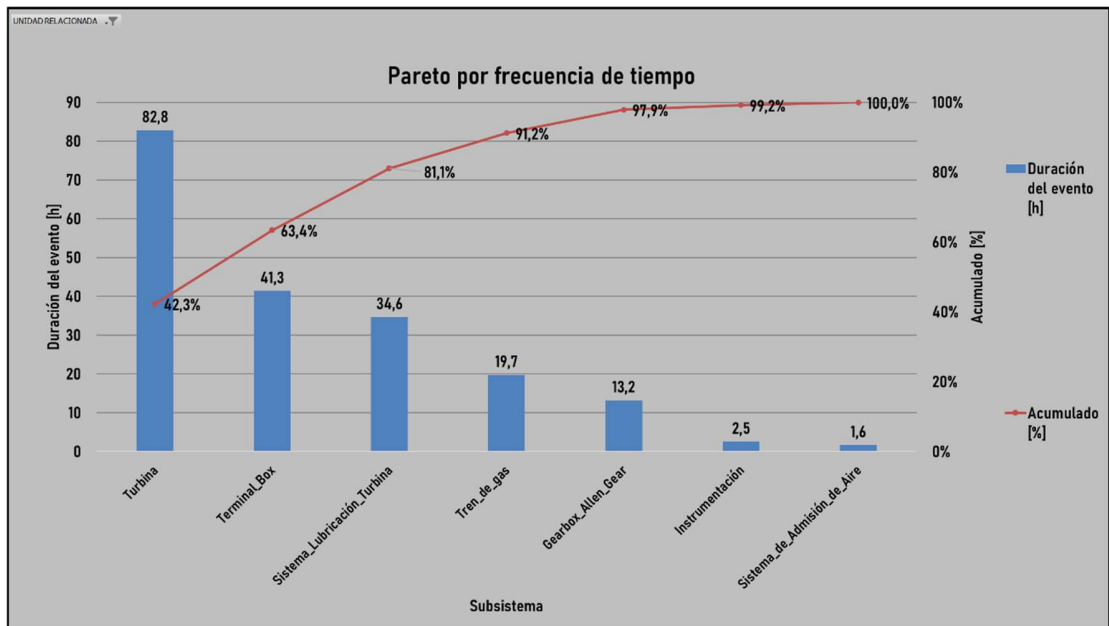
Para la recopilación de la información se tomó los datos de las plantas de generación Empacor y Corona, desde el año 2018 hasta el año 2020.

A continuación, se muestra los paretos de fallas relacionados al paquete turbogenerador.

Para Empacor se tiene un total de 26 registros por paradas correctivas sumando un total de 195,7 horas.

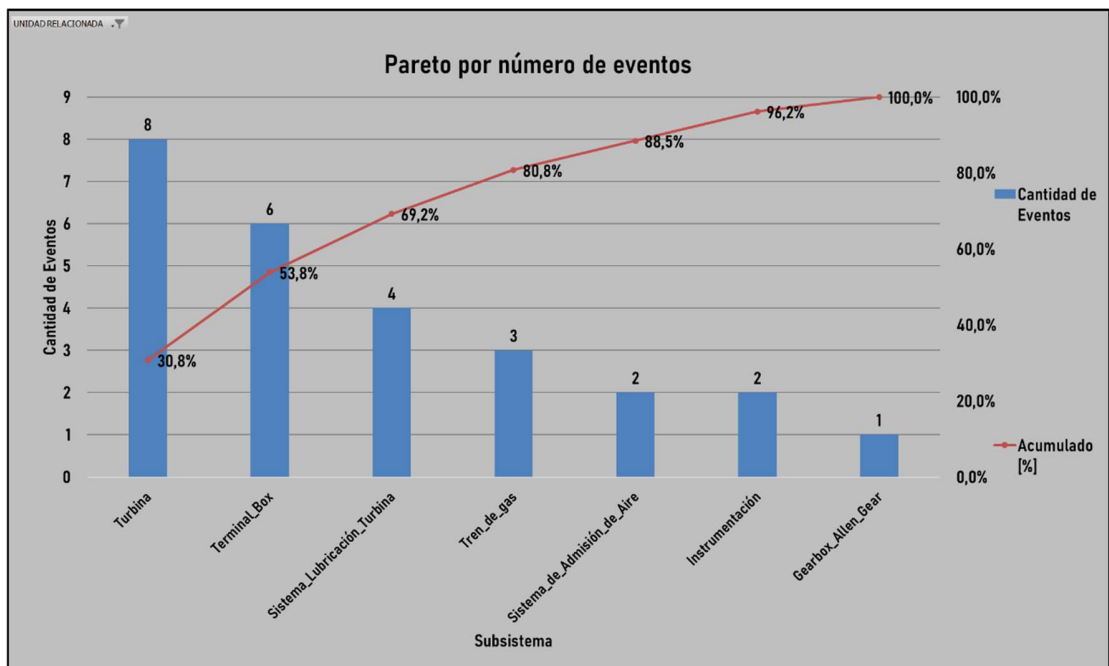
El 42% de los eventos están relacionados con la sección de turbina y por la cual se debe iniciar los planes de acción.

