

Milton Fonseca Junior · Jorge L. Moya R. · Jandecy Cabral Leite

Sistema de Mantenimiento Utilizando Inteligencia Artificial

Integrada con el Sistema de Supervisión
em tiempo real en Plantas
Termoeléctricas

Sistema de Mantenimiento utilizando Inteligencia Artificial Integrada con el Sistema de Supervisión em tempo real en Plantas Termoeléctricas.



Dr. Milton Fonseca Junior¹
Dr. Jorge Laureano Moya Rodriguez²
Dr. Jandecy Cabral Leite²

¹Dr., Instituto de Tecnología y Educación Galileo de la Amazonía, Brasil. milton.fonseca@eletrobrasamazonas.com

²Dr., Department of Post Graduate in Industrial Engineering, Federal University of Bahia (UFBA) . jorgemayar@gmail.com

²Dr., Instituto de Tecnología y Educación Galileo de la Amazonía, Brasil. jandecy.cabral@itegam.org.br

CAPÍTULO I

I. INTRODUCCIÓN

Este estudio presenta una herramienta computacional inteligente e integrada con el sistema de supervisión de una Planta Termoeléctrica (UTE), de una unidad de generación de potencia de Eletrobras Amazonas Energía, para un grupo de indicadores de rendimiento basados en la condición operativa, principalmente para tareas del mantenimiento del motor, máquinas síncronas y de potencia.

Fueron desarrolladas rutinas computacionales para leer la base de datos del sistema SCADA, los datos adquiridos se presentaron en informes técnicos operativos, destacando las aplicaciones en seguridad, economía y eficiencia operativa

Fue diseñado un sistema inteligente basado en la lógica Fuzzy, donde se generaron datos para deducir las indicaciones de mantenimiento predictivo para los equipos de la planta, como motores, máquinas síncronas y transformadores de potencia, basados en datos de SCADA. Fueron implementados modelos dinámicos de los motores de combustión interna, las máquinas síncronas y los transformadores de potencia, con el fin de obtener indicadores para inferir sobre el mantenimiento predictivo;

Se desarrolló un módulo de mantenimiento inteligente basado en las condiciones operativas de los motores, las máquinas síncronas y los transformadores de potencia, a partir de las salidas de los ARN diseñados para monitorear el funcionamiento de estos equipos;

Se desarrolló un módulo de interfaz para presentar al operador informes estadísticos y resultados de diagnóstico sobre el mantenimiento predictivo. Fue preparado un conjunto de informes estadísticos que fueron generados por los datos de SCADA. De esta manera se midió el desempeño operacional de la planta. Se desarrolló un entorno de software para la integración de las rutinas computacionales desarrolladas en tiempo real en los diferentes módulos de programación, a saber: velocidad, presión, temperatura, flujo de aceite, vibración y consumo específico, entre otros; y valores discretos de señales que se refieren a diversos equipos, como

bombas de aceite, bombas de agua, ventiladores, disyuntores, seccionadores, relés, etc. .; alarmas, que indican la superación de los límites mínimo y máximo, tales como límites de temperatura, límites de frecuencia, potencia, etc. .; puntos de ajuste y comandos emitidos por el operador o automáticamente, como el inicio del generador, la apertura y el cierre de los interruptores automáticos, los puntos de ajuste de voltaje, la alimentación, los comandos para inhibir variables, el intercambio de computadoras, entre otros.

Estas plantas constituyen un entorno muy complejo en el que muchas de las relaciones de causas y efectos entre las variables operativas no están completamente cartografiadas porque carecen de herramientas adecuadas para extraer conocimientos y relaciones útiles de la gran cantidad de datos generados por los sistemas SCADA.

Los modelos de inteligencia analítica y computacional pueden extraer indicadores de rendimiento y generar estadísticas, lo que ayudará en la implementación de un sistema de mantenimiento basado en la condición operativa de estas plantas, avanzando hacia el cambio de la filosofía de mantenimiento predictivo, basada en el tiempo, a una filosofía proactiva donde la intervención se basa en las condiciones del equipo.

Por lo tanto, la extracción de esta información, basada en los datos históricos del sistema SCADA y los modelos que se desarrollarán para el equipo, puede proporcionar importantes subsidios para la planificación del funcionamiento del sistema eléctrico, con mayor seguridad, calidad y economía, al igual que para detectar indicios de fallas y defectos que pueden corregirse mediante el mantenimiento, antes de que ocurran estas fallas y defectos, se reduce el número de intervenciones de mantenimiento de emergencia y los costos de mantenimiento, en la medida en que puede permitir el uso eficiente de mano de obra calificada y mejorar los problemas de seguridad.

De esta manera, en este texto se desarrolla un sistema computacional, con el uso de modelos analíticos y técnicas de inteligencia artificial, que permitan una mejor comprensión del comportamiento de las máquinas, la simulación de diversas condiciones operativas en los modelos y la extracción de Conocimiento basado en los datos históricos del sistema SCADA, para establecer un sistema de mantenimiento basado en la condición operativa y generar informes de gestión que evaluarán el

funcionamiento de una planta termoeléctrica, con respecto a aspectos de seguridad, economía y eficiencia, generando indicadores de desempeño técnico y económico.

La elaboración de un sistema de mantenimiento basado en la condición operacional, utilizando la base de datos generada por el SCADA de la planta termoeléctrica, es un enfoque de inversión innovador y de bajo costo, ya que la infraestructura de adquisición, transmisión y almacenamiento de datos ya está disponible a través del sistema de supervisión.

El texto presenta un aspecto innovador en el sector eléctrico al proponer el desarrollo de una metodología para el mantenimiento predictivo, utilizando los propios datos operativos adquiridos por el sistema de supervisión de la UTE.

Se sabe que los sistemas SCADA generan una enorme cantidad de datos operativos, que, según la práctica actual del sector de la energía eléctrica, se utilizan mínimamente, y su uso se concentra principalmente para tareas de supervisión. Con esta práctica se desperdicia el gran potencial de estos datos es la retención del conocimiento implícito sobre las variables operativas del proceso.

De esta manera, el presente texto pretende cambiar este paradigma, ofreciendo a las empresas del sector, una herramienta eficaz para descubrir el conocimiento en la masa de datos operativos, y al mismo tiempo generar estadísticas útiles para la evaluación del desempeño operacional del sistema.

Para abordar el tema de las técnicas inteligentes y los sistemas expertos, es necesario entrar inicialmente en la definición y presentación de la inteligencia artificial (inteligencia artificial).

La inteligencia artificial se puede definir como una rama de la ciencia que estudia el conjunto de paradigmas que pretenden justificar cómo un cierto comportamiento inteligente puede surgir de implementaciones artificiales en las computadoras. Una de las características de los sistemas inteligentes es precisamente la capacidad de aprender, de adaptarse a un entorno desconocido o de una situación nueva (Collins, 2018).

La idea básica de un esquema basado en observadores es reconstruir los resultados del sistema objetivo a partir de mediciones o subconjuntos de mediciones utilizando un elemento observador y utilizando un factor de error estimado como residuo para la especificación (Giles, Pérez, & Ramírez, 2016). Usualmente usan monitoreo en tiempo real, con adquisición constante de datos y métodos de

comparación y evaluación como modelos de medios paralelos. Para ello, se desarrollan la mayoría de los algoritmos numéricos adaptativos.

Las redes neuronales no requieren la articulación de un modelo matemático explícito que relacione las salidas con las entradas. Son estimadores del modelo sin un modelo totalmente explícito, se puede decir que son capaces de "aprender de la experiencia" utilizando muestreos de datos numéricos e incluso a veces lingüísticos (Carleo & Troyer, 2017; Vedaldi & Lenc, 2015). También se pueden usar algoritmos numéricos capaces de convertir entradas numéricas a salidas numéricas.

La lógica nebulosa o lógica difusa es una generalización de la lógica booleana que admite valores lógicos intermedios entre falsedad y verdad (como tal vez). Como hay varias formas de implementar un modelo difuso, la lógica difusa debe verse más como un área de investigación sobre el tratamiento de la incertidumbre, o una familia de modelos matemáticos dedicados al tratamiento de la incertidumbre, que una lógica en sí misma (Nguyen, Walker, & Walker, 2018).

Un sistema neuro difuso adaptativo es capaz de "aprender" a controlar procesos complejos (para implementar controladores no lineales) a partir de un puñado de reglas básicas capaces de describir este proceso. Los especialistas pueden proporcionar las reglas o pueden simplemente extraerse de la observación del comportamiento del sistema en cuestión (Mohammadi, Shamshirband, Tong, Alam, & Petković, 2015).

"Los sistemas inteligentes estiman las funciones continuas de forma adaptativa de las bases de datos sin especificar necesariamente matemáticamente cómo las salidas dependen de las entradas" (Yaïci & Entchev, 2016).

En (Penman & Jiang, 1996) se verifica el uso de una serie de variables que no son características para permitir un determinado diagnóstico. En este caso, se realiza el monitoreo del espectro armónico de la corriente de campo y se puede comenzar a partir de un control estándar preestablecido. Sin embargo, una amplia gama de problemas, que también pueden afectar los devanados de la máquina, no están cubiertos, lo que reduce la efectividad del método.

Dentro de estos grupos de desempeño hay varias metodologías de trabajo, cada una con sus ventajas y deficiencias, tales como: redes neuronales artificiales, lógica difusa, sistemas expertos, métodos estadísticos, métodos probabilísticos, entre otros.

El mantenimiento predictivo consiste en monitorear los parámetros que caracterizan la condición de operación de las máquinas y equipos, a fin de poder detectar y predecir el tiempo probable de ocurrencia de una falla y, si es posible, diagnosticar el tipo de defecto para que la operación de mantenimiento pueda ser planificada de la manera más conveniente. El parámetro que mejor caracteriza la condición de operación varía según el equipo en cuestión. Debido a la complejidad e interdependencia de los fenómenos observados en el funcionamiento de las unidades de generación, algunas de las cuales se desconocen, los parámetros recopilados del monitoreo no pueden interpretarse de forma aislada.

Este texto no solo tiene el objetivo de monitorear estos equipos, sino también de los informes gerenciales de análisis de vibración, temperatura y análisis de aceite, para tomar medidas correctivas, a fin de alcanzar la calidad y confiabilidad del equipo y los servicios.

CAPÍTULO II

SISTEMAS DE MANTENIMIENTO Y SU APLICACIÓN EM LAS PLANTAS TERMOELÉCTRICAS

2.1. Introducción

La formulación de esta propuesta es el desarrollo de una herramienta computacional para apoyar en la decisión del despacho de carga según las condiciones operacionales de los motores y generadores para la central térmica, analizando las principales variables de los motores como son: el análisis del aceite lubricante, análisis de vibración y termografía para poder después desarrollar todo el proceso de mantenimiento predictivo.

La base para el estudio, parte del principio de funcionamiento y condiciones operacionales de los equipos a ser despachados para generación en una central térmica, y sus particularidades como consumo específico y calidad de contaminante expedido por cada equipo.

De esta forma, este texto pretende no sólo monitorear esos equipos, sino también con base en los informes gerenciales de análisis de vibración, temperatura y análisis de aceite, tomar acciones correctivas, para alcanzar la calidad y la confiabilidad del equipo y de los servicios a través de un procedimiento de pre-despacho que tenga en cuenta las condiciones operativas de los equipos, obteniendo indicadores fuzzy de su desempeño.

Se entiende por Control Predictivo de Mantenimiento, la determinación del punto adecuado para realizar el mantenimiento preventivo en un equipo, o sea, el punto a partir del cual la probabilidad de falla del equipo asume valores indeseables (Lindström, Larsson, Jonsson, & Lejon, 2017; Park, Moon, Do, & Bae, 2016). En la Planta Termoeléctrica de la Amazonas Energía con motores diésel de combustión interna, en los últimos años, se observaron paradas excesivas de los motores y equipos auxiliares, debido al gran número de roturas en conjuntos auxiliares y moto-bombas, lo que de cierta forma motivó la realización de los procedimientos que motivaron el presente texto.

Por las reglas del modelo del sector eléctrico brasileño, la indisponibilidad de equipos por cualquier razón es un riesgo del emprendedor, que debe correr con los perjuicios acarreados por indisponibilidades en niveles superiores a los declarados.

Estos problemas implican costes financieros asociados al valor de la generación frustrada y las sanciones, que incluyen la pérdida de la garantía física (disminución de la cantidad de energía que puede venderse en contratos debido a una indisponibilidad comprobada por encima de la prevista).

Sin embargo, el mal comportamiento reciente de las termoeléctricas parece indicar que la regulación actual no está siendo eficaz en inducir un comportamiento adecuado de estas plantas, tan necesaria en este momento de crisis hidrológica prolongada en Brasil. La indisponibilidad de equipos para generación térmica ha sido relativamente elevada, sobre todo después de períodos prolongados de ociosidad, lo que conduce a que esos aspectos se tengan en cuenta al hacer el pre-despacho de carga. Este comportamiento apunta a la necesidad de estudiar la dimensión real del problema, así como hace pertinente el estudio de eventuales alteraciones regulatorias que permitan mitigar el problema, tanto para termoeléctricas existentes como para nuevos proyectos.

La implementación computacional de la lógica fuzzy, utilizando como parámetros de entrada el análisis de vibración, la calidad del aceite lubricante y los datos del termovisor permiten desarrollar un pre-despacho de carga sobre condiciones operacionales de los equipos.

En la mayoría de los paquetes de programación de mantenimiento de unidades generadoras se considera el cronograma de mantenimiento preventivo de las unidades a lo largo de un período de planificación operacional de uno o dos años, para minimizar el costo operacional total, al tiempo que satisface las exigencias de energía del sistema y las restricciones de mantenimiento. Este problema consiste en verificar qué unidades generadoras deben pararse de la producción. La unidad generadora debe ser examinada regularmente por seguridad. Es muy importante porque un fallo en una estación de energía puede causar numerosas paradas en los diferentes equipos. La principal consecuencia es que la demanda de electricidad de los clientes no será satisfecha en estos casos. Por lo tanto, la confiabilidad es el punto clave utilizado en la metodología presentada. El problema se aborda como un problema de optimización. El modelo es desarrollado determinando la función objetivo que es la reserva de potencia neta de la unidad. Algunas restricciones se utilizan para obtener la salida deseada. Se utiliza la programación lineal entera mixta se para resolver el modelo alcanzado. Un enfoque práctico se realiza a través de la implementación del modelo en una planta. El resultado obtenido es un cronograma

que permite una organización eficiente del mantenimiento preventivo a lo largo de un horario específico.

(Alaswad & Xiang, 2017) destacan que el mantenimiento basado en condiciones (CBM) es una estrategia de mantenimiento que recoge y evalúa información en tiempo real y recomienda decisiones de mantenimiento basadas en la condición actual del sistema. En las últimas décadas, la investigación sobre CBM ha crecido rápidamente debido al rápido desarrollo de tecnologías de monitoreo basadas en computadora. Los estudios de investigación han demostrado que el CBM, si se planea correctamente, puede ser eficaz para mejorar la confiabilidad del equipo a costos reducidos. Este artículo presenta una revisión de la literatura CBM con énfasis en enfoques de modelado matemático y optimización. Los autores concentran esta revisión en aspectos importantes del CBM, como criterios de optimización, frecuencia de inspección, grado de mantenimiento, metodología de solución, etc. Una vez que la elección de modelado para el proceso de deterioro estocástico influye mucho en las decisiones de la estrategia de CBM, esta revisión clasifica la literatura sobre los modelos de CBM sobre la base de los procesos de deterioro subyacentes, en particular el deterioro del estado discreto y continuo, y el modelo de riesgo proporcional. Los modelos CBM para sistemas de múltiples unidades también se revisan en este artículo que proporciona además referencias útiles para profesionales de gestión de CBM e investigadores que trabajan en el modelado y la optimización de CBM.

(Arya, 2016) presenta un algoritmo para decidir preferencias en actividades de mantenimiento para secciones de alimentación de sistemas de distribución. Una medida componente de importancia, conocida como factor de importancia diagnóstica (DIF), fue usada para ese fin. Se desarrolló una metodología para calcular un factor de importancia de diagnóstico acumulativo ponderado (WCDIF) para cada sección de alimentación, lo que representa un significado cuantitativamente relativo para la priorización de las actividades de mantenimiento. La metodología desarrollada incluye el efecto de generaciones distribuidas (DG) y cargas. Se implementó en dos sistemas de distribución de muestras y se obtuvieron listas de clasificación de secciones de alimentación para actividades de mantenimiento

El mantenimiento basado en condiciones (CBM) es una política cada vez más aplicable en el mercado competitivo como medio de mejorar la confiabilidad y eficiencia de los equipos. No sólo el mantenimiento tiene una relación estrecha con la

seguridad, sus costos también hacen la cuestión aún más atractiva para los investigadores. Este estudio propone un modelo para evaluar la eficacia de la política de CBM en comparación con otras dos políticas de mantenimiento: Mantenimiento Correctivo (CM) y Mantenimiento Preventivo (PM). Las políticas de mantenimiento se comparan a través de dos indicadores de rendimiento del sistema: confiabilidad y costo. Para estimar la confiabilidad y los costos del sistema, el modelo de simulación de evento discreto Markoviano propuesto se desarrolla en cada una de estas políticas. La aplicabilidad y utilidad del modelo de simulación Markoviano propuesto se ilustra en un sistema de generación de energía. Las características simuladas del sistema CBM incluyen su eficiencia pronóstica para estimar la vida útil restante del equipo. Los resultados muestran que, con un pronóstico eficiente, la política de CBM es una estrategia efectiva en comparación con otras estrategias de mantenimiento.

Según (Baidya & Ghosh, 2015) el mantenimiento adecuado puede aumentar la productividad de la empresa y aumentar su valor en el mercado. Este artículo aborda la cuestión de la selección de una tecnología de mantenimiento efectiva considerando el mantenimiento estratégico y la política gerencial de una organización. La investigación propone un marco de trabajo para evaluar la eficacia del indicador de mantenimiento predictivo (PMIE) basado en el proceso de jerarquía analítica (AHP). El estudio se hizo considerando tres estudios de caso. En primer lugar, se realizó una encuesta de cuestionarios para investigación primaria, en segundo lugar, se desarrolló un modelo y, en tercer lugar, los datos fueron analizados usando el modelo desarrollado. El estudio principal proporcionó un modelo robusto que puede evaluar la tecnología disponible estratégicamente importante y puede excluir la tecnología anticuada y / o inapropiada. Hay muchas investigaciones en este campo y diferentes modelos propuestos, entre ellos el sistema de gestión de mantenimiento, la medición del rendimiento de mantenimiento y los indicadores de rendimiento de mantenimiento, pero los detalles de la eficacia del indicador de mantenimiento predictivo específicamente basado en el mantenimiento basado en condiciones (CBM), con los requisitos de mantenimiento y administración utilizando el proceso de jerarquía analítica (AHP) difícilmente están disponibles en la literatura.

2.2 Conceptos de mantenimiento

Según (Arato Junior, 2004), el mantenimiento se define como un conjunto de acciones que permite maniobrar o restablecer un estado operativo específico o, aún, asegurar un extinto servicio. El diccionario Aurelio (dicionário Aurélio, 1975), define el

mantenimiento como medidas necesarias para la conservación o permanencia de algo o de una situación; o, como cuidados indispensables para el funcionamiento regular y permanente de máquinas e instalaciones. Según (Xenos, 1998), el mantenimiento se define como la combinación de acciones técnicas y administrativas, incluyendo la supervisión y un indicador de combinaciones de acciones y suministros que incluyen la supervisión de una función necesaria.

2.3 Mantenimiento de equipos y procedimiento gerencial

De acuerdo con (Xenos, 1998), nuestra sociedad ha dependido de los productos y servicios generados por procesos cada vez más mecanizados y automatizados, este es un caso que puede observarse en prácticamente todas las ramas de actividades, en las que el trabajo humano ha sido realizado por el trabajo de máquinas. La minería de metales es un ejemplo claro de lo anterior, garantizando mayores volúmenes y costos reducidos.

De esta forma, la calidad de los productos y servicios depende cada vez más del buen funcionamiento de los equipos y de las instalaciones de producción. Cuando estos equipos e instalaciones se deterioran, la satisfacción, el confort y, principalmente, la seguridad de las personas puede quedar amenazadas.

Para obtener los retornos de sus clientes en relación con la calidad, el precio de la entrega y la seguridad, las empresas, en particular las de capital intensivo, incluyen las tecnologías de servicios e instalaciones, y los productos y servicios a ser producidos. Esto es válido no sólo para las industrias, sino también para las empresas que prestan servicios que utilizan vehículos, aparatos de automatización, ordenadores, copadoras e instalaciones prediales.

Para que la empresa programe y alcance sus objetivos de atención, la calidad total, así como las metas que están alineadas con metas de supervivencia de la empresa, es preferible usar las herramientas de la forma más adecuada para lograr una mejor ejecución de sus objetivos principales, o sea un mantenimiento de los equipos en la línea de producción, como una de las principales funciones para una garantía de calidad y productividad garantizando una mayor disponibilidad de las instalaciones.

Para controlar el proceso de mantenimiento, es necesario medir y controlar los resultados.

2.4 Funciones de apoyo al mantenimiento

Según (Kardec & Lafraia, 2002), para tener una eficiente gestión de mantenimiento, se debe poner en práctica junto con los métodos de mantenimiento, algunas funciones de apoyo:

- Tratamiento de fallas de mantenimiento - son actividades de remoción de los síntomas de fallas e identificación de sus causas fundamentales para establecer contramedidas adecuadas.

- Estandarización del Mantenimiento - es la utilización de los procedimientos y estándares técnicos y gerenciales relacionados con las actividades de mantenimiento, incluyendo los manuales de mantenimiento, catálogos de piezas, patrones de inspección y procedimientos de prueba de los equipos.

- Planificación del Mantenimiento - puede ser entendido como acciones de preparación de los servicios de mantenimiento preventivo, que define cuando las acciones serán ejecutadas. Incluye la distribución de los servicios en un determinado período, así como la previsión de mano de obra, materiales y herramientas.

2.5 Mantenimiento Preventivo

Según (Xenos, 1998), el mantenimiento preventivo es un conjunto de actividades o métodos que se llevan desde la fase de proyecto y fabricación del equipo previendo reducir los servicios y operaciones de mantenimiento durante la operación de las instalaciones. El principal aspecto del mantenimiento preventivo es la retroalimentación de las informaciones para el fabricante en la adquisición de nuevos equipos, con el objetivo de prevenir la falla y aumentar su mantenibilidad.

2.6 Programa 5s.

Las empresas con el objetivo de buscar la mejoría de la calidad de vida en el trabajo crearon en el programa 5S, una base para el desarrollo de esa calidad. No sólo los aspectos de calidad y productividad deben ser delegados a los empleados, lo mismo debe ocurrir con relación a la organización del área de trabajo, generando descarte de los ítems sin utilidad, liberación de espacio, patrones de almacenaje, facilitando al propio empleado saber lo que está bien y lo que está mal. La denominación "5S" se debe a las cinco palabras iniciadas por la letra "S", cuando se pronuncian en japonés, es decir, SEIRI (organización), SEITON (almacenaje), SEISO (limpieza), SEIKETSU (estandarización) y SHITSUKE (disciplina) (Lopes, 2018).

La organización: Utilización, clasificación de materiales y equipos en el lugar de trabajo, para mantener sólo lo que es útil.

La disposición: Dejar cada cosa en su lugar para su uso.

La limpieza: Es una forma de inspección, pues posibilita la identificación de defectos, fallas, fugas, etc.

La estandarización: Busca mantener los tres primeros ítems de 5s (organización, almacenaje y limpieza de forma continua).

La disciplina: es la base de una civilización y lo mínimo para que la sociedad funcione en armonía y el camino para la mejora del carácter de las personas.

Con el desarrollo del TPM, se verificó que además es fundamental la necesidad de cada uno buscar la limpieza de la organización para la mejora de sus actividades y del ambiente de un modo general, los atributos ordenamiento, aseo y disciplina, también tienen influencia en la mejora de la productividad.

2.7 Cualidades en las Actividades de Mantenimiento.

Al igual que cualquier otro sector de una empresa, el departamento de mantenimiento debe identificar claramente cuáles son sus interfaces. La principal interfaz del mantenimiento es la producción, que exige que los equipos se mantengan en óptimas condiciones de funcionamiento. Otra interfaz importante, es la alta administración, que exige un mantenimiento dentro del presupuesto ya un costo cada vez menor, pero que no amenace la calidad exigida por la clientela.

En la mayoría de las empresas que están implantando TQM (Gestión de la calidad total), esta conciencia ya está prácticamente establecida y los departamentos de mantenimiento se están esforzando bastante para mejorar su desempeño (Xenos, 1998).

La primera condición para promover la calidad en el mantenimiento es la economía. El aspecto económico siempre debe ser tenido en cuenta por el mantenimiento. No se pueden mantener todos los equipos e instalaciones de la empresa siempre en óptimas condiciones sin tener en cuenta cuánto costó. Por ejemplo, hay situaciones en las que es más barato sustituir el equipo que reformarlo. Así, el mérito del mantenimiento no debe ser solamente la reducción de la ocurrencia de fallas o la disminución de los tiempos de interrupción de los equipos. El objetivo

final del mantenimiento es contribuir al beneficio de la empresa a través de un bajo costo.

Según (Tavares, 1996), debe existir un equilibrio entre lo que se gasta con el mantenimiento y la influencia de esto para la producción. Por ejemplo, si se reduce a cero el stock de piezas de repuesto, seguramente habría una reducción de la utilización de los equipos en función del aumento del tiempo debido por falta de materiales. Si se tienen en cuenta las pérdidas de producción derivadas de ello, probablemente se mostrarían inaceptables. En resumen, no se puede mirar el costo de mantenimiento aisladamente, sino, dentro de un contexto global de productividad.

Para (Kardec & Lafraia, 2002), la segunda condición importante para el mantenimiento es la rapidez. Esto es bastante obvio, pues cuanto menor es el tiempo que el equipo permanece parado, menor será el perjuicio para la producción. Otras condiciones para un buen mantenimiento son la precisión y la honestidad.

2.8 Tipos de mantenimiento.

Hay varios tipos de mantenimiento posibles (mantenimiento correctivo, preventivo, autónomo y predictivo) los nombres pueden incluso variar, más el concepto debe ser bien comprendido; la concepción permite la elección del tipo más conveniente para un determinado equipo, instalación o sistema. Entender cada tipo de mantenimiento y aplicar el más adecuado (correctamente) optimiza la producción, aumenta los beneficios y garantiza la supervivencia de la empresa.

2.8.1 Mantenimiento correctivo

Según (Xenos, 1998), consiste básicamente en dejar que las máquinas funcionen hasta que presenten alguna falla o algo próximo de eso, para entonces programar la corrección de los problemas. Es evidente que este método es el que conlleva mayores costos asociados a pérdidas de producción, debido a las paradas inesperadas y la imposibilidad de una planificación eficiente.

Según (Almeida, 2005), el mantenimiento correctivo se está mostrando no ser un sistema adecuado para las industrias modernas, pues no posibilita tener seguridad para cumplir un determinado plan de producción. Sus inconvenientes son innumerables, acarreando, entre otras, dos consecuencias:

a) El costo de mantenimiento aumenta fuertemente a medida que los equipos van envejeciendo.

b) Las fallas no previstas se traducen en una parada imprevista, acarreado grandes pérdidas debido a las pérdidas de producción.

