

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PRÉ-DESPACHO DE CARGA EM USINAS TERMOELÉTRICAS CONSIDERANDO A  
GESTÃO DA MANUTENÇÃO VIA LÓGICA FUZZY

**MILTON FONSECA JUNIOR**

**TD 03/2018**

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MILTON FONSECA JUNIOR**

PRÉ-DESPACHO DE CARGA EM USINAS TERMOELÉTRICAS CONSIDERANDO A  
GESTÃO DA MANUTENÇÃO VIA LÓGICA FUZZY

**TD 03/2018**

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MILTON FONSECA JUNIOR**

PRÉ-DESPACHO DE CARGA EM USINAS TERMOELÉTRICAS CONSIDERANDO A  
GESTÃO DA MANUTENÇÃO VIA LÓGICA FUZZY

Tese do doutorado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Elétrica, ênfase em Sistemas de Energia.

UFPA / ITEC / PPGEE  
Campus Universitário do Guamá  
Belém-Pará-Brasil  
2018



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA – ITEC**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PRÉ-DESPACHO DE CARGA EM USINAS TERMOELÉTRICAS CONSIDERANDO**  
**A GESTÃO DA MANUTENÇÃO VIA LÓGICA FUZZY**

**AUTOR: MILTON FONSECA JUNIOR**

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA À BANCA EXAMINADORA DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UFPA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA ELÉTRICA, ÊNFASE EM SISTEMAS DE ENERGIA.

APROVADA EM: 27 /02/2018

**BANCA EXAMINADORA:**

.....  
Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra (ORIENTADOR – PPGEE/UFPA)

.....  
Prof. Dr. Marcus Vinicius Nunes Alves (Membro Interno – PPGEE/UFPA)

.....  
Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira (Membro Interno – PPGEE/UFPA)

.....  
Prof. Dr. Jandecy Cabral Leite (Membro Externo - ITEGAM)

.....  
Prof. Dr. Édson Ortiz de Matos (Membro Externo - UFPA)

**VISTO:**

.....  
Prof. Dra. Maria Emília de Lima Tostes  
COORDENADORA DO PPGEE/ITEC/UFPA

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ser a força, a motivação e a inspiração em minha vida durante todas as lutas diárias.

Ao Milton Fonseca, meu pai (in memoriam).

Ao Beijamim Rondon, meu avô (in memoriam). Filho do ilustre (Marechal Cândido Mariano da Silva Rondon).

Em honra a minha mãe Fernanda Rondon Fonseca. Ela que com sua simplicidade e determinação soube dar a mim e a meus irmãos Faustinião Fonseca Neto, Soraya Rondon Fonseca, Zoraide Rondon Fonseca, Sigoreth Rondon Fonseca, o essencial para nos tornarmos pessoas de bem. Todas as conquistas alcançadas até hoje foram por ela e para ela.

A minha esposa Elis Akamy Viera dos Santos, que tem sido o alento de todos os dias. Ela que com sua simplicidade e amor tornam os meus dias mais felizes.

A meu filho Gabriel Fernandes Fonseca, que tem sido o presente de Deus em minha vida, por desejar meu sucesso mais que eu mesmo.

Agradecimento especial ao meu orientador Ubiratan Holanda Bezerra. Não há palavras para descrever o sentimento de gratidão que tenho. Obrigado pela confiança depositada e oportunidade oferecida ao longo de toda a minha vida.

Ao amigo e professor Jandecy Cabral Leite, que desde 2011 tem possibilitado o desenvolvimento de inúmeros trabalhos e que foi um dos grandes responsáveis pela minha mudança profissional. Obrigado também pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus irmãos e familiares, pois família é a base de tudo!

Agradeço a todos aqueles que acreditaram e incentivaram a realização deste trabalho, apesar de todas as dificuldades.

A empresa **Eletrobras** na qual faço parte como engenheiro eletricista pelo apoio financeiro e pelo conhecimento adquirido.

Ao **ITEGAM** pelo apoio total no doutorado.

E à **FAPEAM** pela oportunidade e apoio na conclusão do doutorado.

*“Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar.*

*Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota”.*

*Madre Teresa de Calcutá*

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>12</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>14</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>15</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>16</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>18</b>
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>18</b>
1.1 Apresentação.....	18
1.2 Formulação da Proposta.....	20
1.3 Objetivos:.....	21
1.3.1. Objetivo geral.....	21
1.3.2. Objetivos específicos.....	21
1.4 Contribuição e Relevância do Estudo.....	21
1.5 Estrutura da Tese.....	22
<b>CAPÍTULO II .....</b>	<b>24</b>
<b>ESTADO DA ARTE/MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>24</b>
2.1 Introdução.....	24
2.2 Sistemas de Manutenção e sua Aplicação nas Usinas Termoeletricas .....	25
2.3 Despacho de Carga.....	34
2.4 Conclusões do capítulo.....	40
<b>CAPÍTULO III .....</b>	<b>41</b>
<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA A GESTÃO DA MANUTENÇÃO.....</b>	<b>41</b>
3.1 Introdução.....	41
3.2 Programa de Manutenção Produtiva Total (MPT ou TPM).....	42
3.2.1 Implantação do TPM na Usina Termoeletrica.....	43
3.2.2 Pré-Despacho de Carga com Restrições de Manutenção.....	46
3.3 Breve Descrição da UTE Mauá.....	48
3.3.1 Dados Principais dos Motores a Combustão Interna e dos Geradores).....	50
3.3.2 Despacho de Carga na Usina Mauá.....	50

3.3.2.1 Manutenção Preditiva Utilizando Ferramenta Computacional .....	52
3.3.2.2 Análise de Vibração (Comentários / Recomendações).....	54
3.3.2.3 Análise do Óleo Lubrificante.....	61
3.3.2.4 Análise da Termografia.....	65
3.4 Conclusão do capítulo.....	66
<b>CAPÍTULO IV.....</b>	<b>67</b>
<b>LÓGICA FUZZY E SUA APLICAÇÃO.....</b>	<b>67</b>
4.1 Introdução.....	67
4.2 Lógica <i>Fuzzy</i> ou Lógica Difusa.....	67
4.3 Sistemas <i>Fuzzy</i> .....	68
4.4 Teoria dos Conjuntos <i>Fuzzy</i> .....	69
4.5 Funções de Pertinência <i>Fuzzy</i> .....	69
4.5.1. Funções de Pertinência Triangular <i>fuzzy</i> .....	70
4.5.2. Funções de Pertinência Trapezoidal <i>fuzzy</i> .....	71
4.5.3. Funções de Pertinência Gaussianas <i>fuzzy</i> .....	73
4.6 Regras <i>fuzzy</i> .....	74
4.7 Conclusão do capítulo.....	75
<b>CAPÍTULO V.....</b>	<b>76</b>
<b>APLICAÇÃO DA LÓGICA FUZZY NO PRÉ-DESPACHO – ESTUDO DE CASO.....</b>	<b>76</b>
5.1 Aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> .....	76
5.2 Procedimento para Aplicação da Lógica <i>Fuzzy</i> .....	76
5.3 Determinação das Variáveis de Entradas <i>Fuzzy</i> .....	77
5.3.1 Variável de Entrada Análise de Vibração.....	77
5.3.2 Variável de Entrada Análise de Óleo lubrificante.....	79
5.3.3 Variável de Entrada Termografia.....	80
5.4. Variável de Saída Estado Técnico do Motor.....	81
5.5. Simulação <i>Fuzzy</i> .....	81
5.6 Procedimento Usando a Lógica <i>Fuzzy</i> no Motor/Gerador 01.....	94
5.9. Conclusão Capítulo.....	96
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>97</b>
<b>CONCLUSÃO/RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>97</b>
6.1 Conclusões da Tese.....	97
6.2 Propostas de Trabalhos Futuros.....	98
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>100</b>

## LISTA DE SIGLAS

**MPT** – Manutenção Produtiva Total

**TPM** – Total Productive Maintenance

**GQT** – Gestão da Qualidade Total

**JIPM** – Japan Institute of Plant Maintenance

**PMP** – Programa de Manutenção Preditiva

**5S** – Quando pronunciadas em japonês, ou seja, *SEIRI* (organização), *SEITON* (arrumação), *SEISO* (limpeza), *SEIKETSU* (padronização) e *SHITSUKE* (disciplina).

**PME** – Pilar de Melhorias Específica

**PMA** – Pilar de Manutenção Autônoma

**PMP** – Pilar de Manutenção Planejada

**PMET** – Pilar de Manutenção Educação e Treinamento

**MCI** – Motores de Combustão Interna

**UTE** – Usina Termoelétrica

**PMP** – Programa de Manutenção Preditiva

**A/D** – Analógico/Digital

**PLC** – Programador Lógico Controlável

**MTBF** – Mean Time Between Failures (Período Médio entre Falhas)

**MTTR** – Mean Time To Repair (Tempo Médio para Reparo)

**RCM** – Manutenção Centrada em Confiabilidade

**AC** – Corrente alternada

**DFP** – Desempenho da Frequência em Regime Permanente

**DFD** – Desempenho da Frequência Durante Distúrbios

**MASP** – Método de Análise e Solução de Problemas

**RMS** – Root Mean Square

**ONS** – Operador Nacional do Sistema Elétrico

**MCI** – Motor de Combustão Interna

**PGM** – Programa de Gerenciamento de Manutenção

**MVC** – *Master Voltage Controller* (Limitadores no Controle de Voltagem)

**AVR** – Automatic Voltage Regulator (Regulador Automático de Tensão)

**CBM** – Manutenção Baseada na Condição

**ETM** – Estado Técnico do Motor

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Metodologia da Pesquisa.....	47
Figura 3.2 Foto da Usina do Mauá.....	49
Figura 3.3 Foto dos Motores Wartsila V 46 da Usina do Mauá.....	49
Figura 3.4 Curva de Carga Manaus.....	51
Figura 3.5 Sistema Especialista.....	53
Figura 3.6 Manutenção Preditiva Integrada com o Procedimento <i>Fuzzy</i> .....	53
Figura 3.7 Pontos de Medição para os Geradores Elétricos .....	55
Figura 3.8 Pontos de Medição para os Motores e Geradores.....	55
Figura 3.9 Análise de Vibração. As medidas foram realizadas (horizontal).....	57
Figura 3.10 Análise de Vibração. As medidas foram realizadas (vertical).....	57
Figura 3.11 Análise periódica do óleo lubrificante teor de água do motor.....	62
Figura 3.12 Análise periódica do óleo lubrificante teor de cobre.....	64
Figura 3.13 Análise periódica do óleo lubrificante teor de ferro.....	64
Figura 3.14 Análise de termovisão do motor/gerador 01.....	65
Figura 4.1 Sistema baseado em lógica <i>Fuzzy</i> .....	68
Figura 4.2 Função de Pertinência Triangular .....	71
Figura 4.3 Função de Pertinência Trapezoidal.....	72
Figura 4.4 Comparação entre funções trapezoidais e triangulares.....	73
Figura 4.5 Função de Pertinência Gaussiana.....	73
Figura 5.1 Modelo de Mamdani.....	83
Figura 5.2 Variável de Entrada Nível de Vibração.....	84
Figura 5.3 Variável de Entrada Água.....	84
Figura 5.4 Variável de Entrada Termografia.....	85
Figura 5.5 Variável de Entrada Ferro.....	85
Figura 5.6 Variável de Entrada Cobre.....	86
Figura 5.7 Variável de Saída: Estado Técnico do Motor.....	87
Figura 5.8 Algumas das Regras de Inferência Implementadas.....	88
Figura 5.9 Associação das Variáveis de Entrada e Saída.....	89
Figura 5.10 Superfície Resultante (Termografia x Vibração) .....	90
Figura 5.11 Superfície Resultante (Água x Vibração).....	91

Figura 5.12 Superfície Resultante (Ferro x Vibração).....	92
Figura 5.13 Superfície Resultante (Cobre x Vibração).....	93
Figura 5.14 Associação das Variáveis de Entrada e Saída motor/gerador 01.....	95
Figura 5.15 Pré-despacho centrado na confiabilidade dos equipamentos.....	96

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 Potência em MW fornecida para a cidade de Manaus.....	52
Tabela 3.2 Periodicidade de coletas de dados da MP.....	54
Tabela 3.1 Medição de vibração nos conjuntos Motor/Gerador da UTE Mauá.....	57
Tabela 5.1 Classificação das máquinas conforme a Potência.....	77
Tabela 5.2 Níveis Vibratórios.....	78
Tabela 5.3 Função de pertinência da classificação da severidade da vibração.....	78
Tabela 5.4 Análise periódica do óleo lubrificante.....	79
Tabela 5.5 Função de pertinência da severidade conforme o óleo lubrificante.....	79
Tabela 5.6 Valores limites conforme a termografia para determinar pontos.....	80
Tabela 5.7 Função de pertinência da classificação severidade.....	80
Tabela 5.8 Variável Estado Técnico do Motor (condições operacionais do equipamento).	81
Tabela 5.9 Regras de Inferência.....	82

## RESUMO

Esta tese apresenta uma nova proposta para o pré-despacho de carga considerando o estado técnico dos motores das usinas termelétricas através da combinação de diversas técnicas de manutenção e de diagnóstico a partir da inteligência computacional via lógica *Fuzzy*. O diagnóstico do estado técnico dos motores é realizado usando a análise de óleo lubrificante, análise de vibrações, e termografia. Com esses dados e com a análise estatística, é possível prever quando um motor pode falhar ainda no pré-despacho de carga. Para aumentar a confiabilidade dos motores e do fornecimento da energia elétrica, se desenvolveu um Programa de Gerenciamento de Manutenção (PGM), usando ferramentas de gestão, aplicando apenas 4 pilares do TPM (manutenção produtiva total) e combinando com a manutenção preditiva e o diagnóstico, permitindo assim o gerenciamento para a diminuição das paradas corretivas dos equipamentos da usina. Alguns resultados atingidos após a implantação são: redução do custo anual de manutenção, redução da manutenção corretiva, aumento do MTBF (*Mean Time Between Failures*) e diminuição do MTTR (*Mean Time To Repair*) em todas as áreas. Além disso, o pré-despacho realizado garante que possa ser atingida a potência demandada com um alto grau de confiabilidade e qualidade.

**Palavra chave** – Pré-despacho de carga, Gerenciamento de Manutenção, Geradores Elétricos, TPM, Usinas Termoelétricas, *Lógica Fuzzy*.

## ABSTRACT

This thesis presents a new **proposal** for load pre-dispatch considering the technical conditions of the engines of thermoelectric power plants by combining several maintenance and diagnostic techniques and using computational intelligence based on *fuzzy* logic. Diagnosis of the technical conditions of the engines is done using lubricant analysis, vibration analysis, and thermography. With this data and with the statistical analysis it is possible to predict when an engine can fail and consider this in the load pre-dispatch. To increase engine reliability and power supply, a Maintenance Management Program (MMP) is developed using **management** tools, applying only 4 TPM (Total Predictive Maintenance) pillars and combined them with predictive maintenance and diagnostics, thus allowing to reduce failures of plant equipment. Some results achieved after the implementation are: reduction of the annual cost of maintenance, reduction of corrective maintenance, increase of the MTBF (Mean Time Between Failures) and decrease of MTTR (Mean Time To Repair) in all areas. In addition, the proposed pre-dispatch scheme ensures the demanded power with a high degree of reliability and quality.