Figura 8. Pareto de falla por frecuencia de tiempo - Empacor.



Fuente. Sebastián Vasquez.

Figura 9. Pareto de falla por número de eventos - Empacor.

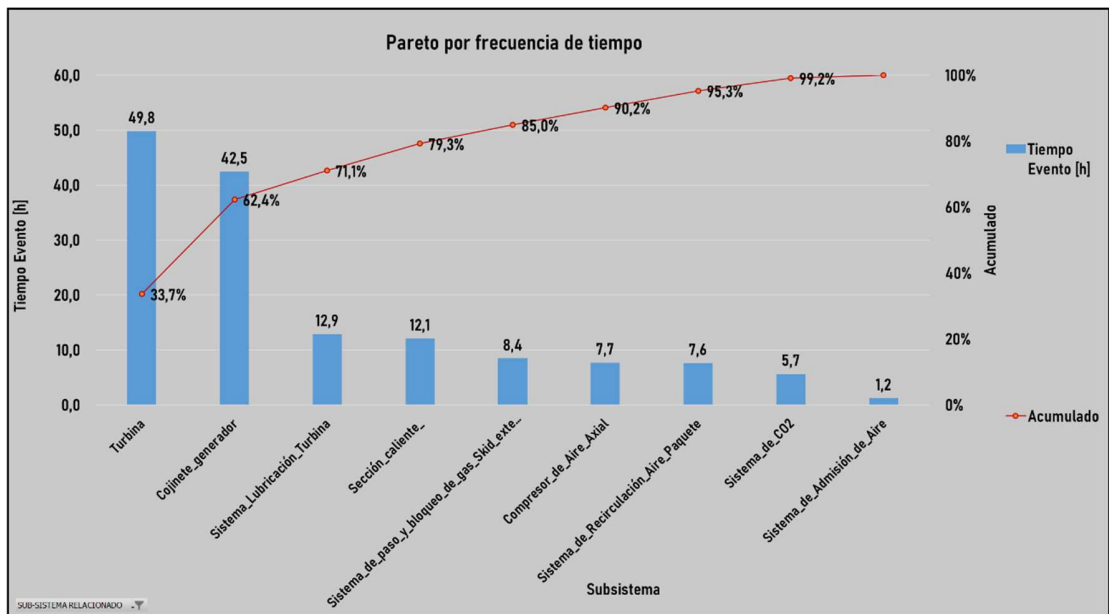


Fuente. Sebastián Vasquez.

Para Corona se tiene un total de 29 registros por paradas correctivas sumando un total de 147,9 horas.