2.8.2 Mantenimiento Preventivo

Según (Tavares, 1996), consiste básicamente en la programación de intervenciones en las máquinas con base en la estimación de un período medio de ocurrencia de fallas; este método normalmente resulta en la sustitución de componentes en buen estado, lo que ocasiona gran desperdicio y como consecuencia costos de mantenimiento muy elevados.

En compensación, la frecuencia de la ocurrencia de los fallos disminuye, la disponibilidad de los equipos aumenta y también disminuyen las interrupciones inesperadas de producción.

Para (Almeida, 2005), el mantenimiento preventivo procura evitar la ocurrencia de fallas, o sea, busca prevenir asegurando el ritmo necesario para el funcionamiento de los equipos, pues involucra tareas sistemáticas tales como: reparaciones, inspecciones e intercambios, contrario a lo que ocurre con la política de mantenimiento correctivo.

Según (Campbell & Reyes-Picknell, 2015) para atenuar las pérdidas que se originan durante la aplicación del mantenimiento preventivo en una empresa, una vez que los equipos o las instalaciones pasan su período de garantía técnica, a partir de los datos históricos de la ocurrencia de fallas o estados de fallas; se debe realizar un ajuste de los ciclos de mantenimiento basado en el uso de herramientas estadísticas-matemáticas que describen la naturaleza de la variable tiempo entre fallos o hasta el fallo, pudiendo siempre el personal de mantenimiento anticipar a la ocurrencia del fallo. Por otro lado, la aplicación de un único sistema de mantenimiento en una empresa es un error, siempre se debe trabajar conjugando los diferentes sistemas de mantenimiento que junto a los análisis que anteriormente fueron mencionados, permite ir reajustando el ciclo de mantenimiento preventivo. Por todo ello en una empresa se debe disponer de una correcta conjugación de la política del mantenimiento preventivo/predictivo como filosofía.

2.8.3 Mantenimiento autónomo

Según (Ribeiro & Pinto, 2002), consiste en desarrollar en los operadores el sentimiento de propiedad y celo por los equipos y la habilidad de inspeccionar y

detectar problemas en su fase inicial, e incluso realizar pequeñas reparaciones, ajuste y regulación.

El mantenimiento autónomo pasa, fundamentalmente, por un rescate justo y necesario de los valores del operador, liberando tiempo y energía para que los profesionales del mantenimiento dejen de ser meros "apagafuegos" y pasen a ser verdaderos practicantes de la "ingeniería de mantenimiento". Muchos profesionales del área de mantenimiento sostienen que el mantenimiento autónomo, por sí solo, no es un tipo de mantenimiento, configurándose al máximo como uno de los cimientos del TPM (Total Productive Maintenance). Sin embargo, en el momento en que hay una planificación y programación para la realización de servicios por parte de los operadores, se tiene una actividad mantenedora presente y efectiva en el organismo productivo. De ahí su caracterización como tipo de mantenimiento a ser encaminado por una empresa.

En el mantenimiento autónomo se tiene como máxima: "De mi máquina cuida yo", que es adoptada por los operadores que pasan a realizar servicios de mantenimiento en la maquinaria que operan.

Se puede decir que la idea del TPM es obtener cero fallos, cero defectos y cero accidentes, ya que el obrero conoce su máquina y tiene condiciones y técnicas de diagnosticar y prever la ruptura y ejecutar pequeños mantenimientos.

2.8.4 Mantenimiento Predictivo

A partir de 1966 con el fortalecimiento de las asociaciones nacionales de mantenimiento creadas en períodos anteriores y con la sofisticación de los instrumentos de protección y medición y la ingeniería de mantenimiento, pasa a desarrollar criterios de predicción de fallas, logrando así la optimización de la actuación de los equipos de ejecución del mantenimiento se decide denominar a tal sistema de trabajo como mantenimiento "**predictivo**" todo lo cual fue asociado a métodos de planificación y control del mantenimiento.

Según (Arato Junior, 2004), son tareas de mantenimiento preventivo en que las intervenciones están condicionadas a algún tipo de información reveladora del estado de degradación del sistema o equipo.

En este tipo de mantenimiento, las inspecciones periódicas se limitan al monitoreo de parámetros que puedan indicar el estado operacional de un sistema o equipo. Si el análisis de estos parámetros indica la existencia de un funcionamiento

no adecuado, se estima la tendencia evolutiva del defecto y se programa una parada de corrección.

La premisa del mantenimiento predictivo es que los monitoreos regulares de las condiciones mecánicas reales de las máquinas, y del rendimiento operativo de los sistemas de proceso, aseguran el intervalo máximo entre las reparaciones. También minimiza el número y el costo de las paradas no programadas creadas por fallas de la máquina, y mejora la disponibilidad global de las plantas operativas. Así, la inclusión del mantenimiento predictivo en un programa de gestión total de la planta, ofrece la capacidad de optimizar la disponibilidad de la maquinaria de proceso, y reduce bastante el costo del mantenimiento. En realidad, el mantenimiento predictivo puede ser visto como un programa de mantenimiento preventivo accionado por condición (Almeida, 2005).

Elegir el mantenimiento predictivo significa intervenciones sobre una máquina de forma condicional, es decir, únicamente si los parámetros de control evolucionan de forma significativa a niveles no aceptables. La principal ventaja de este proceso de mantenimiento es la disminución del coste de producción debido a las interrupciones periódicas y la disminución de la probabilidad de introducir nuevos defectos en las operaciones sistemáticas de montaje / desmontaje. Las otras ventajas son:

- a) aumento del tiempo medio entre cada revisión;
- b) Eliminación de defectos no atendidos;
- c) Disminución del stock de piezas de repuesto;
- d) Eliminación de la sustitución de componentes en estados operativos; y
- e) Minimización de paradas no programadas resultantes de fallos de componentes durante el servicio.

Según (Almeida, 2005), la práctica de mantenimiento predictivo involucra tres fases:

- Detección de defectos;
- Establecimiento de un diagnóstico;
- Análisis de tendencia.

La detección de defectos consiste en la observación de que los valores medidos de los parámetros de control indican una evolución más acelerada que la resultante de la degradación normal del equipo.

El establecimiento del diagnóstico es el resultado del análisis de los resultados de los valores de los parámetros de control establecidos, con base en modelos de desgaste e informaciones anteriores sobre el equipo, el origen y la gravedad de sus posibles defectos.

El análisis de tendencia consiste en ampliar el diagnóstico y prever, en la medida de lo posible, cuánto tiempo se dispone antes de la parada forzada por la falla propiamente dicha. En esta fase, el equipo se somete a una vigilancia estricta y se realiza la programación de la reparación.

2.9 Métodos de mantenimiento predictivo

Básicamente, el proceso consiste en monitorear parámetros que caracterizan el estado de funcionamiento de los equipos. Los métodos empleados involucran técnicas y procedimientos de medición, seguimiento y análisis de estos parámetros (Ripper Neto, 2000).

- Análisis de aceite (ferrografía) / Termografía / Análisis de vibración.

CAPÍTULO III

PREDESPACHO DE CARGA CON RESTRICCIONES DE MANTENIMIENTO

Este capítulo tiene el objetivo de definir el posible enlace entre el pre-despacho de unidades generadoras de carga enfocada en la confiabilidad del equipo, así como apuntar técnicas, métodos, enfoques, procedimientos, materiales, herramientas, entre otros, utilizados en la realización del presente estudio.

3.1 Procedimientos metodológicos para la realización de pre-despacho con restricciones de mantenimiento

El interés en el asunto se dio a partir de la dificultad de la realización de pre-despacho con restricciones de mantenimiento en la Planta Térmica del Mauá, donde el estudio fue realizado.

Se realizó el diagnóstico, donde el programa de TPM fue implantado, con el objetivo de levantar datos de la operación, entrevistas y análisis de documentos para servir de base al plan maestro estratégico. Después de la realización del diagnóstico, un informe con los datos levantados, oportunidades y recomendaciones, para análisis, discusión, adaptaciones y aprobación. Con el plan maestro estratégico definido y aprobado, se presentó el informe del diagnóstico para análisis, adaptación y aprobación de la empresa y personas indicadas involucradas en el programa, buscando determinar a las necesidades específicas y objetivos de las áreas donde el programa fue implantado.

El seguimiento del programa incluye reuniones con los coordinadores de cada pilar, auditorías durante la fase de implantación y orientación de las actividades, conceptos, premisas y metodología del plan maestro estratégico aprobado. Las actividades previstas y recomendadas para cada pilar fueron desarrolladas internamente por los coordinadores y grupos de trabajo, correspondiendo al consultor las auditorías y recomendaciones necesarias durante el período determinado en el contrato.

A medida que los datos fueron recogidos, se identificaron temas y relaciones, construyendo interpretaciones y generando nuevas cuestiones y / o perfeccionando las anteriores, lo que, a su vez, lo llevaron a buscar nuevos datos complementarios o más específicos, que probaran sus interpretaciones, en un proceso de sintonía fina que fue hasta el análisis final.

A partir de ese momento, la dedicación se concentró en los análisis del referencial teórico, dando base académica al estudio y en la creación del modelo utilizando la lógica fuzzy como una pieza clave en el proceso de decisión de los especialistas para el pre-despacho de carga. Las actividades demostraron la flexibilidad y la importancia de la investigación para el desarrollo de estudios dentro del área de planificación de pre-despacho de carga en el criterio de confiabilidad de los equipos, usando nuevas técnicas para la ayuda de los gestores en la toma de decisión.

La figura 3.1 es clave para entender la innovación de este texto y la metodología utilizada para el desarrollo de la misma. En la parte superior izquierda se puede apreciar la simplificación de los 8 pilares del TPM (Mejoras individuales, Mantenimiento autónomo, Mantenimiento planificado, Educación y entrenamiento, Mejoras en el Proyecto o Control inicial, TPM en las áreas Administrativas, Mantenimiento de la calidad y Seguridad, salud y medio para 4 Pilares del TPM (Mejoras específicas, Mantenimiento planificado, Mantenimiento autónomo, Educación y entrenamiento) haciendo una agrupación de los mismos conforme a la realidad de los recursos humanos de la planta. Para poder tener un control del mantenimiento, se ha agregado una actividad de auditoría que impide que la simplificación pueda dejar alguna actividad de mantenimiento importante sin atender. La parte central izquierda muestra las actividades de diagnóstico que permiten conocer el estado técnico de los motores para saber si pueden o no ser usados en el pre-despacho de carga y la parte inferior izquierda muestra los análisis de confiabilidad, lo que junto con el diagnóstico permiten saber cuándo es posible que un motor falle, para no considerarlo en el pre-despacho de carga. Con estos datos, en la parte derecha de la figura se muestra la aplicación de la lógica fuzzy para hacer el pre-despacho de carga, conforme las reglas fuzzy que atienden al estado técnico de los motores.

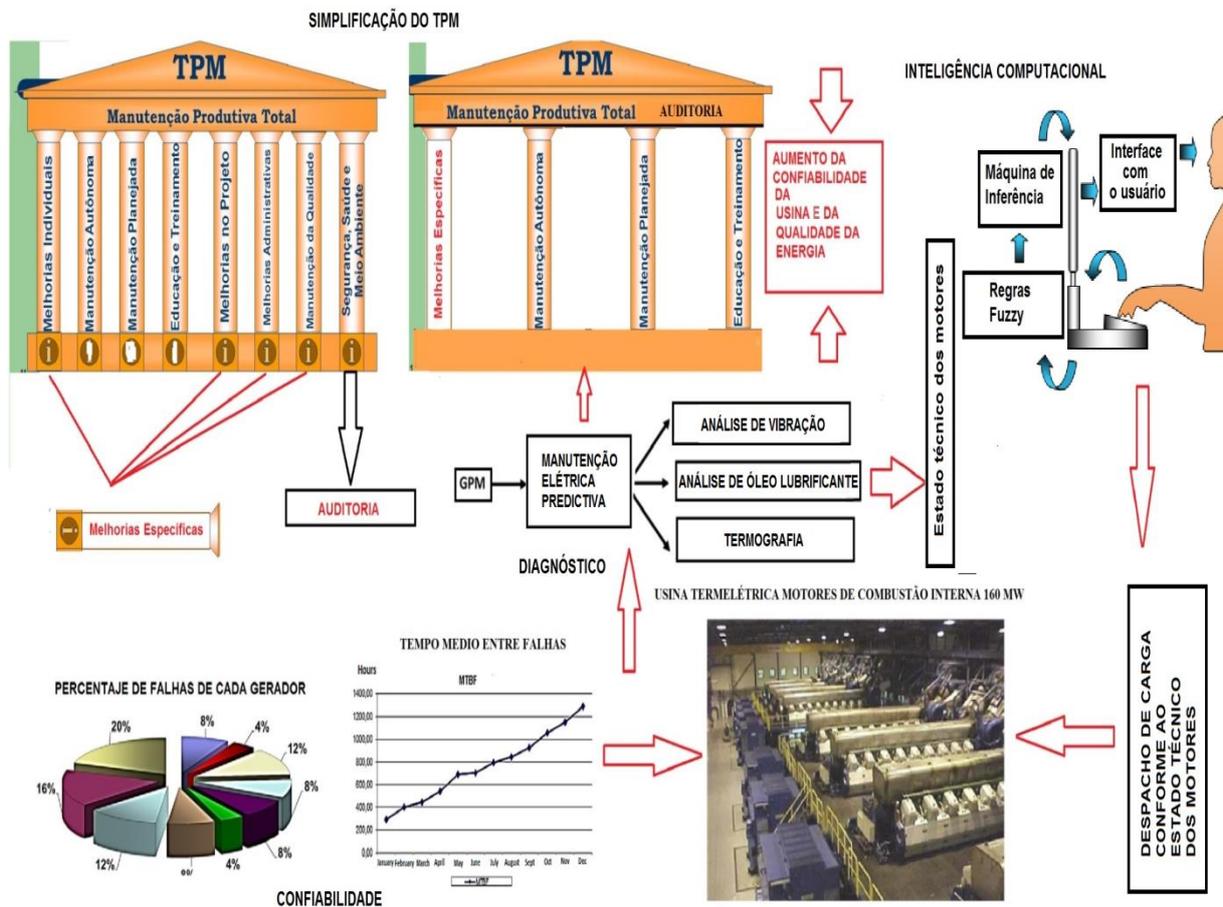


Figura 3.1- Metodología da Pesquisa
Fuente- Autores. (2017)

El seguimiento del programa incluye reuniones con los coordinadores de cada pilar, auditorías durante la fase de implantación y orientación de las actividades, conceptos, premisas y metodología del plan maestro estratégico aprobado. Las actividades previstas y recomendadas para cada pilar fueron desarrolladas internamente por los Coordinadores y Grupos de Trabajo, correspondiendo al Consultor de la auditoría realizar recomendaciones necesarias durante el período determinado en el contrato. Donde realiza los acompañamientos de las actividades seguir.

3.1.1. Gestión de Mantenimiento

Una buena gestión de mantenimiento significa, entre otras cosas, conseguir persuadir a la alta administración de que la inversión en mantenimiento es una buena inversión. En términos económicos, también se espera de una buena gestión, una reducción en los costos directos de mantenimiento y los costos de las piezas de repuesto, un mayor ahorro de energía, un mayor conocimiento de las máquinas y

reacciones particulares a los pedidos y, consecuentemente, un número menor de acuerdo con la normativa vigente en el país de origen.

Siempre habrá debates sobre qué factores deben incluirse en cualquier marco de prácticas. En el contexto de la operación de las usinas, la información recogida de la revisión de la literatura, puede apreciarse que las prácticas relacionadas con la calidad total y la gestión de mantenimiento se implementan activamente en la mayoría de las plantas, pero no siempre de la mejor manera. Esto no es sorprendente desde la introducción del concepto de gestión de calidad total y promoción de la calidad por la mayoría de las empresas; Las prácticas de calidad ahora son ampliamente instituidas en los ambientes de producción de las empresas (Aquilani, Silvestri, Ruggieri, & Gatti, 2017).

Sin embargo, investigadores y profesionales de la industria a menudo ignoraron el papel del equipo en la eficacia en el desempeño operacional, lo que tiene mucho que ver con el estado técnico del equipo y su influencia en el pre-despacho de carga. La gestión de mantenimiento puede ser el mayor desafío en las plantas de energía en un mercado ferozmente competitivo (de Freitas, Zatta, Mattos, Pozo, & Gonçalves, 2017; Gabriel et al., 2016). Con el fin de sostener plantas de alta disponibilidad y, al mismo tiempo, cumplir los requisitos de costo y reglamentación, se puede afirmar que las estrategias de mantenimiento adecuadas necesitan ser integradas con otras funciones de gestión (Brah & Chong, 2004; Nakajima, 1988).

La contribución a esta laguna en el conocimiento puede ayudar a los investigadores ya los profesionales en la comprensión del papel de las prácticas de mantenimiento en la determinación del desempeño de la planta, ya que ahora es considerable la presión sobre los gerentes de las plantas de energía para actuar en el ambiente desregulado competitivo (Chao & Huntington, 2013; David, 1993). En consecuencia, de lo anterior, se debe analizar qué operaciones y prácticas de mantenimiento predictivo son críticas en el desempeño de la planta, lo que proporcionaría una comprensión más profunda de las estrategias de mantenimiento a utilizar y cuáles son las áreas, que tienen la contribución más importante para el desempeño de la planta.

3.1.2. La Influencia del Mantenimiento en los Costos organizacionales.

Con el desarrollo de las empresas en el mercado se sabe que las inversiones en estructura física y tecnología progresaron en virtud de la búsqueda de la

competitividad, y como consecuencia, los costos con la actividad del mantenimiento aumentaron considerablemente (Davison, 2007).

(Marçal & Susin, 2005) en sus planteamientos, proponen la implementación de la planificación y del control de la producción, con vistas a la prevención o la predicción de la quiebra. En este sentido, los mismos autores subrayan que la implementación de esta política presenta resultados positivos para la disminución de los costos, ya que refleja una configuración de costos invertida, con una tasa negativa anual del orden del 20% y tendencia de valores estables, que pueden representar en el mercado el total de una economía de 300 a 500%, siendo más de la mitad de esta economía debido al lucro cesante considerando el coste total de una parada de equipo con la suma de los costes de mantenimiento (Tavares, 1996).

El proceso de mantenimiento incluye todas las actividades técnicas y organizativas que garanticen que las máquinas y equipos, en general, operen dentro de la confiabilidad esperada. Mantenimiento y trabajos de reparación que siguen ciertas directivas básicas reducen las probabilidades de fallas inesperadas y consecuentes pérdidas de producción, tiempo y gastos innecesarios. En casos más críticos, las fallas de un proceso pueden traer perjuicios graves e incluso poner en riesgo vidas humanas.

Esta nueva situación impone desafíos y exige el desarrollo y la aplicación de nuevos sistemas de gestión de mantenimiento, que buscan no sólo el perfeccionamiento continuo de los métodos de trabajo, pero de forma más amplia, la calidad total de los bienes y servicios. Que no sólo satisfagan las necesidades de los clientes, sino que excedan sus expectativas. Esto significa someter todos los procesos a mejoras continuas en la búsqueda de la calidad total, utilizando herramientas gerenciales de las más diversas naturalezas.

3.1.3. Confiabilidad.

La confiabilidad y la disponibilidad de las instalaciones sustentan el desempeño del negocio de la planta. El fracaso de las plantas en alcanzar altos niveles de disponibilidad puede resultar en riesgos significativos para la planta y para los operadores financieramente.

Los productos y servicios confiables son formas de propiciar una ventaja competitiva en las empresas. Para el mantenimiento, la norma brasileña NBR 5462-1994, define la confiabilidad de un ítem como la probabilidad de que este ítem

desempeña la función requerida, por un intervalo de tiempo establecido, bajo condiciones definidas de uso (Mendes & Ribeiro, 2014). La confiabilidad es la probabilidad de que un elemento ejecutará su misión de forma satisfactoria en un determinado período de tiempo cuando se utiliza en las condiciones especificadas. Para determinar la confiabilidad de un equipo, se deben considerar las confiabilidades de todos los componentes. Por lo tanto, en base a la teoría de la confiabilidad, la confiabilidad del sistema es menor que la confiabilidad del componente menos confiable (Jardine & Tsang, 2005). Desde el punto de vista de la confiabilidad, el mantenimiento tiene el objetivo de garantizar que un equipo o sistema ejerza las funciones para las cuales fue proyectado. El énfasis es seleccionar el tipo de mantenimiento más adecuado para mantener la máquina operando, en lugar de intentar restaurarlo a una condición ideal (Kardec & Lafraia, 2002).

Las plantas de energía térmica consisten en un conjunto de sistemas mecánicos y eléctricos que requieren un monitoreo constante de la producción de energía. Los datos obtenidos a través de las acciones de monitoreo son necesarios en la operación, mantenimiento y evaluación del desempeño de las plantas. Para este propósito, a menudo se utilizan los llamados Sistemas de Distributed Control (DCS) (Gomez-Exposito, Conejo, & Canizares, 2018).

La obsolescencia de este equipo (DCS) aumenta los riesgos de indisponibilidad de las unidades generadoras, principalmente en plantas termoeléctricas, con alto grado de desgaste mecánico, debido a las altas temperaturas ya los agentes químicos utilizados para la producción de energía eléctrica (Ericsson, Lennvall, Åkerberg, & Björkman, 2016). Además de la obsolescencia tecnológica, los costos de mantenimiento a lo largo del tiempo aumentan debido a la necesidad de sustituir las piezas en el DCS. Otro obstáculo observado se refiere a la disminución gradual del soporte técnico por los proveedores de estos sistemas a medida que el fabricante lanza nuevos sistemas similares. La renovación de estos sistemas es, por lo tanto, una condición sine qua non, imponiendo la necesidad de nuevos conocimientos y tecnologías para entrenamiento y desarrollo tecnológico de empresas de esta naturaleza. Tal renovación / actualización ofrece la posibilidad de utilizar nuevos sistemas DCS basados principalmente en el flujo libre de datos en tiempo real sin la necesidad de integrar cualquier interfaz en arquitecturas de software propietarias, como ya se ha practicado hasta ahora.

La base de una buena gestión de la ingeniería de mantenimiento es una información confiable sobre los aspectos más críticos del mantenimiento, es decir, los elementos que pueden resultar en un impacto más sustancial en los gastos o en la renta (Campbell & Reyes-Picknell, 2015; Fraser, Hvolby, & Tseng, 2015). Un plan de mantenimiento puede ser establecido, adoptando, entre otros, los siguientes criterios: horas de operación y degradación del medio de aislamiento o ciclo de operación del equipo. Para probar las economías obtenidas con un plan de mantenimiento implantado, las medidas deben ser evaluadas antes y después de su implementación.

Las descripciones que definen el proceso deben permitir su comprensión y proporcionar la base para cualquier examen crítico necesario para el desarrollo de mejoras. Por consiguiente, es esencial que las descripciones del procedimiento sean precisas, claras y concisas. "Es importante que, en una empresa ya en operación, los diagramas se establezcan de forma participativa" (Campos, 1999).

3.1.4 Mantenimiento Predictivo.

El mantenimiento predictivo es un tipo de acción preventiva basada en el MPT y fue desarrollada, inicialmente en Japón, con base en el análisis de vibraciones (Alsayouf, Shamsuzzaman, Abdelrahman, & Al-Taha, 2016; Marçal & Susin, 2005). La ferrografía, otra técnica de mantenimiento predictivo es muy importante y se utilizará en el presente trabajo para evaluar el estado técnico de los motores (Holmes & Knight, 2017).

El mantenimiento predictivo tiene como objetivo analizar los valores de los parámetros de seguimiento establecidos, con base en modelos de desgaste e informaciones anteriores sobre el equipo, el origen y la gravedad de sus posibles defectos.

El mantenimiento predictivo es un enfoque que utiliza los datos de seguimiento de la condición para predecir las futuras condiciones de la máquina y tomar decisiones sobre esta previsión (Schmidt & Wang, 2018).

Actualmente existen varias técnicas de monitoreo para la verificación de la modificación del parámetro establecido o del cambio del desempeño. Las técnicas predictivas pueden ser clasificadas por la magnitud medida, defecto, aplicabilidad. Las técnicas más aplicadas y que se utilizarán en esta tesis para el diagnóstico

técnico del motor son las siguientes (Galar, Thaduri, Catelani, & Ciani, 2015; Henao et al., 2014):

- Ensayos Eléctricos (Corriente, Tensión y Aislamiento);
- Análisis de Vibraciones (Nivel global, Espectro de vibraciones y Pulsos de choque);
- Análisis de Aceites (Viscosidad, Contenido de agua y Recuento de partículas);
- Análisis de Temperatura (Termometría convencional e Indicadores de temperatura);

3.1.5 Mantenimiento Productivo Total (MPT)

El Mantenimiento Productivo Total (MPT) fue desarrollado por el Japan Institute of Plant Maintenance (JIPM), del inglés, Instituto Japonés de Mantenimiento Industrial, e implementado en la industria japonesa a partir de 1971, inicialmente en el grupo Toyota (Brunner, 2017).

El MPT puede ser definida como la maximización de la eficiencia del equipo, cubriendo toda la vida del mismo, a través de la participación de todos los empleados (Alcaraz, Iniesta, & Macías, 2016).

El MPT puede dividirse en elementos a corto plazo ya largo plazo. Los elementos a largo plazo se centran en el desarrollo de nuevos equipos y la eliminación de fuentes de desperdicio de tiempo de producción. Los elementos a corto plazo se centran en: programas de mantenimiento autónomo para el departamento de producción; mantenimiento planificado para el departamento de mantenimiento; y desarrollo de habilidades especiales para el personal de operación; y el mantenimiento de equipos (Attri, Grover, Dev, & Kumar, 2013).

El TPM promueve un cambio de cultura dentro de la empresa que puede ser sentida en los diferentes departamentos de la misma, siendo que varios paradigmas son derribados durante su implantación. La determinación de todos los involucrados en la implementación del programa es fundamental para que puedan transponerse las diferentes barreras, que aparecerán durante la implantación de los pilares del programa. El TPM tiene pilares básicos que deben ser seguidos y trabajados durante su implementación para que los resultados sean alcanzados. Los pilares del TPM son (Adesta, Prabowo, & Agusman, 2018; Venkatesh, 2007):

- Mejoras específicas o individuales;

- Mantenimiento autónomo;
- Mantenimiento planificado;
- Educación y formación;
- Mejoras en el diseño o control inicial;
- TPM en las áreas administrativas (TPM Office);
- Mantenimiento de la calidad;
- Seguridad, salud y medio ambiente.

3.2 Plantas térmicas

Se consideran centrales termoeléctricas las que utilizan como combustible para generación de energía: carbón, gas, energía nuclear y biomasa, donde según (dos Reis, 1998; Feng, Niu, Wang, Zhou, & Cheng, 2019), "el proceso de funcionamiento está basado en la transformación de energía térmica en energía mecánica y de esta entonces en energía eléctrica".

