



**Universidad
de Holguín**

FACULTAD
DE INGENIERÍA
DPTO. INGENIERÍA MECÁNICA

TRABAJO DE DIPLOMA

En opción al Título de Ingeniero Mecánico

**Análisis de criticidad en Grupos Electrógenos MTU serie 4 000 16V G81 del
emplazamiento Holguín 220 kV**

AUTOR: MARIO E. MIRANDA QUIÑONES

TUTORES: ING. RAÚL TORRES SAINZ

Dr.C. ELIO RAFAEL HIDALGO BATISTA

TIPO DE CURSO: CRD

Holguín, Cuba

AÑO: 2022



RESUMEN

En el presente trabajo de diploma se aplica la metodología de análisis de criticidad de Batista, con el objetivo de determinar el subsistema más crítico de los Grupos Electrógenos MTU serie 4 000 16V G81, los cuales pertenecen a la Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel), ubicados en el emplazamiento Holguín 220 kV. Atendiendo a la importancia que tienen en la vida económico y social del país, para establecer una jerarquía o prioridades de los subsistemas, para crear una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en los subsistemas donde sea más importante y necesario mejorar la confiabilidad operacional. Los resultados del análisis de criticidad se han ordenados de manera descendentes en una gráfica por grupos de mayor, mediana y baja criticidad. El procedimiento de la metodología de Batista aparece explicado al igual que una serie de conceptos fundamentales para la mejor comprensión del tema en cuestión. Se hace una caracterización, descripción y análisis de los Grupos Electrógenos MTU serie 4 000, así como de sus subsistemas más importantes. Una vez realizado el análisis de criticidad y establecido su orden a partir de los puntos obtenidos se concluye que el subsistema de mayor criticidad, en este caso es el generador, los de segunda y tercera mayor puntuación son el subsistema de combustible con inyección *Common-Rail* y los mecanismos del motor y el subsistema automático obtuvo la menor puntuación en el desarrollo de este estudio.

ABSTRACT

In the present diploma work, Batista's criticality analysis methodology is applied, with the objective of determining the most critical subsystem of the MTU 4 000 16V G81 series generator sets, which belong to the Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel), located at the Holguín 220 kV site. Taking into account their importance in the economic and social life of the country, to establish a hierarchy or priorities of the subsystems, to create a structure that facilitates accurate and effective decision-making, directing the effort and resources in the subsystems where it is most important and necessary to improve operational reliability. The results of the criticality analysis have been arranged in a descending order in a graph by groups of high, medium and low criticality. The procedure of Batista's methodology is explained as well as a series of fundamental concepts for a better understanding of the subject in question. A characterization, description and analysis of the MTU 4 000 series generator sets, as well as their most important subsystems, is made. Once the criticality analysis has been carried out and its order established on the basis of the points obtained, it is concluded that the subsystem with the highest criticality, in this case, is the generator, those with the second and third highest scores are the fuel subsystem with Common-Rail injection and the engine mechanisms, and the automatic subsystem obtained the lowest score in the development of this study.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Capítulo I. Fundamentación Teórica	7
1.1 Breve descripción de los Grupos Electrógenos.....	7
1.2 Conceptos de Mantenimiento.....	8
1.3 Gestión del Mantenimiento.....	9
1.4 ¿Cómo mejorar la Confiabilidad Operacional?.....	11
1.4.1 Análisis de modo de fallo y sus efectos y análisis de criticidad.....	12
1.4.2 Análisis de causa raíz.....	12
1.4.3 Árbol de fallos.....	13
1.5 Análisis de Criticidad (AC).....	13
1.5.1 ¿Cuándo se debe aplicar un Análisis de Criticidad?.....	18
1.6 Antecedentes.....	20
1.7 Metodología para el análisis de criticidad (Método de Mendoza).....	21
1.8 Metodología para el análisis de criticidad (Método de Batista).....	25
1.9 Diagrama de Pareto.....	28
1.9.1 Principio del Diagrama de Pareto.....	28
1.9.2 Utilidad del diagrama de Pareto.....	28
Capítulo II. Análisis de criticidad de los subsistemas de los Grupos Electrógenos ..	30
2.1 Caracterización de los grupos electrógenos.....	30
2.1.1 Descripción y localización.....	30
2.1.2 Estación de combustible.....	30
2.1.3 Descripción Técnica del GED (MTU, 2006).....	31
2.1.4 Motores de la serie 4 000.....	31
2.1.5 Sistema de gestión electrónica del motor (<i>Engine Control Unit</i>).....	33
2.1.6 Generador.....	33
2.1.7 Tablero de control.....	34
2.1.8 Contenedor de media tensión.....	35
2.2 Sistemas y subsistemas en los grupos electrógenos.....	36
2.2.1 Sistema de enfriamiento.....	37
2.2.2 Sistema de aceite lubricante.....	38
2.2.3 Sistema de combustible con inyección <i>Common-Rail</i>	39

2.2.4 Sistema de aire de sobrealimentación y sistema de escape.....	40
2.2.5 Mecanismos del motor	40
2.2.6 Automática	42
2.2.7 Sistema eléctrico del grupo	43
2.2.8 Generador	43
2.3. Determinación de la criticidad de los sistemas existentes en los grupos electrógenos	44
VALORACIÓN ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL	50
CONTRIBUCIÓN A LA DEFENSA DE LA PATRIA	51
CONCLUSIONES.....	52
RECOMENDACIONES	53
ANEXOS	61

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Agrupación típica de instalaciones. Fuente: (Mendoza, 2000).	16
Figura 2. Modelo básico de criticidad. Fuente: (Mendoza, 2000).	17
Figura 3. Encuesta para el análisis de criticidad. Fuente: (Leyva, 2009).	22
Figura 4. Estándar PDVSA, para dar la puntuación a cada uno de los criterios empleados en el análisis de criticidad. Fuente: (Leyva, 2009).	23
Figura 5. Gráficos de resultados de un análisis de criticidad. Fuente: (Leyva, 2009).	24
Figura 6. Motor MTU serie 4 000 16V G81. Fuente: (MTU, 2006).	32
Figura 7. Generador sincrónico Marrelli. Fuente: (MTU, 2006).	33
Figura 8. Tablero de control del motor.	34
Figura 9. Contenedor de media tensión. Fuente: (MTU, 2006).	35
Figura 10. Representación gráfica de los subsistemas principales que componen el GE. ..	36
Figura 11. Engine Control Unit (Unidad de Control del Motor).	42
Figura 12. Diagrama de Pareto.	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Análisis de criticidad de los subsistemas.	48
Tabla 2. Análisis de los valores de la criticidad.	48

INTRODUCCIÓN

Desde los comienzos de la utilización y posterior desarrollo de la energía eléctrica en el siglo XIX, la humanidad se ha visto en la necesidad de innovar y desarrollar fuentes de energía que ayuden a suplir las demandas energéticas para la producción de bienes, servicios, el sector residencial y que las mismas no sean perjudiciales hacia el medio ambiente. La generación de electricidad es un proceso complejo en donde la gran mayoría de la generación se obtiene mediante la energía liberada en forma de calor mediante la quema de combustible.

En el mundo actual el desarrollo de un país se mide entre otros elementos por la capacidad de generación de electricidad que posea, debido a que la electricidad es la principal fuente de energía para la realización de la inmensa mayoría de las actividades económicas de un país.

En el 2004, Cuba sufrió una severa crisis en el Sistema Electroenergético Nacional (SEN), apoyado en aquel entonces en grandes plantas con elevados índices de consumo de combustibles y redes de transmisión y distribución en mal estado técnico, esta situación conllevó al surgimiento de la puesta en marcha de un nuevo programa.

El cual consiste en un esquema de generación eléctrica distribuida que emplea la instalación de emplazamientos compuestos por baterías de grupos electrógenos, que operan con Diesel o fuel-oil, constituyendo uno de los más profundos cambios conceptuales en esta esfera. Estos Grupos Electrógenos (GE) están distribuidos en dependencia de su potencia y utilidad, a todo lo largo y ancho del país y pueden ser pequeños, medianos o grandes. Los grandes, en su mayoría, están conectados a la red nacional con el fin de apoyar a las centrales termoeléctricas en el proceso normal de generación.

Es decir, equipos con alta disponibilidad, facilidad para su instalación y niveles de potencia utilitaria inferiores a las termoeléctricas y ante situaciones excepcionales que conlleven a la operación aislada, garanticen el suministro eléctrico (Laguna, 2002).

En un discurso pronunciado el 17 de enero de 2006, el Comandante en Jefe Fidel Castro aseguraba que un estudio profundo de la situación y las experiencias del enfrentamiento a fuertes huracanes conllevaron a la puesta en práctica de nuevas concepciones para el desarrollo de un Sistema Electroenergético Nacional (SEN) más eficiente y seguro.

Las acciones adoptadas bajo la política conocida como Revolución Energética comprendían la adquisición e instalación de equipos de generación más eficientes y seguros, con grupos electrógenos y motores convenientemente ubicados en distintos grupos del país; el incremento del uso del gas acompañante del petróleo nacional en la generación de electricidad mediante el empleo del ciclo combinado; la rehabilitación de las redes de distribución anticuadas e ineficientes que afectaban el costo y la calidad del fluido eléctrico; dar prioridad a los recursos mínimos necesarios para una mejor disponibilidad de las plantas del sistema electroenergético y su paso a la conservación, así como la creación de un programa intensivo de investigación y desarrollo del uso de energía eólica y solar en Cuba (O. M. Álvarez, 2022).

En los últimos años los estudios realizados en Cuba en relación con los grupos electrógenos se centran en un análisis de la eficiencia operacional (Teyra, Sarduy, & Felipe, 2012). Dentro de los aspectos más pertinentes que se abordan están: la distribución económica de la carga de los motogeneradores en régimen paralelo o isla para minimizar el consumo y el costo del combustible (Dotres & García, 2012), (Grainger & Stevenson, 1996), (de la Fé Dotres, Fontanil, & Sierra, 2010); la identificación de las causas de algunas ineficiencias en la operación del motor de combustión interna (MCI) a través de diagnósticos técnicos por análisis de tendencia; el análisis de fiabilidad para el pronóstico de fallo (Batista & Proenza, 2011), (Hidalgo-Batista, 2015) y los métodos estadísticos para caracterizar el consumo de aceite (Hechavarría-Pérez, Castañeda-Sandes, & Iskander-Concepción, 2014).

Hoy en día Cuba afronta una difícil situación electroenergética debido a las faltas de mantenimientos y por el desgaste que presentan varios de sus componentes, ya sea por diversas causas como la falta de adquisición de piezas de repuestos, causadas por el bloqueo y a la obsolescencia tecnológica, la utilización del crudo nacional como combustible, el cual presenta una gran cantidad de azufre, un aumento de la demanda de energía eléctrica, también a que las termoeléctricas cargan con casi todo el peso de la generación, solo una pequeña parte le correspondía a la generación eólica e hidroeléctrica, a raíz de todos estos factores surgen problemas con la generación eléctrica. Como se expuso anteriormente estos equipos ya presentan años de explotación y su utilización se vio incrementado debido a la situación energética que presenta el país,

sirviendo como respaldo para la producción de bienes y servicios que son vitales para la economía del país.

Por tanto, se hace necesario aplicar métodos de mantenimientos que mejoren la confiabilidad operacional del equipo y que ayuden al personal de mantenimiento a estar más preparados para una determinada falla teniendo así menores consecuencias para la producción energética, costos de reparación entre otras.

Tradicionalmente, las actividades de mantenimiento han sido vistas como inevitables por las diferentes funciones de gestión en una organización (Jung, Zhang, & Winslett, 2017). Sin embargo, desde 1995, se ha reemplazado cada vez más esta actitud, que reconoce el mantenimiento como un tema estratégico en la organización (Ahmad, Kamaruddin, Azid, & Almanar, 2012). A medida que aumentan las presiones competitivas sobre las organizaciones de todo el mundo para ser más productivas.

La confiabilidad operacional, algunos autores la definen como la capacidad de una organización para cumplir sus funciones de manera óptima, durante un período de tiempo, bajo un contexto operacional específico (Holmberg, Folkesson, Bergman, Ostvik, & Aage, 1992), (Altuger & Chassapis, 2009); (Puthillath, Sasikumar, & Technology, 2012); (Bazovsky, 2004); (Mora, 2009). La confiabilidad operacional está determinada por la confiabilidad del equipo, la confiabilidad humana, la confiabilidad del proceso y la mantenibilidad (Altmann, 2009). La medida de la confiabilidad de un equipo es la frecuencia con la cual ocurren las fallas en el tiempo; si no hay fallas, el equipo es totalmente confiable; si la frecuencia de fallas es muy baja, la confiabilidad del equipo es aún aceptable; pero si la frecuencia de fallas es muy alta, el equipo es poco confiable (Bazovsky, 2004).

Uno de los métodos que ha demostrado ser muy eficaz para determinar la confiabilidad es el análisis de criticidad, pues permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas, subsistemas, equipos y elementos creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual (Mendoza, 2000).

El análisis de criticidad genera una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total del universo analizado, diferenciando tres zonas de clasificación: alta criticidad, mediana criticidad y baja criticidad. Una vez identificadas estas zonas, es

mucho más fácil diseñar una estrategia, para realizar estudios o proyectos que mejoren la confiabilidad operacional, iniciando las aplicaciones en el conjunto de procesos o elementos que formen parte de la zona de alta criticidad.

La lista generada, resultado de un trabajo de equipo, permite nivelar y homologar criterios para establecer prioridades y focalizar el esfuerzo que garantice el éxito maximizando la rentabilidad (Leyva, 2009).

Esta investigación está fundamentada en La Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel), se encuentra ubicada en el municipio de Holguín, en la siguiente dirección: Calle Línea # 3, e/16 y 18, Reparto Pueblo Nuevo, se subordina al Ministerio de la Industria Básica (MINBAS) y es la encargada de la dirección principal de los grupos electrógenos. El principal objetivo de la misma, es mantener disponible los grupos electrógenos existente en todo el territorio provincial.

Situación problemática

Atendiendo a la importancia que tienen los Grupos Electrógenos en la vida económica y social de nuestro país, así como sus altos costos de reparación, alta complejidad y el gran número de subsistemas que la forman, se hace necesario mejorar la gestión del mantenimiento enfocada en la fiabilidad y disponibilidad del equipo, además es de vital importancia dirigir los recursos humanos y financieros para mantener al equipo en buen estado, por lo que se hace necesario aplicar un sistema que jerarquice y priorice los elementos más críticos del equipo y que contenga una estructura que facilite la correcta toma de decisiones.

Esto da surgimiento al siguiente problema científico.

Problema científico

¿Cómo determinar cuáles son los subsistemas más críticos que poseen los Grupos Electrógenos Diesel MTU, serie 4 000 16V G81 de la Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel), emplazamiento Holguín 220 kV?

Objeto de estudio

Los Grupos Electrógenos Diesel MTU, serie 4 000 16V G81 de la Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel), emplazamiento Holguín 220 kV.

Campo de acción

Análisis de criticidad de los subsistemas de los Grupos Electrógenos Diesel MTU, serie 4 000 16V G81 de la Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel), emplazamiento Holguín 220 kV.

Hipótesis

Si se aplica el método de análisis de criticidad de Batista en los subsistemas existentes en los Grupos Electrógenos Diesel MTU, serie 4 000 16V G81, emplazamiento Holguín 220 kV, se podrá conocer cuáles de ellos son los más críticos, y mejorar la gestión del mantenimiento, dirigiendo los recursos a los elementos de mayor criticidad.

Objetivo general

El objetivo de este trabajo es determinar la criticidad de los subsistemas de los Grupos Electrógenos Diesel MTU, serie 4 000 16V G81 de la Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel).

Tareas de Investigación

1. Realizar una revisión bibliográfica de los antecedentes y conceptos fundamentales del mantenimiento, confiabilidad operacional y análisis de criticidad.
2. Caracterizar a los Grupos Electrógenos Diesel MTU, serie 4 000 16V G81 de la Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel).
3. Conocer los sistemas y subsistemas en los Grupos Electrógenos Diesel MTU, serie 4 000 16V G81 de la Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel).
4. Determinar la criticidad de los subsistemas existentes en los Grupos Electrógenos Diesel MTU, serie 4 000 16V G81 de la Unidad Empresarial de Base de Grupos Electrógenos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel).

Métodos de investigación

Teóricos:

Análisis y síntesis:

Se analizó todo lo referente a la bibliografía del universo estudiado para conocer las particularidades donde se desarrolla el marco de este trabajo.

Se escogieron pequeños resúmenes o síntesis de textos referentes al fenómeno a estudiar, para mejorar el contenido en el que se enmarcará este trabajo.

Histórico – Lógico:

Se aplicó para establecer el estado del arte del tema de investigación, como un marco teórico referencial, permitiendo conocer qué se ha investigado sobre el tema objeto de estudio, y los aspectos generales que se abordan, así como surgimiento y evolución del mismo.