**Keywords** Load Dispatch, Management Maintenance Program, Electric Generators, TPM, Thermal Plants, *Fuzzy* Logic.

---

# CAPÍTULO I

---

## INTRODUÇÃO

### 1.1 Apresentação

A maior parte do parque termoelétrico brasileiro fica completamente parada por meses sempre que a situação hidrológica é favorável. Como na média histórica recente a geração hidroelétrica tem sido de 90% de sua capacidade de geração para o sistema (SILVA, 2016), a ociosidade tem prevalecido no parque térmico já que as usinas só podem ser acionadas quando os reservatórios das hidrelétricas estiverem abaixo de 50 % do seu volume máximo. O contraste com a realidade internacional é marcante. Na maioria dos países, as usinas termoelétricas movidas a carvão ou gás em ciclo combinado não costumam experimentar ociosidade de longa duração. Ao contrário, elas operam na base do sistema, sendo despachadas de forma praticamente contínua. Por outro lado, térmicas que em outros sistemas elétricos são usadas para geração de ponta, com acionamento diário ou pelo menos em boa parte dos dias úteis, tais como usinas a gás em ciclo aberto ou térmico com motores, no Brasil podem permanecer ociosas por longos períodos, pois não são necessárias em situações de hidrologia normal ou favorável.

No Brasil, as usinas com tecnologia desenhadas para geração de ponta, portanto projetadas para gerar apenas algumas horas por dia, são contratadas como *backup* de geração de base. No entanto, elas podem ser acionadas continuamente em períodos de seca prolongada e possivelmente por muitos meses, indo assim contra as suas características técnicas e mesmo contratuais.

Segundo a Lei 9.648, de 27 de maio de 1998, cabe ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) executar as “atividades de coordenação e controle da operação da geração e da

transmissão de energia elétrica, integrantes do Sistema Interligado Nacional”, além de “realizar o planejamento e a programação da operação e o despacho centralizado da geração, com vistas à otimização do Sistema Interligado Nacional – SIN”, recebendo autorização do Poder Concedente, sendo fiscalizado e regulado pela ANEEL. O ONS se compromete, em seu Estatuto Social, no 1º parágrafo “desempenhar as suas atribuições com neutralidade, transparência, integridade, representatividade, flexibilidade e razoabilidade, realizando as ações necessárias ao desenvolvimento tecnológico do ONS” (SILVA, 2016).

No Brasil, as usinas térmicas com elevados custos variáveis são acionadas apenas em momentos de hidrologia desfavorável, quando se tornam fundamentais e estratégicas para a segurança energética do sistema. Frente à elevada indisponibilidade apresentada por essas usinas no período de outubro de 2015 a janeiro de 2016, é pertinente examinar possíveis ajustes regulatórios capazes de mitigar este tipo de problema. Nesses termos, sugere-se a introdução de despachos de teste de desempenho de termoelétricas com duração de alguns dias. Isto envolve tanto a mudança nas condições de contratação de novos agentes como, o que é mais sensível, a alteração de direitos e obrigações de agentes já contratados. Com respeito a esses últimos, a introdução de uma rotina de testes representará um custo não previsto originalmente e possivelmente vultoso, em especial dependendo dos valores do PLD – preço de liquidação de diferença.

Por outra parte, é necessário garantir o fornecimento de energia elétrica aos consumidores dentro de padrões de continuidade e confiabilidade. Esses fatores acarretam duas situações antagônicas: se por um lado a falta de investimentos no setor causa a perda da qualidade do produto, por outro, o excesso de investimentos pode tornar o valor do produto muito caro, desestimulando o seu consumo (MANN, 2016; PLESS e FELL, 2017).

Como os fabricantes de equipamentos são, em sua maioria, grupos internacionais que atendem demandas em escala e âmbito mundial, eles estruturam e aperfeiçoam seus produtos para realidades operacionais nitidamente distintas da que se verifica no Brasil. Como os equipamentos e suas rotinas de manutenção não foram estruturados para a realidade brasileira, é compreensível que ocorram problemas técnicos, decorrentes de uma aclimatação imperfeita. Assim, a ociosidade por longos períodos de plantas térmicas que, a qualquer momento, podem ser chamadas para uso contínuo, bem como para operar em temperaturas críticas, pode estar na raiz de alguns contratemplos importantes relacionados à operação e manutenção das UTEs no

Brasil. Além disso, verifica-se que a disponibilidade das plantas de geração térmica tem uma dependência vital da oferta de combustíveis. Porém, o suprimento de combustíveis é encarecido e dificultado pelo padrão errático de uso das usinas térmicas brasileiras.

Um dos aspectos mais importantes para garantir a qualidade e a confiabilidade do fornecimento de energia elétrica é conseguir realizar um ótimo despacho de carga (KUMAR, 2017; MA. H, 2017). A grande maioria dos trabalhos apresentados na literatura desenvolve o despacho de carga das usinas térmicas considerando que todos os motores da usina têm um estado técnico favorável, mas nem sempre é assim, por isso, nesta tese é apresentado um método para o pré-despacho de carga que leva em conta o estado técnico dos motores da usina por meio de diagnóstico e fazendo uso da lógica *fuzzy*.

## 1.2 Formulação da Proposta

Propõe-se o desenvolvimento de uma ferramenta computacional para apoio na decisão do despacho de carga segundo as condições operacionais dos motores e geradores de usinas térmicas, as quais são classificadas com relação às probabilidades de falhas por um sistema *fuzzy* desenvolvido nesta tese, a partir de indicadores obtidos da análise do óleo lubrificante, análise de vibração e termografia dos equipamentos de geração de energia. A base para o estudo parte do princípio de funcionamento e condições operacionais dos equipamentos a serem despachados para geração em uma usina térmica, além de suas particularidades como consumo específico e a qualidade de poluente expedido por cada equipamento.

Dessa forma, este trabalho pretende não só monitorar esses equipamentos, como também, com base nos relatórios gerenciais de análise de vibração, temperatura e análise de óleo, tomar ações corretivas, de modo a atingir a qualidade e a confiabilidade do equipamento e dos serviços através de um procedimento de pré-despacho que leve em consideração as condições operacionais dos equipamentos, obtendo indicadores *fuzzy* do seu desempenho.

Entende-se por Controle Preditivo de Manutenção a determinação do ponto adequado para executar a manutenção preventiva em um equipamento, ou seja, o ponto a partir do qual a probabilidade do equipamento falhar assume valores indesejáveis (PARK, 2016; LINDSTRÖM, 2017). Na Usina termelétrica da Amazonas Energia, em Manaus – AM, com motores a diesel de combustão interna, nos últimos anos, foram observadas paradas excessivas dos motores e equipamentos auxiliares, devido ao grande número de quebras em

conjuntos auxiliares e moto-bombas, o que de certa forma motivou a realização dos procedimentos a serem apresentados nesta tese de doutorado.

## **1.3 Objetivos**

### ***1.3.1. Objetivo Geral***

Desenvolver um modelo para o pré-despacho de carga baseado no gerenciamento de manutenção utilizando, para isso, ferramenta computacional fundamentada em lógica *fuzzy* aplicada em usinas termoelétricas para garantir maior competitividade e confiabilidade no fornecimento de energia.

### ***1.3.2. Objetivos Específicos***

- Implantar e avaliar um procedimento de manutenção que possibilite o planejamento e controle dos equipamentos de forma correta e adequada para melhorar a confiabilidade deles, através da manutenção preditiva combinando a técnica TPM/MPT (manutenção produtiva total) e os pilares de manutenção autônoma com o diagnóstico.
- Utilizar a análise de vibração, análise do óleo e da temperatura para diagnosticar o estado técnico dos motores.
- Reduzir as quantidades de falhas e, conseqüentemente, das paradas para manutenção;
- Desenvolver uma ferramenta computacional utilizando lógica *fuzzy* para o pré-despacho de carga conforme o estado técnico dos motores da usina.

## **1.4 Contribuição e Relevância do Estudo**

Pelas regras do modelo do setor elétrico brasileiro, a indisponibilidade de equipamentos por qualquer razão é um risco do empreendedor, que deve arcar com os prejuízos acarretados por indisponibilidades em níveis superiores aos declarados. Esses problemas implicam em custos financeiros associados ao valor da geração frustrada e às penalidades, que incluem a perda de lastro da garantia física, o que implica na diminuição da quantidade de energia que pode ser vendida em contratos em razão de uma indisponibilidade verificada acima da prevista.

Entretanto, o mau desempenho recente das termoelétricas parece indicar que a regulação atual não está sendo eficaz em induzir um desempenho adequado destas usinas e tão necessário neste momento de crise hidrológica prolongada. A indisponibilidade de equipamentos para geração térmica tem sido relativamente elevada, sobretudo após períodos prolongados de ociosidade, o que conduz esses aspectos a serem levados em conta ao fazer o pré-despacho de carga. Esse comportamento aponta para necessidade de estudar a real dimensão do problema, assim como torna pertinente o estudo de eventuais alterações regulatórias que permitam mitigar o problema, tanto para termoelétricas existentes como para novos projetos.

A Implementação computacional da lógica *fuzzy* utilizando como regras os parâmetros de entrada da análise de vibração, qualidade do óleo lubrificante e do termovisor permite desenvolver um pré-despacho de carga considerando as condições operacionais atuais dos equipamentos.

## 1.5 Estrutura da Tese

A tese está dividida em 6 capítulos:

O **capítulo 1** apresenta os tópicos referentes à origem do tema, a justificativa e o problema de pesquisa, os objetivos geral e específicos, a contribuição e relevância do estudo.

O **capítulo 2** apresenta o estado da arte abordando os principais tópicos relativos ao estudo.

No **capítulo 3** são apresentados os tópicos referentes à fundamentação teórica do programa de gerenciamento de manutenção (PGM), destacando-se os principais aspectos da manutenção centrada na confiabilidade (preditiva). Também são apresentados os tópicos referentes às Usinas Térmicas com Motores de Combustão Interna (UTES de MCI) e à abordagem de despacho e pré-despacho no cenário nacional em questão, além da metodologia da pesquisa.

No **capítulo 4**, apresenta-se a aplicação da lógica *fuzzy* como modelo para pré-despacho de carga nas usinas UTE Eletrobras Amazonas Energia Usina térmica.

O **capítulo 5** apresenta a aplicação da lógica *fuzzy* na confiabilidade do estudo de caso. Tal ferramenta serviu de base para a resolução de problema real de pré-despacho de carga para

satisfazer os métodos racionalizados do *just in time* da UTE. O capítulo apresenta ainda os resultados e a discussão da aplicação do estudo de caso.

No **capítulo 6**, as conclusões resultantes da pesquisa e as recomendações para possível continuidade e aplicações futuras são mostradas.

---

---

## CAPÍTULO II

---

---

### ESTADO DA ARTE/MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Introdução

(ZURN, TENFEN, 2017). A produção predominante de potência hidrelétrica do Brasil deve ser cada vez mais complementada pela geração térmica para enfrentar o rápido crescimento da demanda, o lento planejamento e a construção de novas usinas hidráulicas, a redução proporcional da possível energia armazenada nos reservatórios e os períodos de seca maiores. Quanto maior a quantidade de eletricidade térmica, mais caro é o custo de produção e o impacto ambiental devido aos combustíveis fósseis.

Para combater isso, novas fontes renováveis, como as usinas eólicas, estão sendo construídas em massa, além de medidas mais eficazes de conservação de energia, com base em métodos tradicionais, como o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) e os diferenciais de tarifas máximas de carga, que afetam grandes consumidores e que deverão ser aplicados em consumidores residenciais com novos medidores digitais de energia. Além disso, há o tempo tradicional de verão compensado de uma hora em partes de latitude sul do Brasil.

Conforme o autor previamente citado, ainda a potência produzida pelas usinas termelétricas tem um papel decisivo na matriz energética do Brasil.

Atendendo aos objetivos deste trabalho, o marco teórico será dividido em duas partes. Primeiro, os aspectos que estão relacionados com a manutenção em geral e com a manutenção de usinas térmicas em particular e, segundo, as questões relacionadas com o despacho de carga elétrica, avaliando a literatura com relação à inter-relação de aspectos de manutenção com aspectos de despacho de carga.

## 2.2 Sistemas de manutenção e sua aplicação nas usinas termelétricas

(ALAM, KARIM, 2017). A maioria dos pacotes de agendamento de manutenção de unidades geradoras considera o cronograma de manutenção preventiva das unidades no decorrer de um período de planejamento operacional de um ou dois anos, de forma a minimizar o custo operacional total, ao mesmo tempo em que satisfaz as exigências de energia do sistema e de restrições de manutenção. Esse problema consiste em verificar quais unidades geradoras devem ser paradas da produção. A unidade geradora deve ser examinada regularmente por segurança. É muito importante porque uma falha em uma unidade geradora de energia pode causar paradas nos equipamentos. A principal consequência é que a demanda de eletricidade dos clientes não será satisfeita nesses casos. Portanto, a confiabilidade é o ponto chave usado na metodologia apresentada. A situação é abordada como um problema de otimização. O modelo é desenvolvido determinando a função objetivo, que é a reserva de potência líquida da unidade. Algumas restrições são usadas para obter a saída desejada. Uma abordagem prática é realizada através da implantação do modelo em uma usina. O resultado obtido é um cronograma que permite uma organização eficiente da manutenção preventiva ao longo de um horário específico.

(ALASWAD and XIANG, 2017). Destacam que a manutenção baseada em condições (CBM) é uma estratégia que coleta e avalia informações em tempo real e recomenda decisões de manutenção com base na condição atual do sistema. Nas últimas décadas, a pesquisa sobre CBM vem crescendo rapidamente devido ao acelerado desenvolvimento de tecnologias de monitoramento possibilitadas pelo computador. Estudos de pesquisa provaram que o CBM, se planejado corretamente, pode ser eficaz para melhorar a confiabilidade do equipamento a custos reduzidos. Este artigo apresenta uma revisão da literatura CBM com ênfase em abordagens de modelagem matemática e otimização. Os autores concentram a revisão em aspectos importantes do CBM, como critérios de otimização, frequência de inspeção, grau de manutenção, metodologia de solução etc. Uma vez que a escolha de modelagem para o processo de deterioração estocástica influencia muito as decisões da estratégia de CBM, esta revisão classifica a literatura sobre os modelos de CBM com base nos processos de deterioração subjacentes, nomeadamente a deterioração do estado discreto e contínuo, e o modelo de risco proporcional. Os modelos CBM para sistemas de múltiplas unidades também

são revisados neste artigo. O trabalho fornece referências úteis para profissionais de gerenciamento de CBM e pesquisadores que trabalham na modelagem e otimização de CBM.

(ARYA, 2016). Apresenta um algoritmo para decidir preferências em atividades de manutenção para seções de alimentação de sistemas de distribuição. Uma medida componente de importância, conhecida como fator de importância diagnóstica (DIF), foi usada para esse fim. Foi desenvolvida uma metodologia para calcular um fator de importância de diagnóstico cumulativo ponderado (WCDIF) para cada seção de alimentação, o que representa um significado quantitativo relativo para a priorização das atividades de manutenção. A metodologia desenvolvida inclui o efeito de geração distribuída (DG) e as cargas. Foi implementada em dois sistemas de distribuição, de modo que, ao final, foram obtidas listas de classificação de seções de alimentação para atividades de manutenção.

(AZADEH, ASADZADEH, 2015). A manutenção baseada em condições (CBM) é uma política cada vez mais aplicável no mercado competitivo como meio de melhorar a confiabilidade e eficiência dos equipamentos. Não só a manutenção tem um relacionamento estreito com a segurança, mas seus custos também tornam a questão ainda mais atrativa para os pesquisadores. Este estudo propõe um modelo para avaliar a eficácia da política de CBM em comparação com outras duas políticas de manutenção: Manutenção Corretiva (CM) e Manutenção Preventiva (PM). As políticas de manutenção são comparadas a partir de dois indicadores de desempenho do sistema: confiabilidade e custo. Para estimar a confiabilidade e os custos do sistema, o modelo de simulação de evento discreto *Markoviano* proposto é desenvolvido em cada uma dessas políticas. A aplicabilidade e utilidade do modelo de simulação *Markoviano* proposto são ilustradas para um sistema de geração de energia. As características simuladas do sistema CBM incluem a sua eficiência prognóstica para estimar a vida útil remanescente do equipamento. Os resultados mostram que, com um prognóstico eficiente, a política de CBM é uma estratégia efetiva em comparação com outras estratégias de manutenção.