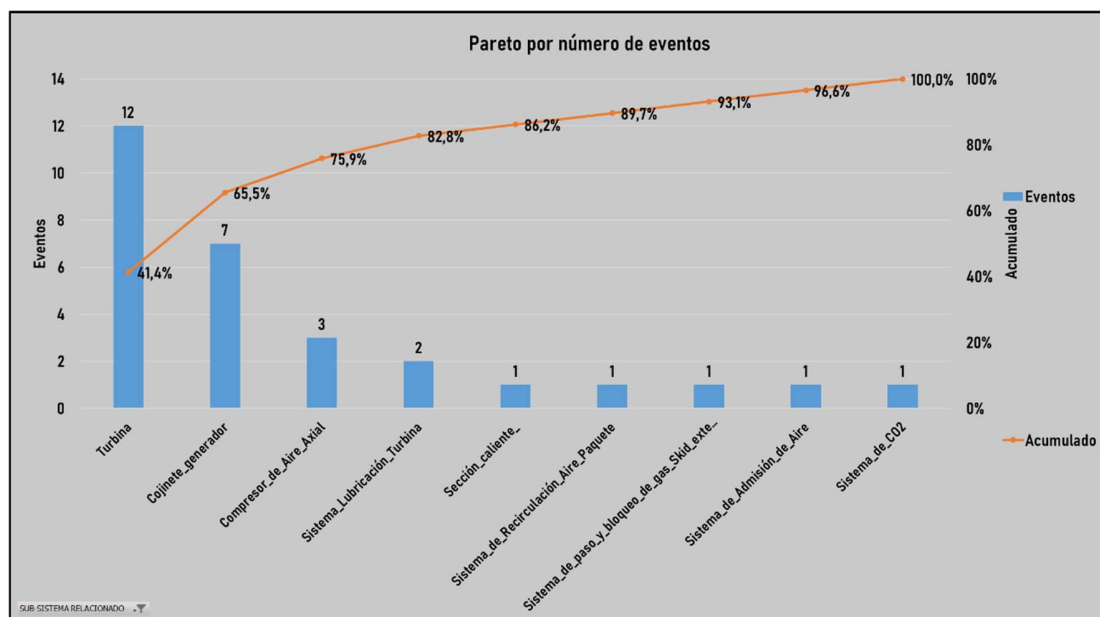
El 34% de los eventos están relacionados con la sección de turbina al igual que Empacor y por la cual se debe iniciar los planes de acción.

Figura 10. Pareto de falla por frecuencia de tiempo - Corona.



Fuente. Sebastián Vasquez.

Figura 11. Pareto de falla por número de eventos - Corona.



Fuente. Sebastián Vasquez.

Una vez se identifican estos eventos, se procedió a la investigación sobre el impacto que puede estar generando dichos números. Esto es debido a que hay eventos que no impactan en la entrega de energía al cliente, por ende, no afecta la disponibilidad a menos que la falla sea inminente y de no parar el proceso de inmediato puede generar consecuencias mayores. Uno de los modos de falla de mayor cuidado y por lo cual se decide parar la turbina, es por aumento en las vibraciones, y puede ser por varios motivos como lo son: problemas de alineación, algún elemento suelto ya sea por la naturaleza de su desgaste o mal apriete de sus partes, falla en el sistema de lubricación, falla en los rodamientos, desbalanceo del eje.

4.2.4 Vibraciones. Las vibraciones de las turbinas SGT A05 KB7s siemens oscilan en un rango normal de 10 µm (0.01 mm) a 20 µm (0.02 mm); la variación de este rango depende normalmente de la carga actual que esté demandando. Los proyectos de Empacor y Corona siempre están entregando su máxima capacidad

la cual está en 3,6 MW, a menos de que se presente alguna novedad por cuestiones internas o por requerimiento del cliente.

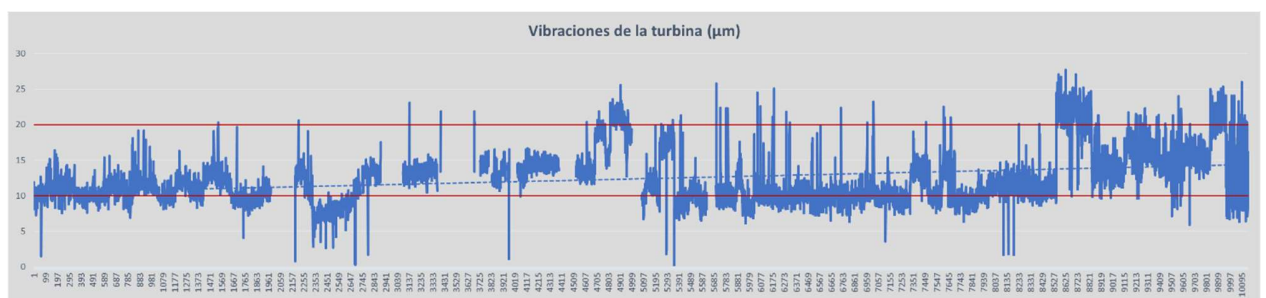
Hay otros factores que puede generar desfases del rango mencionado anteriormente como lo son: factores climáticos, desgastes en sus rodamientos, problemas de lubricación o falla en el transmisor que mide la señal de vibraciones; adicional, el generador tiene un punto de resonancia cuando están entregando una carga aproximada de 2,6 MW y cuando las turbinas están arrancando se presenta un rango superior de 35 μm a 45 μm por un tiempo aproximadamente de 2 minutos, posterior a esto se va normalizando al rango normal de operación.