Empíricos:

Consultas a expertos:

Entrevistas y encuestas realizadas a los directivos con mayor conocimiento en el tema en la empresa, así como, técnicos, ingenieros y operarios lo cual contribuyó con la caracterización de la problemática estudiada.

Observación:

Se observan en qué condiciones se encuentran los equipos, así como donde los mismos están instalados.

Revisión bibliográfica:

Se realizó la consulta de las bibliografías que nos permitieron establecer el estado del arte.

Resultados esperados

Determinar la criticidad de los subsistemas en lo Grupos Electrónicos Diesel MTU, serie 4 000 de la Unidad Empresarial Empresa de Grupos Electrónicos y Servicios Eléctricos Holguín (Geysel), Holguín 220 kV, para alcanzar una mayor visualización de los elementos más críticos del equipo y direccionar los esfuerzos y recursos con el fin de lograr la confiabilidad operacional de los mismos.

Capítulo I. Fundamentación Teórica

Introducción al Capítulo I

Este capítulo tiene como objetivo realizar una búsqueda bibliográfica relacionada con los conceptos fundamentales de los grupos electrógenos, el mantenimiento, sus diferentes filosofías, generalidades el análisis de criticidad, así como los diferentes métodos desarrollados por investigadores en este campo.

1.1 Breve descripción de los Grupos Electrógenos

Según Cepero-Aguilera (2009), los Grupos Electrógenos (GE) son equipos electromecánicos compuestos por dos partes fundamentales: una llamada máquina motriz y la otra, máquina accionada.

Según los autores Rivera (2011), Sánchez (2005), un Grupo Electrógeno es una máquina que mueve un generador de electricidad a través de un motor de combustión interna. Son comúnmente utilizados cuando hay déficit en la generación de energía eléctrica de algún lugar, o cuando son frecuentes los cortes en el suministro eléctrico.

Según Best, Morrow, McGowan, and Crossley (2007) Estas plantas operan sincronizadas (régimen paralelo) al Sistema Electroenergético Nacional o de forma aislada (régimen isla) en los horarios picos cuando existe déficit de generación o ante contingencias que clasifiquen como situaciones excepcionales.

Una de las utilidades más comunes es la de generar electricidad en aquellos lugares donde no hay suministro eléctrico, generalmente son zonas apartadas con pocas infraestructuras y muy poco habitadas. Otro caso sería en locales de pública concurrencia que, a falta de energía eléctrica de red, necesiten de otra fuente de energía alterna para abastecerse.

Los Grupos Electrógenos en la red eléctrica cubana han sido utilizados, por lo general, para compensar las interrupciones de energía de las redes de distribución, donde la falta de esta puede causar daños importantes o donde la red eléctrica no está disponible, es insuficiente o no es rentable, los Grupos Electrógenos que están conectados a una red eléctrica se muestran de dos formas fundamentales: por su conexión de forma aislada, denominado "Isla" o formando parte de varias unidades en paralelo denominadas "Baterías" (Blanco, 2018).

1.2 Conceptos de Mantenimiento

Los seres humanos satisfacen gran parte de sus necesidades materiales a través del consumo de bienes y servicios, cuya existencia depende mayormente de una serie de medios de producción que se adquieren con inversiones considerables. Considerando que los medios de producción son los medios de trabajo y una gran parte de los medios de producción la constituye los medios básicos productivos, denominados como activos fijos tangibles.

Estos activos fijos tangibles funcionan generalmente durante un largo período y se desgastan de forma gradual, tanto física como moralmente, el desgaste físico más menos fuerte se debe a su explotación, lo que influye en sus partes, componentes y grupos constructivos.

Durante el proceso de utilización de estos activos, llega el momento en que varias alternativas tales como: ampliación, modernización, mantenimiento e incluso remplazo, es necesario decidirse por una de ellas, lo que implica considerar varios factores y se requiere de un profundo y cuidadoso análisis para seleccionar la mejor opción con los mayores beneficios.

El mantenimiento como alternativa de decisión, es uno de esos elementos que hasta hace muy poco tiempo no ha desempeñado más que una función reactiva, limitada en medios y destinada únicamente a garantizar el programa de fabricación (Martínez, Espinosa, & Martínez, 2000).

El mantenimiento se reconoce como una de las principales áreas temáticas de la gestión de activos que debe lograrse y controlarse de manera efectiva para mejorar el rendimiento de sistemas complejos (es decir, disponibilidad, confiabilidad, nivel de producción, costos, seguridad, etc.) en diversos entornos operativos (Liu, Wang, & Peng, 2015).

Obviamente, las actividades de mantenimiento deben integrarse y programarse dentro del ciclo de vida del sistema bajo investigación y deben tener en cuenta las características de confiabilidad requeridas por el propio sistema. Panteleev, Kamaev, and Kizim (2014) enfatizan en el papel de la organización de mantenimiento y reparación (MRO) y resaltar la importancia de implementar y planificar acciones periódicas de mantenimiento.

Si una empresa quiere garantizar calidad en los bienes que produce es necesario que la misma logre poseer una información específica y actualizada de sus equipos para que así pequeñas averías no afecten el proceso productivo y por ende la economía de la empresa.

La definición del término mantenimiento ha sido expresada por diferentes autores con puntos de vista similares y pequeñas diferencias o adaptaciones. A medida que la tecnología va avanzando este concepto va tomando nuevas definiciones mejoradas.

En la década de los años 50 fue definido el mantenimiento como la realización eficiente de todas las inspecciones, reparaciones, revisiones y construcciones necesarias para establecer y mantener una facilidad o equipo en condiciones para cumplir los requerimientos de operación (Mobley, 2014).

En la norma cubana 92 - 44 (1986 b) se plasma la definición de mantenimiento como:

“Conjunto de operaciones u operación que se realiza a un artículo para mantener su estado de capacidad de trabajo o su buen estado durante su utilización, su destino, estacionamiento, almacenamiento y transportación.”

“Se ha definido el mantenimiento como la “conservación” de bienes en condiciones adecuadas de operación mediante limpieza, lubricación, reparación y ajuste (Kohler, 1990).

Según AENOR (2002), la norma EN 13306: 2002 – Terminología del mantenimiento, el mantenimiento es: “combinación de todas las acciones técnicas, administrativas y de gestión durante el ciclo de vida de un elemento, destinadas a conservarlo o devolverlo a un estado en el cual puede desarrollar una función requerida”.

“Se entiende por mantenimiento la función empresarial a la que se encomienda el control del estado de las instalaciones de todo tipo, tanto las productivas como las auxiliares y de servicios (Monseco, 2013).

En esta investigación se considera el mantenimiento como la gestión de un grupo de acciones con un análisis previo, las cuales tiene como objetivo, mantener reparar y mejorar un elemento y establecer un balance entre la fiabilidad y el costo.

1.3 Gestión del Mantenimiento

Los procesos asociados a la gestión del mantenimiento deben ser innovadores, metódicos, planeados y liderados por la alta administración, involucrando desde el personal operativo hasta los gerentes (Espinosa, Dias, & Back, 2008); sin embargo, en muchas ocasiones la administración no se preocupa por realizar una planificación adecuada del mantenimiento, incumpliendo los estándares de desempeño de sus procesos, debido a la baja confiabilidad en los activos de producción, repercutiendo en los costos globales de operación, en la vida útil de la maquinaria y en el nivel competitivo de la

industria (Espinosa, Dias, & Salinas, 2012); (Chemweno, Pintelon, Van Horenbeek, & Muchiri, 2015).

La gestión del mantenimiento debe ser eficaz, eficiente y oportuno, y debe alinearse con los objetivos y las necesidades de la empresa, minimizando los costos indirectos y directos asociados; además, la falta de planificación impide ejecutar las actividades de mantenimiento efectivas de forma proactiva (Viveros, Stegmaier, Kristjanpoller, Barbera, & Crespo, 2013); (Pintelon & Gelders, 1992).

Según Pérez (2003) actualmente, existen decenas de conceptos y herramientas de mantenimiento y en esa dinámica constante, surgen cada vez más enfoques del mismo. La gestión de mantenimiento debe exigir al personal que labora en el área, no sólo conocer las técnicas y aprenderlas, sino también aprender a decidir cuáles son útiles en consideración a las necesidades específicas de la empresa y a sus características particulares.

A continuación, se describen tres herramientas para acometer el mantenimiento.

CM – *Corrective maintenance* (mantenimiento correctivo)

Según Ayora and Gaibor (2019), el mantenimiento correctivo involucra todas las actividades de reparación realizadas en el momento de presentarse la falla. Los costos son relativamente elevados, debido a los tiempos de inactividad no programados, maquinaria dañada, y gastos de tiempo extra, afectan en muchas ocasiones la producción. Según Shafiee, Labib, Maiti, and Starr (2019), este mantenimiento comprende las actividades de todo tipo encaminadas a tratar de eliminar la necesidad de mantenimiento, corrigiendo las fallas de una manera integral a mediano plazo.

PM - *Preventive maintenance* (Mantenimiento preventivo)

Según Encalada (2014), el mantenimiento preventivo se realiza a intervalos determinados con el objetivo de minimizar las probabilidades de fallas o la degradación de los equipos.

El Mantenimiento preventivo, involucra actividades programadas tales como inspecciones periódicas, reposición y sustitución de fluidos, pruebas y reparaciones con la intención de reducir la frecuencia de las fallas y garantizar la continuidad de la producción (Ayora & Gaibor, 2019).

Este mantenimiento está destinado a garantizar la fiabilidad de equipos en funcionamiento antes de que pueda producirse un accidente o avería por algún deterioro. Su misión es tener un nivel de servicio determinado en los equipos para programar las intervenciones

en el momento más oportuno. Se interviene, aunque el equipo no haya dado ningún síntoma de tener un problema (García, 2021).

Según Vigo and Yañez (2021), el mantenimiento preventivo es una técnica científica del trabajo industrial, que en especial está dirigida al soporte de las actividades de producción y en general a todas las instalaciones empresarias.

PdM - *Predictive maintenance* (Mantenimiento predictivo)

El mantenimiento predictivo, involucra actividades de monitoreo y diagnóstico de las condiciones operacionales de los equipos y las máquinas. Es por esto por lo que los especialistas en este tipo de mantenimiento industrial son considerados los doctores de los equipos y las máquinas, ya que se encargan de realizar los estudios que permitirán diagnosticar cualquier anomalía operacional y así tomar las medidas respectivas ante la presencia de algún síntoma de falla (Ayora & Gaibor, 2019).

Para minimizar las deficiencias de los métodos tradicionales de mantenimiento y respondiendo a necesidades de reducción de costes, se configura la necesidad de una metodología que permita una “vigilancia periódica” de las máquinas, así surge la estrategia del Mantenimiento Basado en la Condición o Mantenimiento Preventivo, cuyos objetivos principales son la reducción del coste y el aumento de la disponibilidad asociado al empleo del Mantenimiento Correctivo y Mantenimiento Preventivo (García, 2021).

Según la norma (AENOR, 2002), el “Mantenimiento basado en la condición, siguiendo una previsión consecuencia del análisis y evaluación de los parámetros significativos de la degradación del elemento”.

1.4 ¿Cómo mejorar la Confiabilidad Operacional?

Cuando una organización decide enfrascarse en el empeño de implementar un programa de mejora de la confiabilidad operacional, suele encontrarse con el dilema de disponer de una gran cantidad de activos, subsistemas y sistemas por examinar y un volumen de recursos limitado para llevar a cabo la compleja tarea.

Por tanto, resulta sumamente saludable implementar algún procedimiento que permita establecer un orden que indique cuáles serán los activos a incluir primero en el programa, los que se incorporarán después y cuáles sencillamente no se incorporarán, dado que no valga la pena hacerlo porque con las tareas de mantenimiento actuales sea más que suficiente (Concepción, García, Gómez, & Ariet, 2015).

Existen muchas herramientas para mejorar la confiabilidad y la jerarquización de procesos, sistemas, máquinas y elementos, algunas de estas herramientas son, el análisis de modo de fallas y sus efectos y en análisis de criticidad (FMECA), análisis causa raíz, árbol de fallas y el análisis de criticidad.

1.4.1 Análisis de modo de fallo y sus efectos y análisis de criticidad

Según Zhang, Gao, Huang, Li, and Mi (2018), Rausand and Vatn (1998), (Chen & Yao, 2012) el análisis modo de fallas y sus efectos es un método de análisis de confiabilidad que utiliza una forma tabular para analizar los modos de falla, las causas de la falla, los efectos de la falla y las medidas de compensación de los componentes del sistema. El método puede ayudar a determinar las partes débiles del sistema y proponer medidas preventivas y sugerencias para mejorar la confiabilidad.

El análisis de modo de fallas y sus efectos y análisis de criticidad (FMECA) representa un método de soporte válido para medir semicuantitativamente la criticidad de los modos de falla del sistema. Muchos autores como Koning et al. (2009), Aven and Safety (2016) consideran FMECA y el desarrollo de análisis de riesgo como una parte esencial de las estrategias de gestión de mantenimiento. Los autores Vernez and Vuille (2009) destacan la buena adaptabilidad de FMECA como herramienta para analizar macrosistemas complejos con varios niveles jerárquicos.

1.4.2 Análisis de causa raíz

Según Fuenmayor (2012) el análisis causa raíz es una metodología disciplinada de tres niveles que permite identificar de forma deductiva e inductiva las causas raíces latentes desconocidas que generan las fallas humanas y estas ocasionan las fallas de los componentes o que generan un incidente que ocurren una o varias veces permitiendo adoptar las acciones correctivas que reducen los costos del ciclo de vida útil del proceso, mejora la seguridad y las confiabilidad del negocio.

Según Labra (2018), el análisis de causa raíz es un proceso secuencial de preguntas estructuradas para descubrir errores latentes subyacentes en un suceso centinela. Se orienta al proceso, por lo que supone una revisión exhaustiva de los elementos que lo integran (personas, equipos, procedimientos, información, entornos, contingencias externas).

Según los autores Montero et al. (2011) es una técnica sistemática de preguntas utilizada durante la fase de análisis de problemas para buscar sus posibles causas principales. La

técnica requiere que se pregunte “porqué” al menos cinco veces, o se trabaje a través de cinco niveles de detalle. Una vez que sea difícil responder al “porqué”, la causa más probable habrá sido identificada.

1.4.3 Árbol de fallos

Según la norma AENOR (1994) y autores tales como, Brouwer, Al-Jibouri, Cárdenas, Halman, and Safety (2018), Chinchilla, Sierra, and Cediél (2015), Estrada, Cano, and Ocampo (2009), Tomás Piqué Ardanuy (1998), Trujillo (2017) el Árbol de Fallas es un método deductivo que presenta características excelentes a la hora de localizar, corregir y anticiparse a las fallas. Para llevarlo a cabo, el método parte de definir un suceso no deseado, evento o falla que se pretenda evitar y a partir de él se identifican todos los factores que puedan desencadenar el posible suceso.

“Para que sea efectivo, un análisis por árbol de fallas debe ser elaborado por personas con grandes conocimientos de la instalación o proceso a analizar y tengan experiencia en su aplicación” (Trujillo, 2017).

1.5 Análisis de Criticidad (AC)

Otra herramienta de probada utilidad para lograr el mencionado propósito de la confiabilidad es el denominado análisis de criticidad, el que debe ser precedido por un análisis sistémico. Este último tiene por objetivo la descomposición de un sistema complejo en subsistemas con diferentes niveles jerárquicos, de manera tal que el nivel más bajo esté formado por equipos o conjuntos de equipos que puedan ser considerados como unidades indivisibles desde el punto de vista de la determinación de los requerimientos de mantenimiento (Cabrera Gómez, 2003).

Por tanto, el primer paso para llevar a cabo un plan de mejora de la confiabilidad operacional y poder aplicar uno de sus métodos de calidad es realizar un análisis de criticidad, en base al cual se seleccionarán los equipos que se incluirán dentro del plan (Altmann, 2009).

Los autores Noguera, Amendola, Depool, and Belisario (2010), explica que el análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, dirigiendo el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual.

Al respecto Vigo and Yañez (2021) señala que el análisis de criticidad “Es una técnica de fácil manejo y comprensión en el cual se establecen los rangos relativos para representar las probabilidades y/o frecuencias de ocurrencia de eventos y sus consecuencias”.

La norma internacional CEI/IEC 60300 - 3-11:1999 define la criticidad como un valor numérico que indica la severidad de un efecto, combinado con la probabilidad o frecuencia de ocurrencia esperada.

Por lo tanto, tal indicador deberá ser calculado, cuantificando de alguna manera, la combinación adecuada de los niveles de fallo con el impacto global que estos tengan para la organización y su entorno. Esta cuantificación puede llevarse a cabo en forma acertada a partir de la ponderación de los siguientes factores:

1. La frecuencia de fallos.
2. El impacto operacional, evaluado teniendo en cuenta el nivel productivo, el tiempo promedio para reparar, el impacto en la producción y el costo de la reparación.
3. El impacto en la seguridad de las personas.
4. El impacto en el medio ambiente.