(BAIDYA and GHOSH, 2015). A manutenção adequada pode aumentar a produtividade da empresa e aumentar seu valor no mercado. Este artigo aborda a questão da seleção de uma tecnologia de manutenção efetiva considerando a manutenção estratégica e a política gerencial de uma organização. A pesquisa propõe um *framework* de trabalho para avaliar a eficácia do indicador de manutenção preditiva (PMIE) com base no processo de

hierarquia analítica (AHP). O estudo foi feito considerando três estudos de caso. Em primeiro lugar, foi realizada uma pesquisa de questionários para a pesquisa primária, em segundo lugar, foi desenvolvido um modelo e, em terceiro lugar, os dados foram analisados usando o modelo desenvolvido. O estudo principal forneceu um modelo robusto que pode avaliar a tecnologia disponível estrategicamente importante e pode excluir a tecnologia desatualizada e/ou inapropriada. Existem muitas pesquisas neste campo em que o número de modelos foi proposto, como o sistema de gerenciamento de manutenção, medição de desempenho de manutenção e indicadores de desempenho de manutenção, mas os detalhes da eficácia do indicador de manutenção preditiva especificamente baseada em manutenção e em condições (CBM) com os requisitos de manutenção e gerenciamento usando o processo de hierarquia analítica (AHP) dificilmente estão disponíveis na literatura.

(BALAJI, BALAMURUGAN, 2016). Destacam que o agendamento de manutenção de unidades geradoras de energia é muito essencial para o funcionamento econômico e confiável de um sistema de potência. O objetivo do problema do Agendamento da Manutenção do Gerador (GMS) é encontrar o intervalo de tempo exato para a manutenção preventiva de unidades geradoras de energia, a fim de minimizar o custo operacional, maximizar a confiabilidade do sistema e prolongar o tempo de vida das unidades geradoras. Neste artigo, o problema de agendamento de unidades geradoras para manutenção é formulado como um problema de otimização inteira considerando a minimização do custo operacional. Uma vez que o agendamento de manutenção do gerador é um problema inteiro misto, o algoritmo de evolução diferencial é adequadamente modificado para lidar com as variáveis inteiras. As variáveis de controle no algoritmo de evolução diferencial são números inteiros que indicam o período inicial de cada unidade geradora para a realização de trabalhos de manutenção. O método de iteração lambda é usado para determinar o horário de geração ideal de unidades geradoras comprometidas. Este artigo apresenta uma abordagem matemática de evolução diferencial assistida (MADE) para resolver o problema de programação de manutenção em um sistema de energia. O desempenho do algoritmo proposto é validado considerando dois sistemas de teste. O resultado obtido pelo método MADE proposto é comparado com a otimização de enxame de partículas. Os resultados do teste revelam a capacidade do algoritmo MADE proposto em encontrar o cronograma de manutenção ideal para o problema do GMS.

(BOZORGI, PEDRAM, 2016). Como um planejamento de agendamento de médio prazo, o Programa de Manutenção de Unidade (UMS) tem um efeito significativo no lucro das empresas de Geração (*Gencos*). O operador de sistema (*System Operator – SO*) é uma entidade central que fornece o Gencos com o cronograma de manutenção relacionado. Esse cronograma seria finalizado através de interações repetitivas entre o SO e diferentes Gencos no mercado para chegar a um horário geralmente aceito. A estratégia de licitação, por outro lado, afeta o lucro da Gencos. Sendo considerado como um planejamento de curto prazo, o processo de licitação é feito a cada hora para determinar a demanda atribuída a cada Genco por cada hora do dia. Estes planejamentos de horários de curto e médio prazo receberam atenção suficiente na literatura, mas considerar ambos simultaneamente não foi bem estudado. Além disso, pode não ter todas as informações para os períodos futuros. Para fatores de custo de produção e carga, uma estimativa pode ser obtida a partir dos dados históricos, mas esse não seria o valor exato e ela permanece incerta sobre o valor desses parâmetros. Isso evidenciaria a importância de desenvolver um modelo robusto que proteja o cronograma contra mudanças nos valores desses parâmetros e assegure uma solução aceitável, quase ideal. Neste artigo, os autores modelaram as incertezas nos fatores de custo de carga e produção, com base em uma estrutura difusa. O problema do UMS é modelado e resolvido como um jogo *fuzzy* dinâmico e não cooperativo. Os resultados mostram a eficácia da abordagem proposta.

(DAHAL, AL-ARFAJ, 2015). As empresas geradoras usam a função de custo de manutenção como único objetivo ou principal para criar o cronograma de manutenção dos geradores elétricos. Normalmente, apenas os custos relacionados às atividades de manutenção são considerados derivando a função de custo. No entanto, nos mercados desregulados, os custos relacionados à manutenção, por si só, não representam os custos totais dos geradores. Este documento modela vários componentes de custo que afetam as atividades de manutenção em mercados de energia desregulados. Os custos que são modelados incluem manutenção direta e indireta, falhas, interrupções, compensação contratual, reescalonamento e oportunidades de mercado. A perda da reputação da empresa e o modelo de seleção de lealdade também são considerados usando o Processo de Hierarquia Analítica (AHP) dentro de um modelo de custo de oportunidade. Um estudo de caso é usado para ilustrar as atividades de modelagem. O modelo aprimorado é utilizado nos casos de agendamento de manutenção do gerador. Os resultados experimentais demonstram a importância e o impacto dos custos relacionados ao mercado nos cronogramas de manutenção.

(EYGELAAR, LÖTTER, 2017). Afirnam que a capacidade de uma fonte de potência para satisfazer a demanda de energia pode ser influenciada significativamente por desagregações inesperadas das unidades geradoras de energia. Na maioria dos casos, tais falhas inesperadas também são muito mais dispendiosas para reparar do que tomar medidas planejadas de manutenção preventiva. Verificaram-se, especialmente nos países em desenvolvimento, que a manutenção de unidades geradoras de energia, muitas vezes envelhecidas, é negligenciada devido à alta demanda de energia e baixa capacidade do sistema. Os objetivos típicos perseguidos na concepção dos horários de manutenção da unidade geradora de energia não levam em conta essas dificuldades. Um novo critério de agendamento é, portanto, proposto neste artigo. As ocorrências de falhas da unidade geradora de energia podem ser estimadas usando métodos da teoria da confiabilidade em que o objetivo é tipicamente quantificar a probabilidade de um sistema completar sua função pretendida por um período de tempo específico. Com base nessa teoria, o novo objetivo de agendamento procura maximizar a probabilidade de que nenhuma unidade geradora de potência no sistema de energia falha durante a janela de agendamento, ponderada pela capacidade nominal de geração de potência de cada unidade. A viabilidade e a eficácia deste novo objetivo concepção dos horários de manutenção da unidade geradora de energia são analisadas aplicando-a, concepção dos horários de manutenção da unidade geradora de energia em conjunto com uma abordagem de solução exata, em dois sistemas conhecidos de teste de agendamento de manutenção dos geradores.

(FROGER, GENDREAU, 2016). A confiabilidade das usinas e das linhas de transmissão no setor elétrico é crucial para atender a demanda. Conseqüentemente, a manutenção atempada desempenha um papel importante, reduzindo as quebras e evitando caros desligamentos de produção. Até agora, a literatura contém um sólido trabalho focado em melhorar a tomada de decisões nas unidades geradoras e no cronograma de manutenção das linhas de transmissão. O objetivo deste artigo é rever essa literatura. Os autores atualizam levantamentos anteriores e fornecem uma visão mais global do problema: estudam sistemas de energia regulados e desregulados e exploram algumas características importantes, tais como considerações de rede, gerenciamento de combustível e incerteza de dados.

(GAO and GE 2015). Com base nos três tipos de interações de falha, dois modelos de custo de manutenção periódica foram apresentados para um sistema de dois estados e um

sistema de três estados, respectivamente, todos submetidos a interações de falha entre as unidades, considerando que qualquer unidade falha causaria danos a outras unidades. As influências de interação de falha incluíram danos instantâneos e danos contínuos entre unidades. O resultado indicou que as interações de falha encurtarão o intervalo de manutenção preventiva do sistema, se a estratégia de manutenção preventiva se basear no custo.

(JAGTAP and BEWOOR, 2017). As centrais de energia térmica (TPP) são a maior fonte de energia na Índia. Aproximadamente 65% da eletricidade é gerada usando usinas termelétricas. O equipamento das TPP trabalha por 24x7 dias ao longo do ano. As falhas do equipamento das TPP precisam ser identificadas em estágio inicial antes da quebra do sistema ou unidade. As funções de manutenção da TPP devem ser otimizadas cuidadosamente, selecionando uma estratégia de manutenção adequada, ao mínimo custo. A identificação e a confirmação da falha no equipamento das TPP são um passo muito importante para a tomada de decisão. Isso ajuda a otimizar a atividade de manutenção. Este artigo propõe um algoritmo para uso de abordagem de monitoramento de condições coordenadas para identificação e confirmação de falha. O objetivo deste estudo é melhorar a disponibilidade e a saúde dos equipamentos críticos da Estação Termelétrica de Dahanu (DTPS) localizada na região ocidental da Índia.

(JAGTAP and BEWOOR, 2017). Destacam que o método do Processo de Hierarquia Analítica (AHP) é usado para priorizar os ativos da planta de acordo com sua criticidade. O método do Processo de Hierarquia Analítica (AHP) permite aos tomadores de decisão modelar o problema em estrutura hierárquica com relação às metas, os objetivos e às alternativas. Este artigo descreve uma aplicação do Processo de Hierarquia Analítica (AHP) aplicada para a identificação de equipamentos críticos das usinas termelétricas. Para esta análise baseada em AHP, quatro critérios são considerados para a análise de criticidade, a saber: Efeito da falha do equipamento sobre geração de energia, ambiente e segurança, frequência de falha e custo de manutenção. Os principais equipamentos da usina de energia térmica considerados para este estudo foram: Turbina, gerador, ventilador de tiro induzido, ventilador de tiro forçado, ventilador de ar primário, bomba de alimentação da caldeira, bomba de água de refrigeração e bomba de extração de condensados.

(JASIULEWICZ-KACZMAREK, 2016). Destaca que a estratégia de manter o equipamento de uma planta é crucial para a eficácia da fabricação. Ao contrário de outras

funções como fabricação e negócios, a literatura estratégica sobre manutenção é escassa. Muitas ferramentas e técnicas foram desenvolvidas e aplicadas em outros campos. No entanto, a aplicabilidade dessas ferramentas para a função de manutenção é apresentada na literatura em um intervalo limitado. No artigo, o autor introduz a aplicação da análise SWOT para o diagnóstico do sistema de manutenção e a identificação das orientações das ações estratégicas da empresa dentro da área de manutenção.

(KUMARAPPAN and SURESH, 2015). Apresentam um modelo para o agendamento de manutenção (MS) de geradores usando a abordagem estocástica baseada em simulação combinada de recozimento simulado (SA) e otimização binária por enxame de partículas (CSABPSO). A função objetiva deste trabalho é reduzir a perda de probabilidade de carga (LOLP) para um sistema de potência. O algoritmo híbrido combina BPSO com o comportamento de recozimento simulado. O algoritmo CSABPSO possui as vantagens de ambos, a boa qualidade da solução da SA e a rápida busca da BPSO. Como os algoritmos de otimização estocástica são sensíveis aos seus parâmetros, o procedimento de atualização de peso adequado para a seleção de parâmetros é introduzido neste artigo para melhorar a qualidade da solução. Os operadores de atualização de peso são introduzidos no BPSO para obter as soluções diversificadas no espaço de busca. Neste artigo, os impactos da transmissão restringida são considerados. Além disso, o despacho econômico baseado em CSABPSO e o fluxo de carga foram decompostos como um subproblema no modelo de manutenção que resulta em uma programação de manutenção restrita de transmissão mais prática. Um estudo de caso para o sistema de teste de confiabilidade IEEE (RTS) é usado para análise detalhada e outros resultados são apresentados para o sistema de teste *roy billinton* (RBTS), que mostra que o algoritmo proposto pode realizar uma nivelção significativa nos índices de confiabilidade ao longo do horizonte de planejamento e demonstra a utilidade da abordagem proposta. Os resultados de simulação obtidos pelo algoritmo proposto indicam influência da restrição da linha de transmissão no estabelecimento do MS ideal. O CSABPSO poderia ter maior eficiência, melhor qualidade do que os outros algoritmos comparados.

(LIN, HUANG, 2015). Em geral, uma política de manutenção preventiva (PM) baseada em condições não periódicas com diferentes variáveis de condição é, muitas vezes, mais eficaz do que uma política periódica baseada em idade para sistemas complexos deteriorados e reparáveis. Neste estudo, a confiabilidade do sistema é estimada e usada como variável de

condição, três modelos de PM baseados em confiabilidade são então desenvolvidos com a consideração de diferentes cenários que podem auxiliar na avaliação do custo de manutenção para cada cenário. A abordagem proposta fornece os limiares de confiabilidade ótimos e os horários de PM com antecedência pelo qual a disponibilidade e a qualidade do sistema podem ser garantidas e os recursos organizacionais podem estar bem preparados e gerenciados. Os resultados da análise de sensibilidade indicam que as atividades de PM realizadas com um alto limiar de confiabilidade não só melhoram significativamente a disponibilidade do sistema, mas também aumentam eficientemente a vida útil dele, embora essa estratégia de PM seja mais dispendiosa do que se fosse para um baixo limite de confiabilidade. O limite de confiabilidade ideal aumenta juntamente com o número de atividades de PM para evitar quebras futuras causadas por uma forte deterioração e, portanto, reduz substancialmente os custos de reparo.

(MAATOUK, CHEBBO, 2016). Apresentam um algoritmo genético controlado por lógica *fuzzy* e busca local para resolver o problema de otimização de manutenção preventiva em um sistema multiestados em série. O objetivo é otimizar para cada componente do sistema a política de manutenção minimizando uma função de custo sob a restrição da disponibilidade necessária e por um período especificado. Os resultados da simulação são apresentados para o método proposto, que é comparado a um algoritmo genético com probabilidades fixas de cruzamento e mutação e a um algoritmo genético controlado por lógica difusa. Os resultados experimentais mostram as vantagens e a eficiência da hibridização FLC-GA e da busca local.

(MELCHOR-HERNÁNDEZ, RIVAS-DÁVALOS, 2015). As concessionárias de energia elétrica têm o problema de aplicar modelos matemáticos complexos para otimização de manutenção de equipamentos de potência. Isso ocorre porque os modelos apresentados na literatura não têm a simplicidade desejada para realizar avaliações, enquanto outros exigem uma grande quantidade de dados de entrada, que podem não estar facilmente disponíveis. A fim de se superar essas dificuldades, é proposto um novo método de otimização analítica para a manutenção preventiva (PM) com um reparo mínimo em falha, revisão periódica e substituição para equipamentos de potência com histórico de dados de falhas influenciados por uma política de PM atual. O método inclui um novo modelo de PM imperfeito baseado na distribuição de Weibull e incorpora o intervalo de revisão atual  $T_0$  e o intervalo de revisão ideal  $T$  a ser encontrado. Os parâmetros Weibull são estimados usando um novo método analítico. Com base nesse modelo, o número ótimo de revisões e o ótimo intervalo de revisão para minimizar

o custo de manutenção total esperado também são determinados analiticamente. Vários casos de estudo foram projetados para testar o modelo proposto, demonstrando sua aplicabilidade e simplicidade para determinar uma política de manutenção ideal.