En Brasil, las plantas térmicas son utilizadas para dar seguridad al sistema eléctrico, que utiliza prioritariamente energía generada por hidroeléctricas. Cuando el nivel de los depósitos de las centrales hidroeléctricas está por debajo de lo esperado, el accionamiento de las térmicas aumenta (Nazaré, 2017). Las plantas térmicas no son propiamente eficientes, en cifras su producción global es cerca del 38%, es decir, sólo aproximadamente el 38% de la energía térmica colocada en la planta por el combustible se vuelve aprovechable como energía eléctrica.

3.3 Generación termoeléctrica

Aunque se percibe una tendencia mundial, y también en el caso brasileño, del uso cada vez más creciente de fuentes renovables en la matriz energética, las fuentes de generación térmica no renovables, como las de gas y diésel, todavía desempeñan un papel importante en la atención de las puntas de consumo, o incluso en situaciones de baja disponibilidad de los recursos hídricos, cuando ellas asumen una porción considerable de generación de energía eléctrica.

Las plantas termoeléctricas presentan en general, como característica básica, un menor costo de construcción, y la posibilidad de ser asignadas más cercanas al mercado consumidor, aunque exhiben mayor costo de operación y de mantenimiento. En la actualidad, estas centrales representan una parte significativa de la generación de energía eléctrica en Brasil, componiendo principalmente los sistemas aislados

brasileños, mayoritariamente localizados y dispersos en la Región Norte. Estos sistemas atienden un área del 45% del territorio nacional y cerca de aproximadamente 1,2 millones de consumidores, y representan alrededor del 3,4% de la capacidad de producción de electricidad nacional (de Castro & Brandão, 2014).

3.4 Motores de Combustión Interna (MCI)

Pocas invenciones tuvieron un impacto tan grande en la sociedad, la economía y el medio ambiente como el motor de combustión interna (MCI), siendo estos motores comúnmente usados para la propulsión de sistemas muebles. La combustión interna es ventajosa en escenarios móviles, ya que puede proporcionar una alta relación entre peso y potencia (Gupta, 2012).

Estos motores se utilizan también en aplicaciones industriales, como en la producción de petróleo y gas, compresión, explotación de canteras, reciclaje, y generación de energía eléctrica. Su amplia utilización deriva del hecho de que pueden funcionar con una variedad de combustibles en una amplia gama de velocidades y con cargas variables (Ferguson & Kirkpatrick, 2015).

El motor diésel sigue siendo la unidad de combustión más eficiente de combustible líquido que se ha diseñado y ha demostrado su fiabilidad para las unidades de transporte masivo y de generación de energía. Así, el funcionamiento adecuado y eficiente de un motor diésel es un objetivo importante, especialmente para aplicaciones marítimas e industriales, es decir, la generación de energía (Raptotasio, Sakellaridis, Papagiannakis, & Hountalas, 2015). El factor más significativo para que el uso de los motores diésel superara el uso de los motores de gasolina, es su bajo consumo de combustible asociado con la alta potencia y el torque. A pesar del hecho de que los motores diésel atienden la creciente demanda de energía diaria y parecen ser una herramienta prometedora para atender el consumo eficiente de combustible, el ciclo del diésel convencional presenta altos niveles de emisiones de hollín en cargas elevadas del motor, baja eficiencia térmica y niveles elevados de las emisiones de Hidro Carbono no Quemado Unburned Hydro Carbon - (UHC) en bajas condiciones de carga del motor (Li, Yang, An, Maghbouli, & Chou, 2014).



Figura 3.2 – Foto dos Motores Wartsila V 46 da usina Mauá
Fuente: Autores (2017)

3.5 Datos Principales de los Motores a combustión interna y de los generadores eléctricos

La potencia total instalada con motores de combustión interna es de 158 MW con tiempo de 10 años de operación. El motor utilizado en el conjunto generador es un modelo de 4 tiempos, con inyección directa, pistón de tronco, turbo alimentado y enfriamiento intermedio (intercooler), con las siguientes características principales:

Configuración de cilindros: V, Número de cilindros: 18, Diámetro interno de los cilindros: 460 mm Velocidad: 514 rpm, longitud: 13,58 m, Ancho: 5,347 m, Altura: 5,488 m, Peso: 237 Ton

El generador eléctrico es del tipo trifásico, auto enfriado, sin cepillo, síncrono, cuyas características principales son:

El fabricante es ABB con potencia Nominal de 20,795 kVA, tensión de 13,8 kV, y factor de potencia de 0,85 con la frecuencia de 60Hz, velocidad de 514 rpm.

3.6 Despacho de Carga en la Usina Mauá

En Brasil, las plantas térmicas son utilizadas para dar seguridad al sistema eléctrico, que utiliza prioritariamente energía generada por hidroeléctricas. Cuando el nivel de los depósitos de las centrales hidroeléctricas está por debajo de lo esperado, el accionamiento de las térmicas aumenta. En la ciudad de Manaus el problema del

consumo de energía se restringe básicamente a las horas pico, y la duración del pico máximo es de menos de una hora, siendo que en el resto del día la capacidad energética instalada queda prácticamente sobredimensionada. Además, en estos últimos años los índices económicos y sociales brasileños se han vuelto negativos, lo que debe haber conducido a una disminución del consumo de energía. Las centrales térmicas no son propiamente eficientes, su eficiencia global es alrededor del 38%, es decir, sólo aproximadamente el 38% de la energía térmica colocada en la planta por el combustible se convierte en aprovechable como la energía eléctrica.

Las unidades generadoras de una planta se distribuyen para satisfacer los requisitos de carga variable en el tiempo del sistema eléctrico. Esta carga, a pesar de ser variable debido al cambio de la demanda de los consumidores residenciales, comerciales, industriales y de servicios, a lo largo de la jornada diaria; se puede afirmar que esta demanda, desde el punto de vista del suministro, presenta un patrón de comportamiento que varía, naturalmente, según el día de la semana (día hábil, sábado o domingo). Es decir, a pesar de no poder predecir el comportamiento de un consumidor individual, es posible prever el comportamiento de un conjunto de consumidores con un margen razonable de precisión (DE ASSIS CABRAL et al., 2017). El despacho de generadores puede ser efectuado de diversas formas, en función de la carga atendida y de la potencia disponible en los generadores.

La figura 3.3 presenta la curva de carga de Manaos de un día hábil en cierta época del año. Naturalmente, como la demanda máxima de ese sistema es inferior a la suma de la potencia disponible de todas las unidades generadoras, es de esperar que se pueda efectuar la atención del sistema sin restricciones energéticas.

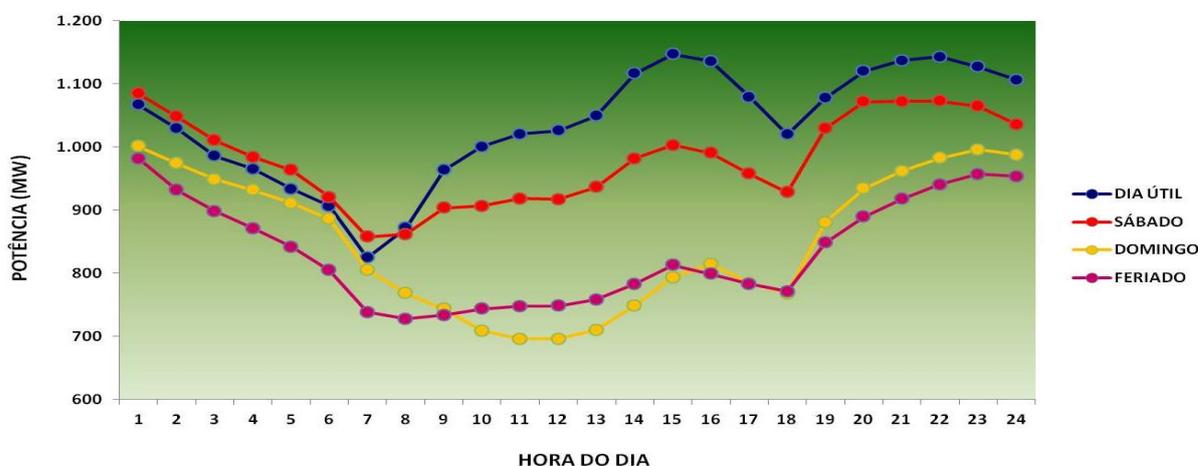


Figura 3.3 - Curva de Carga en la Ciudad de Manaos
Fuente: Autores (2017)

CAPÍTULO IV

LÓGICA FUZZY

Este capítulo aborda los aspectos relacionados con la Lógica Fuzzy. La teoría de los conjuntos clásicos se basa en el concepto fundamental de un conjunto, en el cual individuos son miembros o no miembros. Hay una distinción clara, clara y clara entre un miembro y un no miembro para cualquier conjunto bien definido de entidades en esta teoría, y hay un límite muy preciso y claro para indicar si una entidad pertenece a un conjunto. Así, en la teoría clásica de conjuntos, no puede ser un elemento en un conjunto (1) o un conjunto (0) al mismo tiempo. Esto significa que muchos problemas del mundo real no pueden ser tratados por la teoría clásica. Por el contrario, la teoría de los conjuntos difusos acepta valores de asociación parcial μ_{fc} $[0, + 1]$ y, en cierto sentido, generaliza la teoría de los conjuntos clásicos hasta cierto punto.

4.1 La lógica fuzzy o lógica difusa.

El mundo real es complejo; esta complejidad generalmente se deriva de la incertidumbre de los acontecimientos de la naturaleza y del futuro. Los seres humanos inconscientemente lograron resolver problemas complejos, ambiguos e inciertos gracias al don de pensar. Este proceso de pensamiento es posible porque los seres humanos no necesitan la descripción completa del problema, ya que tienen la capacidad de inferir aproximadamente y sacar conclusiones y evaluaciones sin disponer de todos los datos de determinado problema o situación. Con el advenimiento de las computadoras y el aumento del poder computacional, los ingenieros y los científicos están cada vez más interesados en la creación de métodos y técnicas que permitan a las computadoras trabajar con modelos con incertidumbre.

Como el Prof. Lotti A. Zadeh sugiere por su principio de incompatibilidad: "En cuanto de más cerca se mira a un problema del mundo real, la lógica fuzzy se convierte en la solución", y así la imprecisión y la complejidad se correlacionan (Zadeh, 1973).

La Lógica Fuzzy, las Redes Neuronales, los Sistemas Especialistas y los algoritmos genéticos forman parte de un nuevo paradigma conocido por sistemas inteligentes. Estos sistemas buscan proporcionar respuestas que solucionen

problemas, de forma apropiada a las situaciones específicas de estos problemas, aunque sean nuevas o inesperadas.

La lógica fuzzy tiene como objetivo modelar el modo aproximado de raciocinio, intentando imitar la habilidad humana de tomar decisiones racionales en un ambiente de incertidumbre e imprecisión. De este modo, la lógica fuzzy es una técnica inteligente, que proporciona un mecanismo para manipular informaciones imprecisas - conceptos de pequeño, alto, bueno, muy caliente, frío - y que permite inferir una respuesta aproximada a una pregunta basada en un conocimiento inexacto, incompleto o no totalmente confiable (De Silva, 2018; Nguyen et al., 2018).

En los últimos años, ha habido un interés creciente por la lógica difusa, tanto en la industria como en la academia (Ahn, Cho, & Chung, 2017; Dan, Arnaldos, & Darbra, 2017; Ferreira, Ferreira, & Macedo, 2016; Kahraman, Kaymak, & Yazici, 2016; Zoghi, Ehsani, Sadat, javad Amiri, & Karimi, 2017).

Las aplicaciones actuales incluyen modelado, evaluación, optimización, toma de decisiones, control, diagnóstico e información (Gottwald, 2013). Por ejemplo, la lógica difusa se aplicó en áreas como la predicción de la ruptura de los reactores nucleares en Europa, la previsión de terremotos en China y el control del metro en Japón.

4.2 Sistemas Fuzzy

Un sistema basado en lógica fuzzy, Figura 4.1, puede tener su acción esquematizada por los siguientes elementos constituyentes: Fuzificador; Reglas, o base de conocimiento; Inferencia, o lógica de toma de decisiones, y defuzificador (Larguech, Aloui, Pagès, El Hajjaji, & Chaari, 2016).

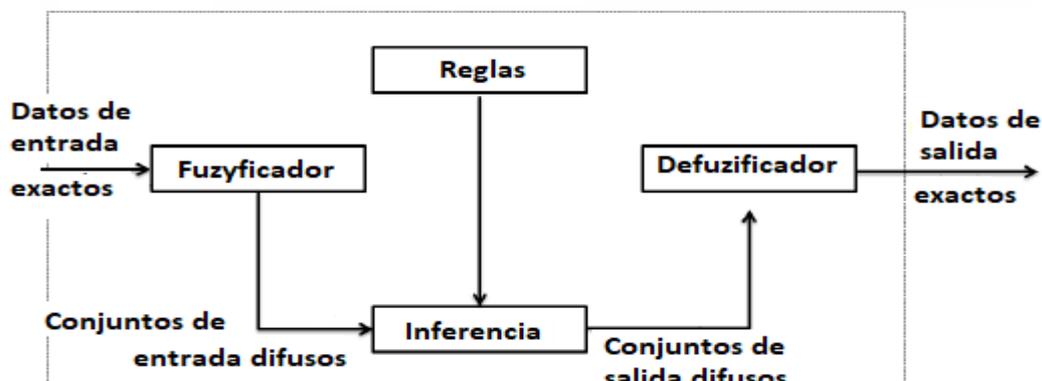


Figura 4.1. Sistema basado en lógica Fuzzy
Fuente: Adaptado de (Larguech et al., 2016)

En segundo lugar, el "Fuzificador" es responsable del mapeo de las entradas numéricas en conjuntos fuzzy, y las convierte en variables lingüísticas. La "inferencia" se realiza mapeando valores lingüísticos de entrada en valores lingüísticos de salida con el uso de las reglas. Esta utiliza implicaciones fuzzy para simulación de decisiones humanas, generando acciones de control, llamadas consecuentes, partiendo de un conjunto de condiciones de entrada, llamada de antecedentes.

Esta base de conocimiento representa el modelo del sistema a controlar, consistente en una base de datos y una base de reglas fuzzy lingüísticas. El "defuzificador" asigna valores lingüísticos y los convierte en valores numéricos de salida. Esta función es realizada por una interfaz de deflexión, obteniéndose un valor discreto que pueda ser usado en una acción de control en el mundo real.

4.3 Teoría de los Conjuntos Fuzzy

La base de los sistemas fuzzy es la teoría de los conjuntos fuzzy. Estos conjuntos son extensiones de los conjuntos convencionales, que permiten solamente que elementos sean verdaderos o falsos (lógica booleana, bivalente). Los conjuntos fuzzy permiten que sus elementos tengan cierto "grado de pertinencia" asociado, siendo esta propiedad conocida como "multivalencia". Esto permite la aproximación con el mundo real que no es bivalente, es en realidad multivalente con un vasto número de opciones en lugar de sólo dos. La lógica fuzzy, entonces, permite trabajar con tales incertidumbres de fenómenos naturales de forma rigurosa y sistemática (Dubois & Prade, 2012).

La determinación del grado de pertinencia, para conjuntos fuzzy continuos, se da por el análisis de "funciones de pertinencia". Estas funciones posibilitan el cálculo del grado de pertinencia de acuerdo con el valor asumido por la variable. Ellas representan los aspectos fundamentales de todas las acciones teóricas y prácticas de sistemas fuzzy (Ganga, Carpinetti, & Politano, 2011; Marques, Lopes Neto, LOPES, Furtado, & Araujo, 2016).

4.4 Funciones de pertinencia fuzzy

Las "Funciones de Pertinencia Fuzzy" representan los aspectos fundamentales de todas las acciones teóricas y prácticas de un sistema fuzzy. Una función de pertinencia es una función numérica gráfica o tabulada que atribuye valores de pertinencias fuzzy a valores discretos de una variable, en su universo de discurso representa el intervalo numérico de todos los posibles valores reales que

una variable específica puede asumir (Gabriel Filho, Cremasco, Putti, & Chacur, 2011; Paiva, 2008).

Un número difuso (en este caso, un indicador de rendimiento) es una generalización de un número real regular, en el sentido de que no se refiere a un solo valor, sino a un conjunto conectado de valores posibles, donde cada valor posible tiene su propio peso entre 0 y 1. Este peso se denomina función de asociación. Así como la lógica Fuzzy es una extensión de la lógica booleana (que utiliza sólo la verdad absoluta y la falsedad, y nada intermedio), los números difusos son una extensión de números reales. Los cálculos con números difusos permiten la incorporación de incertidumbre en parámetros, propiedades, geometría, condiciones iniciales, etc. Se pueden representar por los segmentos formados por asignación a una determinada función de índice de asociación (triangular, trapezoidal, gaussiana, Bell generalizada, sigmoideal, gamma, etc.) (Dubois & Prade, 2012).

La cantidad de funciones en un universo de discurso y su formato se elige basándose en la experiencia, en la naturaleza del proceso a ser analizado o en una entrevista con el operador humano especializado que realiza las funciones de control manualmente.

Los gráficos de funciones de pertinencia pueden tener diferentes formas y representaciones, las más comunes son la triangular, la trapezoidal y la gaussiana.

4.4.1. Funciones de Pertinencia Triangular

Las funciones de pertenencia triangulares se caracterizan por una terna (a, b, c), donde a y c determinan el intervalo dentro del cual la función de pertinencia asume valores diferentes de cero, y b es el punto donde la función de pertinencia es máxima (de Figueiredo, Tasinaffo, & Dias, 2016). La Figura 4.2 muestra la curva de una función de pertinencia triangular donde se destacan a, b y c. En esta figura se encuentran en el eje vertical los valores de la función de pertinencia y en el eje horizontal los valores de la variable que se quiere estudiar (Bittencourt, 2011).

$$\mu_A = \left\{ \begin{array}{l} 0 \text{ se } x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a} \text{ se } a < x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b} \text{ se } b < x \leq c \\ 0 \text{ se } x > c \end{array} \right.$$

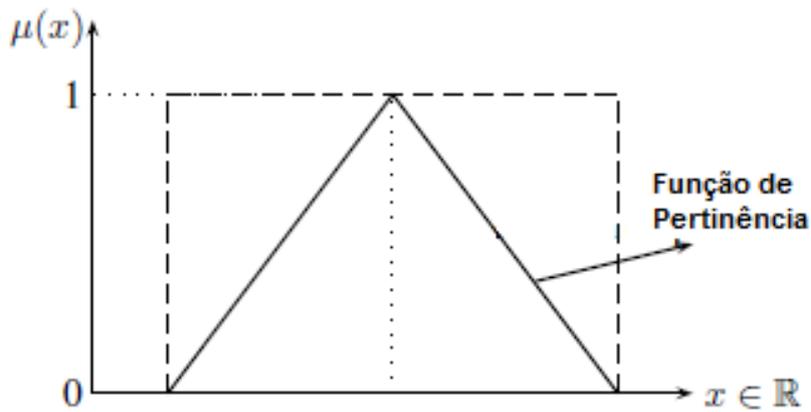


Figura 4.2. Função de pertinência triangular
 Fonte: Adaptado de (Jones, Kaufmann, & Zimmermann, 2012)

4.4.2. Funções de pertinência trapezoidal

Las funciones de pertinencia trapezoidales se caracterizan por un conjunto de cuatro valores de "a", "b", "c" y "d", donde "a" y "d" determinan el intervalo dentro del cual la función de pertinencia asume valores de acuerdo con lo establecido en el apartado 1 del presente artículo, en el caso de que se produzca un cambio en la calidad del producto, , "c" y "d". En esta figura se encuentran en el eje vertical los valores de la función de pertinencia y en el eje horizontal los valores de la variable que se quiere estudiar.

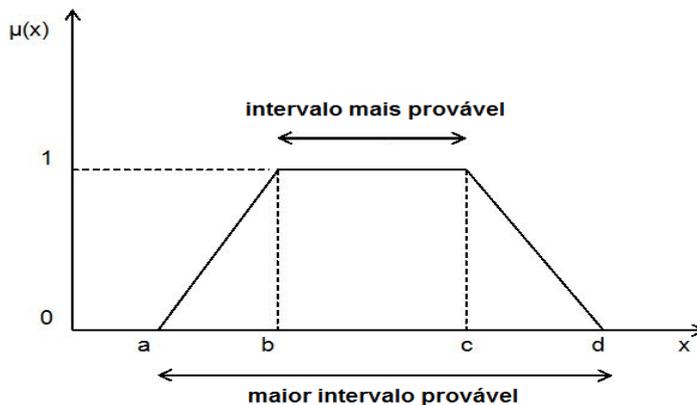


Figura 4.3. Função de Pertinência Trapezoidal
 Fonte: Adaptado de (Jones, Kaufmann, & Zimmermann, 2012)

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases}$$

Los números difusos triangulares y trapezoidales (Figura 4.4) son conocidos por su capacidad de adaptarse, pues formalizan de forma confiable muchas situaciones organizacionales (Jones, Kaufmann, & Zimmermann, 2012)

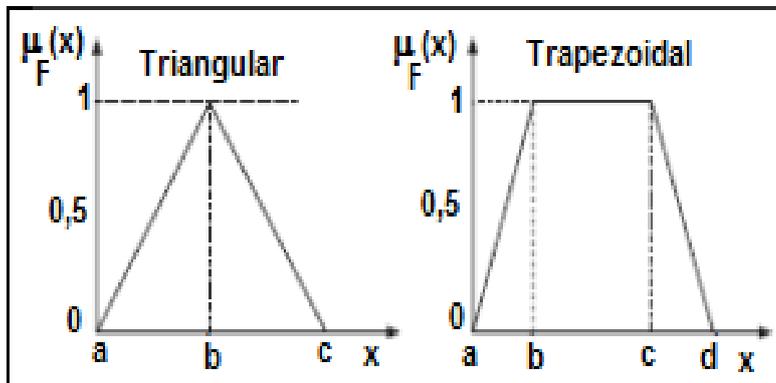


Figura 4.4. Comparación entre funciones trapezoidales y triangulares
Fuente: Adaptado de (Jones, Kaufmann, & Zimmermann, 2012)

4.4.3. Funciones de Pertinencia Gaussianas

Las funciones de pertinencia Gaussianas se caracterizan por su media (μ) y su desviación estándar (σ). Este tipo de función de pertinencia tiene un decaimiento suave y tiene valores diferentes de cero para todo dominio de la variable estudiada. La Figura 4.5 muestra una función de pertinencia Gaussiana. En esta figura se encuentran en el eje vertical los valores de la función de pertinencia y en el eje horizontal los valores de la variable que se quiere estudiar.

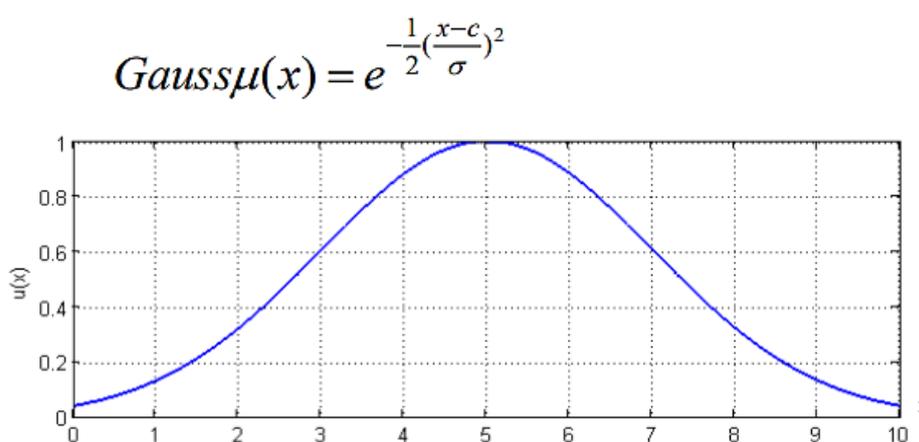


Figura 4.5. Función de Pertinencia Gaussiana
Fuente: Adaptado de (Jones, Kaufmann, & Zimmermann, 2012)

4.5. Reglas Fuzzy

Una regla difusa (si - entonces, regla de producción difusa) se expresa simbólicamente como:

Si <proposición difusa> ENTONCES <proposición difusa>

Se puede definir una proposición simple de este tipo por:

Si X es A ENTONCES Y es B

El antecedente y consecuente de una regla pueden tener múltiples partes.

En sistemas difusos en los que el antecedente es difuso, todas las reglas se ejecutan parcialmente, y el consecuente es cierto hasta cierto punto (si el antecedente es cierto con algún grado de pertinencia, el consecuente es también cierto grado).

Las reglas fuzzy son reglas normales utilizadas para operar, de manera correcta, conjuntos fuzzy, con la intención de obtener consecuentes. Para crear tales reglas es necesario un razonamiento coherente con lo que se desea manipular y obtener. Por lo tanto, este razonamiento se debe dividir en dos etapas: (1) para evaluar el antecedente de la regla y (2) que solicitan el resultado en el consecuente. Por ejemplo, considerando la sentencia si x es alto, entonces x es pesado siguiendo los pasos 1 y 2 arriba, se tiene que para $x = 1,70\text{m}$, primero se debe verificar el grado de pertinencia de la entrada para el conjunto al que encaja, alto, que es, para este caso, $\mu(x) = 0.5$. Como el grado de pertinencia de la entrada x es tal, entonces se debe pasar este valor de pertinencia para un $y = 80\text{ kg}$ (por ejemplo), perteneciente al conjunto pesado. Para casos en que existan varios antecedentes, es necesario encontrar un grado de pertinencia resultante de todos los antecedentes. En los casos en que el conectivo entre los antecedentes sea "y", se deben utilizar métodos de combinación, siempre que el resultado no sobrepase el valor de menor pertinencia entre los antecedentes; un ejemplo de método sería el mínimo de las pertinencias. En los casos en que el contacto entre los antecedentes es "o", se deben utilizar métodos de combinación, siempre y cuando el resultado no sea menor que el mayor grado de pertinencia. El razonamiento es mucho más simple para casos en que existan varios consecuentes, pues el grado de pertinencia resultante será el mismo para todos los consecuentes.

CAPÍTULO V

APLICACIÓN DE LA LÓGICA FUZZY AL DESPACHO DE CARGA TENIENDO EN CUENTA RESTRICCIONES DE MANTENIMIENTO

Este capítulo trata de la aplicación de la lógica fuzzy para el despacho de carga, pero con una particularidad que es realizar dicho pre-despacho de carga teniendo en cuenta el estado técnico de los motores, evaluado por diferentes variables relacionadas con el mantenimiento. En la primera parte se exponen el desarrollo de las reglas fuzzy y de todo el procedimiento de inferencia y en la segunda parte todas las pruebas para evaluar el mantenimiento y el estado técnico de los motores. Esta herramienta sirvió de base para la resolución de problema real de pre-despacho de carga para satisfacer los métodos racionalizados del just in time de la usina térmica sobre condiciones operacionales de los equipos.

En este contexto, se abstraen los siguientes grupos de información y datos: los valores de entrada, denominados crisp, las variables lingüísticas y las variables fuzzy. La lógica fuzzy se justifica en la solución de este estudio caso en función de las variables de entrada con mejor representatividad en conjuntos fuzzy, Las variables debido a la dimensión del universo de estudio, fueron divididas en entradas y salida, todas independientes entre sí.