Traduciendo estas ponderaciones a puntos, es que se consiguen los valores necesarios para combinarlos en una fórmula que relacione los factores antes mencionados (Ekpiwhre & Tee, 2018).

Siguiendo el procedimiento comentado, se organizan los activos procesados con criticidad descendente, de manera que se puedan hacer consideraciones acerca de los que presentan alta, media o baja criticidad.

Restaría tratar brevemente el tema de la información requerida para el análisis de la criticidad. Como sucede en tantas ocasiones, suelen faltar datos confiables que permitan hacer un estudio “con todas las de la ley”. Pero no hay que amilanarse, porque la ausencia o insuficiencia de información se puede superar echando mano a un elemento insustituible en cualquier programa de mejora: un equipo de trabajo multidisciplinario en el que participen expertos de las áreas involucradas, bajo la certera conducción de un facilitador bien entrenado para esta tarea (Gómez, 2003).

Estas consideraciones permiten dar respuestas a interrogantes de mayor relevancia en la toma de decisiones de cualquier compañía, como por ejemplo establecer que proceso, equipo o sistema es el más crítico del conjunto y que criterios deben utilizarse para

determinarlo, dado que el análisis de criticidad genera una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del sistema que se esté analizando.

Uno de los principales problemas de un proyecto de mejoramiento en la confiabilidad es saber identificar las áreas sobre las cuales se tendría un mayor impacto. Esto ha hecho que muchos proyectos de RCM hayan fracasado en industrias de procesos complejos. Se puede superar esta barrera mediante el uso de técnicas de análisis de criticidad (Durán, 1999).

Según Mendoza (2000) el análisis de criticidad es una metodología que permite establecer la jerarquía o prioridades de procesos, sistemas y equipos, creando una estructura que facilita la toma de decisiones acertadas y efectivas, direccionando el esfuerzo y los recursos en áreas donde sea más importante y/o necesario mejorar la confiabilidad operacional, basado en la realidad actual.

El mejoramiento de la confiabilidad operacional de cualquier instalación o de sus sistemas y componentes, está asociado con cuatro aspectos fundamentales: confiabilidad humana, confiabilidad del proceso, confiabilidad del diseño y la confiabilidad del mantenimiento. Lamentablemente, difícilmente se disponen de recursos ilimitados, tanto económicos como humanos, para poder mejorar al mismo tiempo, estos cuatro aspectos en todas las áreas de una empresa.

El análisis de criticidades genera una lista ponderada desde el elemento más crítico hasta el menos crítico del total del universo analizado, diferenciando tres zonas de clasificación: alta criticidad, mediana criticidad y baja criticidad. Una vez identificadas estas zonas, es mucho más fácil diseñar una estrategia, para realizar estudios o proyectos que mejoren la confiabilidad operacional, iniciando las aplicaciones en el conjunto de procesos o elementos que formen parte de la zona de alta criticidad.

Los criterios para realizar un análisis de criticidad están asociados con: seguridad, ambiente, producción, costos de operación y mantenimiento, rata de fallas y tiempo de reparación principalmente. Estos criterios se relacionan con una ecuación matemática, que genera puntuación para cada elemento evaluado.

La lista generada, resultado de un trabajo de equipo, permite nivelar y homologar criterios para establecer prioridades, y focalizar el esfuerzo que garantice el éxito maximizando la rentabilidad.

Debido a que el modelo de criticidad se ocupa de múltiples áreas de una organización, un análisis de criticidad debería ser un esfuerzo de toda la empresa. La inclusión de departamentos que se ocupan de operaciones, ingeniería, mantenimiento, compras y salud y seguridad garantiza que el análisis considere todas las funciones de la operación como un todo. Debe comprender que el riesgo se puede definir de manera diferente en varios equipos.

La jerarquía de activos define el número de elementos o componentes de una instalación y/o planta en agrupaciones secundarias que trabajan conjuntamente para alcanzar propósitos preestablecidos. La Figura 1 muestra el estilo de agrupación típica de una instalación, donde se observa que la jerarquía de los activos la constituyen grupos consecutivos (Mendoza, 2000).

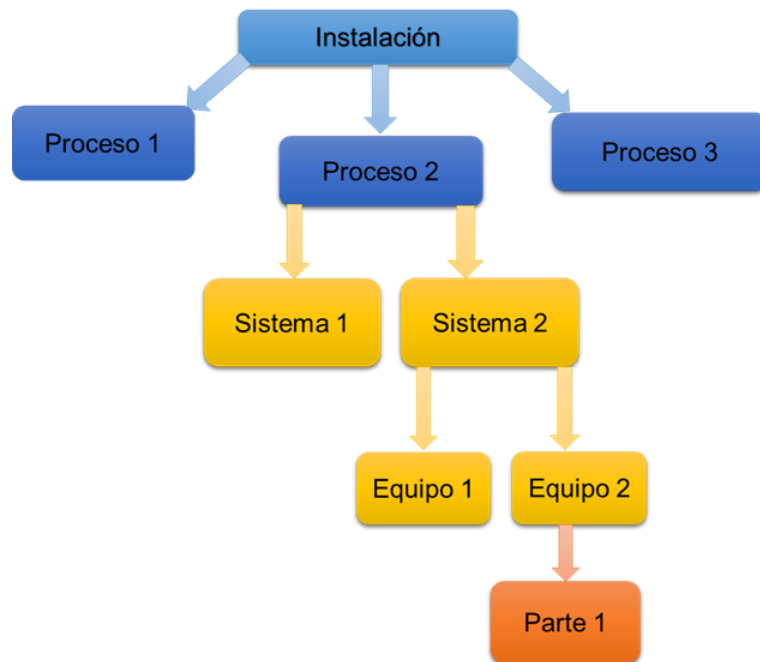


Figura 1. Agrupación típica de instalaciones. Fuente: (Mendoza, 2000).

Una planta compleja tiene asociada muchas unidades de proceso, y cada unidad de proceso podría contar con muchos sistemas, al tiempo que cada sistema tendría varios paquetes de equipos, y así sucesivamente. A medida que descendamos por la jerarquía, crecerá el número de elementos a ser considerados.

“Desde el punto de vista matemático la criticidad se puede expresar como: Criticidad es el producto de la frecuencia por consecuencia, donde la frecuencia está asociada al número de eventos o fallas que presenta el sistema o proceso evaluado en un período de tiempo y

la consecuencia está referida con: el impacto y flexibilidad operacional, los costos de reparación y los impactos en seguridad y ambiente” (Hourné-Calzada, Brito-Vallina, del Castillo-Serpa, Fraga-Guerra, & Díaz-Concepción, 2012).

Criticidad = Frecuencia x Consecuencia

Medición relativa de las consecuencias de un modo de fallo y su frecuencia de ocurrencia (Álvarez, 2008).

Característica (cálculo numérico determinista) de un sistema, que representa el impacto de la falla en cuanto a seguridad, ambiente o producción del proceso al cual pertenece; evalúa la flexibilidad operacional, costos de reparación-mantenimiento y confiabilidad. Esta característica puede ubicarse en bandas alta, media y baja” (Anders & Vaccaro, 2011)

La criticidad tiene una relación directa con los parámetros económicos de cualquier empresa y está basada en riesgo. La escasez actual de los recursos hace necesario lograr la mayor efectividad que permita dirigir los esfuerzos hacia aquellos puntos donde se logre una relación máxima entre los resultados obtenidos y los recursos utilizados.

El análisis de criticidad permite la identificación de esos puntos más críticos estableciendo un grado de jerarquía o prioridad de los activos de una empresa o planta. Un modelo básico de análisis de criticidad es equivalente al mostrado en la Figura 2.

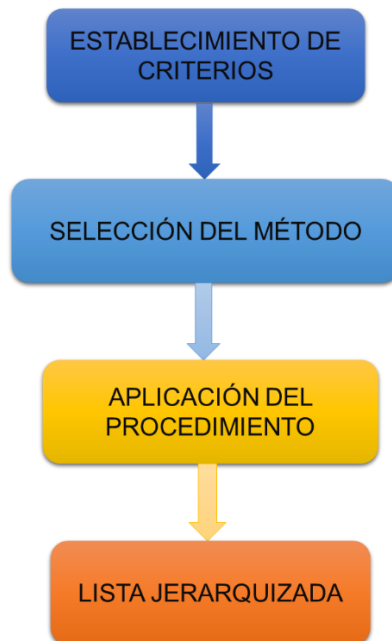


Figura 2. Modelo básico de criticidad. Fuente: (Mendoza, 2000).

1.5.1 ¿Cuándo se debe aplicar un Análisis de Criticidad?

Gotera (2000) plantea que emprender un análisis de criticidad tiene su máxima aplicabilidad cuando se han identificado al menos una de las siguientes necesidades:

- Fijar prioridades en sistemas complejos.
- Administrar recursos escasos.
- Crear valor.
- Determinar impacto en el negocio.
- Aplicar metodologías de confiabilidad operacional.

Mendoza (2000) plantea que al desarrollar un análisis de criticidad sus áreas comunes de aplicación se orientan a establecer programas de implantación y prioridades en los siguientes campos:

- Mantenimiento
- Inspección
- Materiales
- Disponibilidad de planta
- Personal

En el ámbito de mantenimiento

Al tener plenamente establecido cuales sistemas son más críticos, se podrá establecer de una manera más eficiente la priorización de los programas y planes de mantenimiento de tipo: predictivo, preventivo, correctivo, detectivo e inclusive posibles rediseños al nivel de procedimientos y modificaciones menores; inclusive permitirá establecer la prioridad para la programación y ejecución de órdenes de trabajo.

En el ámbito de inspección

El estudio de criticidad facilita y centraliza la implantación de un programa de inspección, dado que la lista jerarquizada indica donde vale la pena realizar inspecciones y ayuda en los criterios de selección de los intervalos y tipo de inspección requerida para sistemas de protección y control (presión, temperatura, nivel, velocidad, espesores, flujo, etc.), así como para equipos dinámicos, estáticos y estructurales.

En el ámbito de materiales

La criticidad de los sistemas ayuda a tomar decisiones más acertadas sobre el nivel de equipos y piezas de repuesto que deben existir en el almacén central, así como los requerimientos de partes, materiales y herramientas que deben estar disponibles en los

almacenes de planta, es decir, podemos sincerar el stock de materiales y repuestos de cada sistema y/o equipo logrando un costo óptimo de inventario.

En el ámbito de disponibilidad de planta

Los datos de criticidad permiten una orientación certera en la ejecución de proyectos, dado que es el mejor punto de partida para realizar estudios de inversión de capital y renovaciones en los procesos, sistemas o equipos de una instalación, basados en el área de mayor impacto total, que será aquella con el mayor nivel de criticidad.

A nivel del personal

Un buen estudio de criticidad permite potenciar el adiestramiento y desarrollo de habilidades en el personal, dado que se puede diseñar un plan de formación técnica, artesanal y de crecimiento personal, basado en las necesidades reales de la instalación, tomando en cuenta primero las áreas más críticas, que es donde se concentra las mejores oportunidades iniciales de mejora y de agregar el máximo valor.

El análisis histórico de la información relacionada con los estudios de criticidad permite conocer que:

- El análisis de criticidad se aplica en cualquier conjunto de procesos, plantas, sistemas, equipos y/o componentes que requieren ser jerarquizados en función de su impacto en el proceso o negocio donde formen parte. Sus áreas comunes de aplicación se encuentran en los siguientes campos: mantenimiento, inspección, materiales, disponibilidad de planta, personal (Zio & Pedroni, 2013), (Palencia, 2011), (Viveros et al., 2013).
- La criticidad tiene una relación directa con los parámetros económicos de cualquier empresa y está basada en riesgo. La escasez actual de los recursos hace necesario lograr la mayor efectividad que permita dirigir los esfuerzos hacia aquellos puntos donde se logre una relación máxima entre los resultados obtenidos y los recursos utilizados (Hourné-Calzada et al., 2012).
- Para realizar un análisis de criticidad se debe definir un alcance y propósito para el análisis, establecer los criterios de evaluación y seleccionar un método de evaluación para jerarquizar la selección de los sistemas objeto del análisis (Materán Linares, Rojas Monsalve, Hernández Mosqueda, & Gutiérrez Urdaneta, 2015).
- La técnica del análisis de criticidad tiene dos variantes en su aplicación, la primera como una aproximación cualitativa y la segunda de forma cuantitativa (Čepin,

2011), (Haarla, Koskinen, Hirvonen, & Labeau, 2011), (Kovacevic, Dvornik, & Dvornik, 2016).

- Es necesario contar con modelos contextualizados a los campos de investigación (Díaz & Benítez, 2012), (Watkins, Pruessner, Chapman, Crosby, & Jensen, 2016), (Toledo & Díaz, 1815).

1.6 Antecedentes

Los estudios e investigaciones realizadas por especialistas cubanos, quienes han aportado grandes resultados en cuanto a los antecedentes de búsqueda de análisis de criticidad en Grupos Electrógenos.

En el Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Eléctrico, titulado “Estudio de asimilación de demanda de los emplazamientos de Grupos Electrógenos Diesel”, el autor Arango Coira (2009), realiza un estudio de las características generales del emplazamiento de grupos electrógenos Diesel en la Subestación Banes 1, el autor aborda los aspectos teóricos prácticos fundamentales del funcionamiento en modo paralelo e isócrono y las acciones prácticas que se deben realizar en ambos casos, la potencia de generación y el flujo tecnológico de la instalación, además de sus características técnicas fundamentales.

El mismo deja plasmadas las características de demanda de los dos circuitos que se alimentan desde este emplazamiento, la potencia de distribución del mismo, así como las particularidades de los clientes que lo integran.

Por último, el autor analiza la selección de los grupos electrógenos que conforman la instalación, para evaluar si los presentes, son suficientes para satisfacer la demanda ante situaciones excepcionales.

En el artículo “ Análisis de Criticidad de Grupos Electrógenos de la tecnología fuel oil en Cuba” de los autores (Hourné-Calzada et al., 2012), los mismos estudian los diferentes modelos de criticidad y la posible factibilidad de su uso en el campo de investigación, identifican los sistemas y subsistemas que componen los grupos electrógenos, realizan un análisis documental de las fallas más frecuentes en que incurrir los sistemas y equipos de los grupos electrógenos, validan el modelo y finalmente clasifican los activos de acuerdo al índice de criticidad contra índice de complejidad. El artículo desarrolla un instrumento a partir del criterio de expertos para determinar las variables a considerar en el modelo de criticidad y complejidad, realizándose para los modelos un estudio de su

confiabilidad. El modelo que obtienen fue aplicado, proporcionando resultados satisfactorios.

“Análisis de criticidad en los sistemas mecánicos de los grupos electrógenos”, los autores Alfonso Padura et al. (2017), el objetivo que persiguió fue jerarquizar los sistemas mecánicos que componen los motores de combustión interna (MCI, en una central eléctrica, empleando un modelo de criticidad. Realizaron la jerarquización de los sistemas con ayuda del modelo de análisis de criticidad en los grupos electrógenos. Este modelo permitió mostrar una lista jerarquizada de todos los sistemas, que permitió dar un criterio de dirección de los recursos y mejorar la gestión del mantenimiento. Para aplicar este modelo, los autores recogieron todos los datos de los fallos de cada motor en un período de un año. Se obtuvo como resultado que los sistemas más críticos fueron los sistemas de inyección de combustible, admisión y gases de escape y enfriamiento del motor.

En la provincia de Holguín se pueden citar dos autores destacados, ellos son: Hidalgo (2007) con su tesis de maestría Análisis del Comportamiento de las Prestaciones en los Motores de Combustión Interna Estacionarios MTU Modelo 16V 4000 G81 y Batista and Proenza (2011) con su tesis de pregrado Estudio de la Fiabilidad de los Grupos Electrógenos 16V 4000 G81 del emplazamiento Holguín 220 kV.

1.7 Metodología para el análisis de criticidad (Método de Mendoza)

El método utilizado por Rosendo Huerta Mendoza para el desarrollo de un análisis de criticidad está basado exclusivamente en el conocimiento de los participantes, el cual será plasmado en una encuesta preferiblemente personal.

La condición ideal sería disponer de datos estadísticos de los sistemas a evaluar que sean bien precisos, lo cual permitiría cálculos “exactos y absolutos”. Sin embargo, desde el punto de vista práctico, dado que pocas veces se dispone de una data histórica de excelente calidad, el análisis de criticidad permite trabajar en rangos, es decir, establecer cuál sería la condición más favorable, así como la condición menos favorable de cada uno de los criterios a evaluar. La información requerida para el análisis siempre estará referida con la frecuencia de fallas y sus consecuencias (Mendoza, 2000).