(PIASSON, BÍSCARO, 2016). Propõem um modelo multiobjectivo para resolver o problema matemático de otimizar o planejamento de manutenção centrada na confiabilidade de um sistema de distribuição de energia elétrica (EPDS). O objetivo principal é minimizar os custos de manutenção preventiva, ao mesmo tempo em que maximiza o índice de confiabilidade de todo o sistema. No modelo proposto, os limites dos índices, tais como SAIDI e SAIFI, são considerados como restrições dos programas de manutenção. Os índices de confiabilidade dos componentes EPDS são avaliados e atualizados por um sistema de inferência difusa. Um algoritmo NSGA-II foi proposto para resolver o modelo multiobjectivo que fornece uma fronteira otimizada de Pareto. Os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta a um sistema com três alimentadores e 733 componentes são apresentados, mostrando sua robustez e qualidade para o planejamento de manutenção no EPDS.

(PRAJAPAT, TIWARI, 2017). Desenvolvem um documento de revisão que considera a literatura no campo da otimização de programação de manutenção preventiva, particularmente para aplicações para usinas de potência, com o objetivo de avaliar os métodos utilizados e identificar tendências e lacunas de pesquisa. Os aspectos de cada um dos documentos, como o domínio do aplicativo, formulação de problemas, formulação de modelo e técnicas de otimização, foram analisados e avaliados. Foram identificadas tendências de pesquisa, como o uso crescente de parâmetros estocásticos, objetivos múltiplos e métodos de otimização híbridos. Foi identificada uma lacuna de pesquisa: a aplicação de métodos de simulação de eventos discretos com otimização híbrida multiobjectivo para o planejamento de manutenção preventiva de usina. Essas áreas fornecem oportunidades de pesquisa interessantes com benefícios potenciais significativos para empresas de geração de potência, incluindo aumento de lucro e confiabilidade.

(ZHANG, ZHANG, 2016). A rede de Petri difusa é uma abordagem promissora e eficiente que pode resolver as complexidades do diagnóstico de falhas dos sistemas de potência. Neste trabalho, a restrição temporal entre ocorrências de eventos em sistemas de potência é investigada. Então, é introduzida em uma rede de Petri difusa (FPN) para o

diagnóstico de falhas. Os atributos temporais são atribuídos às proposições na rede Petri, de modo que a informação temporal possa ser levada em consideração, o que torna a hipótese verdadeira distinguível das falsas. O algoritmo de execução da matriz modificada pode aumentar a eficiência computacional, com uma operação "média ponderada" incluída para melhorar a tolerância a falhas. O modelo desenvolvido possui uma estrutura modular, que é fácil de adaptar às mudanças de topologia e para acomodar esquemas de proteção modernos. A avaliação preliminar do desempenho operacional dos dispositivos de proteção também é realizada após a identificação da seção de falha. Os resultados dos testes no sistema de energia IEEE 14-barras e no sistema de energia provincial Zhejiang, na China, demonstram que o modelo desenvolvido é correto e eficiente. Comparado com três métodos de diagnóstico de falhas existentes, o proposto tem maior tolerância a falhas com menor custo computacional e é adequado para o diagnóstico de falhas on-line em sistemas de energia em grande escala.

### 2.3 Despacho de carga

(AGHDAM and HAGH, 2017). Afirmam que um dos problemas de otimização mais importantes no planejamento de operação de sistemas de potência é o *unit commitment* (UC) ou despacho de carga. A consideração de linhas de transmissão e restrições de operação no problema de UC leva a um problema mais geral conhecido como *unit commitment* com restrições de segurança (SCUC). A solução do SCUC pode levar um tempo significativo de processamento devido à sua enorme dimensão. Neste documento, é apresentada uma formulação do problema SCUC, considerando restrições práticas e características não-lineares, incluindo limites de tensão de barramento, limites de fluxo de linha, além de restrições predominantes, como demanda de energia por hora, reservas girantes do sistema, limites de rampa para cima e para baixo, mínimo para cima e para baixo limites de tempo (MUT / MDT) e limites de emissão. O Algoritmo Competitivo Imperialista Modificado (MICA), valendo-se de uma lista de prioridades (PL) para definir o estado inicial, é usado para resolver o problema de otimização mencionado. A eficácia do método MICA para resolver o problema SCUC é mostrada nos sistemas de teste IEEE de 30 barramentos e 118 barramentos e é comparada com a aplicação de alguns métodos heurísticos, ou seja, algoritmo genético (GA), otimização de enxames de partículas (PSO) e outras abordagens matemáticas tais como a programação inteira mista (MIP).

(BARANI, MIRHOSSEINI, 2017). O problema de pré-despacho ou *Unit Commitment* (UC) é uma importante tarefa de otimização para programar os estados de ativação/desativação de unidades geradoras na operação do sistema de potência em um horizonte temporal, de modo que o custo de geração de energia seja minimizado. Uma vez que o aumento do número de unidades geradoras torna difícil de resolver o problema na prática, muitas abordagens foram introduzidas para resolver o problema de UC. Este artigo apresenta uma versão melhorada do algoritmo de busca gravitacional de inspiração quântica binária (BQIGSA) e propõe uma nova abordagem para resolver o problema da UC com base na BQIGSA melhorada, chamada QGSA-UC. A abordagem proposta é aplicada aos problemas de UC com o número de unidades geradoras na faixa de 10-120, juntamente com o horizonte de programação de 24 horas e é comparado com nove abordagens de última geração. Além disso, quatro versões diferentes da abordagem gravitacional são implementadas para resolver o problema da UC e comparadas com as obtidas pelo QGSA-UC. Os resultados comparativos revelam claramente a eficácia da abordagem proposta e mostram que ela pode ser usada como uma ferramenta confiável para resolver o problema da UC.

(CHENG, CHUANG, 2016). Propõem um algoritmo de despacho de carga baseado em otimização por enxames de partículas (PSO) para lidar com o problema de gerenciamento de energia do sistema de geração híbrida (HGS). Para o método PSO convencional, o espaço de busca é definido apenas por restrições de desigualdade. No entanto, quanto aos problemas de despacho de potência, é vital manter o equilíbrio de potência, que pode ser representado como uma restrição de igualdade. Para abordar este problema, propõe-se um mecanismo de redistribuição da roleta. Com este mecanismo de redistribuição, a potência desequilibrada pode ser retribuída a um elemento superior e a diversidade de busca pode ser preservada. Além disso, o efeito da profundidade de descarga no ciclo de vida do banco de bateria também é levado em consideração por meio do desenvolvimento de um mecanismo de penalidade. O método proposto é então aplicado a um HGS consistindo de matriz fotovoltaica, turbina eólica, microturbina, bancos de bateria, rede elétrica e carga residencial. Para validar a eficácia e a correção do método proposto, também serão fornecidos resultados de simulação para um dia inteiro. Se comparado com os outros três métodos de distribuição de energia, o método proposto pode atingir o menor custo acumulado.

(GOUDARZI, SWANSON, 2017). O agendamento ótimo de recursos geradores desempenha um papel importante como ferramenta de tomada de decisão para operadores de sistemas de energia nos mercados de eletricidade liberalizados e em tempo real. O agendamento em tempo real de unidades geradoras se tornará uma tarefa muito complexa em relação à flutuação instantânea da demanda de carga devido a vários cenários de resposta à demanda no contexto da rede inteligente. Neste estudo, foi apresentado um método matemático híbrido para o agendamento on-line de unidades com base na máquina de suporte vetorial com mínimo quadrado (LSSVM) e a terceira versão do algoritmo cultural (CA3), na qual o CA3 foi especificamente empregado para ajustar os parâmetros de LSSVM. Para o propósito de treinamento do método proposto, o agendamento ótimo da curva de carga diária para quatro sistemas de teste diferentes e para várias restrições físicas e ambientais de unidades geradoras foi preparado usando uma programação quadrática mista modificada (MIQP) para lidar com comportamentos não convexos dos sistemas de teste. Uma função objetivo de erro quadrático médio (MSE) foi usada para reduzir os erros de previsão durante o processo de treinamento para melhorar a precisão e a confiabilidade dos resultados. Uma função de base radial (RBF) e o LSSVM-CA3 proposto foram utilizados para verificar o processo de convergência. Uma alta precisão das previsões da programação do gerador é demonstrada pela comparação dos resultados do método proposto com os das redes neurais artificiais. A partir dos resultados, pode-se inferir que o método é altamente compatível para o despacho em tempo real de recursos de geração em mercados de eletricidade desregulados.

(MOUASSA, BOUKTIR, 2017). Apresentam o uso de um algoritmo desenvolvido recentemente, inspirado no mecanismo de caça das formigas-leões na natureza, chamado algoritmo de otimização de formiga-leão (ALO), para resolver o problema de despacho de potência reativa (ORPD) ideal considerando um sistema de energia em grande escala. O ORPD é formulado como um complexo problema de otimização combinatória com características não lineares. O algoritmo ALO é inspirado no mecanismo de caça das formigas-leões. Uma das coisas mais interessantes é que têm um comportamento de caça exclusivo e apresentam alta capacidade de escapar de ficar presas em um ótimo local. O ALO é usado para encontrar o conjunto de variáveis de controles ótimos do problema do ORPD, como a tensão do terminal dos geradores, a posição dos tapes dos transformadores e o número de bancos de capacitores comutáveis. O desempenho e viabilidade do algoritmo proposto são demonstrados através de vários casos de simulação no sistema IEEE 30-barramentos, sistemas de energia IEEE 118-

barramentos e sistema de energia de grande porte IEEE 300-barramentos. A comparação dos resultados obtidos com os relatados na literatura mostra claramente a superioridade do algoritmo ALO em relação a outros algoritmos publicados recentemente no que se referem às perdas de energia ativa e ao tempo computacional e, portanto, a confirmação da eficiência do algoritmo ALARA na solução quase ideal.

(NADERI, NARIMANI, 2017). O gerenciamento e o agendamento de recursos de potência reativa são um dos problemas importantes e proeminentes na operação e controle do sistema de potência. Assim, procura-se uma operação estável e segura de sistemas de potência, da estabilidade de tensão e do ponto de vista de melhoria de perfil de tensão. Para este fim, propõe-se um novo algoritmo denominado *Fuzzy Adaptive Heterogeneous Comprehensive-Learning Particle Swarm Optimization* (FAHCLPSO) com processos de exploração aprimorados para resolver o problema do despacho ótimo da potência reativa (ORPD). Duas funções objetivo diferentes, incluindo perdas de transmissão de energia ativa e desvio de tensão, que desempenham papéis importantes na operação e no controle do sistema de energia, são consideradas neste artigo. Para autenticar a precisão e o desempenho do FAHCLPSO proposto, aplicou-se um novo algoritmo conforme mencionado, em três sistemas de teste padrão diferentes, incluindo sistemas de teste IEEE 30-barramentos, IEEE 118-barramentos e IEEE 354-barramentos, com seis, cinquenta e quatro e cento e sessenta e duas unidades de geração, respectivamente. Finalmente, os resultados do algoritmo proposto são comparados com os resultados do PSO original e aqueles algoritmos em outras literaturas. A comparação prova a supremacia do algoritmo proposto na solução do complexo problema de otimização.

(NG SHIN MEI, SULAIMAN, 2017). Apresentam uma técnica de otimização inspirada na natureza, recém-surgida, chamada de algoritmo de otimização *moth-flame* (MFO), é utilizada para resolver o problema de despacho de potência reativa (ORPD) ideal. O algoritmo MFO é inspirado pela técnica de navegação natural das mariposas quando elas viajam à noite, quando usam fontes de luz visíveis como orientação. Neste trabalho, o MFO é utilizado no problema do ORPD para investigar a melhor combinação de variáveis de controle, incluindo a tensão dos geradores, a configuração do tap dos transformadores, bem como o dimensionamento dos compensadores reativos para atingir a perda de potência total mínima e o desvio de tensão mínimo. Além disso, a eficácia do algoritmo MFO é comparada com outras técnicas de otimização identificadas em três estudos de caso, o sistema IEEE 30-barramentos,

o sistema IEEE 57-barramentos e o sistema IEEE 118-barramentos. A análise estatística desta pesquisa ilustrou que a MFO é capaz de produzir resultados competitivos, produzindo menor perda de energia e menor desvio de tensão do que as técnicas selecionadas da literatura.

(NUAEKAEW, ARTRIT, 2017). Propõem um novo procedimento de otimização de lobo cinzento multiobjectivo de dois arquivos (2ArchMGWO) para resolver problemas do despacho ótimo de potência reativa (MORPD) de múltiplos objetivos. A otimização foi melhorada a partir do seu predecessor de otimização de lobo cinzento multiobjectivo original (MGWO) modificando o operador de reprodução e adicionando o conceito de dois arquivos ao algoritmo. Em seguida, foram implantadas na resolução do MORPD com funções objetivas, sendo elas a minimização de perda de potência ativa e a melhoria de perfil de tensão (minimização de desvio de tensão). As tensões do barramento do gerador, os tapes dos transformadores e as fontes de energia reativa de derivação, ou os sistemas flexíveis de transmissão de corrente alternada, são definidos como variáveis de projeto. O algoritmo proposto juntamente com outros otimizadores multiobjectivo existentes são aplicados para resolver três problemas de teste com os sistemas de energia padrão IEEE 30-barramentos, IEEE 57-barramentos e IEEE 118-barramentos. Os resultados ótimos obtidos a partir do desempenho de vários otimizadores são comparados com base no indicador de hipervolume e revelam que 2ArchMGWO é claramente superior aos demais.

(QIU, CUI, 2017). Estudam a disponibilidade e as políticas de manutenção ótima de um sistema de risco competitivo submetido a inspeções periódicas. Especificamente, um sistema reparável com um estado de trabalho e  $M$  modos de falha é considerado. Cada modo de falha tem um tempo de falha aleatório. Quando o sistema falha do modo  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ), o reparo corretivo correspondente realizado que leva um tempo aleatório  $Y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, M$ ). Alguns resultados analíticos sobre a disponibilidade instantânea e a disponibilidade de estado estacionário para o sistema são derivados. O modelo é então utilizado para obter o ótimo intervalo de inspeção que maximiza a disponibilidade do estado do sistema ou minimiza a taxa média de custo de longo prazo. Um exemplo numérico para um sistema de potência de alimentação remota é apresentado para demonstrar a aplicação da abordagem desenvolvida.

(RAZA AND ULANSKY, 2017). Afirmam que a manutenção preditiva (PM) inclui monitoramento de condição e prognóstico da condição futura do sistema, na qual a tomada de decisões de manutenção depende dos resultados da predição. Neste estudo, o modelamento do

PM é conduzido. Assume-se que o sistema é periodicamente verificado usando equipamentos de medição imperfeitos. A regra de decisão para verificação preditiva (PC) é formulada e são propostas expressões para calcular as probabilidades das decisões corretas e erradas. A eficácia do PM é avaliada utilizando os seguintes indicadores: disponibilidade média, tempo de inatividade total médio e custo de tempo de inatividade por unidade de tempo. Os modelos matemáticos são propostos para calcular os indicadores de manutenção para uma distribuição arbitrária de tempo até a falha. A abordagem proposta é ilustrada pela determinação do número ótimo de PCs para um processo de deterioração estocástica específica. O exemplo numérico ilustra a vantagem do PM sobre a manutenção corretiva.