Según el manual, si la vibración de la turbina es menor a 30 μm (0,03 mm) es normal. Si la vibración excede este límite, se da una condición de advertencia y se requiere una acción correctiva.

Lo importante en el seguimiento de esta variable es que, si se presenta un desfase del rango normal, este no se mantenga; de ser así, si se estaría hablando de problemas en el equipo y ya se debe tomar la decisión de continuar operando o parar para realizar una inspección.

A continuación, se observa como referencia las vibraciones de la turbina ubicada en el proyecto de Empacor con valores en un rango desde el año 2018 hasta agosto del año 2020.

Figura 12. Vibraciones de la turbina ubicada en Empacor.



Fuente. Autor del proyecto.

4.2.5 Heat Rate. El Heat Rate es una medida muy utilizada en turbinas que permite llevar un seguimiento a la eficiencia y rendimiento de las mismas.

Es el cociente entre la energía térmica aportada en forma de combustible (en realidad es energía química que se transforma en térmica mediante el proceso de combustión) y la energía eléctrica generada.

En otras palabras, puede entenderse como energía/energía, es decir, podría ser adimensional si se expresara en las mismas unidades.¹⁵

Para el caso del proyecto se calcula tomando el consumo de combustible que para este caso es gas en m³ multiplicado por su poder calorífico y el resultado se divide por la energía entregada en kWh.

Se expresa mediante la siguiente expresión.

Ecuación 1. Cálculo de Heat Rate

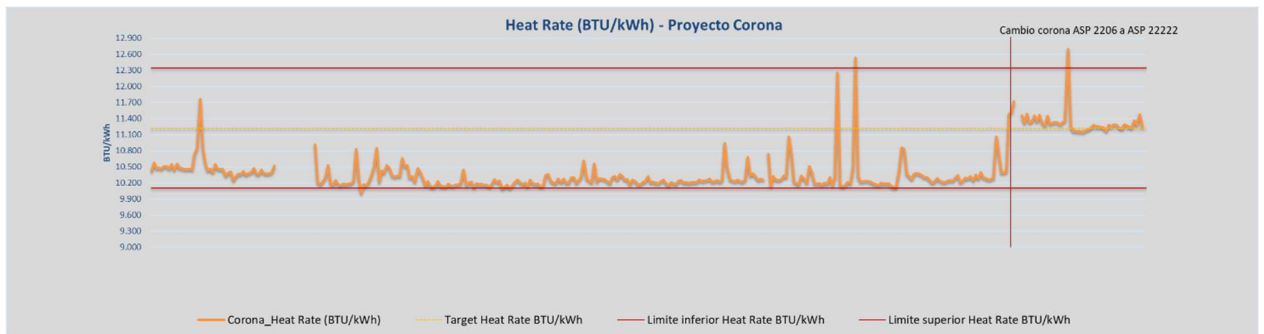
$$\frac{\left(\frac{35,315 \text{ ft}^3}{1 \text{ m}^3} * \text{Poder calorífico inferior LHV} \left[\frac{\text{BTU}}{\text{ft}^3}\right]\right) * \text{consumo de gas (m}^3\text{)}}{\text{Energía generada (kWh)}}$$

Llevar el seguimiento a esta variable permite anticiparse a posibles fallas y generar planes de acción anticipados.

A continuación, se observa el comportamiento de Heat Rate en la turbina ubicada en el proyecto de Empacor y la turbina ubicada en el proyecto de Corona con valores en un rango desde el abril del año 2019 hasta agosto del año 2020.