La Figura 3 muestra el modelo estándar de encuesta, utilizado en PDVSA E & P Occidente para establecer la criticidad de sus sistemas. Los valores que aparecen registrados son un ejemplo de los pesos asignados a cada sistema, establecidos según rangos predeterminados (criterios de evaluación).

AREA		Propósito de este trabajo: La Información recolectada, servirá para estandarizar la priorización de trabajos asociados a confiabilidad y Priorizar ordenes de trabajo de mantenimiento y operaciones, proyectos y respuestas
PERSONA ENTREVISTADA		
FECHA		

Nivel de Prod. de la Instalación	4
----------------------------------	---

Sistem	Frecuencia de Falla (Peso)	Impacto Producción (Peso)	TPPR (Peso)	Costo de Reparación (Peso)	Impacto Seguridad (Peso)	Impacto Ambiente (Peso)	Criticidad
Sistema 1	4	6	2	5	0	0	212
Sistema 2	3	4	2	10	0	0	126
Sistema 3	1	8	2	5	35	30	134
Sistema 4	3	8	1	5	0	0	111
Sistema 5	1	6	1	25	0	0	49
Sistema 6	4	4	2	5	0	0	148
Sistema 7	3	8	2	5	0	0	207
Sistema 8	3	6	2	10	0	0	174
Sistema 9	3	4	1	5	0	0	63

Figura 3. Encuesta para el análisis de criticidad. Fuente: (Leyva, 2009).

La definición de cada criterio es:

Frecuencia de falla: son las veces que falla cualquier componente del sistema.

Impacto operacional: es el porcentaje de producción que se afecta cuando ocurre la falla.

Nivel de producción manejado: es la capacidad que se deja de producir cuando ocurre la falla.

Tiempo promedio para reparar: es el tiempo para reparar la falla.

Costo de reparación: costo de la falla

Impacto en seguridad: posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños a personas.

Impacto ambiental: posibilidad de ocurrencia de eventos no deseados con daños al ambiente.

La última columna corresponde con la criticidad (C), donde basados en la siguiente fórmula que relaciona la frecuencia de falla por su consecuencia, estimará un valor para cada sistema.

$$C = [(Niv_{prod} \cdot tppr \cdot imp_{prod}) + Costo_{rep} + imp_{seg} + imp_{amb}] \cdot Frec_{falla} \quad (1.1)$$

Esta fórmula permite sobre la base de los valores utilizados y plasmados en la encuesta definir una puntuación para cada sistema y realizar un ordenamiento descendente.

En la Figura 4 se muestra un estándar PDVSA, para dar la puntuación a cada uno de los criterios empleados en el análisis de criticidad.


 GERENCIA DE MANTENIMIENTO CONFIABILIDAD OPERACIONAL TABLA DE VALORES DE CRITICIDAD			
GUIA DE CRITICIDAD			
1.- FRECUENCIA DE FALLA (todo tipo de falla)	Puntaje		
.- No más 1 por	1		
.- Entre 2 y 12 por	3		
.- Entre 13 y 52 por	4		
.- Mas de 52 por año (Mas de 1 interrupción semanal)	6		
2.- IMPACTO OPERACIONAL			
2.1.- NIVEL DE PRODUCCIÓN (de la Instalación)	Puntaje		
CRUDO	GAS		
GABARRAS/OTR			
0 - 100 bbl / día	0 - 0.2 MMPCN / día	Menos de 10	1
101 - 1000 bbl / día	0.2 - 20 MMPCN / día	11 - 23	2
1001 - 5000 bbl / día	20 - 100 MMPCN / día	23 - 40	4
5001 - 10000 bbl / día	100 - 200 MMPCN / día	40 - 60	6
10001 - 20000 bbl / día	200 - 400 MMPCN / día	60 - 80	9
Mas de 20000 bbl / día	Mas de 400 MMPCN / día	80 - 100	12
2.2.- TIEMPO PROMEDIO PARA REPARAR (TPPR)		Puntaje	
Menos de 4		1	
Entre 4 y 8		2	
Entre 9 y 24		4	
Mas de 24 horas		6	
2.3.- IMPACTO EN PRODUCCIÓN (por falla)		Puntaje	
No Afecta		0.05	
25% de		0.30	
50% de		0.50	
75% de		0.80	
La Impacta Totalmente		1	
2.4.- COSTO DE REPARACION		Puntaje	
Menos de 25 MMBs		3	
Entre 25 - 50 MMBs		5	
Entre 51 - 100 MMBs		10	
Mas de 100 MMBs		25	
2.5.- IMPACTO EN LA SEGURIDAD PERSONAL (Cualquier tipo de daños, heridas, fatalidad)		Puntaje	
SI		35	
NO		0	
2.6.- IMPACTO AMBIENTAL (Daños a terceros, fuera de la instalación)		Puntaje	
SI		30	
NO		0	

Figura 4. Estándar PDVSA, para dar la puntuación a cada uno de los criterios empleados en el análisis de criticidad. Fuente: (Leyva, 2009).

Los valores de criticidad obtenidos serán ordenados de mayor a menor, y serán graficados utilizando diagramas de barra, lo cual permitirá de forma fácil visualizar la distribución descendente de los sistemas evaluados.

La distribución de barras, en la mayoría de los casos, permitirá establecer de forma fácil tres zonas específicas: alta criticidad, mediana criticidad y baja criticidad. Esta información es la que permite orientar la toma de decisiones, focalizando los esfuerzos en la zona de alta criticidad, donde se ubica la mejor oportunidad de agregar valor y aumentar la rentabilidad del negocio.

A continuación, la Figura 5 muestra el diagrama de barra correspondiente a los resultados mostrados en la Figura 3 para indicar las tres zonas que caracterizan un análisis de criticidad.

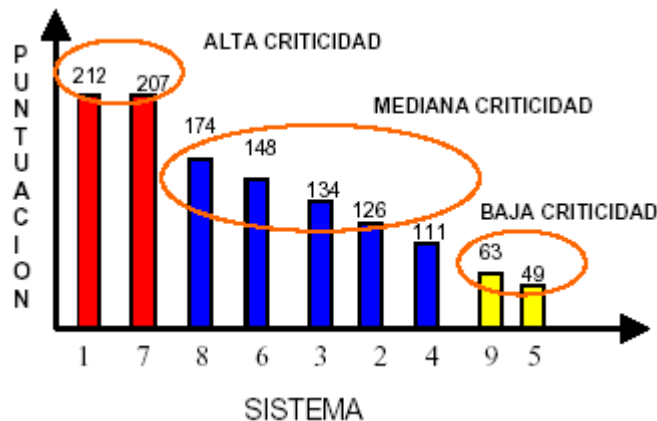


Figura 5. Gráficos de resultados de un análisis de criticidad. Fuente: (Leyva, 2009).

El uso del análisis de criticidad permite la toma de decisiones acertadas y adicionalmente se encuentran otros beneficios por re direccionar el presupuesto en áreas de mayor rentabilidad para la empresa (Mendoza, 2000).

El objetivo fundamental de esta tarea es la identificación de los componentes que se consideran críticos para el adecuado funcionamiento del sistema en cuestión. La catalogación de un componente como crítico supondrá la exigencia de establecer alguna tarea eficiente de mantenimiento preventivo que permita atajar sus posibles causas de fallo (Gotera, 2000).

1.8 Metodología para el análisis de criticidad (Método de Batista)

La metodología que a continuación se propone, fue concebida para aplicarla en la empresa Rene Ramos Latour. Siendo la causa fundamental la no existencia de datos tales como: la frecuencia de los fallos, elemento primordial en la metodología de Mendoza.

Para el análisis de criticidad de los sistemas y subsistemas que intervienen en el flujo productivo de la empresa, se propone utilizar la combinación de dos conocidas herramientas del mantenimiento proactivo, el FMEA y CA, los cuales se combinan en las siglas FMECA (Análisis de Modos de fallos y sus efectos y criticidad), las cuales son herramientas utilizadas en el Mantenimiento Centrado en la Confiabilidad (RCM).

Metodología a utilizar para establecer la criticidad de los sistemas y subsistemas que intervienen en el flujo productivo.

- 1) Reunir la documentación gráfica necesaria que permita al grupo de trabajo tener una absoluta seguridad del flujo productivo, en caso de ser necesario se visitaran las plantas y se levantarán los croquis necesarios.
- 2) Conocido el flujo productivo se identificarán los sistemas o subsistemas que definen por su capacidad productiva los volúmenes de producción (cuellos de botella).
- 3) A partir de la información anterior se definirán los sistemas que participan en el flujo productivo.
- 4) Se entenderá por sistema aquel conjunto de máquinas, instalaciones, equipos, y o elementos de máquinas que en su operación contribuyen a que el sistema realice la función para la cual fue concebido, ya sean primarias, secundarias, de seguridad o superfluas. En otras palabras, se establecerá con claridad cuáles son los subsistemas que pertenecen al sistema definido.
- 5) Para cada uno de los sistemas definido se conocerá con claridad cuál es su función primaria, a partir de lo cual se podrá tener claridad de los diferentes modos de fallos.
- 6) Los sistemas identificados se clasificarán en tres grandes grupos:
 - S. Los que su función primaria es de seguridad.
 - A. Los que su función primaria es de apoyo o aseguramiento de otros sistemas.
 - P. Los que su función primaria está relacionada con la producción de la empresa, planta o línea de producción.
- 7) Para cada sistema identificado del grupo P se establecerán un conjunto de criterios para evaluar su criticidad dentro del macro sistema al que pertenecen.

8) Los criterios generales a utilizar para el grupo P serán:

- a) Gravedad del posible fallo funcional (respecto a la capacidad productiva inherente del sistema o subsistema analizado)
- b) Grado de Conectividad del sistema al flujo productivo necesario para un período de tiempo analizado.
- c) Gravedad e impacto de las consecuencias de los fallos.
- d) Valor actual del sistema afectado por el fallo.

Cada uno de los criterios a utilizar serán ponderados de forma única para poder realizar los cálculos como se propone a continuación.

a) La gravedad del posible fallo funcional estará dada por:

A. Severidad del fallo.

1-10. desde una poca afectación (Calidad y/o volumen) hasta la paralización del flujo productivo

B. Tiempo para restablecer la capacidad operacional antes de ocurrir el fallo en una escala de 0 hasta 10, siendo la escala de 10 el que identifica el mayor tiempo posible de restablecimiento.

C. Gastos para restablecer la capacidad operacional antes de ocurrir el fallo en una escala de 0 hasta 10, siendo la escala de 10 el que identifica el mayor gasto posible de restablecimiento.

El cálculo de la gravedad del fallo funcional se realizará con ayuda de la expresión siguiente

$$G_F = A \cdot (B + C)$$

(1.2)

b) El Grado de Conectividad del sistema analizado respecto al flujo productivo para un período de tiempo dado se ponderará de la manera siguiente.

10. Sistema único sin respaldo de intercambiabilidad disponible en la empresa.

2-9. Sistema único con respaldo de intercambiabilidad disponible en la empresa.

1. Sistema duplicado.

0.1 Sistema triplicado o más.

c) La Gravedad e impacto de la consecuencia de los fallos serán ponderados de la manera siguiente:

A. Afectación humana

1-1 000. Lesiones de leves, graves y fatal

B. Afectación al medio ambiente

1-1 000. de baja a Alta

C. Capacidad destructiva de los sistemas adyacentes

1-10. De baja a Alta

D. Capacidad autodestructiva del propio sistema

1-10. de baja a alta

La gravedad e impacto de la consecuencia de los fallos se calculará por la expresión

$$G_C = A + B + C(V_a) + D(V_a)$$

(1.3)

Valor actual del sistema afectado por el fallo en una escala de 1 hasta 100, siendo la escala de 100 el que identifica el mayor valor posible.

9. La criticidad del sistema analizado se calculará por la expresión siguiente

$$C = \text{GradoConctividad}(G_F + G_C) \quad (1.4)$$

10. Los sistemas con mayor criticidad serán aquellos que obtengan la mayor puntuación.

11. A partir del conjunto de valores de puntos obtenidos por los diferentes sistemas y subsistemas se establecerán tantos grupos de criticidad como se entienda, siendo los de mayor criticidad los que acumulen mayor cantidad de puntos.

12. Los sistemas del grupo A que son subsistemas de apoyo o aseguramiento de los sistemas del grupo P su criticidad se establecerá de la forma siguiente:

- ❖ Si el subsistema de apoyo o aseguramiento del grupo A es único para el sistema del tipo P tendrá la misma criticidad que tiene el sistema del grupo P.
- ❖ En caso que el subsistema de apoyo o aseguramiento del grupo A sea común para varios sistemas del grupo P tendrá la misma criticidad que la más alta que tiene cualquiera de los sistemas del grupo P que le presta apoyo o aseguramiento.

13. Los sistemas del grupo S que son aquellos que su función primaria es de seguridad se establece su criticidad de la manera siguiente:

- ❖ Si su función de seguridad es garantizar la integridad de personas su criticidad será igual a la de mayor jerarquía en toda la empresa.

- ❖ Si función de seguridad es evitar la afectación medio ambiental o de protección física (destrucción) del sistema al cual le brinda el servicio, tendrá la misma criticidad que el sistema del grupo P al cual protege.

1.9 Diagrama de Pareto

El análisis de Pareto se basa en determinar las pequeñas cantidades de causas, lo que muestra como resultado una gran cantidad de fallas. Para ello, las causas están representadas por sus motivos y en orden de porcentajes de fracaso.

1.9.1 Principio del Diagrama de Pareto

El llamado Principio de Pareto establece que en muchos fenómenos o procesos cada ocurrencia de un determinado efecto E se debe a uno y solo de los factores o causas r, de los cuales solo unos pocos son responsables de la gran mayoría del tiempo en que ocurre el efecto. Se produce el efecto E; este grupo de factores se denominan los pocos vitales, mientras que el resto se denominan los muchos triviales en la incidencia de la ocurrencia del efecto E.

El principio de Pareto no se aplica a la ocurrencia de ningún efecto E. Un criterio práctico para considerar aplicable el principio de Pareto es que aproximadamente el 20% de los factores representan aproximadamente el 80 % de la frecuencia de ocurrencia del efecto E.

1.9.2 Utilidad del diagrama de Pareto

- Identificar y focalizar esfuerzos en puntos clave de un problema o fenómeno tales como: los mayores consumidores de energía en la planta, las mayores pérdidas de energía o los mayores costos de energía.
- Predecir la efectividad de una mejora conociendo la influencia de disminuir un efecto al reducir la barra de causa raíz que lo produce.
- Determinar la efectividad de una mejora comparando diagramas de Pareto antes y después de la mejora (Batista, Paneque, & Fernández, 2016).

El diagrama de Pareto se utiliza para definir los rangos de alta, mediana y baja criticidad de los subsistemas analizados.

Luego de profundizar en los diferentes tipos de análisis criticidad, se opta por los métodos de Batista y el diagrama de Pareto para verificar la criticidad del equipo, debido a que en la UEB Geysel no se encuentran registrados los datos de la frecuencia de fallos de los subsistemas. Con el Método de Batista se identifican los subsistemas que tienen mayor

peso o importancia dentro de un proceso, y así enfoca y dirige los esfuerzos hacia un objetivo prioritario común.

Capítulo II. Análisis de criticidad de los subsistemas de los Grupos Electrógenos

Introducción al Capítulo II

Uno de los cambios conceptuales inherentes a la Revolución Energética radica en el establecimiento de un nuevo esquema de generación eléctrica (La Generación Distribuida por todo el país). Esta se basa en la instalación de baterías, dispersas a lo largo de todo el territorio nacional, y sincronizados al SEN. Los niveles de generación son inferiores a los de las termoeléctricas, por lo que, la salida de funcionamiento de alguno de ellos no crearía nunca una crisis como la ocurrida en el 2004 (Planche, 2008).

Como parte de la Revolución Energética, en una 1^{ra} etapa se instalaron grupos electrógenos, de alta calidad y eficiencia. En menos de dos años de intenso trabajo, se instalaron más de 1 400 MW que son generados de forma distribuida por Grupos Electrógenos Diesel MTU en 116 de los 156 municipios del país, además de los instalados en puestos claves como hospitales y fábricas. Posteriormente se dio paso a la 2^{da} etapa del proceso con la instalación de grupos de mayores potencias de fuel oil, tecnologías HYUNDAI y MAN, hasta cubrir una capacidad instalada de alrededor 1 752 MW (Arango, 2012).

El objetivo de este capítulo es aplicar la metodología propuesta por Batista para determinar el subsistema más crítico de los Grupos Electrógenos MTU serie 4 000 16V G81 perteneciente al emplazamiento Holguín 220 kV.

2.1 Caracterización de los grupos electrógenos

Los grupos electrógenos que se instalaron en la provincia de Holguín pertenecen a la familia de grupos electrógenos de gran rendimiento, para proporcionar energía en el momento en que se instalan.