5.1 Procedimiento para la aplicación de la lógica fuzzy

El primer paso fue la determinación de las variables a utilizar para establecer las reglas fuzzy, para ello se tuvieron en cuenta los análisis de vibraciones, los análisis del ojo lubricante y la termografía. En base a la clasificación del estado de estas variables se determinó el estado técnico de los motores conforme a las reglas fuzzy establecidas. Entonces, para una demanda de potencia dada, el pre-despacho de carga se puede hacer utilizando los motores de mejor estado técnico para satisfacer la demanda.

5.2. Determinación de las variables de entrada Fuzzy

Para la determinación de cada variable fue conveniente la división en bandas para una mayor aproximación de la situación real que se desea verifica:

5.2.1. La variable de entrada "Análisis de Vibración"

El "Nivel de vibración", la medición que se realiza a menudo es la primera variable de entrada por ser responsable de las condiciones operativas de despacho

de carga para generación de energía. Los niveles de vibración se subdividieron en 4 (cuatro) variables, siendo cada una correspondiente la clasificación de los niveles de vibraciones, velocidad y desplazamiento.

La clasificación adoptada para la severidad vibratoria es función de la potencia del accionamiento, velocidad de rotación de la máquina, así como nivel de criticidad para la producción se utilizará la clase IV maquinas por encima de 300 KW de potencia conforme tabla 5.1.

Tabla 5.1. Clasificación de las máquinas de acuerdo a la Potencia.

• Clase I	• Máquinas de 0 a 15 kW de Potencia
• Clase II	• Máquinas de 15 a 75 kW de Potencia
• Clase III	• Máquina de 75 a 300 kW de Potencia
• Clase IV	• Máquina encima de 300 kW de Potencia

Fuente: Autores, (2017)

Cada equipo fue cuidadosamente evaluado para que los niveles de vibración fueran compatibles y registrados con la máxima fidelidad en el Software Prism4, buscando la gestión y control de los valores para el análisis de los puntos en estudio. Ver tabla 5.2.

Tabla 5.2: Niveles Vibratorios

Clase	[N] Normal	[P] Permisible	[A] Alerta	[C] Crítico
Clase I	0,18 a 0,71	0,71 a 1,80	1,80 a 4,50	Encima de 4,50 mm/s
Clase II	0,18 a 1,10	1,10 a 2,80	2,80 a 7,10	Encima de 7,10 mm/s
Clase III	0,18 a 1,80	1,80 a 4,50	4,50 a 11,2	Encima de 11,2 mm/s
Clase IV	0,18 a 2,80	2,80 a 7,10	7,10 a 18,0	Encima de 18,0 mm/s
Código	A	B	C	D

Fuente: Electrobras Amazonas Energía, (2017).

En el futuro, estos niveles podrán ser alterados conforme a la periodicidad deseada a alcanzar por las curvas de tendencias, análisis espectral y distribución de vibraciones por el período de análisis del acompañamiento evolutivo de las vibraciones en función de las intervenciones que fueron o no efectuadas por el mantenimiento obedeciendo rigurosamente al plan de mantenimiento predictivo. Para

la toma de decisión para el pre-despacho de carga de las unidades generadoras, conforme tabla 5.3.

Tabla 5.3. Función de pertinencia de la Clasificación de la severidad de la Vibración.

Zona de Vibración	Calificación	Operación de las máquinas
Zona A: Vibración	[N] Normal 0,18 a 2,80	Las máquinas comisionadas generalmente deben operar en esta zona.
Zona B: Vibración	[P] Permisible 2,80 a 7,10	Es aceptable para operación irrestricta por largos períodos;
Zona C: Vibración	[A] Alerta 7,10 a 18,0	Insatisfactoria para operaciones continuas por largos períodos.
Zona D:	[C] Crítica Encima de 18,0 mm/s	Es suficiente para causar daños a la máquina en cualquier momento.

Fuente: Autores, (2017)

5.2.2 Variable de entrada "Análisis del aceite lubricante"

El "Nivel de análisis del aceite lubricante aceptable" realizado mensualmente referente al contenido de agua en el aceite, contenido de partículas sólidas en el aceite lubricante (hierro y cobre), por ser responsable por las condiciones operacionales del despacho de carga para generación de energía. Los niveles de análisis del aceite lubricante aceptable se subdividieron en 3 (tres) variables, siendo cada una correspondiente la clasificación de la calidad de aceite lubricante aceptable conforme la tabla 5.4.

Tabla 5.4 - Análisis periódico del aceite lubricante.

Clase	[N] Normal	[A] Alerta	[C] Crítico
Agua % Volumen	% ≤ 0,2	0,3	Encima de ,03
Teor de hierro	% ≤ 49	50	Encima de 51
Teor de cobre	% ≤ 19	20	Encima de 21
	A	B	C

Fuente: Electrobras Amazonas energía, (2017).

Los análisis se realizan periódicamente (una vez por semana), donde se acompañan las tendencias presentadas por los gráficos, siendo elaborado un resumen. Esta tendencia sirve para la toma de decisión para el pre-despacho de carga de las unidades generadoras, conforme la tabla 5.5.

Tabla 5.5. Función de pertinencia de la severidad de acuerdo al aceite lubricante.

Zona	Calificación	Operación de las máquinas
Zona A Agua % Volumen Teor de hierro Teor de cobre	[N] Normal % ≤ 0,2 % ≤ 49 % ≤ 19	Las máquinas comisionadas generalmente deben operar en esta zona..
Zona B Agua % Volumen Teor de hierro Teor de cobre	[A] Alerta o insatisfactoria 0,3 50 20	Insatisfactoria para operaciones continuas por largos períodos
Zona C Agua % Volumen Teor de hierro Teor de cobre	[C] Crítica o severa Encima de 0,3 Encima de 51 Encima de 21	Es suficiente para causar daños a la máquina en cualquier momento.

Fuente: Autores, (2017)

5.2.3 Variable de entrada "Termografía"

El "Nivel del análisis de la Termografía" realizado a menudo es la quinta variable de entrada por ser responsable por las condiciones operacionales de despacho de carga para generación de energía. Los niveles del análisis de la termografía aceptable se subdividieron en 4 (cuatro) variables, siendo cada una correspondiente la clasificación de la confiabilidad de los equipos de generación aceptable (ver tabla 5.6).

Tabla 5.6 - Valores limites conforme a termografía para determinar puntos calientes

NORMA	ANÁLISIS DE LA TERMOGRAFIA	
A	[N] Normal Menor o	
B	[P] Permisible	
B / C	94,0 F	164,2
C	[A] Alerta	
C / D	164,2 F	199,3 F
D	[C] Crítico Mayor o igual a 199,3 F	

Fuente: Manual del fabricante Fluke 2016).

Los análisis de termografía se realizan mensualmente donde se detecta los puntos calientes atrevidos de una ruta de verificación, donde se acompañan las tendencias presentadas por los termovisor modelo FLUKE, siendo elaborado un resumen. Esta tendencia sirve para la toma de decisión para el pre-despacho de carga de las unidades generadoras, conforme tabla 5.7.

Tabla 5.7. Función de pertinencia de la Clasificación severidad de la termografía.

Zona	Calificación de acuerdo a la Temperatura	Operación das máquinas
Zona A	<i>[N] Normal</i> ($T \leq 34,5^{\circ}\text{F}$)	Las máquinas comisionadas generalmente deben operar en esta zona.
Zona B	<i>[P] Permissible o Aceptable</i> ($34,5^{\circ}\text{F} < T \leq 73,5^{\circ}\text{F}$)	Aceptable para operación irrestricta por largos períodos (24 hs)
Zona C	<i>[A] Alerta o Insatisfactoria</i> ($73,5^{\circ}\text{F} < T \leq 93^{\circ}\text{F}$)	Insatisfactoria para operaciones continuas por largos períodos. (24 hs)
Zona D	<i>[C] Crítica o severa</i> ($T > 93^{\circ}\text{F}$)	Es suficiente para causar daños a la máquina en cualquier momento.

Fuente: Autores, (2017).

5.2.4 Variable de salida "Estado técnico del motor"

El "Estado técnico del motor (ETM)" es la variable de salida del sistema, es decir, la relación entre las variables de entrada (Vibración), (Aceite lubricante: agua, hierro y cobre), (Termografía) para la variable ETM de salida para pre-despacho de carga. El estado técnico del motor va a ser establecido mediante inferencia fuzzy a través de las variables de entrada y de las reglas fuzzy establecidas. El establecimiento de las reglas fue hecho consultando a los ingenieros de más experiencia en la planta y algunos profesores de diferentes universidades. El estado técnico del motor fue transferido a una escala porcentual de donde la variable (ÓPTIMA / NORMAL) corresponde al rango porcentual de 76 a 100%, (PERMISIBLE) corresponde al rango porcentual de 51 a 75% ", (ALERTA), corresponde a la franja porcentual de 26 a 50% el porcentaje porcentual de 26 a 50% y la variable (CRITICO), corresponde al rango porcentual de 0 a 25%, esto sirve para toma de decisión en el pre-despacho de carga de las unidades generadoras conforme.

Tabla 5.8: Variable “Estado Técnico del Motor”

ESTADO TÉCNICO DO MOTOR (ETM) PARA CONDIÇÕES OPERACIONAIS		OPERACIÓN DAS MÁQUINAS
Normal	76 a 100%	As máquinas comisionadas generalmente deben operar en esta zona
Permisible	51 a 75%	Aceptable para operación irrestricta por largos períodos (24 hs)
Alerta	26 a 50%	Insatisfactoria para operaciones continuas por largos períodos. (24 hs)
Critico	0 a 25 %	É suficiente para causar danos à máquina em cualquier momento.

Fuente: Autores, (2017).

5.3. Simulación Fuzzy

La simulación fuzzy conteniendo las variables del sistema, fue realizada utilizando la herramienta MATLAB versión 2017 a y el modelo fuzzy aplicado en esta simulación fue de Mamdani. Este modelo se caracteriza por adoptar las reglas semánticas utilizadas para el procesamiento de inferencias y es comúnmente denominada de inferencia de máximo mínimo. Este modelo de inferencia se aplica bien a este tipo de problema teniendo en cuenta que utiliza las operaciones de unión e intersección entre conjuntos. La implementación es hecha por el modelo de Mamdani aplicado a este estudio de caso conforme Figura 5.2. Después de la edición de las funciones de pertinencia de todas las variables, se establecieron las reglas fuzzy para el proceso de inferencia, que aparecen en la tabla 5.9.

Tabla 5.9: Reglas de Inferencia

Vibración	Agua	Termografía	Hierro	Cobre	ETM
Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Permisible	Normal	Permisible	Normal	Alerta	Alerta
Alerta	Normal	Alerta	Normal	Critico	Critico
Critico	Normal	Critico	Alerta	Normal	Critico
Normal	Normal	Normal	Alerta	Alerta	Alerta
Permisible	Normal	Permisible	Alerta	Critico	Critico
Alerta	Normal	Alerta	Critico	Normal	Critico
Critico	Normal	Critico	Critico	Alerta	Critico
Normal	Normal	Normal	Critico	Critico	Critico
Permisible	Alerta	Permisible	Normal	Normal	Alerta
Alerta	Alerta	Alerta	Normal	Alerta	Alerta
Critico	Alerta	Critico	Normal	Critico	Critico
Normal	Alerta	Normal	Alerta	Normal	Alerta
Permisible	Alerta	Permisible	Alerta	Alerta	Alerta
Alerta	Alerta	Alerta	Alerta	Critico	Critico
Critico	Alerta	Critico	Critico	Normal	Critico
Normal	Alerta	Normal	Critico	Alerta	Critico
Permisible	Alerta	Permisible	Critico	Critico	Critico
Alerta	Critico	Alerta	Normal	Normal	Critico
Critico	Critico	Critico	Normal	Alerta	Critico
Normal	Critico	Normal	Normal	Critico	Critico
Permisible	Critico	Permisible	Alerta	Normal	Critico
Alerta	Critico	Alerta	Alerta	Alerta	Critico
Critico	Critico	Critico	Alerta	Critico	Critico
Normal	Critico	Normal	Critico	Normal	Critico

Fuente: Autores, (2017).

Las reglas de Inferencia se realizaron según datos elaborados con 512 combinaciones (Vibración, agua, hierro, cobre y termografía), pues la tabla 5.9 presentamos sólo 26 combinaciones como ejemplo.

Todas las variables se insertan considerando los intervalos determinados en las reglas de inferencia conforme figura 5.1.

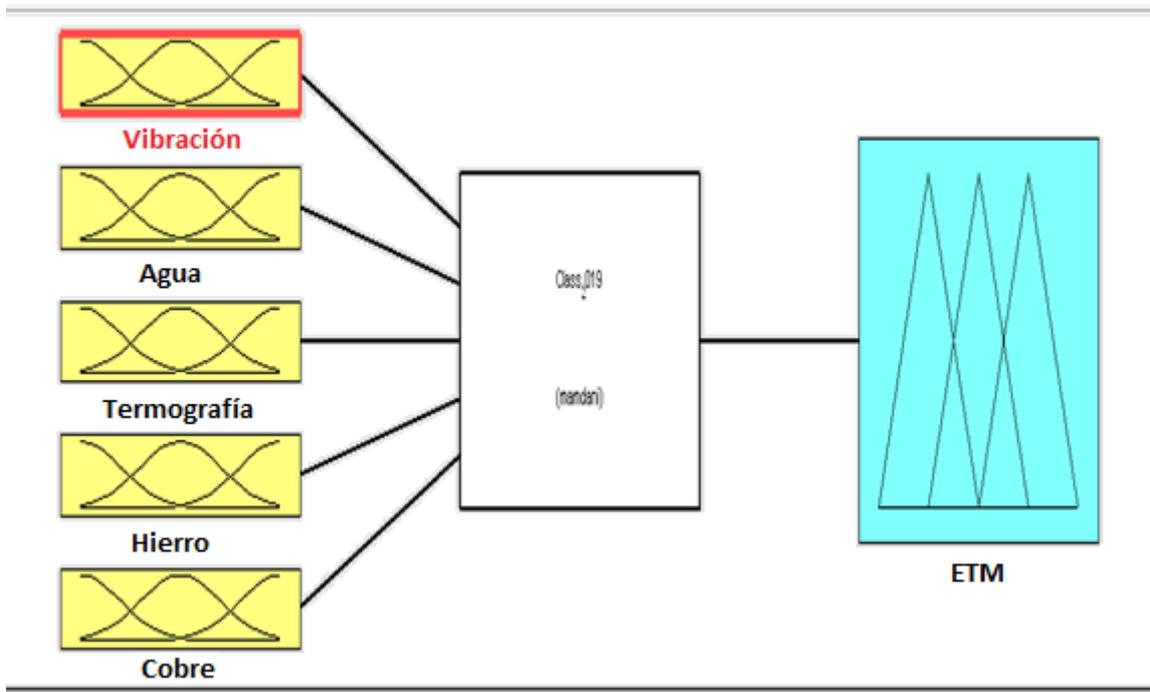


Figura 5.1- Modelo de Mamdani.
Fuente: Autores, (2017).

En las figuras 5.2 a 5.6 se presenta la implementación de todas las variables de entrada al sistema fuzzy.

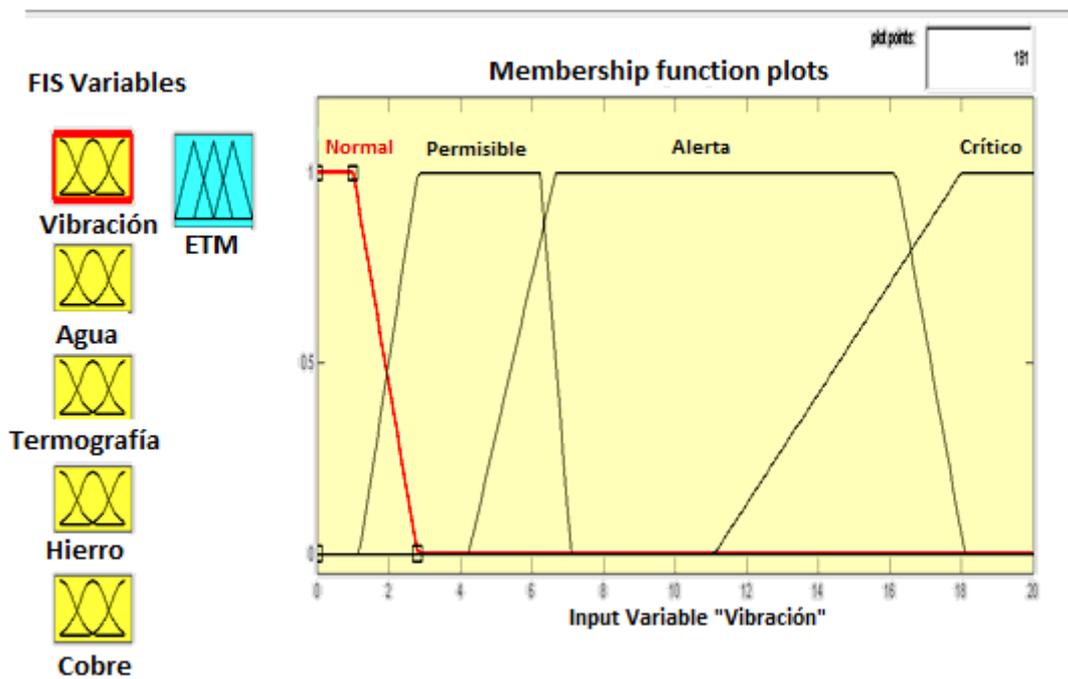


Figura 5.2: Primera Variable de entrada: “Nivel de Vibración”
Fuente: Autores, (2017).

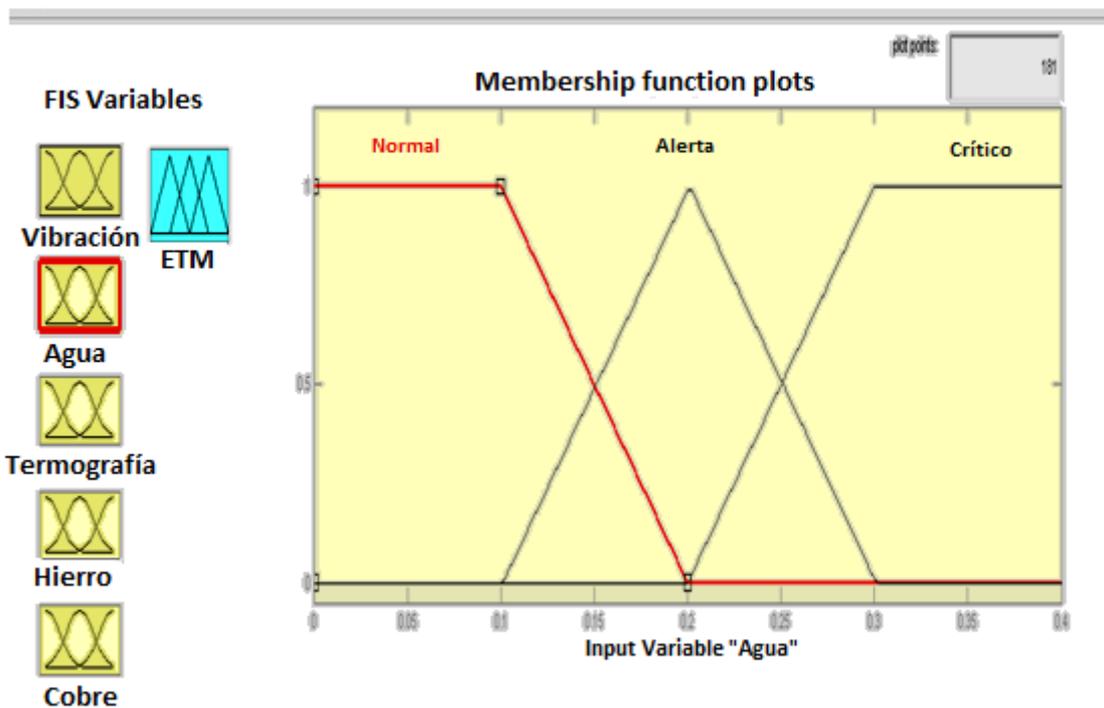


Figura 5.3: Segunda Variable de entrada: “Agua”
 Fuente: Autores, (2017).

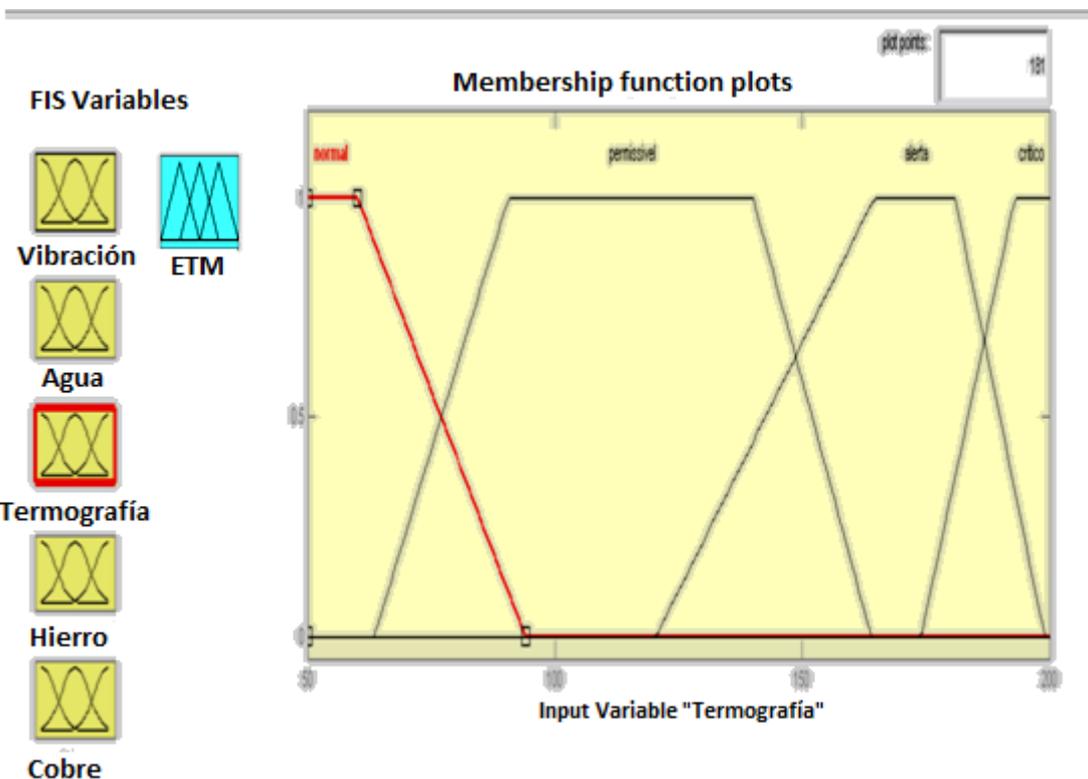


Figura 5.4: tercera Variable de entrada: “Termografía”
 Fuente: Autores, (2017).

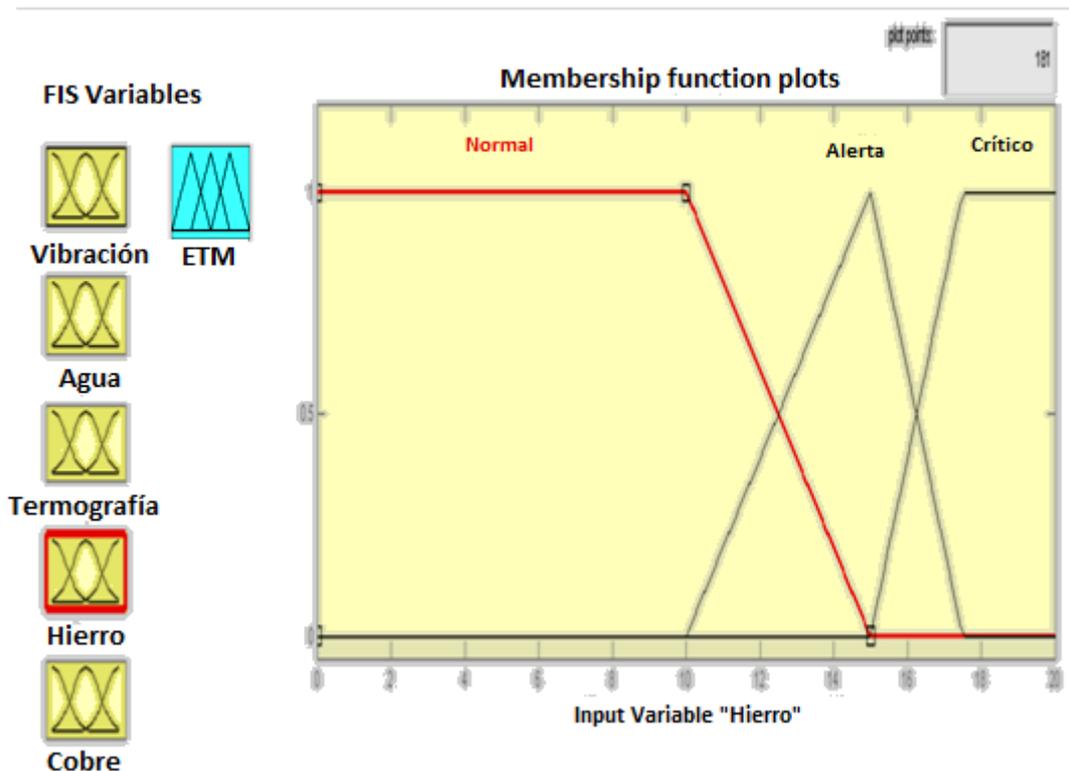


Figura 5.5: Cuarta Variable de entrada: “Hierro”
Fuente: Autores, (2017).

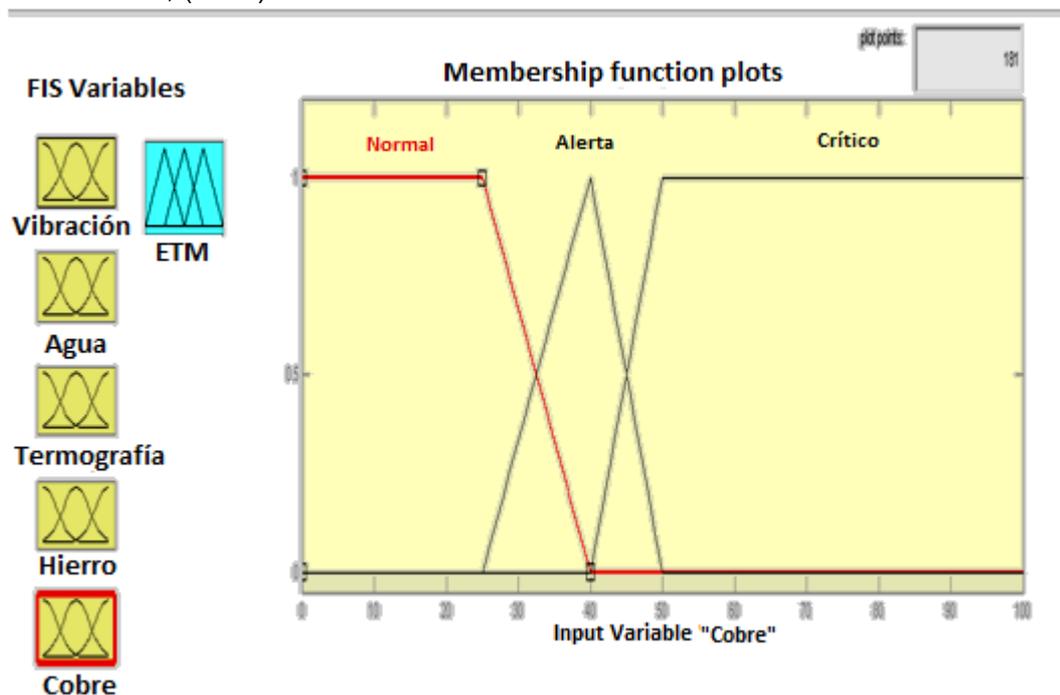


Figura 5.6: Quinta Variable de entrada: “Cobre”
Fuente: Autores, (2017).