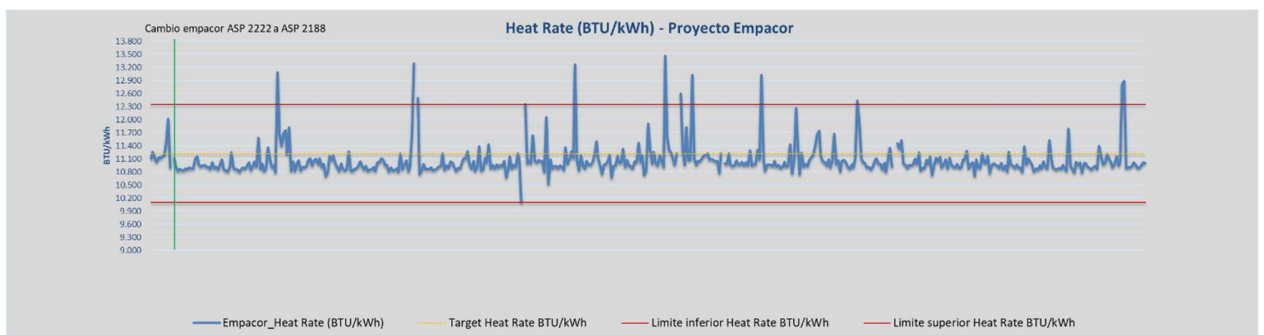
¹⁵ Definiciones del Heat Rate. <http://energia.renovetec.com/>. Unidad de medida para calcular la eficiencia en turbinas.

Figura 13. Heat Rate - Proyecto Corona.



Fuente. Autor del proyecto.

Figura 14. Heat Rate - Proyecto Empacor.



Fuente. Autor del proyecto.

5. MODELO PROPUESTO

5.1 SELECCIÓN DE VARIABLES.

Una vez realizado todo el análisis de la información, se decide que el modelo de variables relevantes para anticiparse a eventos o fallas, son las mencionadas a continuación:

- Heat Rate (BTU/kWh).
- Vibraciones de la turbina (μm).
- Temperatura entrada de aire al compresor turbina CIT ($^{\circ}\text{F}$).
- Presión del aceite (PSI).
- Diferencia de presión de los filtros del aceite (PSI).
- Temperatura del gearbox ($^{\circ}\text{F}$).
- Vibraciones del generador. Lado reductor y lado excitatriz (μm).
- Temperatura del aceite en los cojinetes del generador. Lado reductor y lado excitatriz (μm).

Tabla 1. Modelo de variables definidas para seguimiento y prevención de fallas.

t (periodo)	Heat Rate BTU/kWh	Vibración Turbina μm	In Aire Compresor Turbina CIT $^{\circ}\text{F}$	Presión Aceite PSI	DP Filtros Aceite PSI	Temperatura Gearbox $^{\circ}\text{F}$	Vibración Generador Lado Reductor μm	Vibración Generador Lado Excitatriz μm	Temperatura Aceite Cojinete Generador Lado excitatriz	Temperatura Aceite Cojinete Generador Lado Reductor
4 horas	10.099<12.344	10<20	40<80	45<60	<10	<185	<20	<20	<170	<170

Fuente. Autor del proyecto.

Basado en estas variables se realiza el proceso de análisis de la información para determinar si existe o no una tendencia.

La tendencia se determina con la función de autocorrelación (ACF) que se muestra a continuación.

Ecuación 2. Cálculo de autocorrelación.

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=k+1}^n (Y_t - \bar{Y})(Y_{t-k} - \bar{Y})}{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}$$

Donde:

\bar{y} = media

y = observación en t

y (t-k) = observación k periodos antes

Si ACF es igual a 1 o -1, hay correlación.

Si ACF es igual a 0, no hay correlación.

Otra forma para determinar si hay tendencia es observando el correlograma.

Cuando hay tendencia, los coeficientes de autocorrelación serán significativamente distintos de cero en los primeros resultados e irán disminuyendo gradualmente a cero.

Tabla 2. Análisis de tendencia.

periodo						
t	Yt	Tt-k	Yt - Y media	Tt-k - Y media	(Yt - Y media) ²	(Yt - Y media)*(Tt-k - Y media)
1	123	-	-19	-	361	-
2	130	123	-12	-19	144	228
3	125	130	-17	-12	289	204
4	138	125	-4	-17	16	68
5	145	138	3	-4	9	-12
6	142	145	0	3	0	0
7	141	142	-1	0	1	0
8	146	141	4	-1	16	-4
9	147	146	5	4	25	20
10	157	147	15	5	225	75
11	150	157	8	15	64	120
12	160	150	18	8	324	144
Suma	1704		0	-18	1474	843

media 142

Pk 0,572

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 3. Análisis de tendencia.

periodo						
t	Yt	Tt-k	Yt - Y media	Tt-k - Y media	(Yt - Y media) ²	(Yt - Y media)*(Tt-k - Y media)
1	123	-	-19	-	361	-
2	130	-	-12	-	144	-
3	125	123	-17	-19	289	323
4	138	130	-4	-12	16	48
5	145	125	3	-17	9	-51
6	142	138	0	-4	0	0
7	141	145	-1	3	1	-3
8	146	142	4	0	16	0
9	147	141	5	-1	25	-5
10	157	146	15	4	225	60
11	150	147	8	5	64	40
12	160	157	18	15	324	270
Sumas	1704		0	-26	1474	682

media	142
-------	-----

Pk	0,463
-----------	--------------

Fuente. Autor del proyecto.