2.1.1 Descripción y localización

El emplazamiento Holguín 220 kV se encuentra ubicado en: carretera central vía Bayamo, constan con 4 Baterías con múltiplos de 8 unidades de generación en paralelo de 2 360 kVA de potencia cada uno. Esta subestación tiene además transformadores trifásicos a la salida de cada GE con una potencia de 2 500 kVA conectados al Contenedor de media tensión de 13.8 kVA (Figura 9).

2.1.2 Estación de combustible

En su proceso tecnológico intervienen dos tanques para la recepción del Diesel, de capacidad 100 m³, el cual llega a Holguín 220 kV por medio de carros cisternas, este es

succionado de la paila por una bomba, después es impulsado por los impelentes de la bomba receptora hacia dos tanques de operación de capacidad de 100 m³, con el combustible Diesel previamente centrifugado, lo que permite el llenado del tanque.

Este combustible llega a la succión de la bomba eléctrica (y una bomba manual para caso de avería) que se encuentran en cada una de las unidades generadoras, las mismas tienen un sistema automático para cuando el nivel de estos tanques está al 40% de su capacidad, arranquen automáticamente pasando el combustible a cada motor de combustión interna Diesel.

2.1.3 Descripción Técnica del GED (MTU, 2006)

Los equipos electrógenos que se encuentra instalados en Baterías de la marca alemana MTU serie 4 000 16V G81 están designados para suministrar corriente eléctrica al Sistema Electroenergético Nacional, ya sea alimentando a una parte del sistema, o suministrando a toda la red nacional.

Significado de la denominación del equipo MTU 4 000 16V G81

- 4 000: número de la serie.
- 16V: cantidad de cilindros que tiene el motor y la letra V: la disposición que tienen en el motor.
- G: aplicación para *Generator Sets* (Grupo Electrógenos).
- El número “8”, es el segmento de aplicación.
- El número “1”, es la versión del modelo, para este GED es la segunda versión.

Los GE están compuestos principalmente por

- Motor de Combustión Interna Diesel, con sus sistemas de combustible, lubricante, aire de admisión y agua de enfriamiento. El motor Diesel es el equipo encargado de producir energía mecánica.
- Generador Eléctrico. El Generador es el que transforma la energía mecánica producida en el motor en energía eléctrica.
- Sistema de Control. Este sistema es el que se encarga del control automático de todo el proceso en el conjunto Motor – Generador.

2.1.4 Motores de la serie 4 000

Estos motores son compactos, potentes, fiables, de escaso mantenimiento y extraordinariamente económicos. Su inyección *Common-Rail* conjuga el aprovechamiento

óptimo del combustible con el cumplimiento de todas las normas medioambientales relevantes.



Figura 6. Motor MTU serie 4 000 16V G81. Fuente: (MTU, 2006).

Datos técnicos del Motor Diesel

- Denominación del motor 16V 4 000 G81, marca MTU, Alemania.
- Número de cilindros 16
- Temperatura del aire de aspiración. 25°C
- Temperatura del líquido refrigerante del aire de carga 55°C
- Presión barométrica 1 000 mbar
- Número de revoluciones nominal del motor 1 800 rpm
- Potencia continua, con sobrecarga de un 10 % de la potencia de diseño 1 990 kW
- Consumo de Lubricantes 0.5% del consumo de combustible por hora.
- Motor levógiro
- Inyección *Common-Rail* controlada electrónicamente
- Turbosobrealimentación por gases de escape con refrigeración del aire de carga
- Sistema de refrigeración de dos circuitos con refrigeración del aire de carga por agua
- Refrigeración de pistones
- Arrancador eléctrico o motor de arranque por aire comprimido (opcional)
- Soportado elástico del motor

Peso del Motor

- Peso del motor, es un valor de referencia 6 950 kg

2.1.5 Sistema de gestión electrónica del motor (*Engine Control Unit*)

Sistema de gestión electrónica del motor o regulación del motor, el control del sistema de inyección *Common-Rail* y de los valores más importantes del motor son las tareas principales de la *Engine Control Unit* (ECU). Todos los sensores y elementos de regulación van conectados directamente a la ECU. Se controla el fallo de los sensores, su funcionamiento y las roturas de cables.

2.1.6 Generador

Un alternador o generador sincrónico es una máquina eléctrica giratoria diseñada para convertir la energía mecánica rotatoria en energía eléctrica de corriente alterna (CA).



Figura 7. Generador sincrónico Marrelli. Fuente: (MTU, 2006).

Datos técnicos del Generador

- Tipo MJB 500 MB 4, marca Marrelli de fabricación italiana.
- Generador sincrónico trifásico.
- Cantidad de polos 4 polos
- Temperatura ambiente 40°C
- Factor de potencia 0.8

- Frecuencia 60 Hz
- Voltaje 480 V
- Potencia 2 360 kVA
- Eficiencia 96.1 %

2.1.7 Tablero de control

Este tablero indica muchas de las funciones a desarrollar, recibe los datos del ECU, por lo que un problema en el tablero, puede llevar a que no se pueda encender el grupo electrógeno (el equipo trata de protegerse o de proteger al entorno).



Figura 8. Tablero de control del motor.

2.1.8 Contenedor de media tensión

Los 32 GE que se encuentran en el empalme Holguín 220 kV, le entregan al transformador (TF) 480 V y aumenta la tensión a 13.4 kV, estas tensiones se reciben en el contenedor de media tensión encargado de elevar la tensión hasta 34.5 kV, además cuenta cada GE con un sistema de Control Automático del Generador (*Automatic Generator Control AGC*) que supervisa y monitorea el GE. El Contenedor de Media Tensión es el encargado a través del software SCADA de recoger los datos de los ocho motogeneradores conectados a él.

El contenedor de media tensión tiene 12 192 mm de largo, 2 430 mm de ancho y 2 591 de alto y se representa en la figura siguiente:

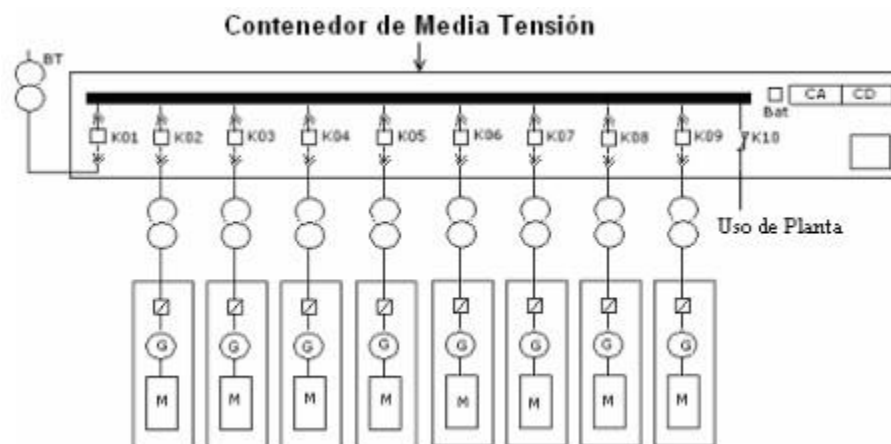


Figura 9. Contenedor de media tensión. Fuente: (MTU, 2006).

Composición del contenedor de media tensión

- 10 celdas similares de 13.8 kV, rotuladas desde K01 hasta K10.
- Sistema trifásico de barras que corren por la parte posterior de las celdas sin peligro de contacto eléctrico para el personal de operaciones.
- Panel de corriente directa (CD).
- Panel de corriente alterna (CA).
- Puesto de trabajo del operador con una computadora con el MVision (Software SCADA).
- Batería portátil para el cierre por emergencia de los interruptores.
- Salida en forma de persiana para la sobrepresión.
- Conducto de evacuación de gases encima de las celdas.

- Dos equipos de climatización.

2.2 Sistemas y subsistemas en los grupos electrógenos

El grupo electrógeno está constituido por un motor de combustión interna, un generador, estos son comandados por circuitos eléctricos que conjuntamente con los sensores mantienen el mando y control estricto de cada acción llevada a cabo por la máquina. Estas acciones son ejecutadas por componentes mecánicos o subsistemas que se muestra a continuación en la Figura 10.

Partiendo del GE como sistema, entonces el mismo está formado por varios subsistemas en los que se encuentran una serie de mecanismos que podrían llamarse subsistemas secundarios formados por elementos y pares cinemáticos que a su vez forman subsistemas de tercer nivel donde se encuentran en este caso las piezas y accesorios.

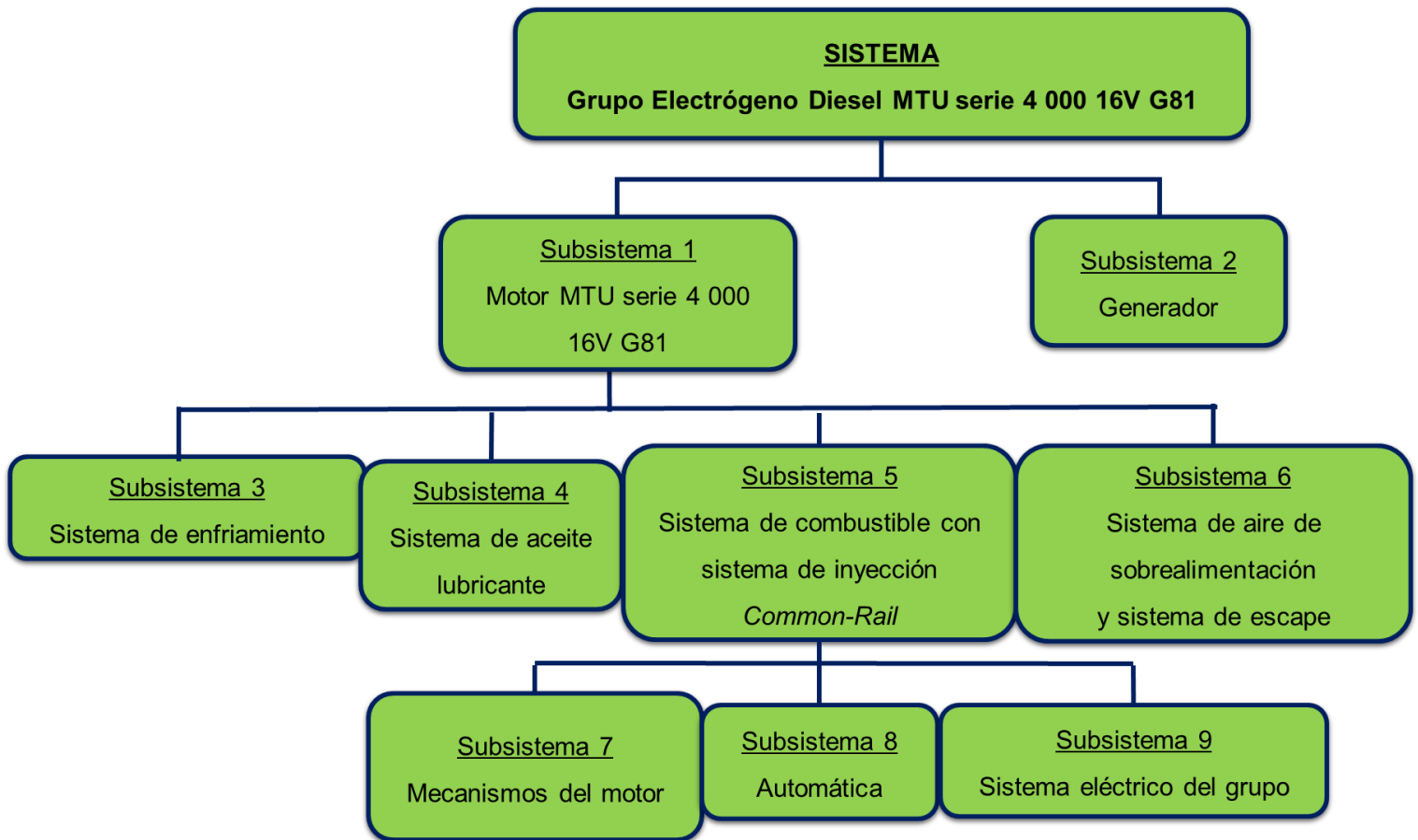


Figura 10. Representación gráfica de los subsistemas principales que componen el GE.

Descripción de los subsistemas

En los 32 Motores de Combustión Interna (MCI), se quema el combustible a través de los procesos del ciclo de trabajo de los MCI: admisión, compresión, explosión o fuerza y escape, el combustible (Diesel) que se quema se convierte en energía mecánica útil, para generar una potencia nominal de 1 990 kW. Estos motores Diesel son estacionarios, de cuatro tiempos, con 16 cilindros. Poseen un sistema de enfriamiento con aire y con líquido refrigerante.

Tienen además un sistema de regulación: que controla el motor, vigila los estados operativos, la velocidad de rotación en dependencia del estado operativo), y visualiza los estados de funcionamiento erróneos (códigos de fallo), además de tener un sistema de inducción o aspiración que suministra aire limpio al motor a la temperatura y cantidad correcta, cuenta también con un sistema de lubricación que reduce la fricción entre las partes móviles del motor, y un sistema para el combustible que lo regula y transporta en tiempo y con suficiente presión a la cámara de combustible de cada cilindro.

2.2.1 Sistema de enfriamiento

El motor es refrigerado mediante dos circuitos separados, el circuito de líquido refrigerante del motor y el circuito de líquido refrigerante del aire de sobrealimentación. El líquido refrigerante caliente se refrigera de nuevo en un radiador de refrigeración de retorno del líquido refrigerante.

Funcionamiento

Circuito de líquido refrigerante del motor (alta temperatura, HT)

La bomba del líquido refrigerante montada en el motor bombea el refrigerante a través del motor. El mismo fluye a través de las cámaras de líquido refrigerante del bloque motor, rodea las camisas de cilindro y penetra en la culata. Desde allí pasa por las cámaras de líquido refrigerante y los orificios de líquido refrigerante de las culatas. El refrigerante llega hasta el regulador de temperatura a través de las tuberías colectoras de líquido refrigerante.

Una parte del refrigerante se separa antes del regulador de temperatura y refluye a través de un diafragma directamente hasta la bomba del líquido refrigerante.

El regulador de temperatura impulsa en función de la temperatura una parte del líquido refrigerante a través del radiador de refrigeración de retorno del líquido refrigerante del motor. A continuación, el líquido refrigerante fluye a lo largo del intercambiador de calor del aceite lubricante antes de llegar de nuevo a la bomba de líquido refrigerante del motor.

El depósito de expansión del líquido refrigerante está montado en el punto más alto del sistema de refrigeración. Permite obtener una compensación de la presión y el volumen del líquido refrigerante y va unido al circuito mediante una tubería de expansión y de purga de aire. El motor va equipado por regla general con un dispositivo de precalentamiento de líquido refrigerante. En el punto más bajo del circuito del líquido refrigerante van montados tornillos de vaciado.

Circuito de líquido refrigerante del aire de sobrealimentación (baja temperatura, NT)

La bomba del líquido refrigerante del aire de sobrealimentación bombea el líquido refrigerante del aire de sobrealimentación hacia el refrigerador del aire de sobrealimentación. El líquido refrigerante del aire de sobrealimentación llega hasta el regulador de temperatura a través del refrigerador del aire de sobrealimentación. El regulador envía el líquido refrigerante del aire de sobrealimentación directamente a la bomba del líquido refrigerante del aire de sobrealimentación con el motor frío. Con el motor a temperatura de servicio se dirige el líquido refrigerante del aire de sobrealimentación a través del radiador de refrigeración de retorno del líquido refrigerante del motor hasta la bomba del líquido refrigerante del aire de sobrealimentación.

En el lugar más alto del sistema de refrigeración va montado un depósito de expansión del agua de refrigeración, el cual va unido al circuito mediante una tubería de purga de aire y de expansión. En el punto más bajo del circuito del líquido refrigerante van montados tornillos de vaciado.

2.2.2 Sistema de aceite lubricante

Funcionamiento

La bomba de aceite de motor aspira el aceite a través de una alcachofa del cárter de aceite, impulsándolo al intercambiador de calor de aceite de motor a través de un conducto de unión. En caso de filtros centrífugos de aceite adosados, parte del aceite refrigerado pasa por los mismos. Purifican (centrifugan) el aceite. El aceite purificado retorna, sin presión, al cárter de aceite.

La corriente principal del aceite pasa a través de cuatro filtros de aceite de motor directamente a los puntos de engrase existentes en el motor y al canal principal de aceite.

Son abastecidos directamente:

- Amortiguador de vibraciones
- Cojinete de apoyo del cigüeñal

- Cojinetes de biela
- Toberas de inyección de la refrigeración de pistones

A través del canal principal de aceite son abastecidos:

- Cojinetes principales del cigüeñal
- Culata
- Cojinete de apoyo del cigüeñal
- Cojinetes del árbol de leva
- Rodamientos de los turbosobrealimentadores
- Cojinetes axiales del árbol de levas

La bomba de aceite de motor es una bomba de engranajes accionada por el cigüeñal a través de una rueda dentada intermedia. Una válvula de sobrepresión la protege de una presión de aceite excesiva. Una válvula de descarga regula la presión de aceite independientemente del número de revoluciones del motor. Las válvulas presostatos abastecen las toberas de inyección para la refrigeración de los pistones sólo a partir de una presión mínima de aceite. De esta forma aseguran la lubricación del mecanismo en la gama de revoluciones inferior.