(SAKR, EL-SEHIEMY, 2017). Apresentam um procedimento proposto para resolver o problema ideal de gerenciamento de potência reativa (ORPM) com base em uma função multiobjectivo usando um algoritmo de evolução diferencial modificado (MDEA). O MDEA proposto é investigado para melhorar o perfil de tensão, bem como para reduzir as perdas de energia ativa, resolvendo o problema ORPM. A função objetivo ORPM tem como objetivo minimizar as perdas de energia de transmissão e o desvio de tensão considerando as restrições do sistema. O MDEA visa aprimorar a característica de convergência do algoritmo de evolução diferencial a partir da atualização do fator de escala autoadaptativo, que pode trocar informações de forma dinâmica a cada geração. O fator de escala adota dinamicamente as buscas globais e locais para eliminar eficientemente a armadilha do ótimo local. Além disso, uma estratégia é desenvolvida para atualizar o fator de penalidade para aliviar os efeitos de várias restrições do sistema. As aplicações numéricas de diferentes estudos de caso são realizadas em três sistemas IEEE padrão, ou seja, sistemas de teste de 14, 30 e 57-barramentos. Além disso, o procedimento proposto é aplicado na *Western Delta Network*, que é uma parte real do sistema de rede principal egípcio. A flexibilidade das máquinas síncronas para fornecer potência reativa controlável é comprovada com menor dependência dos controladores de potência reativa discretos, como a instalação de dispositivos comutáveis e variações dos tapes. Os resultados obtidos mostram a eficácia do algoritmo de otimização aprimorado proposto como uma técnica avançada de otimização que foi implementada sucessivamente com boas características de desempenho.

## 2.4 Conclusões do capítulo

O agendamento da manutenção de unidades geradoras de energia é essencial para o funcionamento econômico e confiável de um sistema de potência. O objetivo do problema do Agendamento da Manutenção do Gerador (GMS) é encontrar o intervalo de tempo exato para manutenção preventiva de unidades geradoras de energia, a fim de minimizar o custo operacional, maximizar a confiabilidade do sistema e prolongar o tempo de vida das unidades geradoras.

Nos últimos tempos, a manutenção baseada em condições (CBM) tem sido introduzida em sistemas industriais para manter preventivamente o equipamento correto no momento certo em relação à sua "condição" de operação atual. O bom estado de operação de um gerador pode ser representado principalmente pelos indicadores convencionais, como temperatura do óleo, dados harmônicos, vibração etc. Aí a importância do monitoramento dos motores/geradores e do diagnóstico deles para que o despacho de carga não tenha interrupções inesperadas.

A capacidade de uma fonte de geração para satisfazer a demanda de energia pode ser influenciada significativamente por desagregações inesperadas das unidades geradoras de energia. Na maioria dos casos, tais falhas inesperadas também são muito mais dispendiosas para reparar do que tomar medidas planejadas de manutenção preventiva, mas não se encontraram na literatura revisada trabalhos que combinem o despacho de carga com a manutenção e o estado técnico dos motores e dos geradores.

---

## CAPÍTULO III

---

### PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS PARA A GESTÃO DA MANUTENÇÃO

#### 3.1 Introdução

O processo de manutenção inclui todas as atividades técnicas e organizacionais que garantem que as máquinas e equipamentos, em geral, operem dentro da confiabilidade esperada. Manutenção e trabalhos de reparo que seguem determinadas diretrizes básicas reduzem as chances de falhas inesperadas e consequentes perda de produção, tempo e gastos desnecessários. Em casos mais críticos, as falhas de um processo podem trazer prejuízos graves e, até mesmo, colocar em risco vidas humanas.

Esta nova situação impõe desafios e exige o desenvolvimento e a aplicação de novos sistemas de gerenciamento de manutenção, que buscam não só o aperfeiçoamento contínuo dos métodos de trabalho, mas, de maneira mais ampla, a qualidade total dos bens e serviços, que não só satisfaçam as necessidades dos clientes, mas que excedam suas expectativas. Isso significa submeter todos os processos a melhorias contínuas na busca da qualidade total, utilizando-se de ferramentas gerenciais das mais diversas naturezas. Dentre elas, a manutenção preditiva comumente empregada na indústria de uma forma geral.

A manutenção preditiva é um tipo de ação preventiva baseada na Manutenção Produtiva Total (TPM) e foi desenvolvida, inicialmente, no Japão com base na análise de vibrações (MARÇAL; SUSIN, 2005; ALSYOUF, 2016). A manutenção preditiva tem como finalidade analisar os valores dos parâmetros de acompanhamento estabelecidos, de acordo com modelos de desgaste e informações anteriores sobre o equipamento, a origem e a gravidade de seus possíveis defeitos. As usinas termelétricas de geração de energia elétrica consistem, de modo geral, em um conjunto de sistemas mecânicos que exigem, portanto, um

monitoramento constante para a avaliação das condições operacionais, com a finalidade de detectar e identificar indicadores de possíveis falhas na operação.

Atualmente, existem várias técnicas de monitoração que podem ser utilizadas para a verificação da modificação do parâmetro estabelecido ou da alteração do desempenho do sistema sob avaliação. Para as usinas termelétricas, foco deste trabalho, deseja-se avaliar os modos de falha dos sistemas motor-gerador, assim, serão utilizadas as técnicas baseadas em:

Análise de vibrações nível global, espectro de vibrações e pulsos de choque;

Análise de óleos viscosidade, teor de água e contagem de partículas;

Análise de temperatura, termometria convencional e Indicadores de temperatura;

Ao longo deste capítulo, serão estabelecidos os procedimentos utilizados para a implantação do TPM na Usina Mauá, da Eletrobras Amazonas Energia, bem como serão apresentados os resultados alcançados com esta implantação.

### **3.2 Programa de Manutenção Produtiva Total (MPT ou TPM)**

A Manutenção Produtiva Total (MPT) foi desenvolvida pelo *Japan Institute of Plant Maintenance* (JIPM), inglês, Instituto Japonês de Manutenção Industrial, e implementada na indústria japonesa a partir de 1971, inicialmente no grupo Toyota (BRUNNER, 2017).

A MPT pode ser definida como a maximização da eficiência do equipamento, cobrindo toda a vida útil dele, através do envolvimento de todos os funcionários (ALCARAZ, 2016).

A MPT pode ser dividida em elementos de curto prazo e de longo prazo. Os elementos de longo prazo são focados no desenvolvimento de novos equipamentos e eliminação de fontes de desperdício de tempo de produção. Já os elementos de curto prazo são focados em: programas de manutenção autônoma para o departamento de produção; manutenção planejada para o departamento de manutenção; desenvolvimento de habilidades especiais para o pessoal de operação e manutenção de equipamentos (ATTRI, 2013).

O TPM promove uma mudança de cultura dentro da empresa que pode ser sentida em seus diferentes departamentos, sendo que diversos paradigmas são derrubados durante a sua implantação. A determinação de todos os envolvidos na realização do programa é fundamental para que se possam transpor as diferentes barreiras que aparecerão durante a fundação dos

pilares do programa. O TPM original é composto de oito pilares básicos que devem ser seguidos e trabalhados quando da sua implementação para que os resultados sejam atingidos. Os pilares do TPM são (JAIN, 2014):

- Melhorias específicas ou individuais;
- Manutenção autônoma;
- Manutenção planejada;
- Educação e treinamento;
- Melhorias no Projeto ou Controle inicial;
- TPM nas áreas Administrativas (TPM Office);
- Manutenção da qualidade;
- Segurança, saúde e meio ambiente.

### 3.2.1 Implantação do TPM na Usina Termoeletrica Mauá

A Usina Termoeletrica Mauá, da Eletrobras Amazonas Energia, constitui o estudo de caso apresentado nesta tese, com relação à análise de resultados obtidos com a implantação do TPM, e posteriormente acoplado ao TPM já implantado, a proposta de realização de pré-despacho das unidades geradoras leva em consideração a infraestrutura alcançada com a implantação do TPM.

O principal objetivo da implantação do TPM nesta Usina foi estabelecer uma metodologia de manutenção que possibilite o planejamento e controle dos equipamentos de forma correta e adequada para melhorar a confiabilidade neles. Para atingir esse objetivo, a estrutura tradicional do TPM, que é composta de oito pilares, foi modificada para o uso de somente quatro pilares, cujos objetivos principais também são apresentados a seguir:

- ✓ **Pilar de Melhorias** - maximizar a eficiência global dos equipamentos e da operação a partir da análise e eliminação das perdas operacionais. Tal pilar permite:
  - Aumentar o conhecimento de toda a operação e uniformizar os conhecimentos dos participantes do Grupo de Trabalho, utilizando as ferramentas da qualidade;

- Identificar as distorções entre o real e o previsto (*standard* ou padrão) de cada motor da Usina;

- Identificar consumos dos óleos combustíveis e lubrificantes de cada motor da Usina, conhecendo o desempenho de cada um, para se viabilizar melhorias;

- Identificar as causas fundamentais de cada perda, as condições reais de operação de cada motor e equipamento auxiliar (folgas, pintura, vazamentos, instrumentação, condições do ambiente de trabalho, qualificação dos operadores, ferramentas necessárias e disponíveis etc.);

- Organizar as diversas atividades necessárias para eliminar as perdas identificadas, em ordem de prioridade (do maior para a menor) e investimento (do menor para o maior);

- Padronizar os procedimentos que deverão ser seguidos por todos os operadores, melhorando a qualidade da informação, para auxiliar na investigação das perdas e suas eliminações;

- Medir os resultados, comparando-os aos resultados anteriores e às melhorias implantadas pelo Grupo de Trabalho;

- Criar relatórios de acompanhamento, indicadores e gráficos de gerenciamento visual do programa TPM.

✓ **Pilar de Manutenção Autônoma** - capacitar os operadores a manter os locais de trabalho limpos e organizados, inspecionando seus equipamentos, seguindo procedimentos operacionais, lubrificando, identificando anormalidades, etiquetando e procurando eliminar os locais de difícil acesso e fontes de sujeira. Esse pilar permite:

- Eliminar as anormalidades dos motores, equipamento auxiliares, Instalações, local de trabalho, sujeira acumulada e materiais não utilizados na operação;

- Identificar visualmente as condições anormais que necessitam de reparo, manter as condições ideais de trabalho que atendam à segurança industrial. Nessa limpeza inicial, devem ser observadas as condições dos motores, equipamentos auxiliares e instalações como parafusos soltos, falta de fixações e proteções, peças danificadas e reparos provisórios, falta de sinalização etc., identificado cada um com uma etiqueta e providenciando os reparos necessários. A etiqueta só deve ser retirada depois da aprovação do serviço realizado;

- Acompanhar as atividades realizadas e medir os resultados após as melhorias implantadas;

- Garantir a Operação dentro dos padrões ideais exigidos;

- Acompanhar esse indicador e avaliar os resultados atingidos com as melhorias implantadas, mantendo as condições de limpeza dentro dos padrões estabelecidos e exigidos.

✓ **Pilar de Manutenção Planejada** - criar modelo corporativo de gestão da manutenção para todos os motores e equipamentos auxiliares da Usina e clientes externos para otimizar as intervenções e reduzir os custos de manutenção, garantindo a performance dos motores e equipamentos auxiliares. O pilar permite:

- Padronizar a forma de priorizar motores, equipamentos auxiliares e instalações conforme a necessidade da empresa, com foco no negócio;

- Identificar as prioridades do negócio da empresa para facilitar a implantação de um modelo de gestão de manutenção;

- Facilitar o atendimento e a decisão na ação mais indicada a ser tomada, conforme a prioridade;

- Resgatar as condições ideais de operação dos motores, equipamentos auxiliares e instalações, melhorando a disponibilidade, confiabilidade e manutenibilidade;

- Definir uma filosofia de manutenção a ser utilizada nos equipamentos;

- Analisar os relatórios existentes e complementares às informações com novos documentos para facilitar a análise e solução de problemas.

✓ **Pilar de Manutenção-Educação e Treinamento** - apoiar os outros pilares, analisando a qualificação dos participantes e a necessidade de treinamento. Tal pilar permite:

- Nivelar o conhecimento de todos os participantes antes do início das atividades nos Grupos de Trabalho;

- Padronizar o material e as informações passadas aos funcionários;

- Organizar um calendário de atividades que permita acompanhar e auditar o desenvolvimento do TPM para medir o seu grau e apresentar os indicadores dos Pilares: PME – Pilar de Melhorias específicas, PMA – Pilar de Manutenção Autônoma, PMP – Pilar de Manutenção Planejada e PMET – Pilar de Manutenção Educação e Treinamento;
- Identificar, planejar e realizar a necessidade de treinamento, a fim de permitir o andamento das atividades dos outros Pilares da TPM;
- Nivelar o conhecimento dos participantes dos Grupos de Trabalho para poderem assumir outras atividades sem nenhum problema, conforme os passos dos Pilares de ME, MA, MP e MET;
- Organizar e disciplinar a realização das reuniões, tornando-as objetivas, com tempo determinado para iniciar e terminar e para utilização correta da documentação/registo das atividades desenvolvidas pelos Grupos de Trabalho;
- Melhorar a comunicação e divulgação do andamento do Programa.

### **3.2.2 Pré-Despacho de Carga com Restrições de Manutenção**

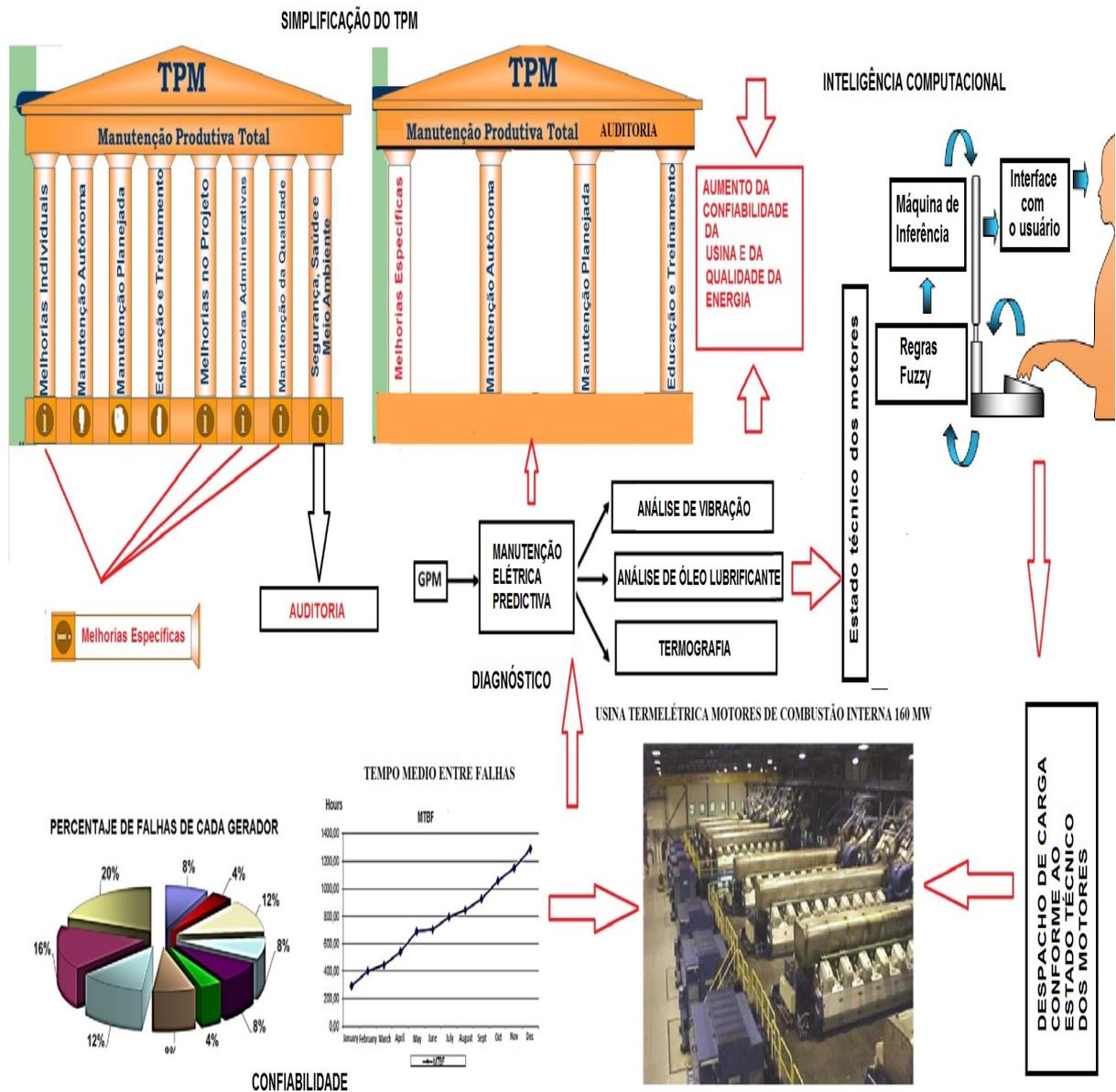
A implantação do programa TPM no ambiente de produção da Usina Mauá, permitiu que se levantasse um diagnóstico das reais condições de operação das máquinas geradoras e equipamentos auxiliares, resultando em indicadores de desempenho para o sistema de geração que atestaram expressivos ganhos com a adoção do TPM, conforme mostrado na tese.