El Estado Técnico del Motor es producto de la relación entre la variable de entrada y variable de salida, que componen las funciones de pertinencia expresadas en las curvas de la Figura 5.7:

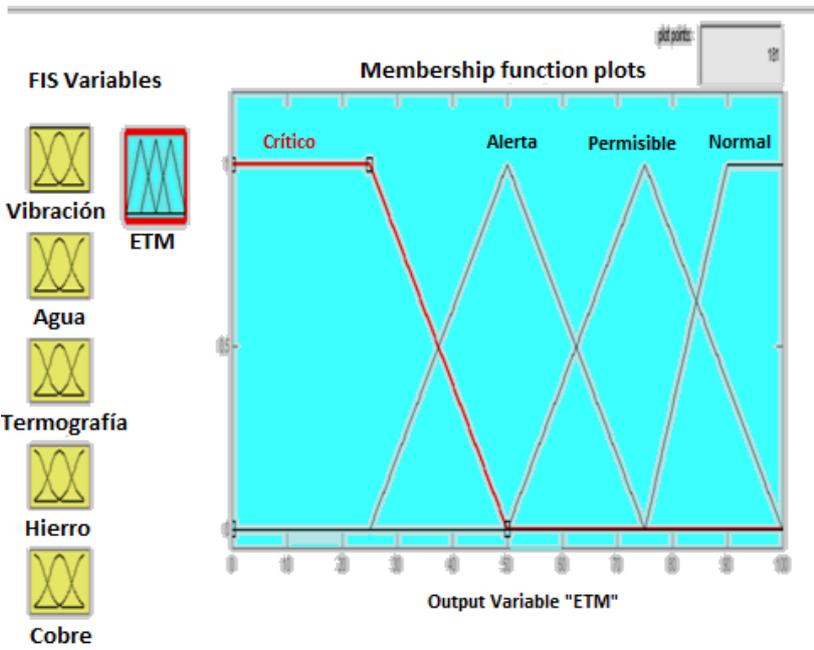


Figura 5.7: Variable de Salida: Estado Técnico do Motor
Fuente: Autores, (2017).

Conforme a la Figura 5.8 se muestra como ejemplo la combinación de algunas de las variables lingüísticas formando así los antecedentes y los consecuentes con base en las reglas de inferencia Fuzzy.

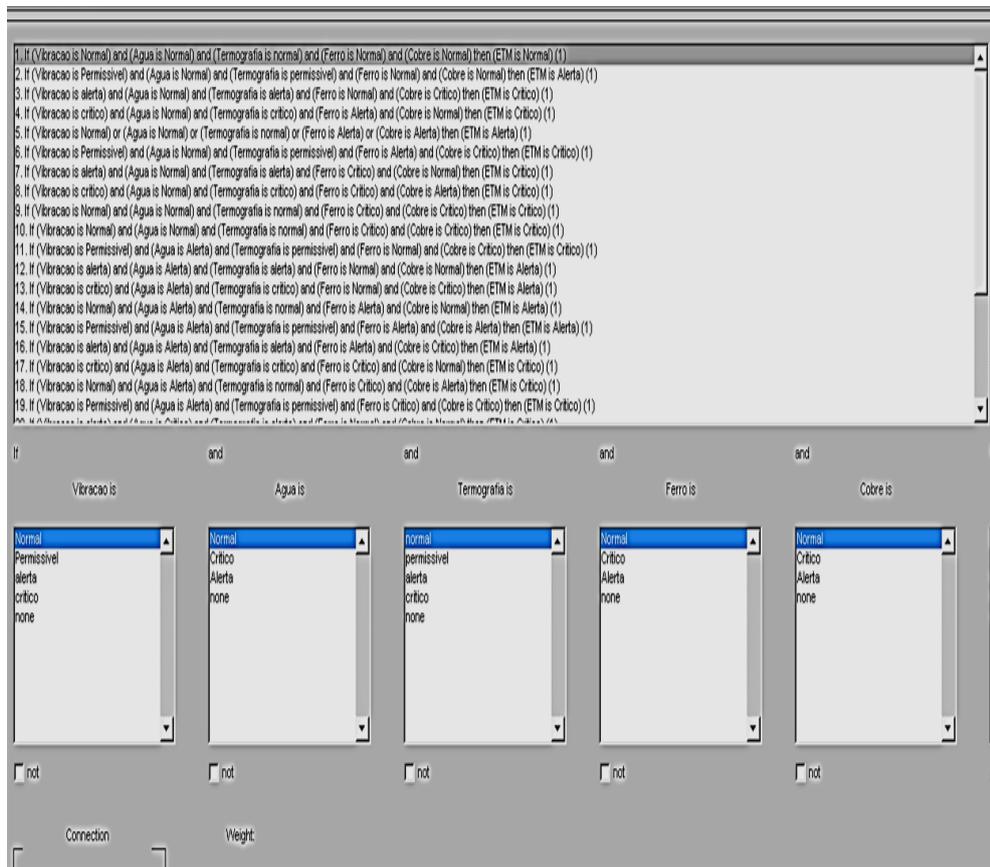


Figura 5.8: Algunas de las Reglas de Inferencia Implementadas
Fuente: Autores, (2017).

Para una mejor comprensión la pantalla expresada en la figura 5.9 demuestra todas las posibilidades que la simulación puede producir. El movimiento de las líneas rojas determina la otra regla que se desea evaluar. Como muchas combinaciones son prácticamente idénticas y no alteran los datos de salida se realizaron 120 combinaciones en el Matlab,

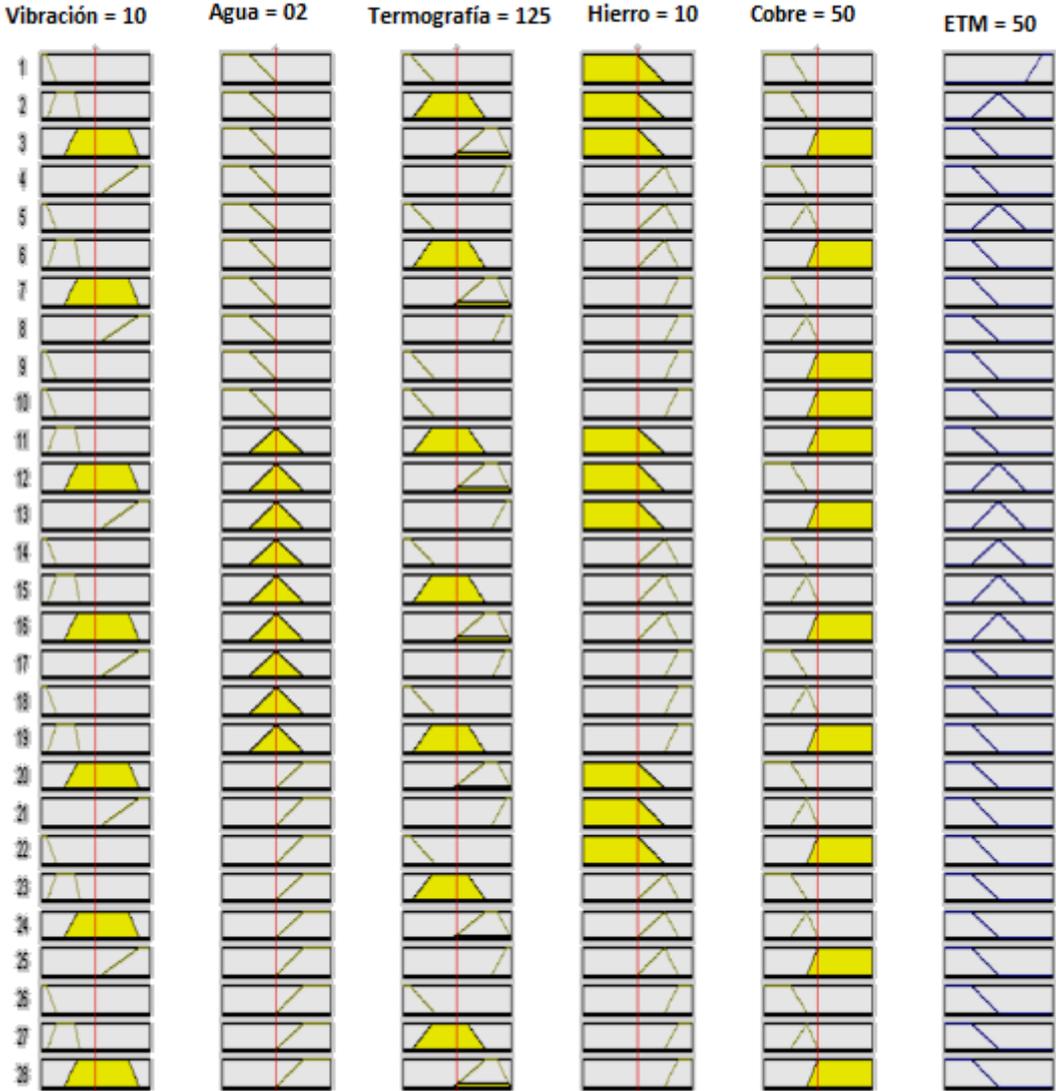


Figura 5.9: Asociación de las Variables de Entrada y Salida
 Fuente: Autores, (2017).

Los valores que son producidos por esta inferencia pueden ser interpretados por el especialista de forma que el mismo pueda verificar conforme a las figuras 5.10 a 5.13. Donde se muestra el resultado del procesamiento de las reglas de inferencia fuzzy a través de la superficie del gráfico en 3D. En estas curvas están presentes

todas las situaciones posibles que las variables pueden asumir dentro de la simulación.

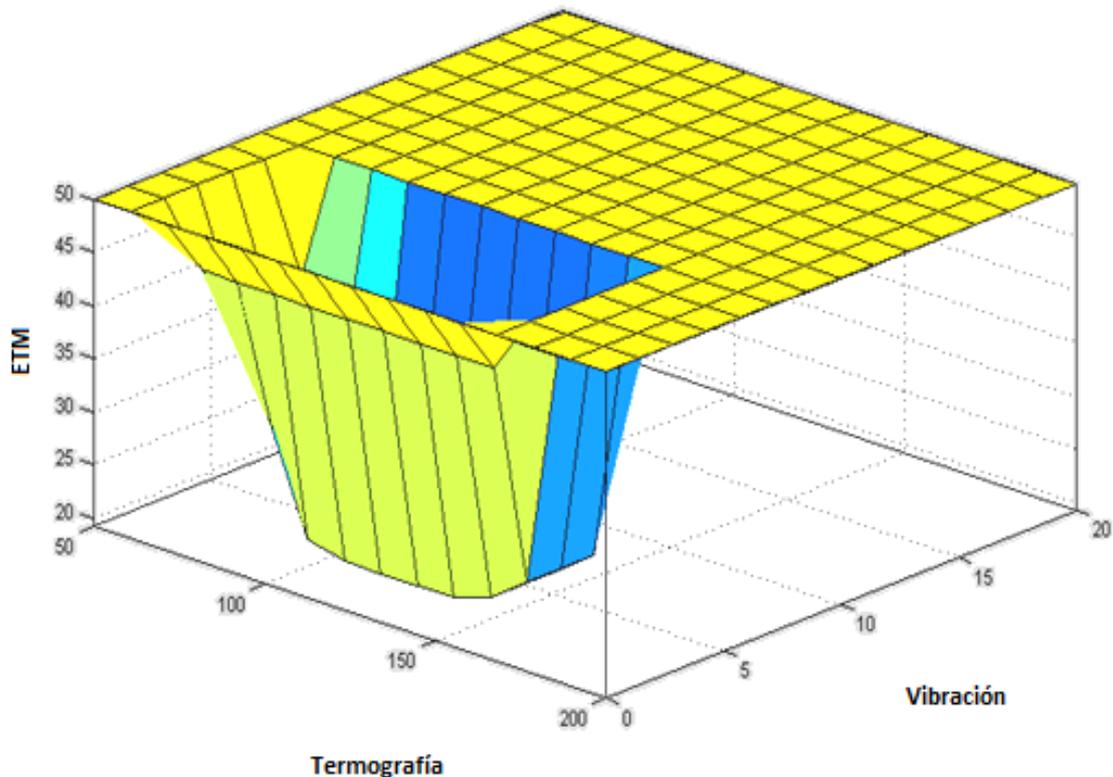


Figura 5.10: Superficie Resultante (Termografía x Vibración)
Fuente: Autores, (2017).

El área superior de la curva tiene color amarillo, representando la zona de confort del sistema, es decir, cuando la variable "Vibración" tiende a asumir valor mínimo (normal) o permisible y la "Termografía" tiende a asumir valor mínimo (normal) o permisible la variable "Estado Técnico del Motor" asumirá un valor máximo.

El área azul de la curva representa la zona de incomodidad del sistema, es decir, cuando la variable "Vibración" tiende a valor máximo (crítico) o alerta y la variable "Termografía" asume valor máximo (crítico) o alerta la variable "Estado Técnico del motor" asumirá un valor mínimo.

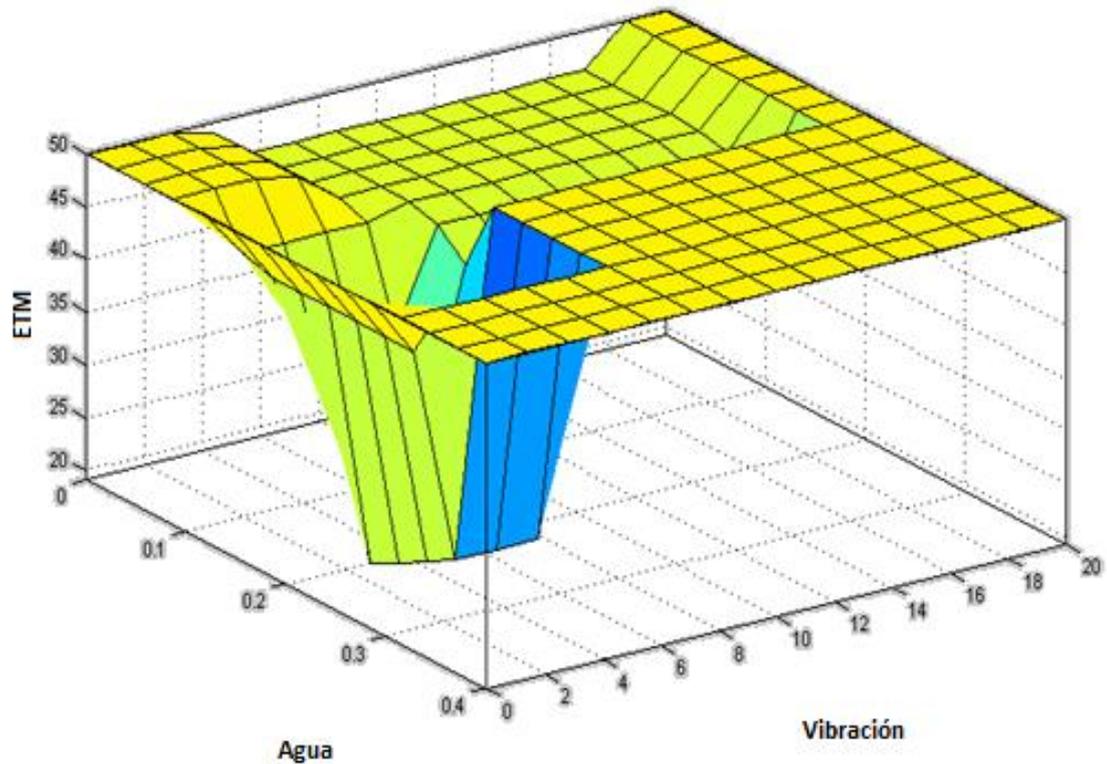


Figura 5.11: Superficie Resultante (Agua x Vibración)
 Fuente: Autores, (2017).

El área superior de la curva tiene color amarillo, representando la zona de confort del sistema, es decir, cuando la variable "Vibración" tiende a asumir valor mínimo (normal) o permisible y el "Agua" tiende a asumir valor mínimo (normal) a variable "Estado Técnico del Motor" asumirá un valor máximo.

El área azul de la curva representa la zona de incomodidad del sistema, es decir, cuando la variable "Vibración" tiende a valor máximo (critico) o alerta y la variable "Agua" asume valor máximo (critico) la variable "Estimación" asumirá valor mínimo.

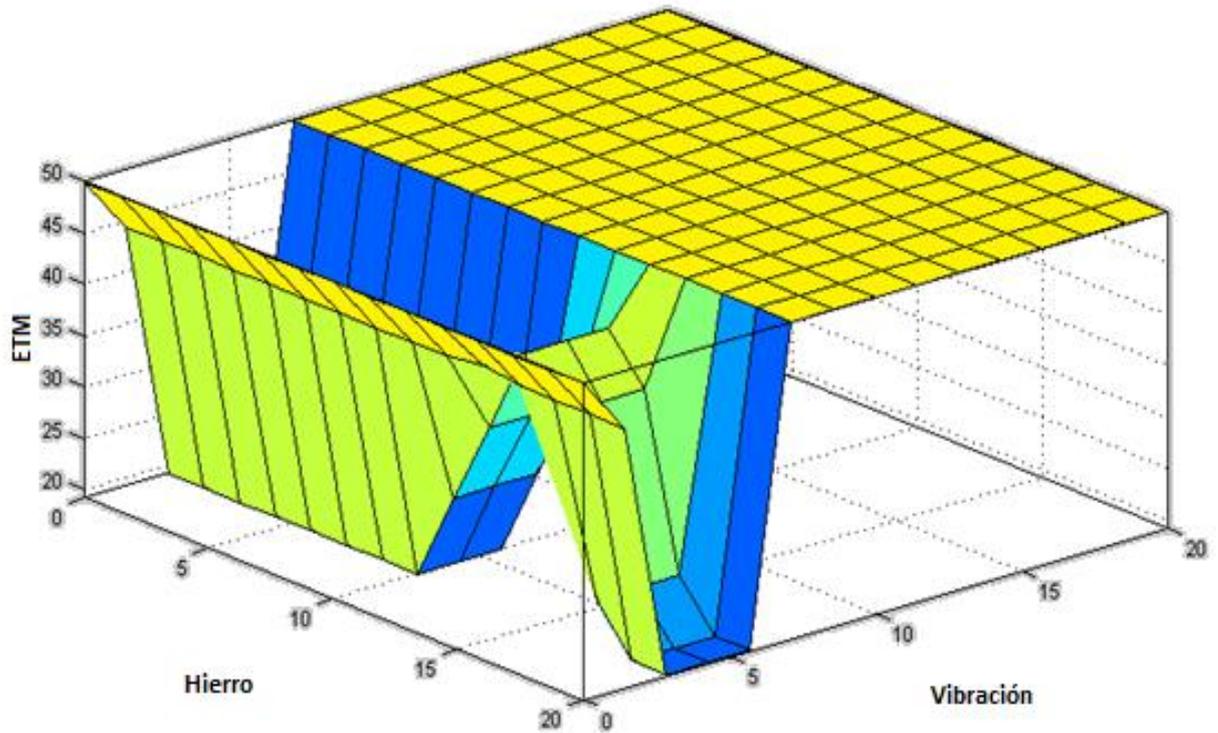


Figura 5.12: Superficie Resultante (Hierro x Vibración)
Fuente: Autores, (2017).

El área superior de la curva tiene color amarillo, representando la zona de confort del sistema, es decir, cuando la variable "Vibración" tiende a asumir un valor mínimo (normal) o permisible y la "Hierro" tiende a asumir un valor mínimo (normal) variable "Estado Técnico del Motor" asumirá un valor máximo.

El área azul de la curva representa la zona de incomodidad del sistema, es decir, cuando la variable "Vibración" tiende a valor máximo (critico) o alerta y la variable "Hierro" asume valor máximo (critico) a la variable "Estado Técnico del Motor" Asumirá un valor mínimo.

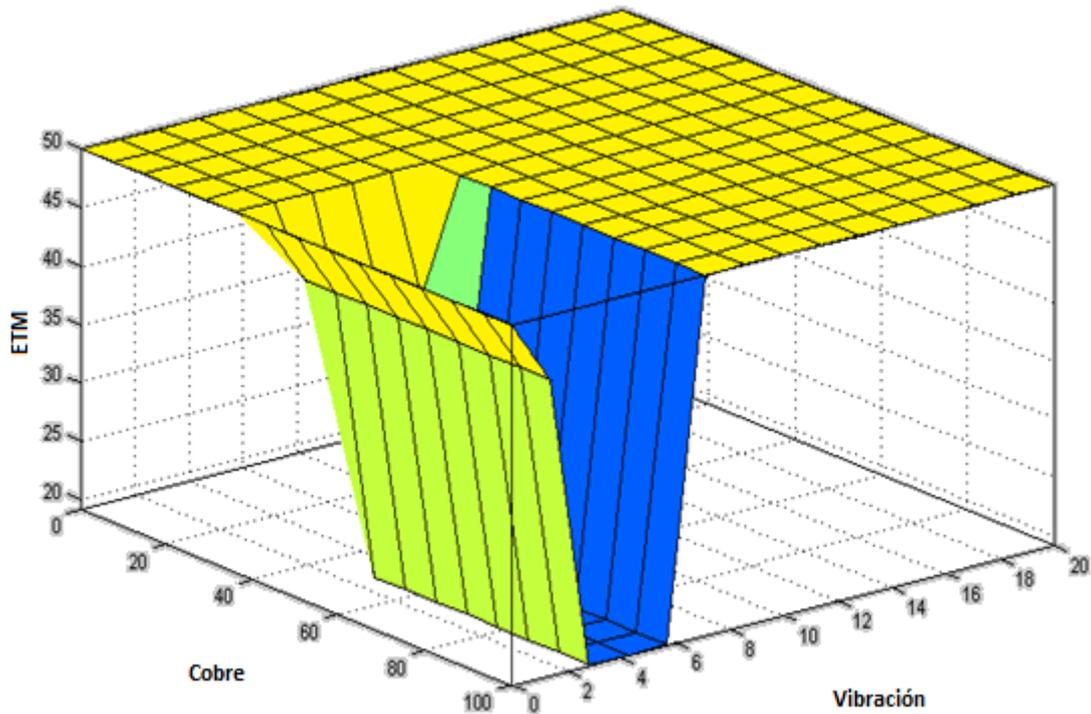


Figura 5.13: Superficie Resultante (Cobre x Vibración)
Fuente: Autores, 2017

El área superior de la curva tiene color amarillo, representando la zona de confort del sistema, es decir, cuando la variable "Vibración" tiende a asumir valor mínimo (normal) o permisible y la "Cobre" tiende a asumir valor mínimo (normal) a variable "Estado Técnico del Motor" asumirá un valor máximo. El área azul de la curva representa la zona de incomodidad del sistema, es decir, cuando la variable "Vibración" tiende a valor máximo (crítico) o alerta y la variable "Cobre" asume valor máximo (crítico) la variable "Estimación" asumirá valor mínimo.

5.6. Mantenimiento Predictivo Utilizando Lógica Fuzzy como Herramienta Computacional de Apoyo a la Decisión en el Pre-despacho de Carga.

MATLAB es una herramienta poderosa utilizada en computación numérica y en diversas áreas científicas y se ha convertido efectivamente en ingeniería para realizar cálculos matemáticos, desarrollar algoritmos, modelado y simulación. A través de él se confirmó la posibilidad de optimización del proceso de toma de decisión en el pre-despacho de carga con la utilización de Lógica Fuzzy sobre condiciones operacionales de las unidades generadoras,

Además de los bloques principales existe una interfaz hombre-máquina Human-Machine Interface (HMI), que el usuario o el experto se comuniquen con el sistema sin la asistencia de un programador, Figura 5.14. La máquina de inferencia o

intérprete de reglas guía el proceso de raciocinio a través de la base de conocimiento, comparando hechos contenidos en la base de hechos con el conjunto de reglas. Por mucho tiempo se utilizaron programas que contenían heurísticas generales de cómo solucionar problemas. Sin embargo, si el conocimiento está representado por lógica matemática, la máquina de inferencia es el método de resolución (GIARRATANO, RILEY, 2005).

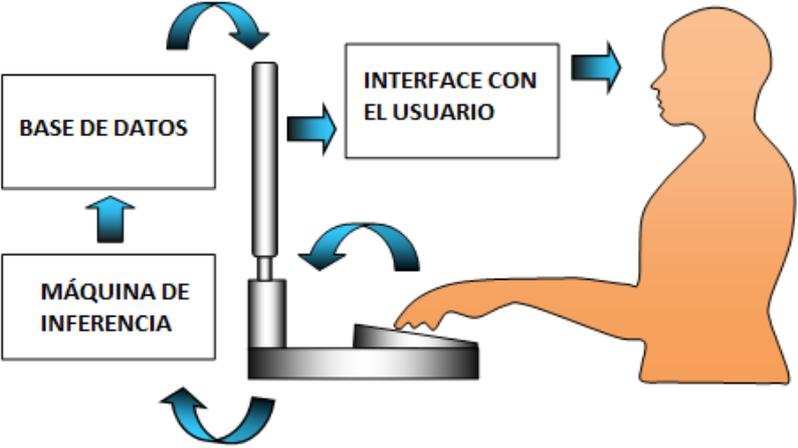


Figura 5.14: Sistema Especialista
Fuente: Autores, 2017

Entre los tipos más comunes de mantenimiento, se puede citar el mantenimiento preventivo y el mantenimiento predictivo. En la figura 5.15 se muestra un esquema del mantenimiento predictivo desarrollado en la usina estudio de caso, donde se realizan análisis de vibración, del aceite lubricante y de termografía para poder respaldar las reglas fuzzy, desarrolladas como herramienta computacional de apoyo a la decisión.

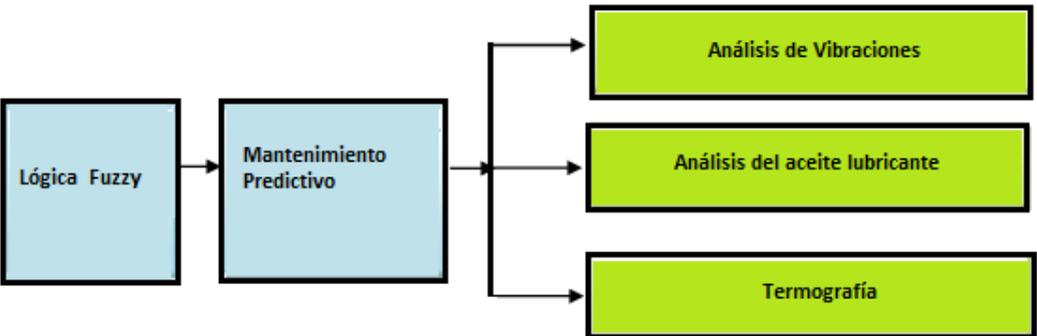


Figura 5.15 – Mantenimiento Predictivo integrado con el procedimiento fuzzy propuesto.
Fuente: Autores (2017).