2.2.3 Sistema de combustible con inyección *Common-Rail*

El sistema de combustible consta de un sistema de baja presión y otro de alta presión (sistema *Common Rail*). Mediante el sistema de inyección Common Rail son controlados por la electrónica del motor, la presión de inyección, el momento de inyección y la cantidad de inyección, independientemente del número de revoluciones del motor. Presiones de inyección de hasta 1.4 bar (1 400 kPa) se encargan de unas condiciones óptimas de inyección de combustible y combustión.

Funcionamiento

Accionada por un arrastrador de la bomba de alta presión de combustible, la bomba de alimentación de combustible aspira el combustible del depósito, impeliéndolo a través del filtro doble de combustible a la bomba de alta presión. Esta aumenta la presión a hasta 1.4 bar (1 400 kPa), impeliendo el combustible al *Common-Rail*. El Common Rail acumula la presión, repartiendo el combustible, a través de los conductos de alta presión, a las distintas válvulas de inyección.

El tiempo y la cantidad de inyección son determinados por las válvulas electromagnéticas incorporadas a las válvulas de inyección, todo controlado por la electrónica del motor. El

combustible inyectado por las válvulas de inyección es distribuido óptimamente en la cámara de combustión.

El combustible sobrante pasa a través del conducto de retorno al filtro doble de combustible. Desde allí retorna al depósito junto con el combustible sobrante del conducto de retorno de la bomba de alta presión de combustible. Para purga de aire del sistema de baja presión de combustible va montada una bomba.

2.2.4 Sistema de aire de sobrealimentación y sistema de escape

Los componentes del sistema de aire de carga y de escape están montados en el lado de accionamiento y en el motor. Las exigencias elevadas planteadas a la potencia y el comportamiento de aceleración de dichos motores requieren campos característicos anchos del motor. Por el perfeccionamiento consecuente del sistema de sobrealimentación y escape se obtiene un comportamiento del par de los motores que cumple dichos requerimientos.

Funcionamiento

Sistema de escape

Los gases de escape fluyen desde las cámaras de combustión a los turbocompresores por gases de escape a través de las tuberías colectoras de gases de escape. Los gases de escape introducidos en la carcasa de la turbina impulsan la rueda de la turbina del grupo de rotores y se conducen al exterior a través del guiado de gases de escape.

Sistema de aire de sobrealimentación

La rueda de la turbina y la rueda de álabes del compresor asientan en un eje. La rueda de álabes del compresor aspira el aire del filtro seco de aire a través de una tubería de aspiración y lo comprime. El aire comprimido fluye a través del refrigerador del aire de sobrealimentación y los tubos de alimentación de aire hacia los conductos de admisión de las culatas.

El refrigerador del aire de sobrealimentación:

- Precalienta el aire de sobrealimentación en el margen de baja carga,
- Refrigerera el aire de sobrealimentación en funcionamiento bajo carga.

Con ello se obtiene un comportamiento de funcionamiento óptimo del motor.

2.2.5 Mecanismos del motor

En los mecanismos del motor se encuentran los siguientes subsistemas

Engranaje de distribución

En el engranaje de distribución con la rueda dentada del cigüeñal se acciona la rueda dentada del árbol de levas, y se accionan mediante ruedas dentadas intermedias los siguientes grupos auxiliares:

Bomba de alta presión de combustible, bomba de alimentación de combustible, bomba de aceite del motor, bomba del líquido refrigerante del circuito de baja temperatura, bomba del líquido refrigerante del circuito de alta temperatura, alternador, grupo adicional.

Grupo propulsor

Las fuerzas generadas en las cámaras de combustión de los cilindros son transmitidas, a través de pistones y bielas, al cigüeñal, siendo convertidas en movimiento rotatorio, y entregadas a través de la brida de accionamiento. Las vibraciones torsionales son amortiguadas hidráulicamente por el amortiguador de vibraciones. Una rueda dentada encajada a presión en el extremo acciona las ruedas intermedias y motrices del tren de engranajes.

El sistema de aceite lubricante se encarga de la lubricación de los cojinetes del cigüeñal, de los cojinetes de apoyo, de los semicojinetes de biela inferior y superior, así como del amortiguador de vibraciones. Los pistones son enfriados de forma permanente con aceite por las toberas de inyección incorporadas al bloque motor.

Culta y distribución por válvulas

Con las válvulas de admisión abiertas, el aire de carga pasa a la cámara de combustión del cilindro correspondiente. Al ser inyectado combustible por la válvula de inyección se produce una mezcla de aire/combustible en la cámara de combustión que se auto enciende por la compresión. Una vez abiertas las válvulas de escape, los gases de escape producidos en la combustión son conducidos, a través del canal de escape, al colector de escape que va a los turbosobrealimentadores por gases de escape. La apertura y el cierre de las válvulas de admisión y escape tienen lugar por la distribución por válvulas.

Distribución por válvulas

La apertura y el cierre de las válvulas de admisión y escape son controlados por el árbol de levas. Movimientos impulsados por las levas del árbol de levas para accionamiento de las válvulas son transmitidos, a través de las palancas oscilantes, los empujadores y los balancines a los puentes de válvulas de las válvulas de admisión y escape. La apertura de las válvulas tiene lugar contra la fuerza del resorte y el cierre por la presión de los resortes de válvula.

2.2.6 Automática

La vigilancia del motor garantiza la disponibilidad de servicio y la larga vida útil del motor. El momento de inyección, la duración de inyección y la cantidad de inyección resultante son calculados de nuevo para cada ignición y para cada cilindro. Esto garantiza un consumo favorable, gases de escape mínimos y una potencia máxima.

Unidad de control del motor ECU (*Engine Control Unit*)



Figura 11. *Engine Control Unit* (Unidad de Control del Motor).

Se encarga de regular:

- Número de revoluciones (en función de las prescripciones)
- Inyección (presión del combustible, momento de inyección, duración de la inyección, estado de servicio)

Se encarga de controlar:

- Número de revoluciones del motor, número excesivo de revoluciones, presión del aceite lubricante, temperatura del líquido refrigerante, del aceite lubricante, del aire de sobrealimentación, del líquido refrigerante del aire de sobrealimentación.
- nivel del líquido refrigerante.

Se encarga además de realizar paradas de emergencia mediante el sistema de protección del motor.

2.2.7 Sistema eléctrico del grupo

El sistema eléctrico del motor está constituido por interruptor de salida, barras y cables 480 V, magnetos térmicos, contactores, panel eléctrico, bornera, fusibles y portafusiles, cargador de baterías del grupo, alternador de las baterías, baterías, motor de arranque, conmutador de corriente y cableado de fuerza CD.

2.2.8 Generador

Principio de funcionamiento del generador sincrónico

La transformación de la energía mecánica a eléctrica ocurre en los 32 generadores que componen las Baterías, los cuales son sincrónicos, trifásicos, tetrapolares. El rotor de cada una de estas máquinas está directamente acoplado al eje de los MCI, por lo que gira a la misma velocidad que estos, es decir, a 1 800 rpm. Tiene un sistema de enfriamiento por aire, además de tener un sistema autoexcitado que mantiene una excitación constante en dependencia de la demanda de la carga.

Están asegurados por protecciones que garantizan la seguridad de estos. Una vez garantizado la velocidad sincrónica y teniendo como referencia el voltaje, frecuencia, y la secuencia de fase, los generadores se sincronizan (presentan dos modos de sincronización en paralelo o en isla) cerrando el interruptor que lo enlaza al transformador de 13.8 kV.

El principio de funcionamiento del generador sincrónico se basa en la inducción electromagnética el cual plantea, que, si se hace mover un conductor en un campo magnético de manera tal que este corte las líneas de flujo, en el mismo se inducirá una

fuerza electromagnética (FEM). De igual manera ocurriría si el conductor se encuentra fijo y se mueve un campo magnético sobre él.

2.3. Determinación de la criticidad de los sistemas existentes en los grupos electrógenos

Cumplimiento de la metodología a utilizar para establecer la criticidad de los sistemas que intervienen en el flujo productivo del GE.

1. Reunir la documentación gráfica necesaria que permita tener una absoluta seguridad del flujo de generación de los GE.

Para dar cumplimiento a este paso, fue necesario revisar toda la documentación técnico existente del GED, además fue posible comprender mejor el flujo productivo del equipo gracias a las visitas realizadas al emplazamiento Holguín 220 kV.

2. Conocido el flujo productivo se identificarán los sistemas o subsistemas que definen por su capacidad productiva los volúmenes de producción (cuellos de botella).

Se definen como subsistemas de mayor impacto en la capacidad productiva de la máquina los siguientes:

- a) Sistema de enfriamiento
- b) Sistema de aceite lubricante
- c) Sistema de combustible con sistema de inyección *Common-Rail*
- d) Sistema de aire de sobrealimentación y sistema de escape
- e) Mecanismos del motor
- f) Automática
- g) Sistema eléctrico del grupo
- h) Generador

3. A partir de la información anterior se definirán los subsistemas que participan en el flujo productivo.

Es necesario aclarar que los Grupos Electrógenos son máquinas de extrema complejidad, las cuales funcionan como un todo. Esta característica dificulta escoger los subsistemas que intervienen en su flujo productivo. Si uno de ellos no está operando dentro de los límites establecidos, la calidad del proceso y el producto final se verá afectado.

4. Se entenderá por sistema aquella instalación, o elementos de máquinas que en su operación contribuyen a que el sistema realice la función para la cual fue concebido, ya sean primarias, secundarias, de seguridad o superfluas.

Siguiendo la metodología expuesta, se prosiguió a determinar cuál de los subsistemas en cuestión intervenían en el proceso de generación del GE, se tuvo en cuenta la función primaria de cada subsistema.

5. Para cada uno de los sistemas definido se conocerá con claridad cuál es su función primaria, información necesaria para conocer los modos de fallos.
6. Los subsistemas identificados se clasificarán en tres grandes grupos:
 - S. Los que su función primaria es de seguridad.
 - A. Los que su función primaria es de apoyo o aseguramiento de otros sistemas.
 - P. Los que su función primaria está relacionado con la producción de la empresa, planta o línea de producción.

Para el estudio se llega a la conclusión que todos los subsistemas de la máquina, serán tratados como los del grupo "P", producto a que todos intervienen en la función principal del GE.

7. Para cada subsistema identificado del grupo P se establecerán un conjunto de criterios para evaluar su criticidad dentro del macro sistema al que pertenecen.
8. Los criterios generales a utilizar para calcular la criticidad en el grupo P serán:
 - a) Gravedad del posible fallo funcional (respecto a la capacidad productiva inherente del sistema o subsistema analizado)
 - b) Grado de Conectividad del subsistema al flujo productivo necesario para un período de tiempo analizado.
 - c) Gravedad e impacto de las consecuencias de los fallos.
 - d) Valor actual del sistema afectado por el fallo.

Cada uno de los criterios a utilizar serán ponderados de forma única para poder realizar los cálculos como se propone a continuación.

- a) La gravedad del posible fallo funcional estará dada por
 - A. Severidad del fallo.

1-10 desde una poca afectación (Calidad y/o volumen) hasta la paralización del flujo productivo.

Para determinar la severidad del fallo se analizó que al fallar cualquiera de estos subsistemas del GE se produce un paro del flujo productivo.

- B. Tiempo para restablecer la capacidad operacional antes de ocurrir el fallo en una escala de 0 hasta 10, siendo la escala de 10 el que identifica el mayor tiempo posible de restablecimiento.

Para determinar este parámetro se toma como referencia, las opiniones de los expertos en mantenimiento de Geysel.

- C. Gastos para restablecer la capacidad operacional antes de ocurrir el fallo en una escala de 0 hasta 10, siendo la escala de 10 el que identifica el mayor gasto posible de restablecimiento.

El cálculo de la gravedad del fallo funcional se realizará con ayuda de la expresión siguiente

$$G_F = A \cdot (B + C)$$

(1.2)

Este será el primer indicador a evaluar, para ello se tendrá en cuenta la severidad del fallo, el tiempo para erradicarlo y el costo del proceso de reparación. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

- b) El Grado de Conectividad del sistema analizado respecto al flujo productivo para un período de tiempo dado se ponderará de la manera siguiente:

10. Sistema único sin respaldo de intercambiabilidad disponible en la empresa.

2-9. Sistema único con respaldo de intercambiabilidad disponible en la empresa.

1. Sistema duplicado.

0.1 Sistema triplicado o más.

En este caso el grado de conectividad de los GE se toman entre 2 – 9.

- c) La Gravedad e impacto de la consecuencia los fallos serán ponderados de la manera siguiente:

- A. Afectación humana

1-1 000. Lesiones de leves, graves y fatal

- B. Afectación al medio ambiente

1-1 000. de baja a Alta

- C. Capacidad destructiva de los sistemas adyacentes

1-10. De baja a Alta

- D. Capacidad autodestructiva del propio sistema

1-10. de baja a alta

En el caso de afectaciones humanas y afectaciones al medio ambiente se tomaron valores altos para algunos subsistemas como, el sistema de aceite lubricante; el sistema de combustible, sistema de aire de sobrealimentación y sistema de escape y el generador.

La gravedad e impacto de la consecuencia de los fallos se calculará por la expresión

$$G_C = A + B + C(V_a) + D(V_a)$$

(1.2)

La ponderación se muestra en la Tabla 1.

- d) Valor actual del sistema afectado por el fallo en una escala de 1 hasta 100, siendo la escala de 100 el que identifica el mayor valor posible.

El resultado se muestra en la Tabla 1.

La criticidad del sistema analizado se calculará por la expresión siguiente

$$C = \text{GradoConctividad}(G_F + G_C) \tag{1.4}$$

Para dar cumplimiento a esta tarea se entrevistaron a siete personas, el jefe de operaciones, el jefe del departamento de mantenimiento, dos técnicos, el jefe del departamento técnico, dos ingenieros mecánicos, todos con una vasta experiencia en los grupos electrógenos, para conocer los criterios sobre las ponderaciones de las variables que prevé el método, de esta entrevista y luego el procesamiento de las variables se obtuvo los siguientes resultados que se muestran en la Tabla 1.

Los sistemas con mayor criticidad serán aquellos que obtengan la mayor puntuación.

Luego de evaluar todos los aspectos vistos y aplicar la metodología para el cálculo de la criticidad de los subsistemas de los GE MTU serie 4 000 16V G81, se obtuvieron los resultados siguientes en la Tabla 1.

Tabla 1. Análisis de criticidad de los subsistemas.

Grupo Electrógeno MTU serie 4 000		S-F (1-10)	Trest (1-10)	Grest (1-10)	GF	Gonect. (2-9)	Ah (1-1000)	A ma (1-1000)	C dest (1-10)	C Auto (1-10)	Va (1-100)	GC	C
	Denominación del sistema												
1	Sistema de enfriamiento	7	3	8	77	7	100	400	9	4	90	1670	12229
2	Sistema de aceite lubricante	9	5	6	99	7	900	1000	9	5	60	2740	19873
3	Sistema de combustible con subsistema de inyección <i>Common-Rail</i>	8	2	7	72	8	900	900	5	3	90	2520	20736
4	Sistema de aire de sobrealimentación y de gases de escape	7	4	6	70	7	900	900	6	3	60	2340	16870
5	Mecanismos del motor	9	9	9	162	7	500	800	7	9	90	2740	20314
6	Automática	4	2	9	41	2	100	100	5	4	90	1010	2108
7	Sistema eléctrico del grupo	6	2	7	54	7	100	100	4	3	70	690	5208
8	Generador	9	9	10	171	9	700	800	5	8	100	2800	26739

Para determinar el rango de criticidad se utiliza el Diagrama de Pareto y se toman como los de mayor criticidad los subsistemas que el porcentaje acumulado sea hasta 20%, los de mediana criticidad hasta un 80% y el resto de baja criticidad.

Tabla 2. Análisis de los valores de la criticidad.