Por outro lado, a implantação do programa TPM pelo fato de gerar periodicamente avaliações de desempenho do sistema de geração de energia, via dados de medição de vibração, análise de óleo e análise de termografia, também permitiu que se formulasse uma proposta de pré-despacho de carga para as unidades geradoras, baseada na condição das máquinas. Essa abordagem é apresentada como uma proposta desta tese, utilizando-se regras *fuzzy* construídas a partir dos resultados das análises de vibração, análise de óleo e análise de termografia. Esses procedimentos serão descritos em maiores detalhes no capítulo 5 desta tese.

A Figura 3.1, a seguir, apresenta de forma resumida os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho para a implementação da proposta de despacho de carga com restrições de manutenção. Na parte superior esquerda da Figura 3.1, destaca-se a simplificação dos oito pilares do TPM para um programa de quatro Pilares, como apresentado

anteriormente. Para poder haver um controle da manutenção, foi adicionada uma atividade de auditoria que impede que a simplificação do TPM, possa deixar alguma atividade de manutenção importante sem ser atendida.

Figura 3.1- Metodologia da Pesquisa.



Fonte: Autor (2017).

Dados da operação dos motores em conjunto com dados das análises de vibração, de óleo e de temperatura, são coletados periodicamente na Usina e utilizados de forma integrada para alimentar um sistema baseado em regras *fuzzy*, o qual retorna a programação de pré-despacho da Usina para o período de interesse, levando em consideração o estado de operação das máquinas.

A seguir apresenta-se uma breve descrição da UTE Mauá, na qual foi implantado o programa TPM e a proposta de pré-despacho considerando as condições operacionais dos motores/geradores.

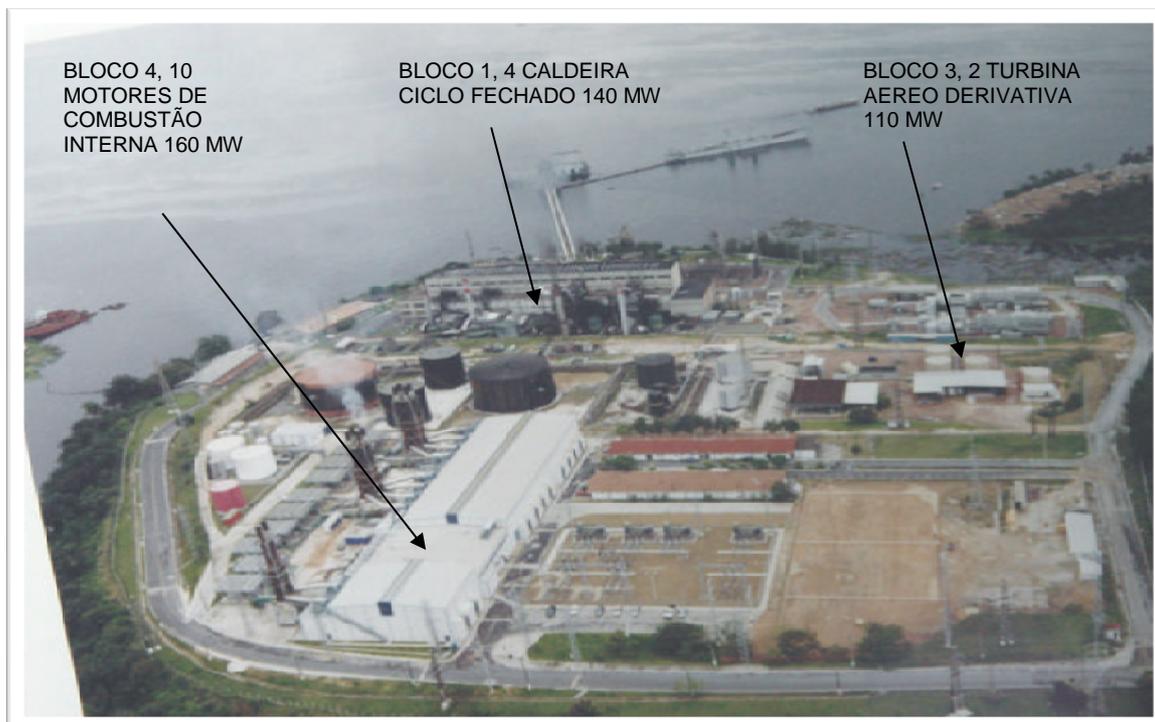
### **3.3 Breve Descrição da UTE Mauá**

A Usina Térmica Mauá está localizada na estrada do Mauzinho, Avenida Solimões s/n, a catorze quilômetros do centro da cidade de Manaus, à margem esquerda do Rio Negro, ocupando uma área de 136.000 m<sup>2</sup>, com coordenadas geográficas Lat. 03° 07' 29" S Long. 59° 55' 42" W 5.

A Usina foi estabelecida em duas etapas, sendo a primeira com duas unidades a vapor com potência nominal de 18.609 kW cada, inauguradas em 15/11/1973. A segunda etapa com duas Unidades a Vapor com potência nominal de 50.000 kW foi inaugurada em 04/11/78. Em 15 de janeiro de 2008 a Eletrobras Amazonas Energia, por meio de um contrato firmado com a El Paso, herdou duas Unidades Geradoras a gás de potência de 50 MW cada e também dez motores Wartsila de potência 15,6 MW, totalizando uma potência útil de 392 MW.

Na cidade de Manaus, as Usinas térmicas são responsáveis por quase toda a geração de energia, cabendo a Usina Hidrelétrica Balbina o restante do suprimento de energia. O parque gerador é formado essencialmente por Motores de combustão interna (MCIs) do ciclo diesel de 160 MW, Caldeira ciclo fechado 140 MW e Turbina Aéreo Derivativa 110 MW.

Figura 3.2 – Foto do Complexo das Usinas UTE Mauá.



Fonte: Autor (2017).

Figura 3.3 – Foto dos Motores Wartsila V 46 da usina Mauá.



Fonte: Autor (2017).

### 3.3.1 Dados Principais dos Motores a Combustão Interna e dos Geradores Elétricos

A potência total instalada com motores de combustão interna é de 158 MW com tempo de dez anos de operação. O motor utilizado no conjunto gerador é um modelo de quatro tempos, incluindo injeção direta, pistão de tronco, turbo alimentado e arrefecimento intermediário (*intercooler*), com as seguintes características principais:

Fabricante Wartsila NSD Corporation, Modelo: 18V46, Tipo do Motor: Ciclo Diesel de quatro tempos, Quantidade de Motores: 10, Potência Nominal: 15,75 MW, Eficiência: 42,3%, Consumo específico de cada motor: 204 g/kWh, Configuração de cilindros: V, Número de cilindros: 18, Diâmetro interno dos cilindros: 460 mm Velocidade: 514 rpm, comprimento: 13,58 m, Largura: 5,347 m, Altura: 5,488 m, Peso: 237 Ton.

O gerador elétrico é do tipo trifásico, autorresfriado, sem escova, síncrono, cujas características principais são: Fabricante é a ABB com potência nominal de 20,795 kVA, tensão de 13,8 kV, fator de potência de 0,85 com a frequência de 60Hz e velocidade de 514 rpm.

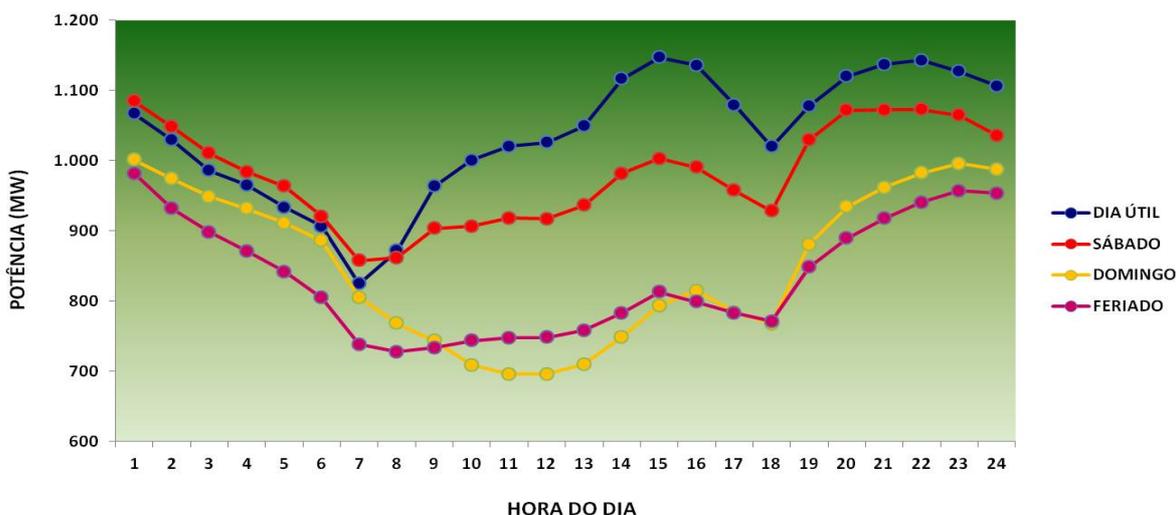
### 3.3.2 Despacho de Carga na Usina Mauá

No Brasil, as usinas térmicas são utilizadas para dar segurança ao sistema elétrico, que utiliza prioritariamente energia gerada por hidrelétricas. Quando o nível dos reservatórios das usinas hidrelétricas está abaixo do esperado, o acionamento das térmicas aumenta. Na cidade de Manaus, o problema do consumo de energia restringe-se basicamente às horas de pico, e a duração do pico máximo é de menos de uma hora, sendo que no restante do dia a capacidade energética instalada fica praticamente superdimensionada.

As unidades geradoras de uma usina são despachadas de modo a atender aos requisitos de carga variável no tempo do sistema elétrico. Essa carga, apesar de ser variável devido à mudança da demanda dos consumidores residenciais, comerciais, industriais e de serviços, ao longo da jornada diária, apresenta um padrão de comportamento previsível que varia, naturalmente, conforme o dia da semana (dia útil, sábado, domingo, feriado). Ou seja, apesar de não poder prever o comportamento de um consumidor individual, é possível prever o comportamento de um conjunto de consumidores com razoável margem de precisão (DE ASSIS CABRAL, 2017).

A figura 3.4 apresenta a curva de carga da cidade de Manaus para um dia útil, sábado, domingo e feriado em determinada época do ano. Essas curvas representam as demandas horárias, para o período de um dia, ou seja, 24 horas. Naturalmente, se a demanda máxima desse sistema é inferior à soma da potência disponível de todas as unidades geradoras, é de se esperar que se possa efetuar o atendimento do sistema sem restrições energéticas.

Figura 3.4 - Curva de Carga na Cidade de Manaus.



Fonte: Autor (2017).

No pré-despacho, é feita a relação das unidades geradoras que irão participar da geração do dia seguinte. Normalmente se programa as unidades geradoras e seus níveis de geração, para uma programação horária. Então, com o pré-despacho, sabe-se as unidades geradoras que participarão da programação de geração do dia seguinte, bem como aquelas que serão paradas para manutenção.

O bloco 04 (MCIs) da Usina Térmica do Mauá corresponde a cerca de 10% (160 MW) de toda energia fornecida para a cidade de Manaus, conforme apresentado na tabela 01, considerando os horários de pico (1.150 MW), mas, nos horários de baixo consumo, o Centro Regional de Operações (CRO) solicita com frequência o desligamento das Unidades Geradoras, devido o custo de funcionamento, situação oposta à Usina Hidrelétrica de Balbina, portanto, em uma situação de baixo consumo de carga, as primeiras usinas que os desligamentos serão solicitados serão as que operam com custo mais elevado.

Tabela 01: Potência 160 MW fornecida para a cidade de Manaus.

UNIDADE(S) GERANDO	POTÊNCIA (MW)	CONSUMO DE ÓLEO (Hs)
UNIDADE 01 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 02 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 03 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 04 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 05 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 06 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 07 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 08 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 09 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
UNIDADE 10 (MCIs)	16 MW	204 g/kWh
<b>TOTAL POTÊNCIA DESPACHADA</b>	<b>160 MW</b>	

Fonte: Relatório de Geração Usina Mauá (2017).

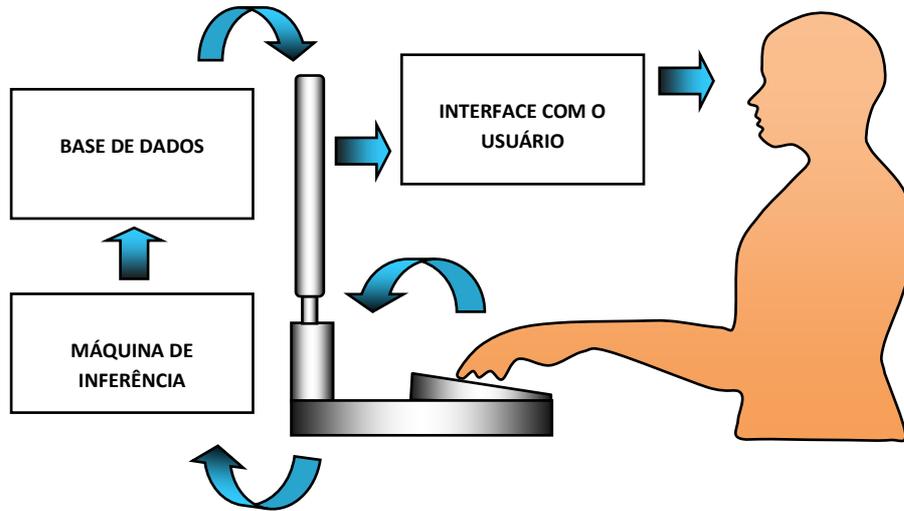
A seguir, serão apresentados detalhes da proposta de um sistema baseado em regras *fuzzy* para suporte ao pré-despacho de carga, levando em conta as restrições de manutenção das unidades de geração, como apresentado na figura 3.1. Os procedimentos implantados para a coleta de dados de análise de vibrações, análise de óleo lubrificante e análise de termografia, também serão abordados.

### 3.3.2.1 Manutenção Preditiva Utilizando Ferramenta Computacional de Apoio a Decisão no Pré-despacho de Carga

Na figura 3.5, é apresentada a estrutura de um sistema especialista que será desenvolvido nesta tese, a fim de dar suporte à tomada de decisão com relação às unidades geradoras que participarão do pré-despacho e aquelas que serão alocadas para manutenção preditiva. A máquina de inferência será implementada por um sistema *fuzzy* sobre uma base de dados de regras *fuzzy*, formatadas para levar em conta o desempenho atual das máquinas geradoras com relação à vibração, qualidade do óleo lubrificante e temperatura, cujos dados são obtidos de medições periódicas dessas variáveis nas instalações da Usina.

Além dos blocos principais, existe uma interface homem-máquina, *Human-Machine Interface* (HMI), para que o usuário ou o especialista se comunique com o sistema sem a assistência de um programador. A máquina de inferência ou interpretador de regras guia o processo de raciocínio através da base de conhecimento, comparando fatos contidos na base de dados com o conjunto de regras.