Tabla 4. Análisis de tendencia.

periodo						
t	Yt	Tt-k	Yt - Y media	Tt-k - Y media	(Yt - Y media) ²	(Yt - Y media)*(Tt-k - Y media)
1	123	-	-19	-	361	-
2	130	-	-12	-	144	-
3	125	-	-17	-	289	-
4	138	123	-4	-19	16	76
5	145	130	3	-12	9	-36
6	142	125	0	-17	0	0
7	141	138	-1	-4	1	4
8	146	145	4	3	16	12
9	147	142	5	0	25	0
10	157	141	15	-1	225	-15
11	150	146	8	4	64	32
12	160	147	18	5	324	90
Sumas	1704		0	-41	1474	163

media	142
-------	-----

Pk	0,111
-----------	--------------

Fuente. Autor del proyecto.

Posterior al proceso de autocorrelación se inicia la selección de la técnica teniendo en cuenta una serie de factores que se mencionan a continuación:

- El periodo: Tiempo en el cual se han generado los datos. Puede ser: inmediato (menos de un mes), corto plazo (uno a tres meses), medio (más de tres meses y hasta dos años) y largo plazo (dos o más años).
- El patrón de datos: los componentes presentes (tendencia, estacionalidad, ciclo, fluctuaciones irregulares) ayudarán a determinar el modelo que se va a usar.
- Costo del pronóstico: Al elegir una técnica se debe tener en cuenta el costo de desarrollar el modelo y el costo de la operación real de la técnica.
- La exactitud deseada: La exactitud que se desea obtener varía de acuerdo a la técnica empleada.

- La disponibilidad de la información: es indispensable disponer de información histórica de la variable. Además, debe examinarse la exactitud y puntualidad de los datos con que se cuenta.
- Facilidad de operar y entender: al final son los gerentes quienes toman las decisiones y si ellos esperan apoyarse para tomarlas en predicciones, deben ser capaces de entenderlas.¹⁶

Tabla 5. Guía para seleccionar una técnica adecuada.

Método	Patrón de datos	Horizonte de tiempo	Tipo modelo	Datos mínimos requeridos
Promedio simple	ST	S	TS	30
Promedio móvil	ST	S	TS	4-20
Suavizamiento exp simple	ST	S	TS	¿2?
Suavizam exp lineal	T	S	TS	3
Suavizam exp cuadrático	T	S	TS	4
Suavizam exp estacional	E	S	TS	
Regresión simple	T	I	C	10
Regresión múltiple	C,E	I	C	10
Descomposición clásica	E	S	TS	5s
Tendencia exponencial	T	I,L	TS	10
Box-Jenkins	ST,T,C,E	S	TS	6s
Modelos econométricos	C,E	S	C	30

ST: estacionario, T: tendencia, E: estacional, C: cíclico, S: corto, I: mediano, L: largo, TS: serie temporal, C: causal

Fuente. Julián Jaramillo.

Teniendo en cuenta la tabla anterior se muestran los cálculos de algunos métodos que pueden ser aplicados.

¹⁶ Mantenimiento predictivo. Filosofía, gestión tecnológica y teoría de la predicción. Publicado el 30 de enero de 2019. Publicado por Julián Jaramillo.

5.1.1 Modelo HOLT-WINTER. Para datos con un patrón estacional o cíclico y tendencia.

Se tienen las siguientes ecuaciones.

Ecuación 3.

$$P_{t+1} = (S_t + b_t) \times E_{t+1}$$

Ecuación 4.

$$S_t = \alpha \left(\frac{X_t}{E_t} \right) + (1 - \alpha)(S_{t-1} + b_{t-1})$$

Ecuación 5.

$$b_t = \beta(S_t - S_{t-1}) + (1 - \beta)b_{t-1}$$

Ecuación 6.

$$E_{t+P} = \gamma \left(\frac{X_t}{S_t} \right) + (1 - \gamma)(E_t)$$

Teniendo en cuenta que:

$\alpha > 0.1$, $\beta < 0.35$ y $0.65 < \gamma < 0.99$

Donde:

P = número de periodos por ciclo.