5.6.1 Análisis de Vibración (Comentarios / Recomendaciones)

Se implantó un programa de mantenimiento predictivo eléctrico por análisis de vibraciones con periodicidad trimestral en todos los conjuntos generadores. El mismo tiene por objetivo minimizar los costos provenientes de mantenimientos preventivos y correctivos innecesarios.

En el mantenimiento predictivo por análisis de vibraciones, es necesario utilizar técnicas de procesamiento de la señal vibratoria con el objetivo de extraer las informaciones que permitan correlacionar algunas características de la señal con el estado del equipo. Entre las diversas técnicas que pueden aplicarse, las más utilizadas, consideradas clásicas y de aceptación universal, son: análisis por nivel global de vibración, análisis por espectro de la vibración, media temporal síncrona, demodulación y diagramas de orbitas.

Norma ISO 8528-9

La planta de estudio de caso está formada por Motores Reciprocantes de Combustión Interna Accionando Conjunto Generador AC. Esta norma se aplica a los Motores de Combustión Interna Reciprocantes (RIC) que acciona conjuntos generadores AC en instalaciones fijas y móviles, en montajes rígidos o resilientes (resortes). Es aplicable para uso terrestre y marino, excluyendo conjuntos generadores usados en aeronaves o aquellos utilizados para impulsar vehículos terrestres y locomotoras. En las figuras 5.16 y 5.17 se muestran los puntos del motor y del generador donde deben efectuarse las mediciones de las vibraciones.’

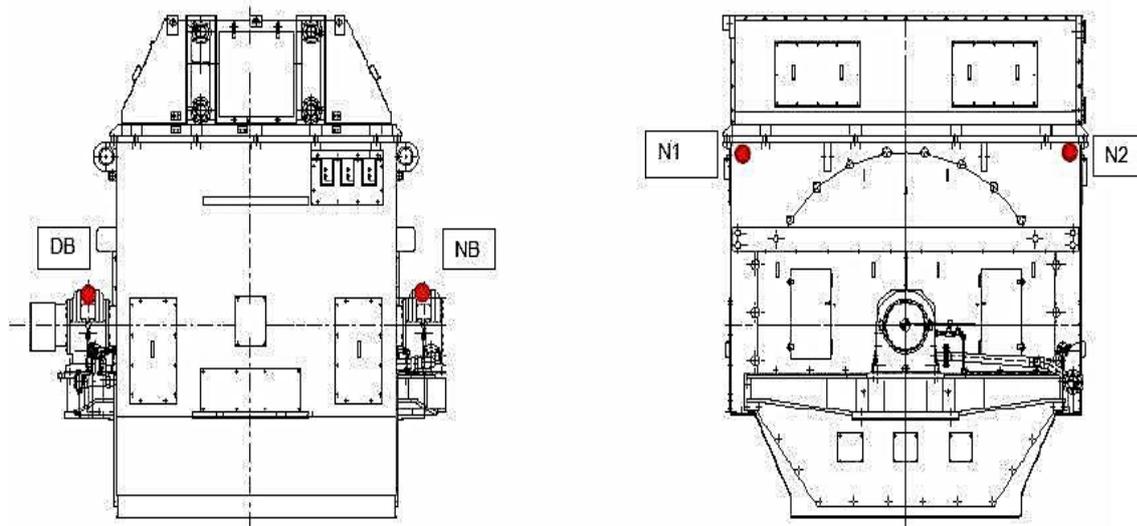


Figura 5.16 – Puntos de medición para los generadores eléctricos de corriente alterna
Fuente: Norma ISSO 8528-9, (2015).

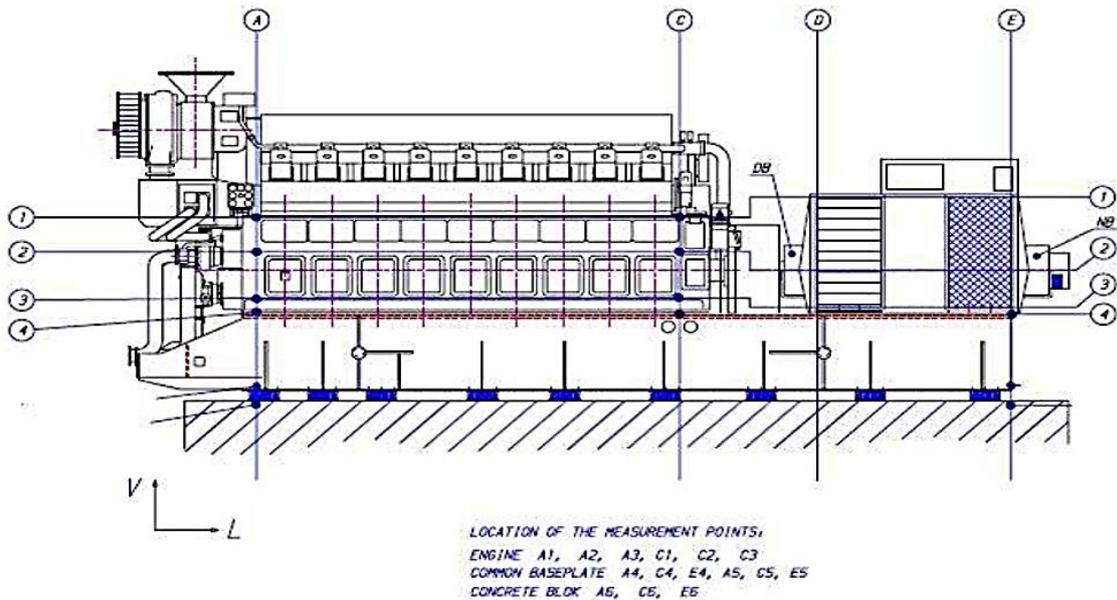


Figura 5.17 - Puntos de medición para los motores y generadores.
 Fuente: Norma ISSO 8528-9, (2015).

Identificación de los Puntos de Medición:

En las mediciones de vibraciones se adopta la siguiente nomenclatura para la identificación de los puntos: } Primer carácter - identificación de los cojinetes (por secuencia de potencia): 1 - Cojinete del motor del lado no acoplado (LNA); 2 - Cojinete del motor del lado acoplado (LA); 3 - Cojín del generador del lado acoplado (cuando exista) (LA); 4- Cojinete del generador del lado no acoplado (LNA); En este caso se utilizó la nomenclatura adoptada por el cliente siendo: A - Cojinete del motor del lado no acoplado (LNA); B Cojinete del motor del lado acoplado (LA); C - Cojinete del generador del lado acoplado (cuando exista) (LA); D-cojinete del generador del lado no acoplado (LNA); } Segundo carácter - dirección del punto de medición: H - Horizontal, plano de la caja de conexiones; V - Vertical, perpendicular al plano horizontal; A - Axial; } Tercer carácter - parámetro medido: V - Velocidad - mm / s (rms)

Se realizó un análisis espectral de la señal vibratoria obtenida. "La idea asociada es que, como la señal es la respuesta de la estructura a las excitaciones dinámicas derivadas del funcionamiento de la máquina, el análisis espectral va a revelar" picos "de amplitudes en las frecuencias asociadas a tales excitaciones, o sea, observándose el espectro de es posible identificar las frecuencias de funcionamiento de cada componente de la máquina, tales como giro del eje, paso de palas de turbinas, acoplamiento de engranaje, entre otros.

Verificamos ejemplos de los resultados ofrecidos por el equipo para medir las vibraciones del motor / generador 01, ellos estaban dentados de los patrones según la tabla 5.2. Los picos amplitud no revelaron que el motor estuviera desalineado con el generador, debido al desgaste del acoplamiento, ocasionando vibración excesiva en el motor / generador (01). Conforme a las figuras 5.18 y 5.19 y tabla 5.10.

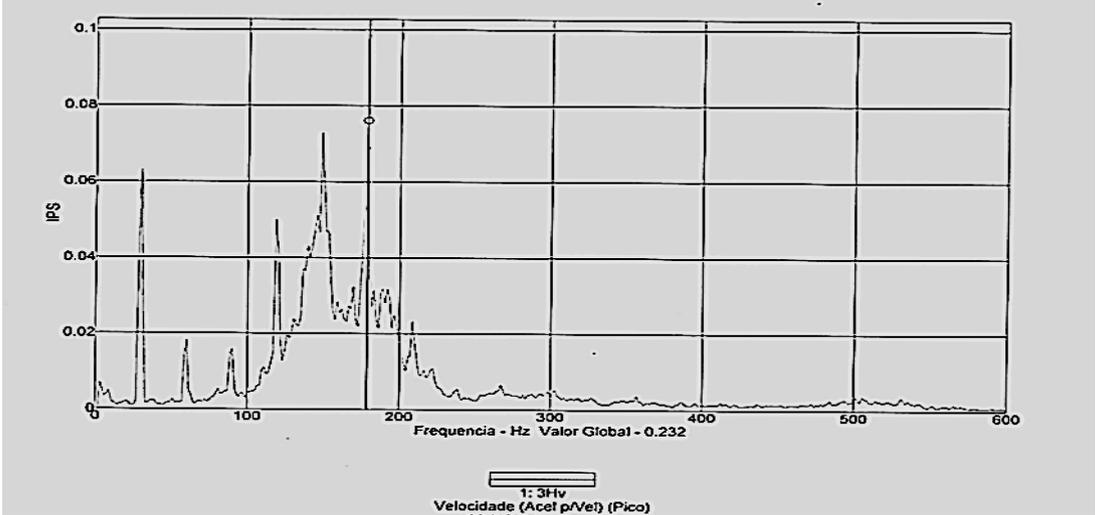


Figura 5.18: Análisis de Vibración. Las mediciones fueron realizadas horizontalmente Fuente: Autores (2017).

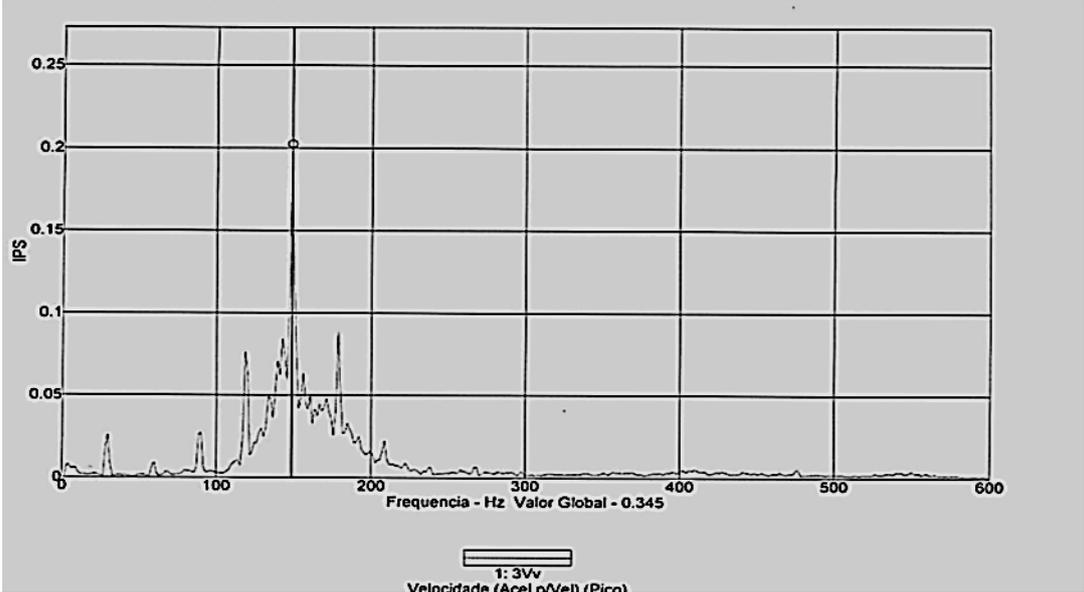


Figura 5.19: Análisis de Vibración. Las mediciones fueron realizadas verticalmente Fuente: Autores (2017).

Tabla 5.10 – Últimas mediciones de Vibración del Motor/Generador

Equipo Motor/generador	Unidades	Data	Último valor (M)	Último valor (G)	Análisis fuzzy
01	mm/s	28-fev-2016	3.679	0.07	Zona A aceptable para pré-despacho
02	mm/s	28-fev-2016	6.637	2.006	Zona A aceptable para pré-despacho
03	mm/s	28-fev-2016	8.879	1.966	Zona A aceptable para pré-despacho
04	mm/s	28-fev-2016	7.563	1.183	Zona A aceptable para pré-despacho
05	mm/s	28-fev-2016	9.509	2.238	Zona A aceptable para pré-despacho
06	mm/s	28-fev-2016	10.703	2.411	Zona A aceptable para pré-despacho
07	mm/s	28-fev-2016	12.64	1.078	Zona A aceptable para pré-despacho
08	mm/s	28-fev-2016	5.507	1.140	Zona A aceptable para pré-despacho
09	mm/s	28-fev-2016	4.544	0.74	Zona A aceptable para pré-despacho
10	mm/s	28-fev-2016	6.060	1.286	Zona A aceptable para pré-despacho

Fuente: Autores (2017).

Mantenimiento predictivo por el nivel global de vibraciones.

El control del estado del equipo se realiza sobre la base de un valor global calculado para la señal de vibración medido en puntos críticos de la superficie de la máquina. Como este valor es consecuencia de una señal de respuesta de la estructura a las excitaciones dinámicas del funcionamiento del equipo, representa una medida del nivel de amplitud de su señal vibratoria. En el caso de la aplicación para mantenimiento predictivo, las normas técnicas internacionales, entre ellas la ISO, definen dos criterios para la adopción de un valor global. "Para las máquinas giratorias con velocidad de rotación en el rango de 600 a 12.000 RPM (10 a 200 Hz), la norma ISO 2372, VDI Richiline 2056, y en Brasil, por la NBR 10082, adopta el valor eficaz de la velocidad de vibración, conocida como la velocidad RMS de la señal, como la unidad de medida para identificar la severidad de vibración ", (ARATO JR, 2004). Para máquinas giratorias con velocidad en el rango de 60 a 1.800 rpm (1 a 30 Hz) y máquinas especiales, tales como grupos generadores de vapor, turbinas de gas, máquinas hidroeléctricas o bombas hidráulicas, las normas técnicas, como la ISO 7919, amplitud de desplazamiento relativo eje-cojinete, como criterio de severidad. El procedimiento de mantenimiento consiste en establecer, por comparación con valores recomendados y considerados por las normas internacionales como correspondientes a buenas condiciones de funcionamiento, el nivel inicial de la severidad de vibración de la máquina. A continuación, se mide periódicamente la severidad de vibración del equipo. La señal de un mal funcionamiento será un incremento repentino en la tasa de variación de la severidad de vibración observada entre las medidas, o cuando, por desgaste, el nivel de vibración alcance el rango de severidad considerado como inaceptable, según la norma técnica adoptada

Mantenimiento predictivo por el espectro de vibración.

En la posesión de esa información, el mantenimiento consiste en hacer un seguimiento periódico del conjunto, y cuando se nota una variación singular en la amplitud de una de las frecuencias fundamentales, o si se produce el surgimiento de otra frecuencia con amplitudes significativas, se diagnostica el hecho como un defecto del componente que tenga esa frecuencia asociada a su excitación (BANDERA et al., 2015).

En la aplicación de esta técnica, el análisis del espectro puede ser realizado por inspección visual directa, con la identificación y marcación de puestos clave para establecer su configuración considerada normal para una máquina particular, o

utilizando técnica de procesamiento específica como Cepctrum y Espectro Sintetizado. Ellos extraen un espectro del espectro de vibraciones, o sea, presenta un número reducido de informaciones convenientemente seleccionadas para el análisis y el seguimiento deseado.

Media temporal síncrona, demodulación y diagrama de órbita

En contraste con los métodos de análisis basados en la medición de un nivel global de vibración y en la obtención del espectro (ARATO, 2004). "La media temporal síncrona, la demodulación y los diagramas de órbita son técnicas de empleo más específicas y dirigidas al monitoreo de una clase de equipo o un tipo de defecto". Conceptualmente esta técnica se define de las siguientes maneras:

Media temporal síncrona: (ARATO JR, 2004). "La señal de vibración se obtiene en forma de varios bloques secuenciales del mismo tamaño, cuyo inicio se sincroniza con algún evento periódico de la máquina, como el paso de un mismo punto del eje. Se quita el promedio entre estos bloques de la señal vibratoria y se procede a su análisis. Se trata de una técnica muy usada para monitorear máquinas compuesta por varios elementos giratorios sincronizados entre sí, tal como reductores de engranaje.

- Demodulación o técnica del sobre: (ARATO JR, 2004) "Consiste en obtener el contorno externo de la señal vibratoria y analizarlo como si fuera una señal". Esta nueva señal puede traer información sobre fuentes de ruidos repetitivos dentro de la máquina, tal como un rodamiento defectuoso en una de sus pistas.

Diagrama del tipo "órbita": (ARATO JR, 2004). "Es el resultado de trazar un gráfico ordenado XY, donde X e Y son dos señales de vibración sincrónicas, tomadas en el mismo plano con sensores apropiadamente montados a 90° el uno del otro, para establecer un gráfico de la impulsión del centro del eje bajo análisis ". Se trata de una técnica muy usada para analizar la condición del giro de un eje dentro de un cojinete de deslizamiento.

Considerando que el deterioro del equipo se traduce por una modificación en la distribución de la "energía" vibratoria, y que su consecuencia más frecuente es el aumento del nivel de vibraciones, se puede, a partir de la toma de la señal vibratoria en puntos determinados del equipo , acompañar la evolución de esos signos e identificar la aparición de esfuerzo dinámico nuevo o el aumento abrupto de la

amplitud de la respuesta, que son indicadores del surgimiento de defectos o degradación del funcionamiento (ARATO JR, 2004).

Después de investigar sobre las normas de vibraciones disponibles que rigen las máquinas movidas por motores de combustión interna (motor diésel), se atiende a dos que sirven a los propósitos de este trabajo, o sea: la ISO 10.816-6 y la ISO 8528-9.

Norma ISO 10.816-6 Vibración mecánica –

Evaluación de la vibración de la máquina por mediciones en partes no rotativas. Esta parte de la ISO 10816 especifica las condiciones generales y procedimientos para la medición y evaluación de la vibración, utilizando mediciones realizadas en partes no rotativas y no recíprocas de la máquina (JIANG et al., 2016). Se aplica generalmente a las máquinas de pistones recíprocas montadas tanto en bases rígidas y sobre muelles, con una potencia superior a 100 kW. Los ejemplos típicos de aplicación son: motores marinos de propulsión, motores marinos auxiliares, conjunto generador a diésel, compresor de gas y motores para locomotoras a diésel. Para todos los puntos de medición se registraron los valores globales de vibración en unidades de velocidad - mm / si desplazamiento μm (estos valores globales poseen la nomenclatura OVRL - abreviatura del inglés OVERALL), de tal forma que se pueda utilizar como referencia los niveles de ruido la severidad de vibración dictada por la Norma Internacional ISO 10.816-6 / 95, cuyos valores son los siguientes, en velocidad de vibración, nivel rms (raíz cuadrática media): Norma ISO 8528-9 Motor Reciprocante de Combustión Interna Accionando Conjunto Generador AC. Esta norma se aplica a los Motores de Combustión Interna Recíprocos (RIC) que acciona conjuntos generadores AC en instalaciones fijas y móviles, en montajes rígidos o resilientes (resortes). Es aplicable para uso terrestre y marino, excluyendo conjuntos generadores usados en aircrafts o aquellos usados para impulsar vehículos terrestres

5.6.2 Análisis del aceite lubricante.

La correcta interpretación de los análisis efectuados en las muestras de lubricante de los motores, siempre que se cosechen en las etapas iniciales del desarrollo del producto, debidamente identificadas en cuanto a la clasificación del

aceite, período en uso en las pruebas, tipo de pruebas efectuadas, identificación del combustible utilizado, el conjunto motor, y recogidas con criterios de laboratorio de limpieza y aislamiento de contaminación, indicarán interesantes parámetros que aquí se describen en el estudio.

La lectura de un parámetro aisladamente, o incluso de todos los parámetros investigados en una sola muestra puede llevar al analista a una conclusión errónea, o indicar falsa tendencia a algún comportamiento irreal del desempeño del lubricante. Es común la obtención de valores conocidos como "fuera de la curva", debido a la rutina, cantidad de muestras ensayadas, influencia de "causa externa" en la muestra o incluso por la variación esperada de los ensayos (HASANNUDDIN et al., 2016).

Análisis del contenido de agua en el aceite lubricante.

El análisis del contenido de agua en el aceite lubricante es uno de los análisis más importantes para conocer acerca del estado técnico del motor (YANG et al., 2017)

Conforme a los resultados de la Figura 5.20, los análisis de contenido de agua, realizados periódicamente como parte del mantenimiento predictivo, muestran niveles normales, pues el tolerable es del 0.3%, siendo que el nivel más alto comprobado fue alrededor del 0,2%. este análisis y realizado semanalmente con la recolección de aceite lubricante de cada motor / generador 01.

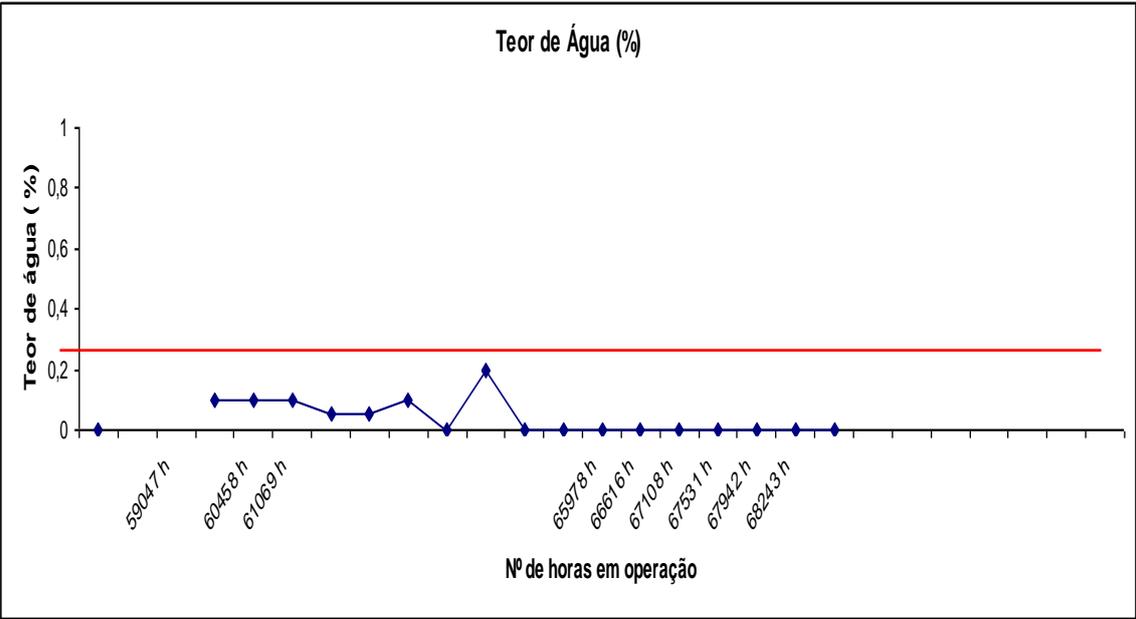


Figura 5.20 - Análisis periódico del aceite lubricante, teor de agua del motor/generador 01. Fuente: Autores (2017).

Se necesitan sólo 100 ml de muestra del aceite lubricante del cartón del motor, que se coloca en un frasco con capacidad para 150 ml. Exceso de lubricante, después de la recolección, debe ser descartado inmediatamente, para evitar que las partículas se precipiten. El espacio de 50 ml, que corresponde a 1/3 del vial, se deja vacío para permitir una agitación posterior de la muestra. La determinación de la presencia y contenido de agua en aceites lubricantes puede darse con métodos de verificación de turbidez en aceites claros, crepitación en chapa calentada. El método utilizado en este estudio es el de la destilación que es una prueba que tiene como objetivo evaluar las características de volatilidad del aceite lubricante. La prueba se realiza tomando 100 ml de la muestra del producto, que se colocan en un matraz de vidrio que, a continuación, se somete a calentamiento para la destilación en condiciones controladas. Con ese calentamiento, los productos se evaporizan y luego se condensan y se recogen en una probeta de vidrio, sumergida en un baño de hielo. Después de esta operación las temperaturas registradas se corrigen teniendo en cuenta las pérdidas que ocurren en la evaporación de pequeñas partes del producto y presión barométrica. Después del análisis se verificó que fue hasta 0.2% de contaminación, generando el gráfico del porcentaje de contaminación por el número de horas de operación del generador

Análisis del contenido de metales en el aceite lubricante.

Los análisis del contenido de metales en el aceite lubricante se realizaron por ferrografía para lectura directa de hierro y cobre. Con base en la extracción de las partículas contaminantes magnetizables, contenidas en el lubricante, por medio de la acción de un campo magnético. Los análisis se realizan periódicamente, y se acompañan las tendencias presentadas por los gráficos.

El equipo distribuye las partículas según su tamaño, ya que, cuanto menores, menor la distancia recorrida dentro del campo magnético. Las partículas no magnéticas se fijan a una distancia mayor aún. Este patrón se refiere al número de partículas mayores que 2,5 y 15 micras en un volumen de 100 mililitros. El número de partículas mayores que 2 y 5 micras se utiliza como punto de referencia para las partículas sedimentadas. Las partículas mayores a 15 micras, contribuyen en gran medida a un posible fallo catastrófico en el componente. Después del análisis del contenido de metales en el aceite lubricante se hicieron los gráficos para contenido de azufre, IBT, cobre y contenido de hierro. En las figuras 5.21 y 5.22 se muestran los

análisis de contenido de cobre y contenido de hierro para el estudio de caso de la planta de Mauá. La presente figura informa los datos levantados sólo del motor 8 como ejemplo

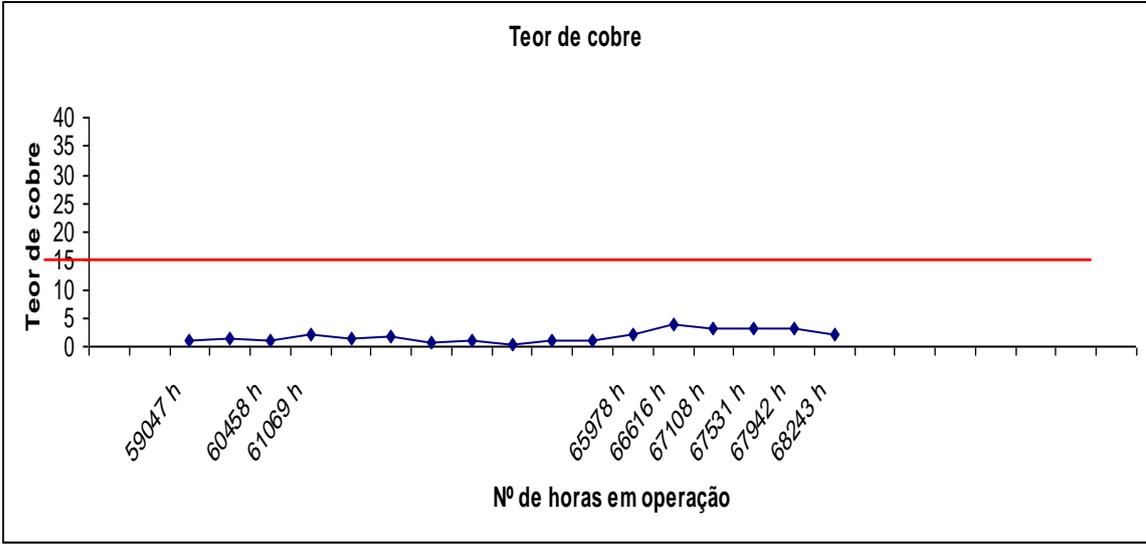


Figura 5.21 - Análisis periódico del aceite lubricante, teor de cobre del motor/generador 01 Fuente: Autores (2016).