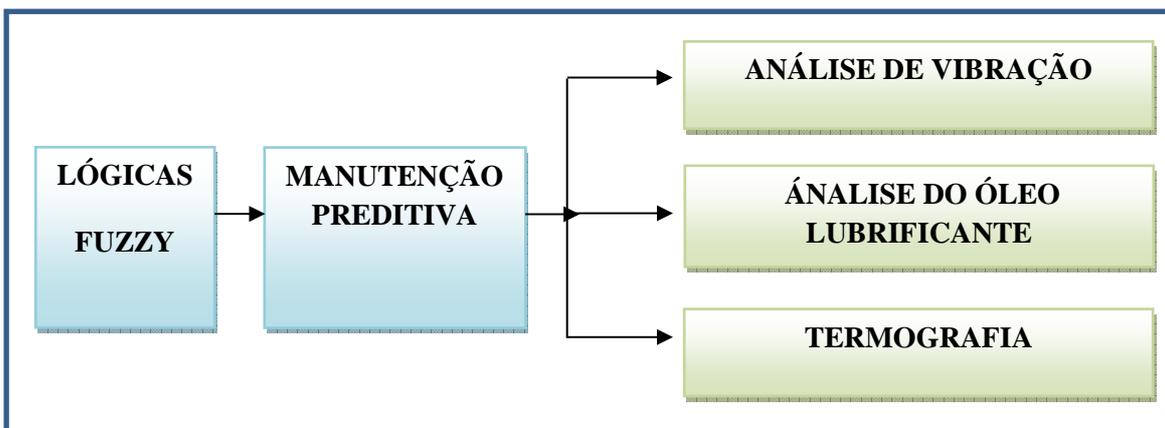
Figura 3.5: Sistema Especialista.



Fonte: Autor (2017).

Entre os tipos mais comuns de manutenção, pode-se citar a manutenção preventiva e a manutenção preditiva. Na figura 3.6, mostra-se um esquema da manutenção preditiva que é proposto nesta tese para a implantação na Usina Mauá, em estudo de caso, onde são feitas análises de vibração, do óleo lubrificante e de termografia para poder respaldar as regras *fuzzy*, desenvolvidas como ferramenta computacional de apoio a decisão.

Figura 3.6 - Manutenção preditiva integrada com o procedimento *fuzzy* proposto.



Fonte: Autor (2017).

Conforme a Tabela 02, são apresentados detalhes dos procedimentos implementados na Usina Mauá para a coleta de dados de vibração, qualidade do óleo lubrificante e de termografia, de acordo com os dados de suas periodicidades.

Tabela 02: Periodicidade de coletas de dados da MP.

<b>MANUTENÇÃO PRETIVIVA</b>	<b>SETOR RESPONSÁVEL</b>	<b>PERIODICIDADE</b>
ANÁLISE DE VIBRAÇÃO	MECÂNICA	TRIMESTRAL
TERMOGRAFIA	ELÉTRICA	MENSAL
ANÁLISE DO ÓLEO LUBRIFICANTE	QUÍMICA	SEMANAL

Fonte: Relatório de Geração Usina Mauá, (2017).

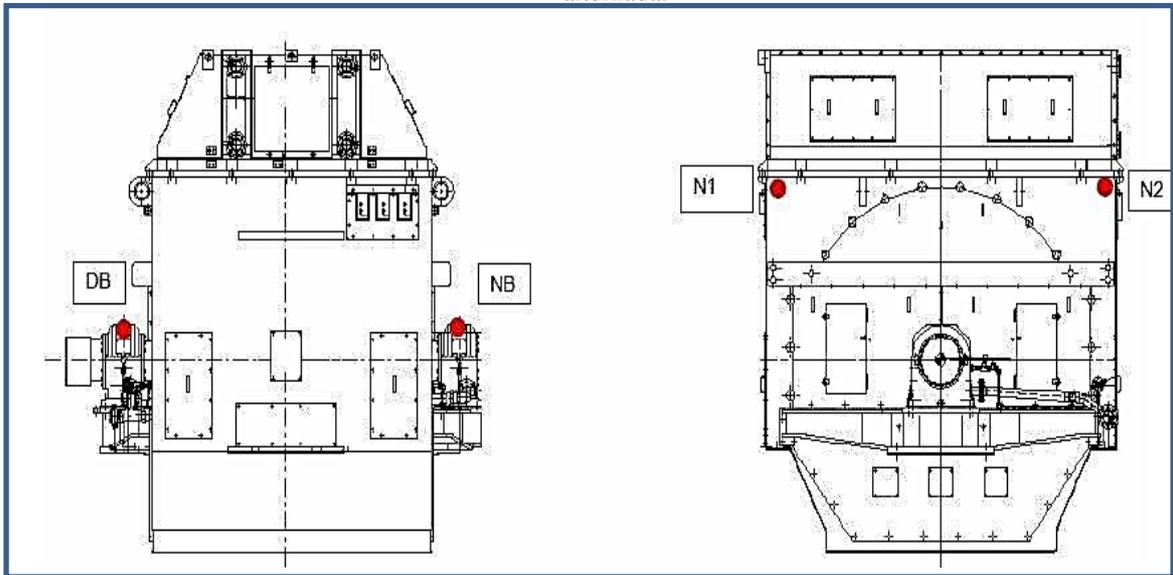
### **3.3.2.2 Análise de Vibração (Comentários/Recomendações)**

Foi implantado um programa de manutenção preditiva por análise de vibrações com periodicidade trimestral em todos os conjuntos geradores. Ele tem por objetivo minimizar os custos oriundos de manutenções preventivas e corretivas desnecessárias.

Na manutenção preditiva por análise de vibrações, é necessário utilizar técnicas de processamento do sinal vibratório com o objetivo de extrair as informações que permitam correlacionar algumas características do sinal com o estado do equipamento. Dentre as várias técnicas que podem ser aplicadas, as mais utilizadas, consideradas clássicas e de aceitação universal, são: análise por nível global de vibração, análise por espectro da vibração, média temporal síncrona, demodulação e diagramas de órbitas.

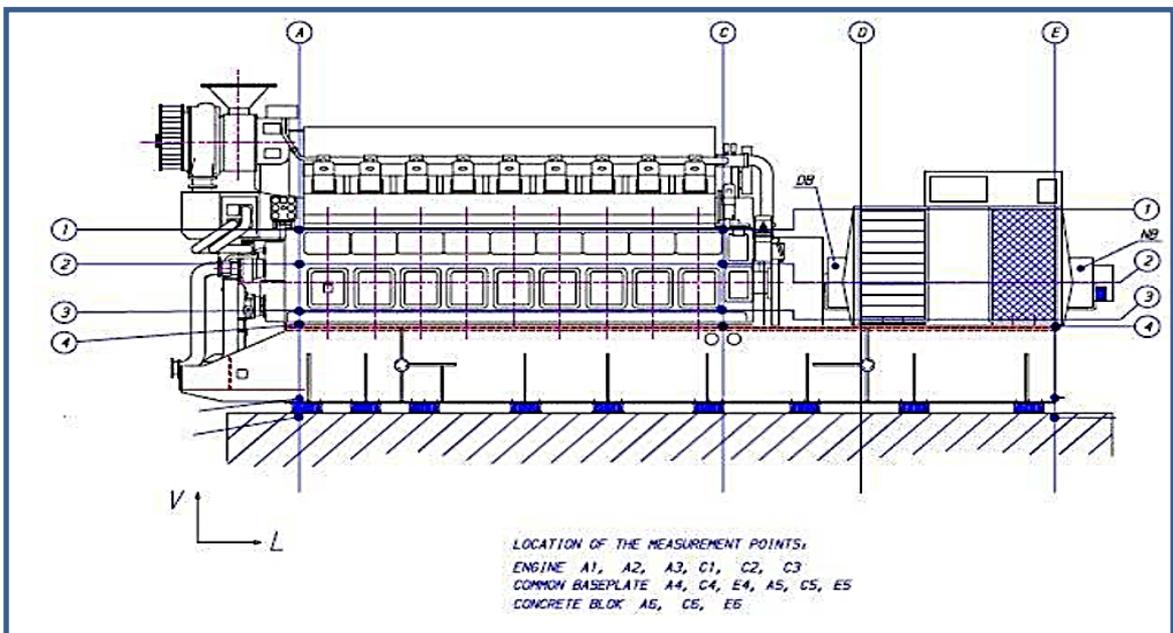
A usina estudo de caso está formada por Motores Reciprocativos de Combustão Interna que aciona o conjunto gerador AC. A Norma ISO 8528-9 se aplica a Motores de Combustão Interna Reciprocativos (RIC) que aciona conjunto geradores AC em instalações fixas e móveis, em montagens rígidas ou resilientes (molas). É aplicável para uso terrestre e marinho, excluindo-se conjuntos geradores usados em aeronaves ou aqueles usados para impulsionar veículos terrestres e locomotivos. Nas figuras 3.7 e 3.8 se mostram os pontos do motor e do gerador nos quais devem ser feitas as medições das vibrações, conforme esta Norma.

Figura 3.7 - Pontos de medição para os geradores elétricos de corrente alternada.



Fonte: Norma ISSO 8528-9 (2015).

Figura 3.8 - Pontos de medição para os motores e geradores.



Fonte: Norma ISSO 8528-9 (2015).

## Identificação dos Pontos de Medições:

Nas medições de vibração, adota-se a seguinte nomenclatura para a identificação dos pontos:

✓ **Primeiro caractere – identificação dos mancais (por sequência de potência):**

1 – Mancal do motor do lado não acoplado (LNA);

2 – Mancal do motor do lado acoplado (LA);

3 – Mancal do gerador do lado acoplado (quando existir) (LA);

4 – Mancal do gerador do lado não acoplado (LNA);

Neste caso, foi utilizada a nomenclatura adotada pelo cliente sendo:

A – Mancal do motor do lado não acoplado (LNA); B

Mancal do motor do lado acoplado (LA);

C – Mancal do gerador do lado acoplado (quando existir) (LA); D –  
mancal do gerador do lado não acoplado (LNA);

✓ **Segundo caractere – direção do ponto de medição:**

H – Horizontal, plano da caixa de ligações;

V – Vertical, perpendicular ao plano horizontal;

A – Axial;

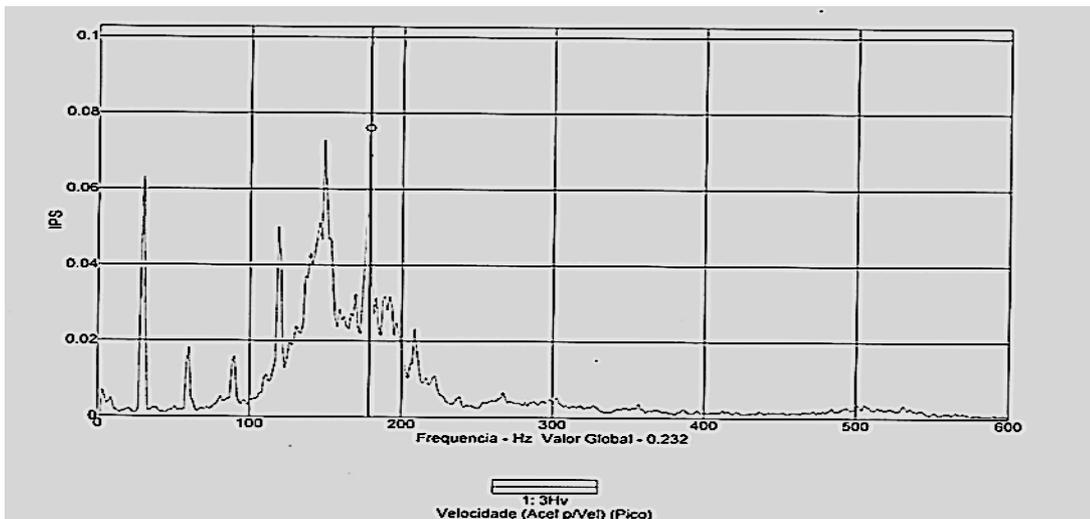
✓ **Terceiro caractere – parâmetro medido:**

V – Velocidade - mm/s (rms);

Foi realizada uma análise espectral do sinal vibratório obtido. A ideia associada é que, como o sinal é a resposta da estrutura às excitações dinâmicas decorrentes do funcionamento da máquina, a análise espectral vai revelar “picos” de amplitudes nas frequências associadas a tais excitações, ou seja, observando-se o espectro de vibrações é possível identificar as frequências de funcionamento de cada componente da máquina, tais como giro do eixo, passagem de pás de turbinas, acoplamento de engrenagem, entre outros.

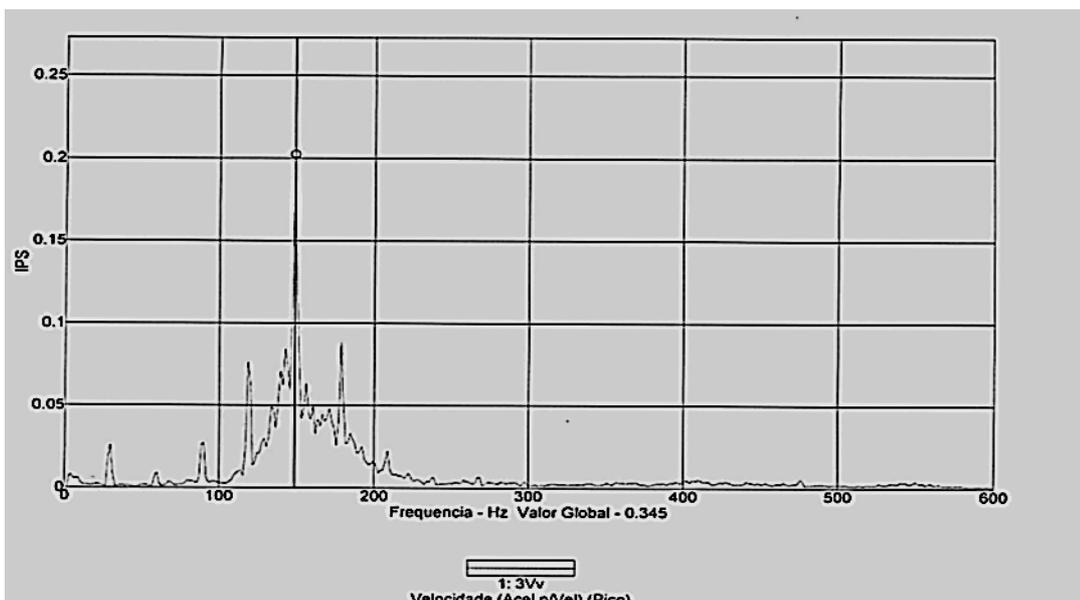
Apresentam-se como exemplo os resultados oferecidos pelo equipamento para medir as vibrações do motor/gerador 01, conforme as figuras 3.9, 3.10. Os registros oscilográficos não revelaram que o motor está desalinhado com o gerador, devido ao desgaste do acoplamento no motor/gerador (01). Os resultados de teste de vibração para os dez grupos motor/gerador da Usina Mauá são apresentados na Tabela 3.3 e mostram que todos os conjuntos estão em condições de vibração normal, portanto, aptos para o pré-despacho.

Figura 3.9: Análise de Vibração (trimestral). As medidas foram realizadas (horizontal).



Fonte: Autor (2017).

Figura 3.10: Análise de Vibração (trimestral). As medidas foram realizadas (vertical).



Fonte: Autor (2017).

Tabela 3.3 – Medição de vibração nos conjuntos Motor/Gerador da UTE Mauá.