Subsistemas	Criticidad	Suma	% Total	% Total acumulado
Generador	26739	26739	21.6	21.6
Sistema de combustible con sistema de inyección <i>Common-Rail</i>	20736	47475	16.7	38.3
Mecanismos del motor	20314	67789	16.4	54.6
Sistema de aceite lubricante	19873	87662	16.0	70.7
Sistema de aire de sobrealimentación y de gases de escape	16870	104532	13.6	84.2
Sistema de enfriamiento	12229	116761	9.9	94.1
Sistema eléctrico del grupo	5208	121969	4.2	98.3
Automática	2108	124077	1.7	100

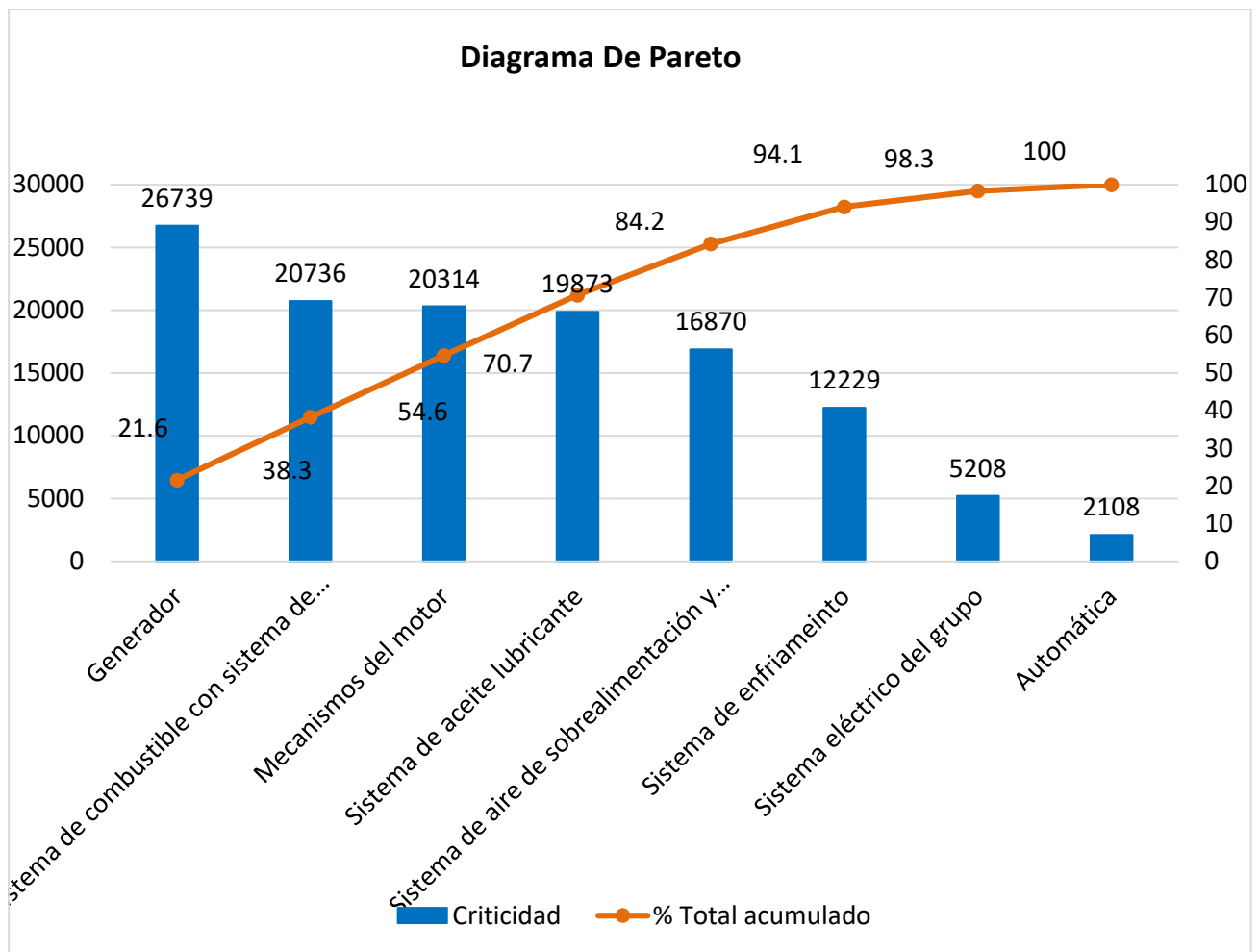


Figura 12. Diagrama de Pareto.

En la Figura 12 se puede observar los subsistemas más críticos de los Grupos Electrónicos MTU serie 4 000, el sistema más crítico es el generador, seguido por los sistemas de mediana criticidad, sistema de combustible con inyección *Common-Rail*, sistema de aceite lubricante, sistema de aire de sobrealimentación y gases de escape, mecanismos del motor y con una baja criticidad el sistema de enfriamiento, el sistema eléctrico del grupo y la automática.

Además, se puede apreciar que un 38.3 % de la criticidad de los GE lo conforman los subsistemas generador y sistema de combustible con inyección *Common-Rail*, por lo que si se realizan servicios técnicos de revisión el tiempo medio para reparar la falla puede disminuir evitando así una afectación mayor.

Esta información es la que permite orientar la toma de decisiones, centrando los recursos materiales y humanos en la zona de alta criticidad, en este caso el sistema generador, sistema de combustible con sistema de inyección *Common-Rail*, el sistema de aceite

lubricante, sistema de aire de sobrealimentación y gases de escape y los mecanismos del motor se encuentra la mejor oportunidad de agregar valor, rentabilidad y aumentar la confiabilidad del equipo.

VALORACIÓN ECONÓMICO Y MEDIOAMBIENTAL

Con la jerarquización de los subsistemas de los Grupo Electrógenos Diesel MTU serie 4 000 realizada por el autor de este trabajo, se logrará una mejor distribución de recursos materiales y humanos, en acciones por mantener la confiabilidad operacional de la máquina.

Una de las ventajas del estudio de criticidad realizado es que el mismo permite modificar el plan de mantenimiento a los subsistemas más críticos, con el objetivo de disminuir su frecuencia de fallos, lo que representa un ahorro considerable por concepto de piezas de repuesto.

Como consecuencia de fallas que se puedan presentar en el subsistema más crítico, el generador trae graves consecuencias al medio ambiente y para la seguridad y salud del ser humano, otros subsistemas de mediana criticidad como el sistema de combustible, aceite lubricante, aire de sobrealimentación y gases de escape, so grandes proliferadores de contaminantes al medio ambiente por lo que el control de sus fallas es primordial.

Se hace necesario velar cada día más por el estado técnico de los emplazamientos de Grupos Electrógenos del país y principalmente de la provincia de Holguín, esta investigación, para el criterio del autor como futuro profesional en la rama del estudio del funcionamiento de las máquinas, tiene gran importancia y connotación, puesto que un análisis detallado de la criticidad de los Grupos Electrógenos MTU serie 4 000 16V G81 del emplazamiento Holguín 220 kV ayudará a reorientar los recursos y mejorar gradualmente la gestión del mantenimiento para lograr la calidad medioambiental del municipio holguinero, apoyando en todo momento la estrategia a seguir en cuanto a medio ambiente, orientadas por nuestras máximas autoridades estatales y la UEB Geysel Holguín donde se desarrolló este trabajo.

El desarrollo del trabajo de diploma que tiene como título, análisis de criticidad de los grupos electrógenos MTU serie 4 000 16V G81 del emplazamiento Holguín 220 kV, no solamente tiene importancia económica para UEB Geysel Holguín del municipio de Holguín, sino también para el país, la implementación de este procedimiento permitirá un mejor control de los equipos, del proceso de mantenimiento, se planifica mejor el mismo,

se explota con más eficiencia los grupos electrógenos, mejorando gradualmente su eficiencia y confiabilidad, se protege el medio ambiente, la salud de los operarios y de la población cercana a los emplazamientos. Por tanto, al mejorar todos estos parámetros y controlarlos con mayor precisión, se ahorra tiempo, dinero y recursos, siendo estos últimos muy costosos en el mercado internacional.

CONTRIBUCIÓN A LA DEFENSA DE LA PATRIA

Los Grupos Electrógenos forman parte de la vida y del desarrollo de nuestra provincia, los mismos cumplen una función territorialmente muy importante en la defensa del país, porque estos independizan energéticamente las Zonas de Defensa y las Regiones Militares del resto de la nación, ya que si las termoeléctricas de Cuba son destruidas por ataques del enemigo, los Grupos Electrógenos automáticamente se pondrían en funcionamiento, obteniendo así independencia energética, dándole alimentación en cuanto energía a las regiones afectadas tanto como poblados, industrias, hospitales, objetivos de primer orden centros de prioridad, los cuales contarían con este servicio de emergencia. Esta idea tan innovadora fue ideada por nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz, no solo con el objetivo de mantener nuestro sistema electroenergético activo, sino también con un propósito estratégico y de seguridad nacional.

El trabajo presentado por el autor anteriormente, contribuye a elevar la confiabilidad de los grupos electrógenos, además de ayudar a redireccionar esfuerzos y gastos para la explotación de la máquina, lo que traería consigo una mejora de la confiabilidad, así como la eficiencia de los grupos.

CONCLUSIONES

1. Se realizó un análisis de indicadores bibliométrico, entre ellos fueron los artículos más citados, entre estos se encuentran los autores: Bevilacqua, Braglia, and Gabrielli (2000) con 519 citas, Braglia, Frosolini, and Montanari (2003) con 140 citas y Blanchard (1997) con 125 citas, estos artículos de los autores más citados son la base del marco teórico referencial de la investigación.
2. Se realizó una caracterización de Los Grupos Electrógenos instalados en la provincia de Holguín, así como de sus principales subsistemas, los cuales son: los subsistemas de enfriamiento, aceite lubricante, combustible con inyección *Common-Rail*, aire de sobrealimentación y gases de escape, mecanismos del motor, subsistema eléctrico del grupo, autómata y el generador.
3. La aplicación del método de Batista para determinar la criticidad de los subsistemas de los Grupos Electrógenos MTU serie 4 000 16V G81, permitió conocer que:
 - El generador es el más crítico del GE.
 - Los sistemas de combustible, mecanismos del motor, aceite lubricante, aire de sobrealimentación y gases de escape, tienen una mediana criticidad.
 - El sistema de enfriamiento, el sistema eléctrico del grupo y el sistema automático son los menos críticos.

RECOMENDACIONES

1. La continuación del estudio (análisis de criticidad), de los sistemas más críticos para conocer dentro de ellos los elementos y piezas puedan traer consecuencias graves para la generación de energía eléctrica.
2. Realizar un estudio de Confiabilidad Operacional al sistema de mayor criticidad.
3. Este trabajo de diploma sirva como objeto de estudio y análisis para profesores, estudiantes, personal técnico que operan estos importantes equipos.
4. Se recomienda direccionar las acciones de mantenimiento y recursos hacia los subsistemas más críticos de los GE.

BIBLIOGRAFÍA

- AENOR. (1994). Análisis del árbol de fallos.
- AENOR. (2002). Terminología del mantenimiento. EN 13306.
- Ahmad, R., Kamaruddin, S., Azid, I. A., & Almanar, I. P. (2012). Failure analysis of machinery component by considering external factors and multiple failure modes - A case study in the processing industry. *Engineering Failure Analysis*, 25, 182-192. doi:10.1016/j.engfailanal.2012.05.007
- Alfonso Padura, Y., García Tol, A. E., Díaz Concepción, A., Rodríguez Piñeiro, A. J., Hourné Calzada, M. B., & Cedrón Pérez, G. J. I. E. (2017). Análisis de criticidad en los sistemas mecánicos de los grupos electrógenos. 38(3), 237-243.
- Altmann, C. J. R. P. y. S. (2009). ¿Cómo mejorar la confiabilidad de un sistema complejo. 55(325), 59-68.
- Altuger, G., & Chassapis, C. (2009). *Multi criteria preventive maintenance scheduling through arena based simulation modeling*. Paper presented at the Proceedings of the 2009 Winter Simulation Conference (WSC).
- Álvarez. (2008). *Análisis y Reparto de cortes de conexión de régimen especial a redes de distribución [en línea]*. Tesis Máster Sector Eléctrico, Universidad de Comillas ICAI, 2007/2008, 72 ...,
- Álvarez, O. M. (2022). ¿Qué ha pasado con los grupos electrógenos en Cuba? .
- Anders, G. J., & Vaccaro, A. (2011). *Innovations in power systems reliability*: Springer.
- Arango Coira, M. (2009). *Estudio de asimilación de demanda de los emplazamientos de Grupos Electrógenos Diesel*. Departamento de Eléctrica,
- Arango, D. L. (2012). *Propuesta de modificación del sistema de mantenimiento preventivo planificado (MPP) aplicado en los motores de las Centrales Eléctricas de Fuel utilizando el diagnóstico técnico*. Universidad Central" Marta Abreu" de Las Villas,
- Aven, T. J. R. E., & Safety, S. (2016). Supplementing quantitative risk assessments with a stage addressing the risk understanding of the decision maker. 152, 51-57.
- Ayora, A. M., & Gaibor, J. Q. (2019). Deontología aplicada al mantenimiento de maquinaria industrial por ingenieros mecánicos. (mayo).
- Batista, E. R. H., Paneque, Y. H., & Fernández, J. L. (2016). Sistema de mantenimiento para la línea de extrusión de polietileno en HOLPLAST.

- Batista, E. R. H., & Proenza, D. D. V. J. C. H. (2011). La fiabilidad en motores de combustión interna diésel estacionarios. *17(2)*, 1-10.
- Bazovsky, I. (2004). *Reliability theory and practice*: Courier Corporation.
- Best, R., Morrow, D. J., McGowan, D., & Crossley, P. A. (2007). Synchronous Islanded Operation of a Diesel Generator. *Power Systems, IEEE Transactions on*, *22*, 2170-2176. doi:10.1109/TPWRS.2007.907449
- Bevilacqua, M., Braglia, M., & Gabbriellini, R. (2000). Monte Carlo simulation approach for a modified FMECA in a power plant. *Quality and Reliability Engineering International*, *16(4)*, 313-324. doi:10.1002/1099-1638(200007/08)16:4<313::AID-QRE434>3.0.CO;2-U
- Blanchard, B. S. (1997). An enhanced approach for implementing total productive maintenance in the manufacturing environment. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, *3(2)*, 69-80. doi:10.1108/13552519710167692
- Blanco, J. C. F. (2018). EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA EN LOS GRUPOS ELECTRÓGENOS DIÉSEL MTU SERIE 4000.
- Braglia, M., Frosolini, M., & Montanari, R. (2003). Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis. *International Journal of Quality and Reliability Management*, *20(4)*, 503-524. doi:10.1108/02656710310468687
- Brouwer, S. R., Al-Jibouri, S. H., Cárdenas, I. C., Halman, J. I. J. R. E., & Safety, S. (2018). Towards analysing risks to public safety from wind turbines. *180*, 77-87.
- Cabrera Gómez, J. J. C. C. P. e. C. d. I. H. C., junio del. (2003). Plataforma básica para un enfoque del mantenimiento centrado en la confiabilidad.
- Cepero-Aguilera, Y. J. I. m. (2009). Contaminación acústica por grupos electrógenos. *12(2)*, 59-68.
- Čepin, M. (2011). *Assessment of power system reliability: methods and applications*: Springer Science & Business Media.
- Chemweno, P., Pintelon, L., Van Horenbeek, A., & Muchiri, P. J. I. J. o. P. E. (2015). Development of a risk assessment selection methodology for asset maintenance decision making: An analytic network process (ANP) approach. *170*, 663-676.
- Chen, D., & Yao, C. J. J. G. X. (2012). Reliability analysis of multi-state system based on fuzzy Bayesian networks and application in hydraulic system. *48(16)*, 175-183.

- Chinchilla, L. R. L., Sierra, M. A. S., & Cediell, O. D. F. J. R. P. (2015). Evaluación de la confiabilidad de microrredes eléctricas aisladas por el método de árbol de fallas. *11(20)*, 89-98.
- Concepción, A. D., García, J. A. R., Gómez, J. C., & Ariet, N. V. (2015). Estudio de confiabilidad operacional como soporte al mantenimiento aeronáutico en Cuba. *18(66)*, 6-12.
- de la Fé Dotres, S., Fontanil, J. D., & Sierra, J. A. J. R. C. d. C. I. (2010). Pronóstico del consumo de combustible de grupos motogeneradores empleando una red neuronal. *4(1-2)*, 53-58.
- Díaz, C., & Benítez, M. J. R. M. e. L. (2012). Los análisis de criticidad en el MCC: Particularidades de diferentes modelos. *4(4)*, 24-32.
- Dotres, S. d. I. F., & García, D. J. (2012). Distribución óptima de carga en emplazamientos de generadores %J Ingeniería Energética. *33*, 87-94.
- Durán, M. A. (1999). *La base del iceberg: la contribución del trabajo no remunerado al mantenimiento de la sociedad española*: CSIC. Instituto de Economía y Geografía.
- Ekpiwhre, E. O., & Tee, K. F. (2018). Reliability based maintenance methodology for sustainable transport asset management. *Pollack Periodica*, *13(1)*, 99-112. doi:10.1556/606.2018.13.1.9
- Encalada, E. M. D. (2014). *Gestión e implementación del plan de mantenimiento en los laboratorios del área de Ingeniería Mecánica en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca*.
- Espinosa, F. F., Dias, A., & Back, N. J. I. t. (2008). Un procedimiento de evaluación de las condiciones necesarias para innovar la gestión de mantenimiento en una empresa. *19(1)*, 97-104.
- Espinosa, F. F., Dias, A., & Salinas, G. E. J. I. R. c. d. i. (2012). Un procedimiento para evaluar el riesgo de la innovación en la gestión del mantenimiento industrial. *20(2)*, 242-254.
- Estrada, S. G., Cano, H. B., & Ocampo, F. A. (2009). Análisis de inconfiabilidad a un proceso de construcción de rollos de papel utilizando árbol de fallos. *15(43)*, 19-24.
- Fuenmayor, E. (2012). Análisis Causa Raíz. *Revista Confiabilidad Industrial*, *12*.
- García, J. L. P. (2021). Análisis de vibraciones como mantenimiento predictivo a las turbinas de succión de agua del Ingenio Trinidad, San Diego, S.A. .