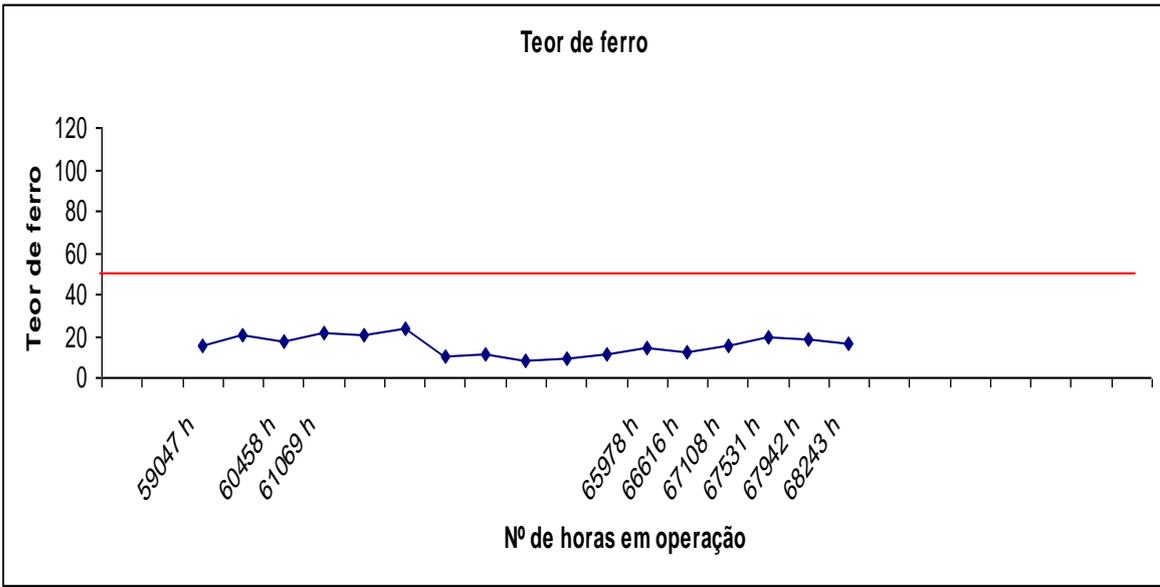


Figura 5.22 - Análisis periódico del aceite lubricante, teor de hierro do motor/gerador 01 Fuente: Autores (2017).

5.6.3 Análisis de la Termografía.

Este estudio consiste en la investigación de los fundamentos de la radiación térmica, específicamente el uso de imágenes térmicas aplicadas en la prevención de la sobre corriente. Los materiales y métodos: la radiación infrarroja es la base de

estudios sobre imágenes térmicas, que tiene la función de capturar esta radiación, interpretando y generando una imagen cuantitativa de la temperatura del cuerpo estudiado (LOPEZ-PEREZ y ANTONINO-DAVIU, 2017).

Un termograma es una imagen que proporciona el análisis del objeto considerando la distribución de su temperatura. Es una técnica no destructiva donde las imágenes se generan a una distancia y es una de las maneras más eficaces de inspección previa para Sistemas eléctricos (ANDRADE et al., 2015)

Así, para identificar posibles anomalías en equipos eléctricos, se realizaron análisis periódicos de imágenes térmicas de equipos y / o circuitos usando una cámara termográfica. Este análisis permite realizar operaciones sin interrupción de operación para mantenimiento y ejecución cuando comienza con el uso de dispositivos electrónicos, a su vez, operar con propósitos adecuados o no irradiar calor cuando está energizado.

De forma complementaria al uso del sistema de supervisión proporcionado por el software 9 FLUKE), se utiliza termovisión, como aquella presentada en la Figura 5.1, para medición en sistemas eléctricos de baja o alta tensión, variaciones de temperatura causadas por exceso de corriente eléctrica en la mufla del motor / generador 01 estar con el punto caliente y no es apto para el pre-despacho de carga



Figura 5.23 – Análisis de termovisión del motor/generador 01
Fuente: Autores, (2017).

5.7 Procedimiento para el uso de la lógica fuzzy en el motor / generador

01

Podemos identificar posibles anomalías en equipos eléctricos del generador 01, se realizaron análisis periódicos de imágenes térmicas de equipos y / o circuitos usando una cámara termográfica.

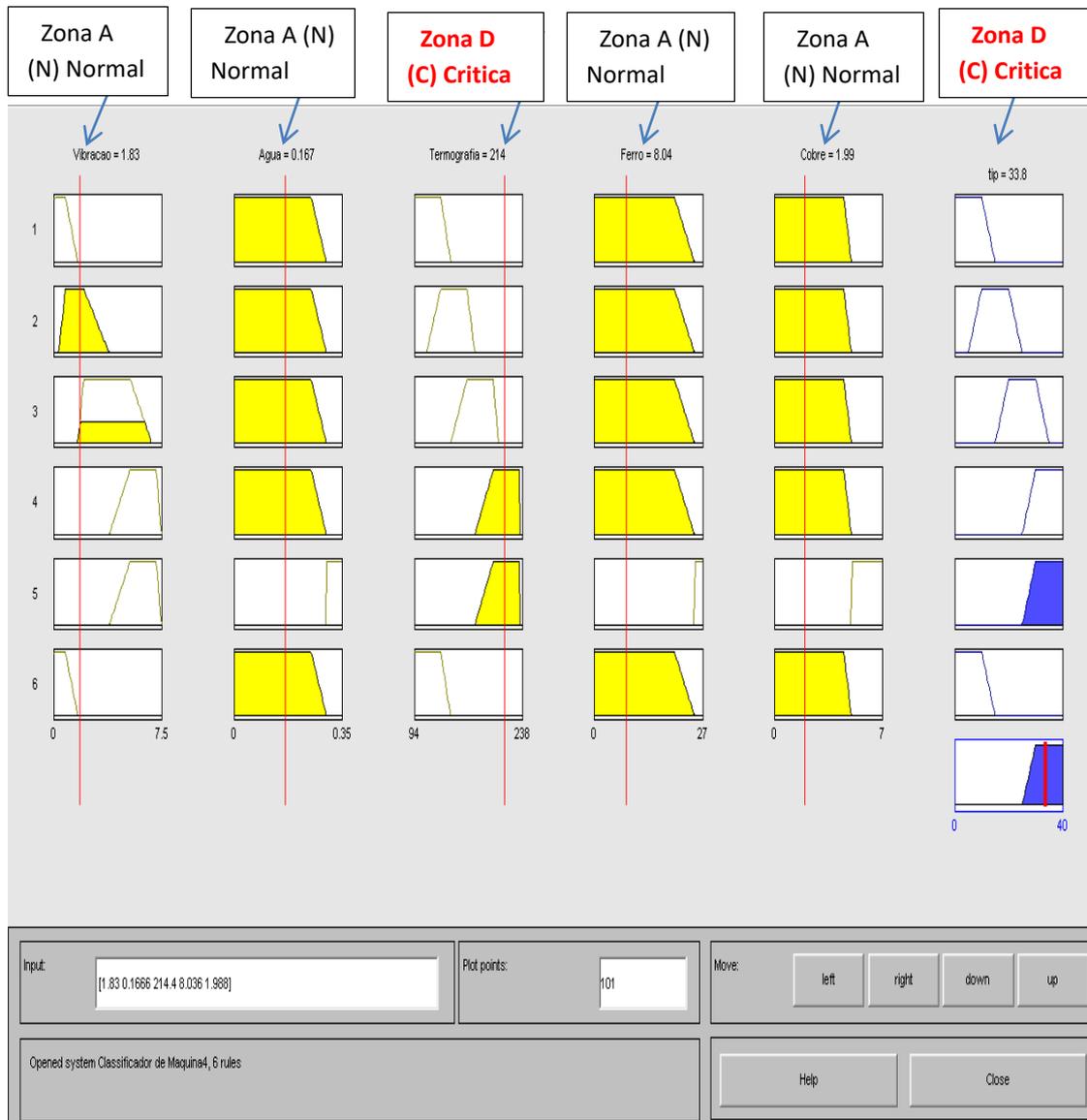


Figura 5.24: Asociación de las variables de Entrada y Salida motor/generador 01
 Fuente: Autores 2017

Con esta figura 5.24, este análisis permite que el motor / generador 01 no era apto para el pre-despacho de carga sobre condiciones operacionales. Los demás motores están en la zona A (N) Normal, 02,03,04,05,06,07,08,09 y 10 son aptos pues sus condiciones operacionales están dentro de los parámetros de la regla fuzzy,

conforme figura 5.25 ejecutar operaciones sin interrupción de operación para mantenimiento y ejecución cuando comienza con el uso de dispositivos electrónicos, a su vez, operar con propósitos adecuados o no irradiar calor cuando se energiza.

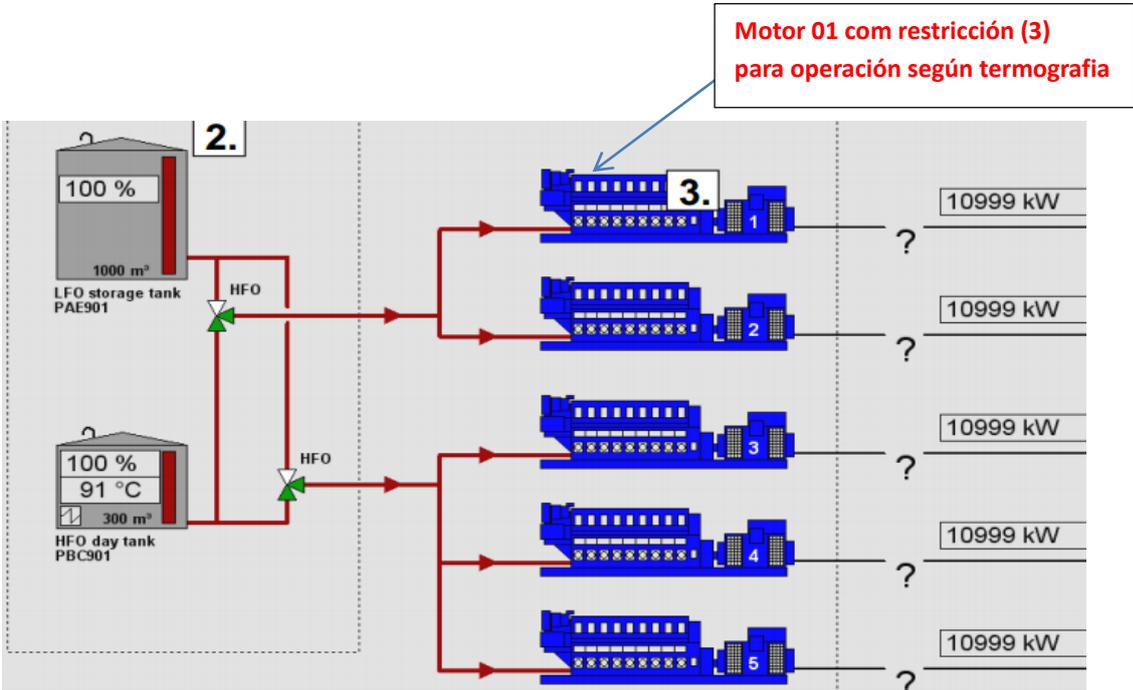


Figura 5.25: Pré-despacho centrado en la fiabilidad de los equipos.
Fuente: Autores 2017

Como se muestra en la sección anterior, la lógica fuzzy sirvió de base para la resolución de problema real de pre-despacho centrado en la confiabilidad de los equipos para satisfacer los métodos racionalizados del just in time de la central térmica motores de combustión interna. Para poder implementar satisfactoriamente todo el procedimiento desarrollado usando la lógica fuzzy, es necesario conocer el estado técnico de los

CAPÍTULO VI

RESULTADOS DEL MANTENIMIENTO QUE TIENE INFLUENCIA EN EL PRÉ-DESPACHO DE CARGA.

El primer paso cuando se trata de desarrollar un programa de mantenimiento, es dirigir todos los esfuerzos en las áreas que traerá el máximo de beneficio, y tal aproximación puede ser desarrollada ejecutando un análisis de confiabilidad.

Como parte de un programa de gestión de mantenimiento y de estudio y monitoreo, es esencial evaluar el desarrollo o la formación de defectos, el tamaño de tales defectos, el crecimiento de defectos, así como otro debilitamiento general de las estructuras de los componentes, y también caracterizar y comprobar el comportamiento y el rendimiento de los componentes y de la máquina como un todo.

6.1. Herramientas estadísticas de calidad

Las principales técnicas estadísticas que se pueden utilizar de forma integrada en ciclos de mejora continua de los procesos y servicios son las siguientes: El diagrama de flujo, Diagrama Ishikawa (Espina de Pez), Hoja de Verificación, Diagrama de Pareto, Histograma, Diagrama de Dispersión y Cartas de Control.

Estas siete herramientas forman parte de un grupo de métodos estadísticos elementales, que deben ser de conocimiento de todas las personas involucradas con la empresa, del presidente a los colaboradores, y, por lo tanto, deben formar parte de los programas básicos de entrenamientos de las organizaciones (GOETSCH y DAVIS, 2014; Jensen, 2015).

Algunas de ellas serán discutidas e implementadas a lo largo de este capítulo. Para poder planificar y ejecutar el trabajo desarrollado en esta tesis fue necesario primero que todo hacer un análisis de fallas de los generadores durante los años 2015 y 2016. En la tabla 6.1 se ofrecen los datos de la frecuencia de fallas de los generadores en el mes de septiembre de 2015

Tabla 6.1 – Frecuencias de fallas datos estadísticos del generador en setiembre 2015.

FALHA NO GERADOR 2015	FREQUÊNCIA	
	A	%
ABRAZADERA DE LA RED DE RETORNO DEL GENERADOR	1	4,55%
REGULADOR DE TENSÓN (AVR)	1	4,55%
PUNTES DE DIODO DEL VARISTOR	1	4,55%
FILTROS DE PROTECCIÓN	2	9,09%
DETECTOR DE NEBLINA (ACEITE LUBRICANTE CONTAMINADO)	2	9,09%
SENSOR DE VIBRACIÓN (VIBRACIÓN)	5	22,73%
DISJUNTOR DE 69KV (DISTURBIO DE TENSÓN)	10	45,45%
TOTAL	22	100,00%

Fuente: Autores (2016).

En la tabla 6.2 se ofrecen los datos del tiempo perdido debido a las fallas de los generadores en el mes de septiembre de 2015.

Tabla 6.2 – Tiempo de fallas dados estadísticos em el generador en setiembre 2015

FALHA NO GERADOR 2015	TEMPO	%
ABRAZADERA DE LA RED DE RETORNO DEL GENERADOR	2,48	2,36%
DETECTOR DE NEBLINA (ACEITE LUBRICANTE CONTAMINADO)	4,53	4,32%
REGULADOR DE TENSÓN (AVR)	6,52	6,21%
FILTROS DE PROTECCIÓN	12,43	11,85%
PUNTES DE DIODO DEL VARISTOR	20,13	19,19%
DISJUNTOR DE 69KV (DISTURBIO DE TENSÓN)	22,87	21,80%
SENSOR DE VIBRACIÓN (VIBRACIÓN)	35,95	34,27%
TOTAL	104,91	100,00%

Fuente: Autores (2016)

En la tabla 6.3 se ofrecen los datos de la frecuencia de fallos de los generadores en el mes de septiembre de 2016.

Tabla 6.3 – Frecuencias de fallas datos estadísticos de los generadores setiembre 2016.

FALL EN EL GENERADOR 2015	FRECUENCIA	%
SISTERMA WOS	1	20,00%
AVR	1	20,00%
SENSOR DE VIBRACIÓN	3	60,00%
TOTAL	5	100,00%

Fuente: Autores (2016).

En la tabla 6.4 se ofrecen los datos del tiempo perdido debido a las fallas de los generadores en el mes de septiembre de 2016.

Tabla 6.4 – Tiempo de fallas datos estadísticos del generador en setiembre 2016.

FALHA NO GERADOR 2016	TEMPO	%
SISTERMA WOS	6,04	17,52%
AVR	4,15	12,04%
SERSOR DE VIBRACIÓN	24,28	70,44%
TOTAL	34,47	100,00%

Fuente: Autor (2016).

Todos los datos anteriores se utilizaron para determinar el tiempo medio entre fallos (MTBF) y el tiempo promedio de reparación (MTTR). A continuación, se ofrece todo el procedimiento matemático para determinar estos tiempos.

6.3 Formulación matemática

6.3.1. Cálculo del porcentaje de fallas

Para calcular el porcentaje de fallos se utiliza la ecuación matemática 6.1

$$POCENTAGEM = \frac{TEMPO}{\sum \text{DOS TEMPOS DE FALHAS}} \times 100 \quad (6.1)$$

Aplicando esta expresión, por ejemplo, a los datos del año 2015, se obtiene:

- 1) $2,48 / (104,91) = (2,48/104,91) \times 100 = \mathbf{2,36 \%}$
- 2) $4,53 / (104,91) = (4,53/104,91) \times 100 = \mathbf{4,32 \%}$
- 3) $6,52 / (104,91) = (6,25/104,91) \times 100 = \mathbf{6,21 \%}$
- 4) $12,43 / (104,91) = (1,24/104,91) \times 100 = \mathbf{11,85 \%}$
- 5) $20,13 / (104,91) = (20,13/104,91) \times 100 = \mathbf{19,19 \%}$
- 6) $22,87 / (104,91) = (22,87/104,91) \times 100 = \mathbf{34,27 \%}$

Esos son los datos que aparecen en la Tabla 7.2 citada previamente. Aplicando la misma expresión, en este caso para el año 2016, se obtiene:

1) $6,04 / (34,47) = (6,04/34,47) \times 100 = 17,52 \%$

2) $4,15 / (34,47) = (4,15/34,47) \times 100 = 12,04 \%$

3) $24,28 / (34,47) = (24,28/34,47) \times 100 = 70,44 \%$

Esos son los datos que aparecen en la última columna de la Tabla 6.4.

6.3.2. Cálculo do MTBF

Para calcular el MTBF se utiliza la ecuación matemática 6.2

$$MTBF = \frac{\text{Tempo de Operação Total} - \sum \text{Total de temp.de parada}}{\sum \text{Total de ocorrências}} \quad (6.2)$$

En la Tabla 6.5 son ofrecidos los datos para calcular el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio para reparación (MTTR) para el mes de septiembre de 2015.

Tabla 6.5 – Indicadores para o cálculo do MTBF e MTTR septiembre 2015.

TOTAL DE OCURRENCIAS	22
TOTAL DE TIEMPO DE PARADAS	104,91
FECHA INICIAL	1/09/2015
FECHA FINAL	30/09/2015
TOTAL DE DIAS	30

Fuente: Autores (2016).

Aplicando la ecuación 6.2, se obtiene (usando 24 horas por 30 días y por 9 meses):

$$MTBF = \frac{(24 \times 9 \times 30) - \sum \text{Total de temp.de parada}}{\sum \text{Total de ocorrências}}$$

$$MTBF = \frac{(24 \times 9 \times 30) - 104,91}{22} = 289,78 \text{ h}$$

En la Tabla 6.6 son ofrecidos los datos para calcular el tiempo medio entre fallas (MTBF) y el tiempo medio para reparación (MTTR) para el mes de septiembre de 2015.

Tabla 6.6 – Indicadores para o cálculo do MTBF e MTTR 2016.

TOTAL DE OCURRENCIAS	5
TOTAL DE TIEMPO DE PARADAS	34,47
FECHA INICIAL	1/09/2016
FECHA FINAL	30/09/2016
TOTAL DE DIAS	30

Fuente: Autores (2016).

Aplicando la misma ecuación para el año 2016 se obtiene:

$$MTBF = \frac{(24 \times 9 \times 30) - 34,37}{5} = 1289,12 \text{ h}$$

Na Tabla 6.7 aparece um resumo dos tempos médios entre falhas dos geradores nos anos 2015 e 2016

Tabla 6.7 Resultados do MTBF dos geradores dos anos 2015 e 2016

Ano	MTBF em horas
2015	289,78
2016	1289,12

Fuente: Autor (2016).

6.3.3. Cálculo do MTTR.

O MTTR se calcula pela expressão 6.3, ou seja:

$$MTTR = \frac{\sum \text{Total de temp.de parada}}{\sum \text{Total de ocorrencias}} \quad (6.3)$$

Para o caso do ano 2015 e usando os dados da Tabla 6.5 se obtém:

$$MTTR = \frac{104,91}{22} = 4,77h$$

Para el caso dwl año 2016 y usando los datos de la Tabla 6.6 se obtiene:

$$MTTR = \frac{34,47}{5} = 6,89h$$

6.4 Gráficos de Pareto de los análisis de los indicadores

El gráfico de Pareto es un gráfico de barras verticales que dispone la información para hacer evidente y visual la priorización de temas. La información así dispuesta también permite el establecimiento de metas numéricas viables de ser alcanzadas.

El modelo económico de Pareto fue traducido al área de la Calidad bajo la forma "algunos elementos son vitales; (ARNOLD, 2015), las figuras 6.1 y 6.2 muestran los diagramas de Pareto de las fallas de los generadores en el año 2015. En el primer caso la frecuencia de fallas y en el segundo el tiempo perdido por fallas.



Figura 6.1 – Ocorrências de falhas dados estatísticos nos geradores Setembro 2015.

Fuente: Autor (2016).

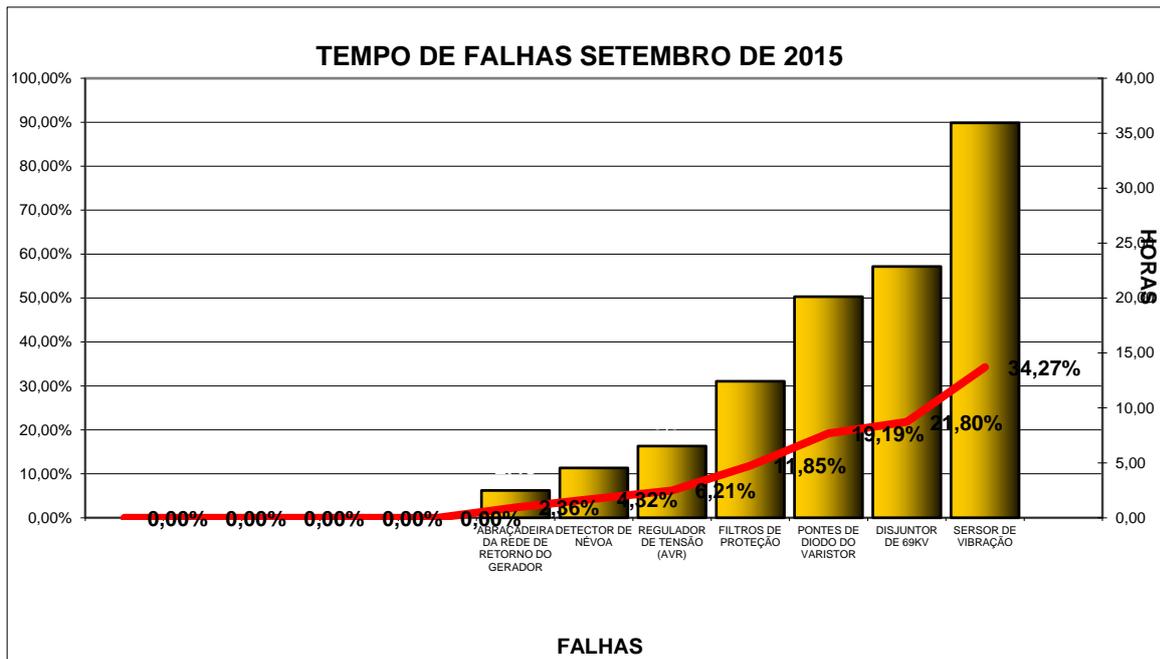


Figura 6.2 – Tempo de falhas dados estatísticos nos geradores em setembro 2015. Fuente: Autor (2016).

El modelo de un gráfico de barras dispone de las informaciones de modo que sea posible la visualización de la forma de la distribución de un conjunto de datos y también la percepción de la ubicación del valor central y de la dispersión de los datos en torno a este valor central. La comparación de histogramas con los límites de especificación permite evaluar si un proceso está centrado en el valor nominal y si es necesario adoptar alguna medida para reducir la variabilidad del proceso. En las figuras 6.3 y 6.4 se ofrecen los datos de fallos de 2016.

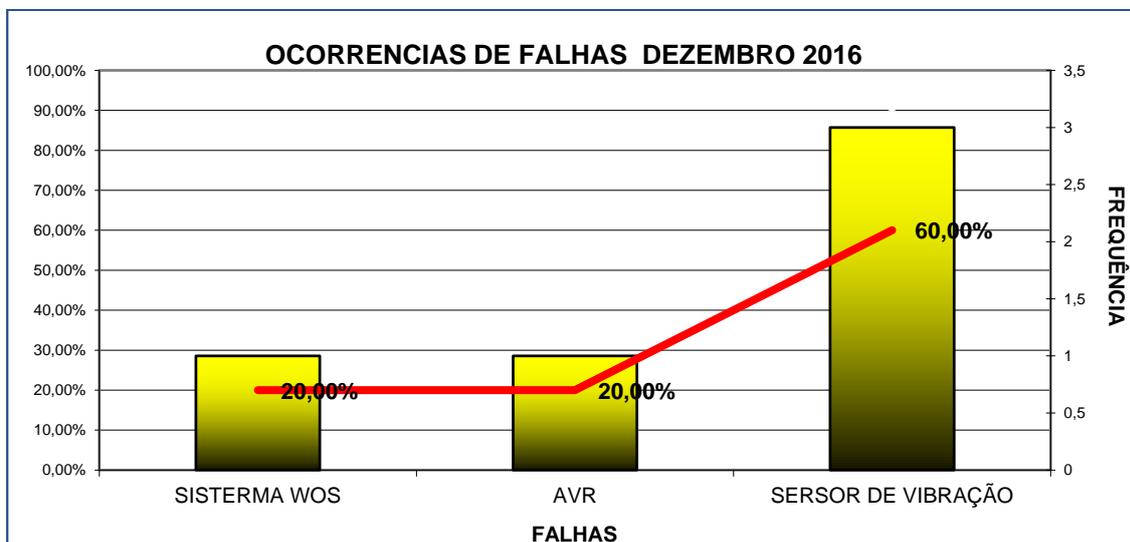


Figura 6.3 – Frequência de falhas, dados estatísticos nos geradores setembro 2016.
 Fuente: Autor (2016).