Tabla 6. Aplicación con el modelo de HOLT-WINTER.

t	X(t)	S(t)	b(t)	E(t)	P(t)
1	53	157,00	4,00	0,34	
2	22	160,20	3,76	0,14	22,56
3	37	162,57	3,34	0,24	38,64
4	45	164,13	2,81	0,29	47,55
5	58	167,91	3,10	0,34	56,35
6	25	173,03	3,71	0,14	23,60
7	40	176,23	3,55	0,23	40,58
8	50	179,89	3,59	0,28	49,85
9	62	182,89	3,41	0,34	63,02
10	27	186,83	3,57	0,14	26,62
11	44	190,98	3,74	0,23	43,34
12	56	196,10	4,16	0,28	54,09
13				0,34	68,11

alpha	0,2
beta	0,3
Gama	0,75

Fuente. Autor del proyecto.

5.1.2 Suavización exponencial doble. Para datos tendencia. Se tienen las siguientes ecuaciones.

Ecuación 7.

$$\hat{a} = x_1$$

Ecuación 8.

$$\hat{b}_1 = \frac{x_N - x_1}{N - 1}$$

Ecuación 9.

$$\hat{x}_1 = \hat{a}_1 - \hat{b}_1 \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)$$

Ecuación 10.

$$\hat{x}_1 = \hat{a}_1 - 2\hat{b}_1 \left(\frac{1-\alpha}{\alpha} \right)$$

Ecuación 11.

$$\hat{x}_t = \alpha x_t + (1-\alpha)\hat{x}_{t-1}$$

Ecuación 12.

$$\hat{\hat{x}}_t = \alpha \hat{x}_t + (1-\alpha)\hat{\hat{x}}_{t-1}$$

Ecuación 13.

$$\hat{a}_t = 2\hat{x}_t - \hat{\hat{x}}_t$$

Ecuación 14.

$$\hat{b}_t = \left(\frac{\alpha}{1-\alpha} \right) [\hat{x}_t + \hat{\hat{x}}_t]$$

Ecuación 15.

$$P_{N+L} = \hat{a}_N + (L * \hat{b}_N)$$

Teniendo en cuenta que:

$$\alpha = 0.2$$

Ver la siguiente tabla para entender gráficamente la aplicación de las fórmulas mencionadas anteriormente.

Tabla 7. Aplicación con el modelo de suavización exponencial doble.

t	Xt	a	b	X^	X^^	P (N+L)
1	15	15,000	11,667	-31,667	-78,333	
2	25	26,067	-21,767	-20,333	-66,733	
3	30	34,907	-16,427	-10,267	-55,440	
4	45	45,768	-10,852	0,787	-44,195	
5	50	54,489	-5,650	10,629	-33,230	
6	70	67,090	0,105	22,503	-22,083	
7	85	80,672	6,084	35,003	-10,666	
8						86,755744
10						98,924128

Fuente. Autor del proyecto.

5.1.3 Aspectos relevantes a tener en cuenta.

- Se establecen el periodo de tiempo en horas para tomar datos y los rangos normales de operación para cada una de las variables.
- La actualización de datos debe ser registrada y analizada mensualmente.
- Se grafica la información para revisar tendencia.
- Se calcula los valores de pronósticos de los siguientes dos meses.
- Sobre los resultados obtenidos, si hay alguna variable fuera de rango, se programa actividades de mantenimiento para la siguiente parada.
- Posterior a la ejecución de mantenimiento se lleva un seguimiento diario por 1 mes.

5.2 PROGRAMA DE MANTENIMIENTO.

Posterior a los resultados obtenidos en los paretos y con el apoyo del personal experimentado de las plantas de Empacor y Corona se desarrolla el plan de mantenimiento preventivo anual, donde se programan paradas mensuales para la

ejecución de actividades que aseguren la disponibilidad y confiabilidad de los equipos.

El seguimiento a este plan se revisará trimestralmente para las actividades programadas de los próximos 3 meses. Los puntos a revisar en dicho seguimiento serán:

- Actividades programadas.
- Comportamiento anormal o fuera de rango de las variables mencionadas en el punto 5.1.
- Eventos reportados del último trimestre.
- Pareto de fallas.
- Herramienta de confiabilidad.
- Frecuencia de las actividades.
- Cumplimiento al plan de mantenimiento.