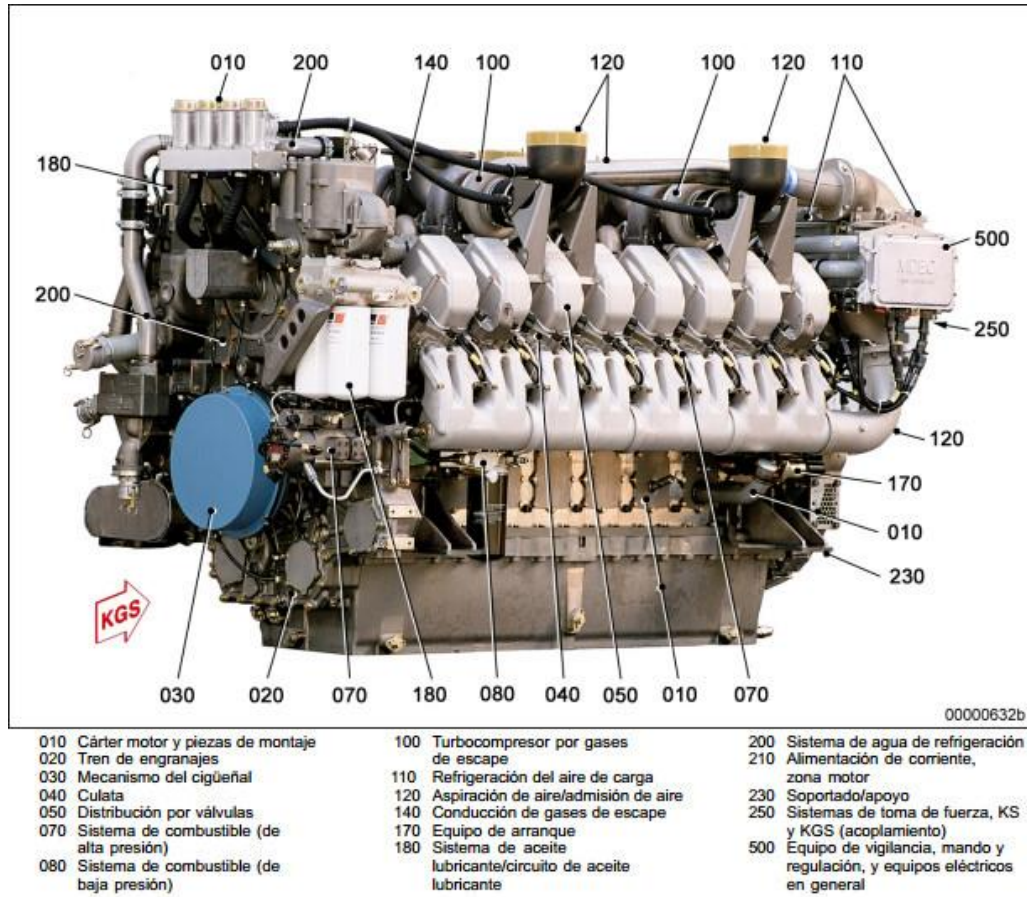
- Gómez, J. C. (2003). Plataforma básica para un enfoque del mantenimiento centrado en la confiabilidad.
- Gotera, E. J. C. d. e. e. C. I. d. E. y. D., filial de PDVSA, Paraguaná. Venezuela. (2000). Mantenimiento Centrado en Confiabilidad Plus.
- Grainger, J. J., & Stevenson, W. D. (1996). Análisis de sistemas de potencia.
- Haarla, L., Koskinen, M., Hirvonen, R., & Labeau, P.-E. (2011). *Transmission grid security: a PSA approach*: Springer Science & Business Media.
- Hechavarría-Pérez, J. R., Castañeda-Sandes, J. C., & Iskander-Concepción, Y. J. C. H. (2014). Análisis del consumo de aceite de motor en grupos electrógenos de la provincia de Holguín. *20*(3), 1-12.
- Hidalgo-Batista, E. R. J. C. H. (2015). Propuesta de dispositivo para diagnosticar las bombas de alta presión de los grupos electrógenos MTU serie 4000. *21*(1), 1-10.
- Hidalgo, B. E. R. (2007). *Análisis del comportamiento de las prestaciones en los motores de combustión interna estacionarios MTU modelo 16V 4000 G81*. Tesis para optar por el título de Master en Ciencias. Universidad de Holguín,
- Holmberg, K., Folkesson, A., Bergman, B., Ostvik, R., & Aage, C. (1992). *Operational reliability and systematic maintenance*: CRC Press.
- Hourné-Calzada, M. B., Brito-Vallina, M. L., del Castillo-Serpa, A. M., Fraga-Guerra, E., & Díaz-Concepción, A. J. R. C. T. A. (2012). Análisis de criticidad de grupos electrógenos de la tecnología fuel oil en Cuba. *21*(3), 55-61.
- Jung, D., Zhang, Z., & Winslett, M. (2017, 19-22 April 2017). *Vibration Analysis for IoT Enabled Predictive Maintenance*. Paper presented at the 2017 IEEE 33rd International Conference on Data Engineering (ICDE).
- Kohler, E. L. J. M. p. (1990). Diccionario para contadores./Unión Tipográfica Editorial Hispano Americana (UTEHA).
- Koning, J., Jaspers, R., Doornink, J., Ouwehand, B., Klinkhamer, F., Snijders, B., . . . design. (2009). Maintenance implications of critical components in ITER CXRS upper port plug design. *84*(7-11), 1091-1094.
- Kovacevic, G., Dvornik, J., & Dvornik, S. J. I. J. o. M. E. (2016). Analysis of the operational reliability of the rotary cup burner of a marine boiler. *1*, 55-61.
- Labra, J. M. G. (2018). ANÁLISIS DE CONFIABILIDAD Y ESTIMACIÓN DE PROBABILIDAD DE COLAPSO EN UNA PLANTA INDUSTRIAL.

- Laguna, I. J. G. E. (2002). Generación de energía eléctrica y medio ambiente. (65), 53-62.
- Leyva, I. P. (2009). *El análisis de criticidad para el estudio de Confiabilidad Operacional de la cosechadora de caña CASE IH-7000*. Universidad de Holguín Oscar Lucero Moya, Facultad de Ingeniería ...,
- Liu, X., Wang, W., & Peng, R. (2015). An integrated production, inventory and preventive maintenance model for a multi-product production system. *Reliability Engineering & System Safety*, 137, 76-86. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2015.01.002>
- Martínez, E. M. D. I. P., Espinosa, H. L., & Martínez, A. A. (2000). Evolución del mantenimiento en Cuba y la participación de las universidades en el proceso. 8, 48-53.
- Materán Linares, E. d. J., Rojas Monsalve, E. A., Hernández Mosqueda, J. A., & Gutiérrez Urdaneta, E. E. J. I. p. (2015). Aplicación de la tecnología de inspección basada en riesgo (IBR) para la generación de planes óptimos de inspección a equipos estáticos en la industria del petróleo y gas. 55(1), 38-56.
- Mendoza, R. H. J. I. m. (2000). El análisis de criticidad, una metodología para mejorar la confiabilidad operacional//Criticality analysis, a methodology to improve the operational reliability. 3(4), 13-19.
- Mobley, K. (2014). *Maintenance engineering handbook*: McGraw-Hill Education.
- Monseco, M. J. T. I. (2013). Diseño de un plan de mantenimiento para un equipo de alta fiabilidad. 301, 40-53.
- Montero, F. E. H., Barrios, M. L. R., Suárez, J. R. R., Naranjo, A. R., Gerges, S. N., & de Miguel González, L. J. J. I. E. (2011). Sistema de bajo costo para el monitoreo por condición a aplicar en parques eólicos. 32(1), 62-71.
- Mora, L. A. (2009). *Mantenimiento-planeación, ejecución y control*: Alfaomega Grupo Editor.
- Moreno Rivera, G. A. (2011). *Determinación de los valores límites de las variables de los procesos de salida de los grupos electrógenos MTU Br 4 000 16V G81 del emplazamiento Holguín 220*. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica,
- MTU. (2006). Explotación de una batería GED.

- Noguera, S., Amendola, L., Depool, T., & Belisario, J. (2010). Análisis de sensibilidad en modelo de criticidad del aerogenerador como soporte para implementar proyecto de gestión de mantenimiento de activos.
- Palencia, O. G. (2011). *Gestión Moderna del Mantenimiento Industrial. Principios fundamentales*: Ediciones de la U.
- Panteleev, V. V., Kamaev, V. A., & Kizim, A. V. (2014). Developing a Model of Equipment Maintenance and Repair Process at Service Repair Company Using Agent-based Approach. *Procedia Technology*, 16, 1072-1079. doi:<https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.10.121>
- Pérez, C. M. (2003). Confiabilidad y Evolución del mantenimiento. In.
- Pintelon, L. M., & Gelders, L. J. E. j. o. o. r. (1992). Maintenance management decision making. 58(3), 301-317.
- Planche, D. V. (2008). *Establecimiento del rango del índice de consumo de combustible en la batería de grupos electrógenos de Moa*. Departamento de Mecánica,
- Puthillath, B., Sasikumar, R. J. I. J. o. E., & Technology, I. (2012). Selection of maintenance strategy using failure mode effect and criticality analysis. 1(6), 73-79.
- Rausand, M., & Vatn, J. J. B., Holland. (1998). Reliability Centered Maintenance. In CG Soares, editor, Risk and Reliability in Marine Technology.
- Rivera, G. A. M. (2011). *Determinación de los valores límites de las variables de los procesos de salida de los grupos electrógenos MTU Br 4 000 16V G81 del emplazamiento Holguín 220*. Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Mecánica,
- Sánchez, J. C. C. (2005). *Conceptos generales sobre grupos electrógenos*. Universidad de Costa Rica. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería ...,
- Shafiee, M., Labib, A., Maiti, J., & Starr, A. (2019). Maintenance strategy selection for multi-component systems using a combined analytic network process and cost-risk criticality model. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability*, 233(2), 89-104. doi:10.1177/1748006X17712071
- Teyra, M. d. A., Sarduy, J. G., & Felipe, P. V. (2012). Operación eficiente de los bloques generador-transformadores en las unidades de generación distribuida %J Ingeniería Energética. 33, 240-249.

- Toledo, M., & Díaz, C. (1815). Obtención de un modelo de criticidad para los equipos y sistemas tecnológicos de una termoeléctrica Ingeniería Energética. 37 (3): 217-27. In: ISSN.
- Tomás Piqué Ardanuy, A. C. L. (1998). Análisis probabilístico de riesgos: Metodología del "Árbol de fallos y errores".
- Torna del Rio, D. (2014). *Análisis de la generación, disponibilidad y los mantenimientos en la central eléctrica Cayo Santa María*. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas,
- Trujillo, A. (2017). El árbol de fallos y el análisis de importancia, dos herramientas para la optimización de la gestión de riesgos. doi:<https://es.linkedin.com/pulse/el-%C3%A1rbol-de-fallos-y-an%C3%A1lisis-importancia-dos-para-la-arturo-trujillo>
- Vernez, D., & Vuille, F. J. S. S. (2009). Method to assess and optimise dependability of complex macro-systems: Application to a railway signalling system. 47(3), 382-394.
- Vigo, E. R. A., & Yañez, G. R. O. (2021). Mantenimiento para aumentar la disponibilidad de máquinas.
- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., & Crespo, A. J. I. R. c. d. i. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. 21(1), 125-138.
- Watkins, N. W., Pruessner, G., Chapman, S. C., Crosby, N. B., & Jensen, H. J. J. S. S. R. (2016). 25 years of self-organized criticality: Concepts and controversies. 198(1), 3-44.
- Zhang, X., Gao, H., Huang, H.-Z., Li, Y.-F., & Mi, J. (2018). Dynamic reliability modeling for system analysis under complex load. *Reliability Engineering & System Safety*, 180, 345-351. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ress.2018.07.025>
- Zio, E., & Pedroni, N. (2013). Literature review of methods for representing uncertainty.

ANEXOS



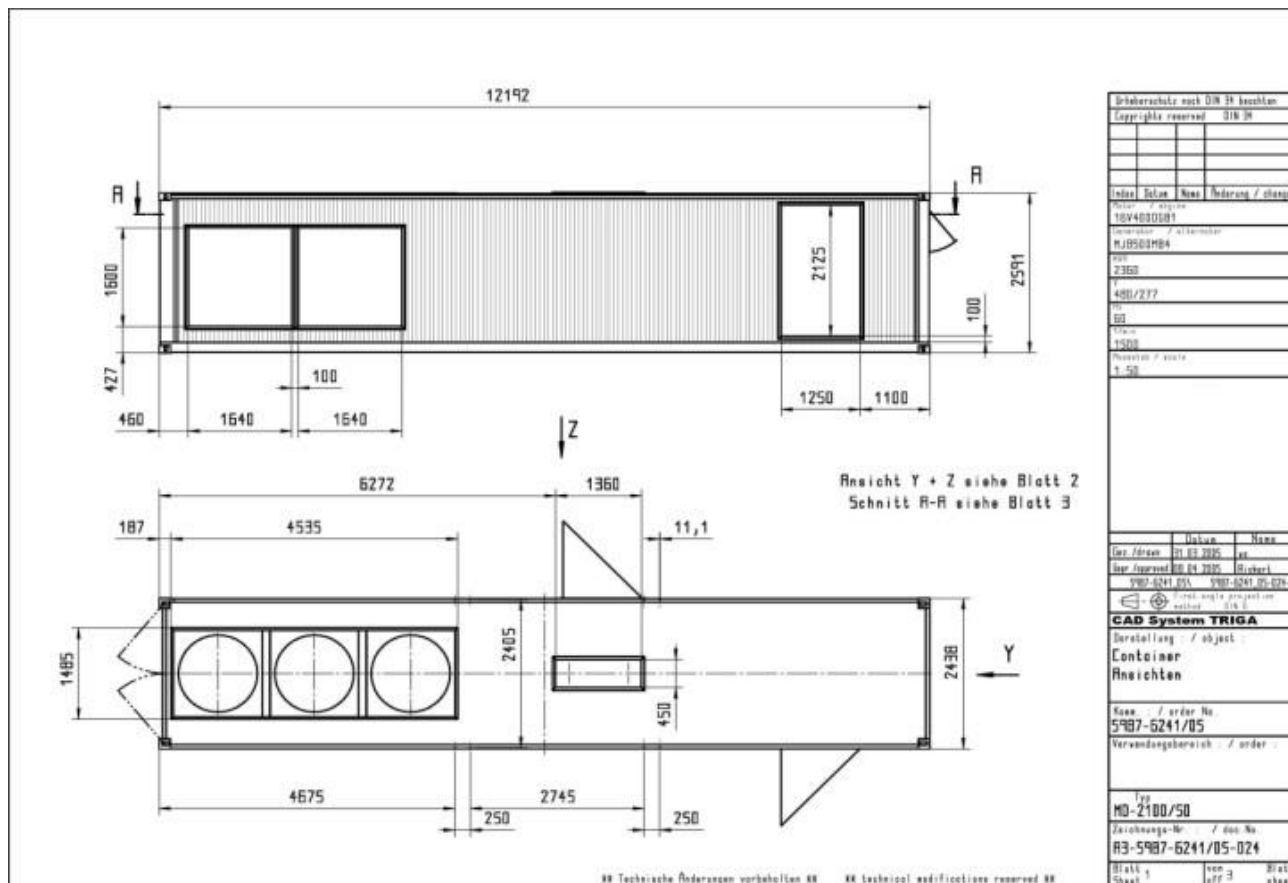
Anexo 1. Visión del conjunto motor. Fuente: (MTU, 2006).



Anexo 2. Radiador.



Anexo 3. Transformador del grupo electrógeno.



Anexo 4. Plano y vista de los grupos electrógenos serie 4 000. Fuente: (Moreno Rivera, 2011).



Anexo 6. Batería conformada por Grupos Electr6genos. Fuente: (Torna del Rio, 2014).



Anexo 7. Grupo Electr6geno MTU serie 4 000. Fuente: (Moreno Rivera, 2011).