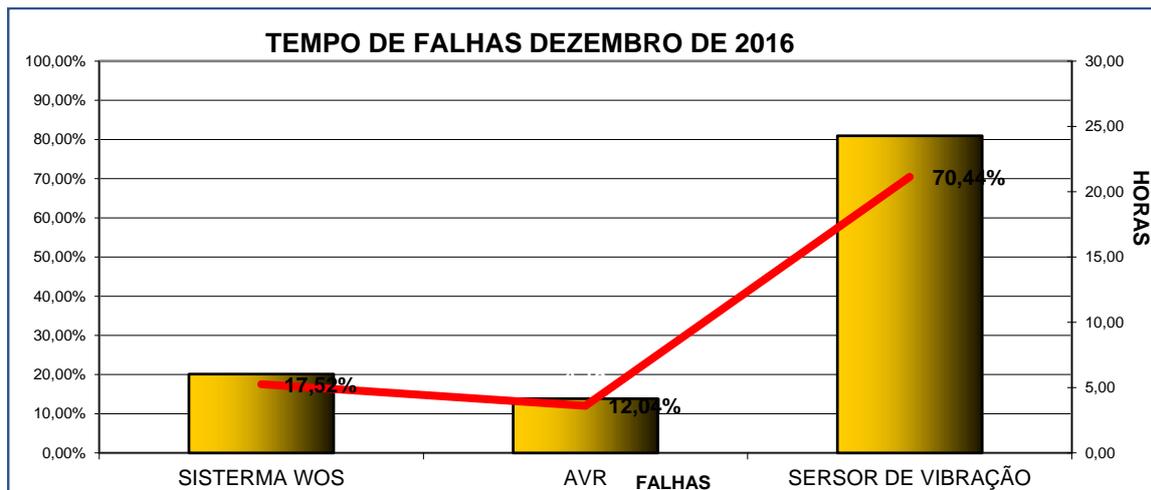


Figura 6.4 – Tempo de falhas dados estatísticos nos geradores setembro 2016.
 Fuente: Autor (2016).

6.5 Cierre del año por unidad generadora en 2016.

En la tabla 6.8 se muestran los datos de la frecuencia de fallas y del tiempo indisponible de cada generador en el año 2016.

Tabla 6.8 – Tempo indisponível y frequência de falhas no ano 2016.

Unidade Geradora	Frequência de Falhas	Tempo Indisponível em Relação de Falhas Ano 2016
01	2	10,23
02	2	13,87
03	3	9,13
04	2	2,92
05	2	0,43
06	1	1,83
07	3	13,88
08	3	3,35
09	4	7,55
10	5	1,58

Fuente: Autor (2016).

De la tabla se puede apreciar que el generador 10 fue lo que pero falló, pero el generador 7 y el generador 2 fueron los que más tiempo quedaron parados por fallas. En la figura 6.5 se muestran también estos dato

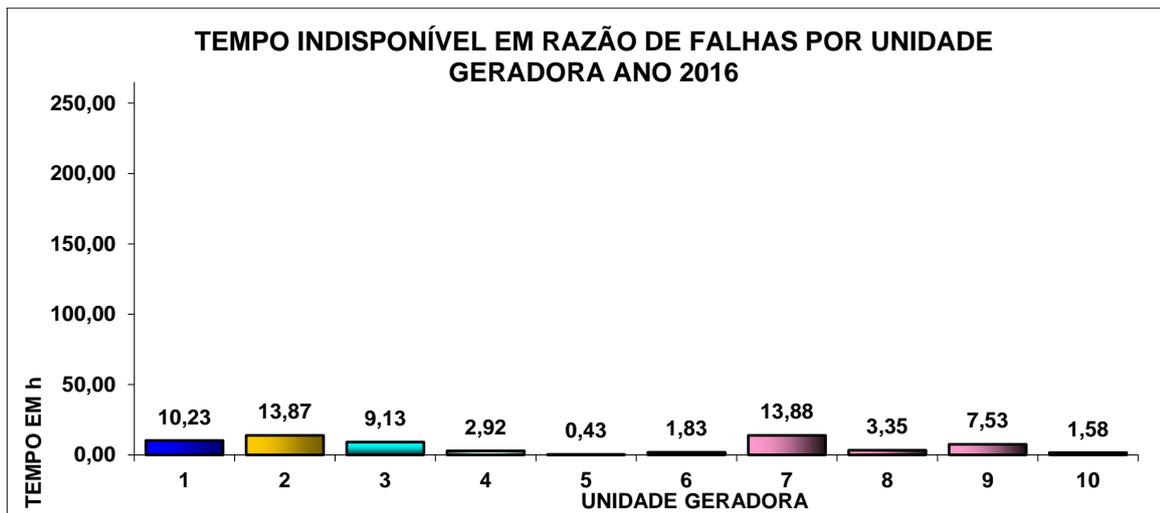


Figura 6.5 – Tempo de falhas dados estatísticos no gerador ano 2016.
 Fuente: Autor (2016).

Conforme a la Figura 6.5, se verificó que el tiempo no disponible debido a fallas en el generador de CA, hubo una disminución significativa después de la implementación del programa de administración de mantenimiento.

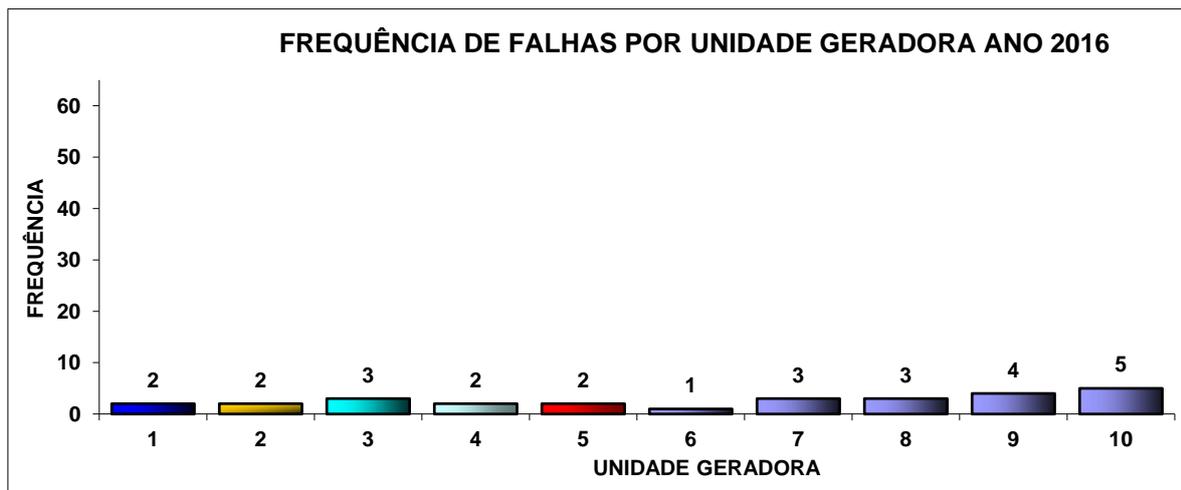


Figura 6.6 – Frecuencias de falhas dados estatísticos no gerador ano 2016.
 Fuente: Autor (2016).

Conforme a la Figura 6.6, verificamos la frecuencia de fallos en el generador AC, hubo una disminución significativa después de la implementación del programa de gestión de mantenimiento.

En la figura 6.7 se muestran los porcentajes de fallas de cada generador en forma de gráfico de pastel.

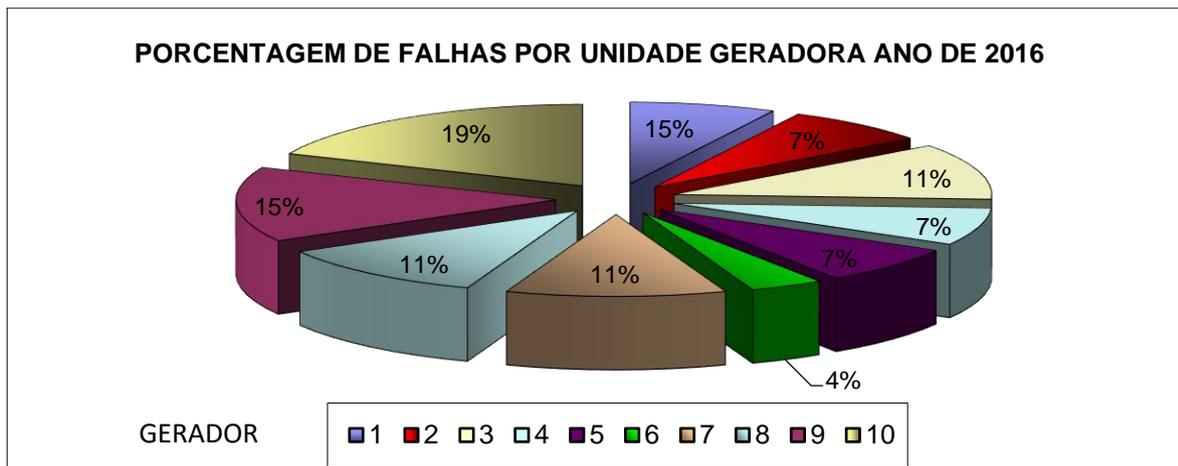


Figura 6.7 – Porcentagem de falhas dados estatísticos no gerador ano 2016
 Fuente: Autor (2016).

En la figura 6.8 se muestra el índice de disponibilidad del bloque 4 de la planta en el período 2015/2016, por mes. Como se puede apreciar el índice ha mejorado considerablemente.

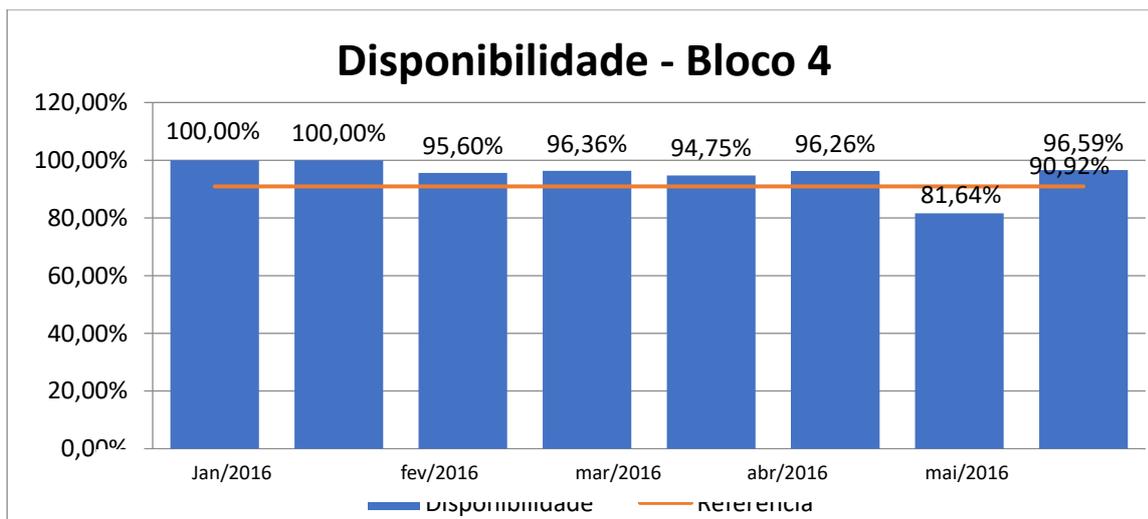


Figura 6.8 – Disponibilidade após a aplicação do programa de manutenção 2016.
 Fuente: Autor (2016).

En la figura 6.9 se muestra la tasa equivalente de indisponibilidad del bloque 4 de la planta en el período 2015/2016, por mes. Como se puede apreciar el índice ha mejorado considerablemente.

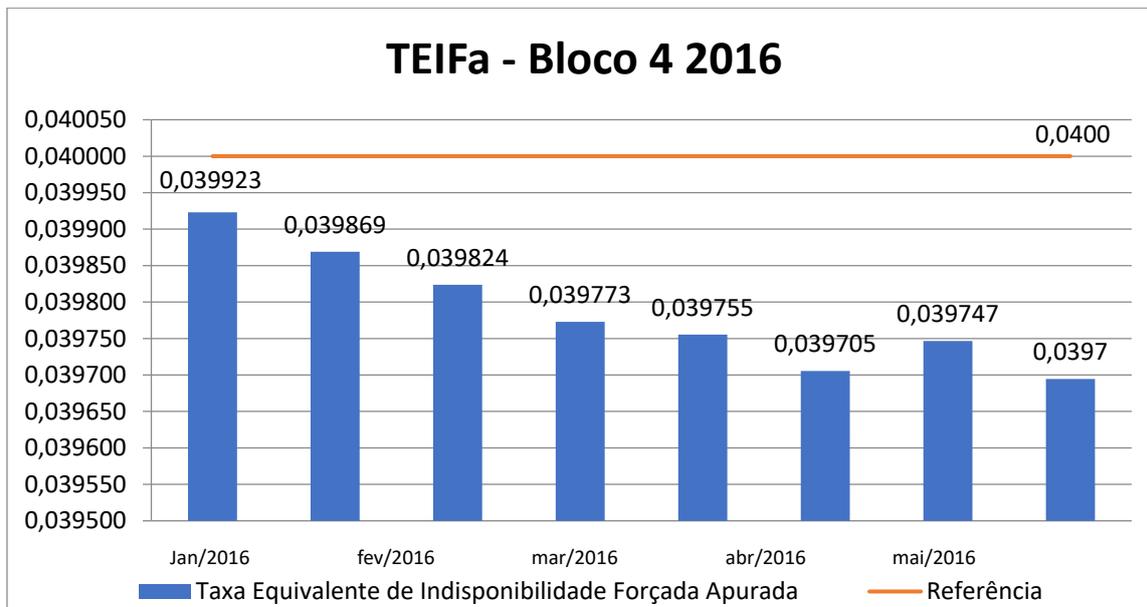


Figura 6.9 – Taxa equivalente de indisponibilidade forçada apurada.
 Fuente: Autor (2016).

REFERENCES

- Adesta, E., Prabowo, H., & Agusman, D. (2018). *Evaluating 8 pillars of Total Productive Maintenance (TPM) implementation and their contribution to manufacturing performance*. Paper presented at the IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.
- Ahn, J., Cho, S., & Chung, D. H. (2017). Analysis of energy and control efficiencies of fuzzy logic and artificial neural network technologies in the heating energy supply system responding to the changes of user demands. *Applied Energy*, 190, 222-231.
- Alaswad, S., & Xiang, Y. (2017). A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system. *Reliability Engineering & System Safety*, 157, 54-63.
- Alcaraz, J. L. G., Iniesta, A. A., & Macías, A. A. M. (2016). Human factors related to success of total productive maintenance. *Human Work Productivity: A Global Perspective*, 41.
- Almeida, A. T. d. (2005). Modelagem multicritério para seleção de intervalos de manutenção preventiva baseada na teoria da utilidade multiatributo. *Pesquisa Operacional*, 25(1), 69-81.
- Alsyouf, I., Shamsuzzaman, M., Abdelrahman, G., & Al-Taha, M. (2016). Improving reliability of repairable systems using preventive maintenance and time-between-failures monitoring. *European Journal of Industrial Engineering*, 10(5), 596-617.
- Aquilani, B., Silvestri, C., Ruggieri, A., & Gatti, C. (2017). A systematic literature review on total quality management critical success factors and the identification of new avenues of research. *The TQM Journal*, 29(1), 184-213.
- Arato Junior, A. (2004). Manutenção preditiva usando análise de vibrações. *São Paulo*.
- Arya, R. (2016). Ranking of feeder sections of distribution systems for maintenance prioritization accounting distributed generations and loads using diagnostic importance factor (DIF). *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 74, 70-77.
- Attri, R., Grover, S., Dev, N., & Kumar, D. (2013). An ISM approach for modelling the enablers in the implementation of total productive maintenance (TPM). *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 4(4), 313-326.
- Baidya, R., & Ghosh, S. K. (2015). Model for a predictive maintenance system effectiveness using the analytical hierarchy process as analytical tool. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 1463-1468.
- Bittencourt, C. G. d. (2011). *Aplicação da lógica fuzzy em um sistema de pré-análise de oscilografias em unidades de geração*. Universidade Tecnológica Federal do Paraná,
- Brah, S. A., & Chong, W.-K. (2004). Relationship between total productive maintenance and performance. *International Journal of Production Research*, 42(12), 2383-2401.
- Brunner, F. J. (2017). *Japanische Erfolgskonzepte: KAIZEN, KVP, Lean Production Management, Total Productive Maintenance Shopfloor Management, Toyota Production System, GD3-Lean Development*: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

- Campbell, J. D., & Reyes-Picknell, J. V. (2015). *Uptime: Strategies for excellence in maintenance management*: Productivity Press.
- Campos, V. F. (1999). Controle da Qualidade Total, TQC. *CEP*, 39, 000.
- Carleo, G., & Troyer, M. (2017). Solving the quantum many-body problem with artificial neural networks. *Science*, 355(6325), 602-606.
- Chao, H.-p., & Huntington, H. G. (2013). *Designing competitive electricity markets* (Vol. 13): Springer Science & Business Media.
- Collins, H. M. (2018). Expert systems, artificial intelligence and the behavioural co-ordinates of skill. In *The Question of Artificial Intelligence* (pp. 258-281): Routledge.
- Dan, J. G., Arnaldos, J., & Darbra, R. (2017). Introduction of the human factor in the estimation of accident frequencies through fuzzy logic. *Safety science*, 97, 134-143.
- David, A. K. (1993). *Competitive bidding in electricity supply*. Paper presented at the IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution).
- Davison, J. (2007). Performance and costs of power plants with capture and storage of CO₂. *Energy*, 32(7), 1163-1176.
- de Castro, N., & Brandão, R. (2014). Preço x custo da energia no setor elétrico brasileiro. *Valor Econômico, São Paulo [Online]*. Disponível em: <http://goo.gl/94U7Vb>.
- de Figueiredo, M. O., Tasinaffo, P. M., & Dias, L. (2016). Modeling autonomous nonlinear dynamic systems using mean derivatives, fuzzy logic and genetic algorithms. *Int. J. Innov. Comput. Inf. Control*, 12(5), 1721-1743.
- de Freitas, R. R., Zatta, F. N., Mattos, A. L., Pozo, O. V. C., & Gonçalves, W. (2017). ANÁLISE DE FATORES CRÍTICOS DE SUCESSO PARA IMPLANTAÇÃO DA TOTAL PRODUCTIVE MAINTENANCE (TPM) EM ORGANIZAÇÕES INDUSTRIAIS. *Brazilian Journal of Production Engineering-BJPE*, 3(1), 35-47.
- De Silva, C. W. (2018). *Intelligent control: fuzzy logic applications*: CRC press.
- dicionário Aurélio, N. (1975). novo dicionário da língua portuguesa. *Nova Fronteira*.
- dos Reis, L. B. (1998). *Geração de energia elétrica*: Tec Art.
- Dubois, D., & Prade, H. (2012). *Fundamentals of fuzzy sets* (Vol. 7): Springer Science & Business Media.
- Ericsson, N., Lennvall, T., Åkerberg, J., & Björkman, M. (2016). *Challenges from research to deployment of industrial distributed control systems*. Paper presented at the 2016 IEEE 14th International Conference on Industrial Informatics (INDIN).
- Feng, Z.-k., Niu, W.-j., Wang, W.-c., Zhou, J.-z., & Cheng, C.-t. (2019). A mixed integer linear programming model for unit commitment of thermal plants with peak shaving operation aspect in regional power grid. *Energy*.
- Ferguson, C. R., & Kirkpatrick, A. T. (2015). *Internal combustion engines: applied thermosciences*: John Wiley & Sons.
- Ferreira, R., Ferreira, R., & Macedo, H. (2016). *Fuzzy logic for estimating replacement items in inventory management*. Paper presented at the 2016 8th Euro American Conference on Telematics and Information Systems (EATIS).
- Fraser, K., Hvolby, H.-H., & Tseng, T.-L. (2015). Maintenance management models: a study of the published literature to identify empirical evidence: a greater practical focus is needed. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 32(6), 635-664.
- Gabriel, F. Â., de Gondra Bezerra, A. P. X., Lorena, E. M. G., Santos, Í. G. S., Silva, M. C., & Moraes, A. S. (2016). Thermal Energy and the Social and Environmental Impacts: Mitigation Alternatives in Thermoelectrics Plants Operation in Brazil | Energia térmica e os impactos sociais e ambientais: alternativas de mitigação na operação de usinas termoeletricas no Brasil. *Revista Geama*, 2(4), 511-520.
- Gabriel Filho, L. R., Cremasco, C. P., Putti, F. F., & Chacur, M. G. (2011). Application of fuzzy logic for the evaluation of livestock slaughtering. *Engenharia Agrícola*, 31(4), 813-825.
- Galar, D., Thaduri, A., Catelani, M., & Ciani, L. (2015). Context awareness for maintenance decision making: A diagnosis and prognosis approach. *Measurement*, 67, 137-150.
- Ganga, G. M. D., Carpinetti, L. C. R., & Politano, P. R. (2011). A fuzzy logic approach to supply chain performance management. *Gestão & produção*, 18(4), 755-774.
- Giles, A. G., Pérez, M. A. A., & Ramírez, H. S. (2016). Control de fuerza de robots manipuladores basado en observadores proporcionales integrales generalizados. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial*, 13(2), 238-246.
- Gomez-Exposito, A., Conejo, A. J., & Canizares, C. (2018). *Electric energy systems: analysis and operation*: CRC press.
- Gottwald, S. (2013). *Fuzzy sets and fuzzy logic: The foundations of application—from a mathematical point of view*: Springer-Verlag.

- Gupta, H. N. (2012). *Fundamentals of internal combustion engines*: PHI Learning Pvt. Ltd.
- Henao, H., Capolino, G.-A., Fernandez-Cabanas, M., Filippetti, F., Bruzzese, C., Strangas, E., . . . Hedayati-Kia, S. (2014). Trends in fault diagnosis for electrical machines. *IEEE industrial electronics magazine*, 8(2), 31-42.
- Holmes, K., & Knight, D. (2017). *The use of ferrography and component rating in order to reduce engine run-in time*. Paper presented at the Tribology of Reciprocating Engines: Proceedings of the 9th Leeds–Lyon Symposium on Tribology Held in Bondington Hall, the University of Leeds, England 7–10 September 1982.
- Jardine, A. K., & Tsang, A. H. (2005). *Maintenance, replacement, and reliability: theory and applications*: CRC press.
- Jones, A., Kaufmann, A., & Zimmermann, H.-J. (2012). *Fuzzy sets theory and applications* (Vol. 177): Springer Science & Business Media.
- Kahraman, C., Kaymak, U. U., & Yazici, A. (2016). *Fuzzy Logic in Its 50th Year: new developments, directions and challenges* (Vol. 341): Springer.
- Kardec, A., & Lafraia, J. R. B. (2002). *Gestão estratégica e confiabilidade*: Qualitymark Editora Ltda.
- Larguech, S., Aloui, S., Pagès, O., El Hajjaji, A., & Chaari, A. (2016). Fuzzy sliding mode control for turbocharged diesel engine. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 138(1), 011009.
- Li, J., Yang, W., An, H., Maghbouli, A., & Chou, S. (2014). Effects of piston bowl geometry on combustion and emission characteristics of biodiesel fueled diesel engines. *Fuel*, 120, 66-73.
- Lindström, J., Larsson, H., Jonsson, M., & Lejon, E. (2017). Towards intelligent and sustainable production: combining and integrating online predictive maintenance and continuous quality control. *Procedia CIRP*, 63, 443-448.
- Lopes, L. L. S. (2018). *A QUALIDADE DO PROGRAMA 5S NAS ORGANIZAÇÕES SEM FINS LUCRATIVOS*. Paper presented at the Congresso Científico da Fatec Mococa.
- Marçal, R. F., & Susin, A. A. (2005). Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas. *Revista Gestão Industrial*, 1(2).
- Marques, J. I., Lopes Neto, J. P., LOPES, F. F., Furtado, D. A., & Araujo, T. G. (2016). Fuzzy modeling in the prediction of climate indices and productive performance of quails kept in climate chamber. *Engenharia Agrícola*, 36(4), 604-612.
- Mendes, A. A., & Ribeiro, J. L. D. (2014). ANÁLISE DA GESTÃO DA MANUTENÇÃO EMPREGADA EM SISTEMAS REDUNDANTES. *Revista Gestão Industrial*, 10(3).
- Mohammadi, K., Shamshirband, S., Tong, C. W., Alam, K. A., & Petković, D. (2015). Potential of adaptive neuro-fuzzy system for prediction of daily global solar radiation by day of the year. *Energy Conversion and Management*, 93, 406-413.
- Nakajima, S. (1988). Introduction to TPM: total productive maintenance.(Translation). *Productivity Press, Inc., 1988*, 129.
- Nazaré, F. L. G. (2017). *Despacho Hidrotérmico com Critério de Aversão ao Risco: Impacto na Expansão da Geração do Sistema*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO,
- Nguyen, H. T., Walker, C. L., & Walker, E. A. (2018). *A first course in fuzzy logic*: CRC press.
- Paiva, M. (2008). *Aplicação de sistemas baseados em regras fuzzy para o roteamento em redes ópticas*. Universidade Federal do Espírito Santo,
- Park, C., Moon, D., Do, N., & Bae, S. M. (2016). A predictive maintenance approach based on real-time internal parameter monitoring. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 85(1-4), 623-632.
- Penman, J., & Jiang, H. (1996). The detection of stator and rotor winding short circuits in synchronous generators by analysing excitation current harmonics.
- Raptotasio, S. I., Sakellaris, N. F., Papagiannakis, R. G., & Hountalas, D. T. (2015). Application of a multi-zone combustion model to investigate the NOx reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR. *Applied Energy*, 157, 814-823.
- Ribeiro, H., & Pinto, A. K. (2002). *Gestão estratégica e manutenção autônoma*: Qualitymark Editora Ltda.
- Ripper Neto, A. (2000). Medição de Vibrações para Manutenção Preditiva de Máquinas. *Universidade Federal do Rio de Janeiro-COPPE/UFRJ*.
- Schmidt, B., & Wang, L. (2018). Cloud-enhanced predictive maintenance. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(1-4), 5-13.
- Tavares, L. A. (1996). Excelência na manutenção-Estratégias, otimização e gerenciamento. *Salvador: Casa da Qualidade Editora Ltda*, 36.
- Vedaldi, A., & Lenc, K. (2015). *Matconvnet: Convolutional neural networks for matlab*. Paper presented at the Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia.

- Venkatesh, J. (2007). An introduction to total productive maintenance (TPM). *The plant maintenance resource center*, 3-20.
- Xenos, H. G. (1998). Gerenciando a manutenção produtiva. *Belo Horizonte: Editora de desenvolvimento gerencial*, 171.
- Yaïci, W., & Entchev, E. (2016). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System modelling for performance prediction of solar thermal energy system. *Renewable Energy*, 86, 302-315.
- Zadeh, L. A. (1973). Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*(1), 28-44.
- Zoghi, M., Ehsani, A. H., Sadat, M., javad Amiri, M., & Karimi, S. (2017). Optimization solar site selection by fuzzy logic model and weighted linear combination method in arid and semi-arid region: A case study Isfahan-IRAN. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 986-996.