Al finalizar, se aprueban las actividades a desarrollar y se programa el personal encargado, repuestos, consumibles, herramientas, proveedores (si aplica) y el tiempo total de parada.

6. CONCLUSIONES

El objetivo de la monografía surge como consecuencia a las falencias evidenciadas para analizar el comportamiento de las variables de operación que son registradas diariamente por el personal operativo.

Se identificó y planteo una serie de variables para seguimiento y prevención de fallas en turbinas de gas aeroderivadas SGT A05 KB7S Siemens con su paquete turbogenerador.

Debido a la interacción y aportes de diferentes agentes durante el proceso, se fortaleció el conocimiento en los componentes del equipo y sus comportamientos con respecto a tendencias; adicional, como puede verse afectado el cumplimiento de las funciones de cada uno de ellos y que efectos tienen sobre la operación.

El plan de actividades se enfocará sobre los resultados obtenidos en los paretos de fallas para ambos proyectos pues presentan el mismo equipo con mayor número de fallas y mayor número de horas.

De acuerdo al programa de mantenimiento, se ha establecido ciertos criterios de revisión y seguimiento que aseguren la confiabilidad de los equipos y de toda la operación.

BIBLIOGRAFIA

- DEFINICIÓN ABC. (s.f.). *Concepto de energía eléctrica*. Obtenido de <https://www.definicionabc.com/tecnologia/energia-electrica>
- ENERGIZA. (15 de 09 de 2011). *Historia de las turbinas*. Obtenido de [energizaseptiembre2011_HISTORIA DE LAS TURBINAS](#)
- ENERGIZA. (02 de 2012). *Diferentes tipos de intervenciones en las turbinas con respecto a su mantenimiento*.
- ESIMIOS. (30 de 11 de 2007). *Turbinas a gas*. Obtenido de <http://esimios-energia.blogspot.com/>
- GARRIDO, S. G. (s.f.). *Renovetec. Datos e información útil*. Obtenido de <http://energia.renovetec.com/index.php/113-que-es-el-heat-rate>
- GENSER POWER. (s.f.). *Genser Power*. Obtenido de <https://genserpower.com/>
- GÓMEZ LUBO, N. R. (2012). *Modelo de mantenimiento basado en RCM para las subestaciones portátiles 69 kV / 7,2 kV de la empresa Carnos del Cerrejón, LTD*.
- GONZALEZ, y. (28 de 10 de 2011). *Evolución del mantenimiento industrial*. Obtenido de <http://ugmamantenimiento12011.blogspot.com/2011/10/evolucion-del-mantenimiento.html>
- GONZALEZ, y. (28 de 10 de 2011). *Nuevas técnicas de mantenimiento*. Obtenido de <http://ugmamantenimiento12011.blogspot.com/2011/10/evolucion-del-mantenimiento.html>
- JARAMILLO, J. (2019). *Mantenimiento predictivo. Filosofía, gestión tecnológica y teoría de la predicción*.
- MORA, A. (05 de 02 de 2014). *Evolución del mantenimiento industrial*. Obtenido de <https://prezi.com/sjnw7wnvqj7a/linea-del-tiempo-mantenimiento-industrial/>
- PLANTAS DE GENERACIÓN. (s.f.). *Diseño las turbinas*. Obtenido de <http://www.plantasdecogeneracion.com/>
- RENOVETEC, E. (s.f.). *Heat Rate, unidad de medida para eficiencia de turbinas*. Obtenido de <http://energia.renovetec.com/>

- SIEMENS. (s.f.). *Turbinas Siemens*. Obtenido de <https://new.siemens.com/global/en.html>
- SMART GRIDS. (s.f.). *Generación distribuida*. Obtenido de <https://www.smartgridsinfo.es/generacion-distribuida>
- SOLARES. (05 de 2019). *Generación centralizada*. Obtenido de <https://solaresenergia.com/uncategorized/sabes-que-es-la-generacion-de-energia-centralizada/>
- TECNOLOGÍAS INFORMACIÓN. (2018). *Procesamiento de datos*. Obtenido de <https://www.tecnologias-informacion.com/procesamientodatos.html>
- TURBINAS DE GAS. (s.f.). *Operación de las turbinas a gas*. Obtenido de <http://www.turbinasdegas.com/>