Equipamento Motor/gerador	Unidades	Data	Último valor (Motor)	Último valor (Gerador)	Análise <i>fuzzy</i>
01	rm/s	28-fev-2016	3.679	0.07	Zona A aceitável para pré-despacho
02	rm/s	28-fev-2016	6.637	2.006	Zona A aceitável para pré-despacho
03	rm/s	28-fev-2016	8.879	1.966	Zona A aceitável para pré-despacho
04	rm/s	28-fev-2016	7.563	1.183	Zona A aceitável para pré-despacho
05	rm/s	28-fev-2016	9.509	2.238	Zona A aceitável para pré-despacho
06	rm/s	28-fev-2016	10.703	2.411	Zona A aceitável para pré-despacho
07	rm/s	28-fev-2016	12.64	1.078	Zona A aceitável para pré-despacho
08	rm/s	28-fev-2016	5.507	1.140	Zona A aceitável para pré-despacho
09	rm/s	28-fev-2016	4.544	0.74	Zona A aceitável para pré-despacho
10	rm/s	28-fev-2016	6.060	1.286	Zona A aceitável para pré-despacho

Fonte: Autor (2017).

### Manutenção preditiva pelo nível global de vibrações

O controle do estado do equipamento é realizado com base em um valor global calculado para o sinal de vibração medido em pontos críticos da superfície da máquina. Como esse valor é decorrente de um sinal de resposta da estrutura às excitações dinâmicas do funcionamento do equipamento, ele representa uma medida do nível de amplitude do seu sinal vibratório. No caso da aplicação para a manutenção preditiva, as normas técnicas internacionais, dentre elas a ISO, definem dois critérios para adoção de um valor global.

“Para as máquinas girantes com velocidade de rotação na faixa de 600 a 12.000 RPM (10 a 200 Hz), a norma ISO 2372, VDI Richiline 2056, e no Brasil, pela NBR 10082, adotam o valor eficaz da velocidade de vibração, conhecida como velocidade RMS do sinal, como a unidade de medida para identificação da severidade de vibração” (ARATO JR, 2004).

Para máquinas girantes com velocidade na faixa de 60 a 1.800 rpm (1 a 30 Hz) e máquinas especiais, tais como grupos geradores a vapor, turbinas a gás, máquinas

hidrelétricas ou bombas hidráulicas, as normas técnicas, como a ISO 7919, escolhem a amplitude de deslocamento relativo eixo-mancal como critério de severidade.

O procedimento de manutenção consiste em se estabelecer, por comparação com valores recomendados e considerados pelas normas internacionais como correspondentes a boas condições de funcionamento, o nível inicial da severidade de vibração da máquina. Conforme Tabela 3.3, mede-se mensalmente a severidade de vibração do equipamento. O sinal de um mau funcionamento será um incremento repentino na taxa de variação da severidade de vibração observada entre as medidas ou quando, por desgaste, o nível de vibração atingir a faixa de severidade considerada como inaceitável, segundo a norma técnica adotada.

### **Manutenção preditiva pelo espectro de vibração**

De posse dessa informação, a manutenção consiste em se fazer um seguimento periódico do conjunto, e quando se nota uma variação singular na amplitude de uma das frequências fundamentais ou se verifica o surgimento de outra frequência com amplitudes significativas, diagnostica-se o fato como um defeito do componente que tenha essa frequência associada à sua excitação (BANDEIRA, 2015).

Na aplicação dessa técnica, a análise do espectro pode ser realizada por inspeção visual direta, com a identificação e marcação de postos-chaves para estabelecer sua configuração considerada normal para uma máquina particular, ou utilizando-se das técnicas de processamento específicas como *Cepctrum* e *Espectro* Sintetizado. Eles extraem um espectro do espectro de vibrações, ou seja, apresentam um número reduzido de informações convenientemente selecionadas para análise e o seguimento pretendido.

### **Média temporal síncrona, demodulação e diagrama de órbita**

Em contraste com os métodos de análise baseados na medição de um nível global de vibração e na obtenção do espectro (ARATO, 2004), “A média temporal síncrona, a demodulação e os diagramas de órbita são técnicas de emprego mais específicos e direcionados para o monitoramento de uma classe de equipamento ou um tipo de defeito”. Conceitualmente esta técnica é definida de acordo com as seguintes formas:

Média temporal síncrona: (ARATO JR, 2004). “O sinal de vibração é obtido na forma de vários blocos sequenciais de mesmo tamanho, cujo início é sincronizado com algum evento periódico da máquina, como a passagem de um mesmo ponto do eixo”. Tira-se a média entre estes blocos do sinal vibratório e procede-se a sua análise. Trata-se de uma técnica muito usada para monitorar máquinas. Ela é composta por vários elementos girantes sincronizados entre si, tais como os redutores de engrenagem.

Demodulação ou técnica do envelope: (ARATO JR, 2004). “Consiste em obter o contorno externo do sinal vibratório e analisá-lo como se fosse um sinal”. Esse novo sinal pode trazer informações sobre fontes de ruídos repetitivos dentro da máquina, tal como um rolamento com defeito em uma de suas pistas.

Diagrama do tipo “órbita”: (ARATO JR, 2004). “É o resultado de se traçar um gráfico ordenado X-Y, onde X e Y são dois sinais de vibração síncronos, tomados no mesmo plano com sensores apropriadamente montados a 90° um do outro, de modo a estabelecer um gráfico da movimentação do centro do eixo sob análise”. Trata-se de uma técnica muito usada para se analisar a condição do giro de um eixo dentro de um mancal de deslizamento.

Considerando que a deterioração do equipamento traduz-se por uma modificação na distribuição da “energia” vibratória, e que sua consequência mais frequente é o aumento do nível de vibrações, pode-se, a partir da tomada do sinal vibratório em pontos determinados do equipamento, acompanhar a evolução desses sinais e identificar o aparecimento de esforço dinâmico novo ou o aumento abrupto da amplitude da resposta, que são indicadores do surgimento de defeitos ou degradação do funcionamento (ARATO JR, 2004).

Após pesquisar sobre as normas de vibrações disponíveis que regem as máquinas movidas por motores de combustão interna (motor diesel), ateu-se a duas que servem aos propósitos deste trabalho, ou seja: a ISO 10.816-6 e a ISO 8528-9.

## **Norma ISO 10.816-6**

Vibração Mecânica – Avaliação da Vibração da Máquina por medições em partes não rotativas.

Esta parte da ISO 10.816 especifica as condições gerais e procedimentos para a medição e avaliação da vibração, utilizando-se de medições realizadas em partes não rotativas e não reciprocativas da máquina (JIANG, 2016).

É geralmente aplicada a máquinas de pistões reciprocativos montadas tanto em bases rígidas quanto sobre molas, com potência acima de 100 kW. Exemplos típicos de aplicação são: motores marinhos de propulsão, motores marinhos auxiliares, conjunto gerador a diesel, compressor de gás e motores para locomotivas a diesel.

Para todos os pontos de medições conforme figuras 3.7 e 3.8, foram registrados os valores globais de vibração em unidades de velocidade – mm/s e deslocamento  $\mu\text{m}$  (estes valores globais possuem a nomenclatura OVRL – abreviação do inglês OVERALL), de tal forma que se possa utilizar como referência os níveis de severidade de vibração ditados pela Norma Internacional ISO 10.816-6/95, cujos valores são apresentadas na tabela 3.3, em velocidade de vibração, nível rms (raiz quadrática média):

### **Norma ISO 8528-9**

Motor Reciprocativo de Combustão Interna Acionando Conjunto Gerador AC. Esta norma se aplica a Motores de Combustão Interna Reciprocativos (RIC) que aciona um conjunto geradores AC em instalações fixas e móveis, em montagens rígidas ou resilientes (molas). É aplicável para uso terrestre e marinho, excluindo-se conjuntos geradores usados em *aircrafts* ou aqueles usados para impulsionar veículos terrestres.

#### **3.3.2.3 Análise do Óleo Lubrificante**

A correta interpretação das análises efetuadas nas amostras de lubrificante dos motores, desde que colhidas nos estágios iniciais do desenvolvimento do produto, devidamente identificadas quanto à classificação do óleo, período em uso nos testes, tipo de testes efetuados, identificação do combustível utilizado, idade do conjunto motor, e coletadas com critérios laboratoriais de limpeza e isolamento de contaminação, indicarão interessantes parâmetros que serão aqui descritos no estudo.

A leitura de um parâmetro isoladamente, ou mesmo de todos os parâmetros investigados em uma única amostra, pode levar o analista a uma conclusão errônea, ou indicar

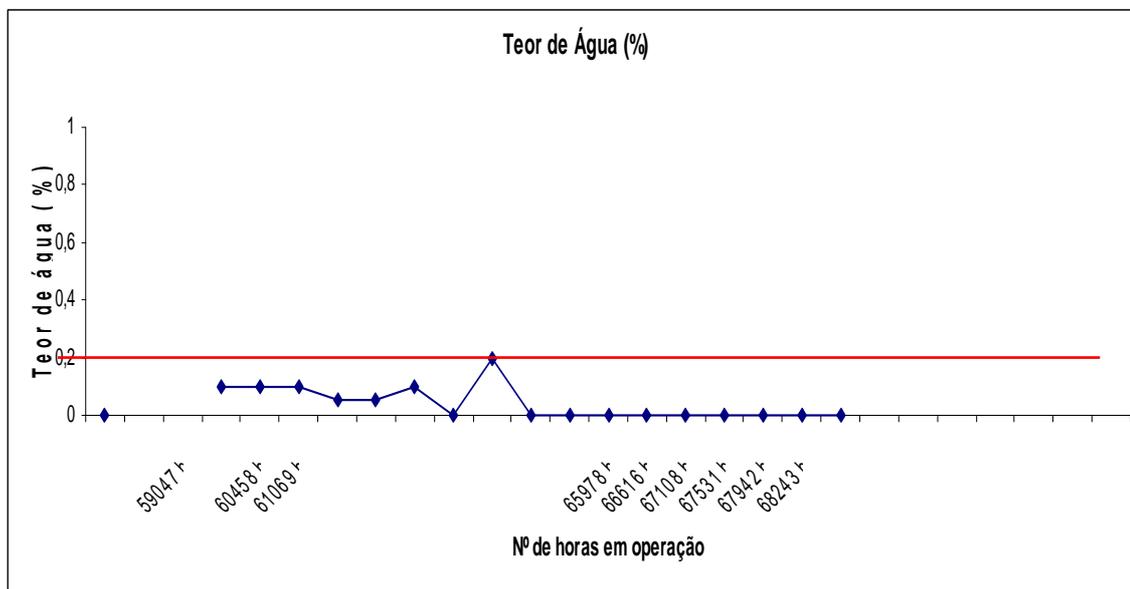
falsa tendência a algum comportamento irreal do desempenho do lubrificante. É comum a obtenção de valores conhecidos como “fora da curva”, devido à rotina, quantidade de amostras ensaiadas, influência de “causa externa” na amostra ou ainda pela variação esperada dos ensaios (HASANNUDDIN, 2016).

➤ **Análise do Conteúdo de Água no Óleo Lubrificante**

A análise do conteúdo de água no óleo lubrificante é uma das análises mais importantes para conhecer o estado técnico do motor (YANG, 2017).

Conforme os resultados da Figura 3.11, as análises de teor de água, feitas periodicamente como parte da manutenção preditiva, mostram níveis normais, pois o tolerável é de 0.3%, sendo que o nível mais elevado verificado foi em torno de 0.2%. Essa análise é realizada semanalmente com a coleta de óleo lubrificante como mostrado nos resultados para o motor/gerador 01.

Figura 3.11 - Análise semanal do óleo lubrificante do teor de água do motor/gerador 01.



Fonte: Autor (2017).

São necessários apenas 100 ml de amostra do óleo lubrificante do carte do motor, que é colocada em um frasco com capacidade para 150 ml. O excesso de lubrificante, após a coleta,

deve ser descartado imediatamente, a fim de se evitar que as partículas se precipitem. O espaço de 50 ml, que corresponde a 1/3 do frasco, é deixado vazio para permitir uma agitação posterior da amostra. A determinação da presença e do teor de água em óleos lubrificantes pode se dar com métodos de verificação de turbidez em óleos claros, crepitação em chapa aquecida.

O método utilizado neste estudo é o da destilação, um teste que tem como objetivo avaliar as características de volatilidade do óleo lubrificante. Ele é feito tomando-se 100 ml da amostra do produto, que são colocados em um balão de vidro que, a seguir, é submetido a aquecimento para destilação em condições controladas. Com esse aquecimento, os produtos se vaporizam sendo, em seguida, condensados e recolhidos em uma proveta de vidro, imersa em um banho de gelo. Após esta operação, as temperaturas registradas são corrigidas levando em conta as perdas que ocorrem na vaporização de pequenas partes do produto e a pressão barométrica.

Depois da análise, conforme figura 3.11, verificou-se que valor foi até 0.2 % de contaminação, gerando-se o gráfico da porcentagem de contaminação pelo número de horas de operação do gerador, que ficou dentro dos padrões para um pré-despacho de carga.

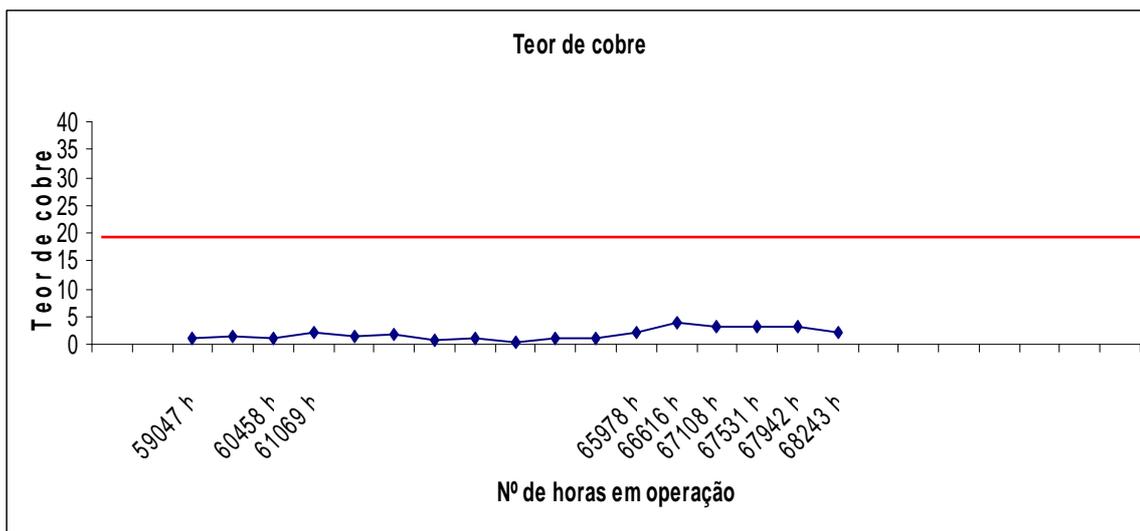
### ➤ **Análise do Conteúdo de Metais no Óleo Lubrificante**

As análises do conteúdo de metais no óleo lubrificante foram feitas por ferrografia para leitura direta de ferro e cobre. Com base na extração das partículas contaminantes magnetizáveis conforme figuras 3.12 e 3.13, contidas no lubrificante, por meio da ação de um campo magnético. As análises são feitas semanalmente, momento em que também são acompanhadas as tendências apresentadas pelos gráficos.

O equipamento distribui as partículas segundo seu tamanho, já que quanto menores forem, menor também será a distância percorrida dentro do campo magnético. As partículas não magnéticas ficam “fixadas” a uma distância maior ainda. Este padrão refere-se ao número de partículas maiores que 2,5 e 15 micras em um volume de 100 mililitros. O número de partículas maiores que dois e cinco micras é usado como ponto de referência para partículas sedimentadas. As partículas maiores que quinze micras contribuem grandemente para uma possível falha catastrófica no componente. Após a análise do conteúdo de metais no óleo lubrificante, foram feitos os gráficos para teor de enxofre, IBT, cobre e teor de ferro. Nas

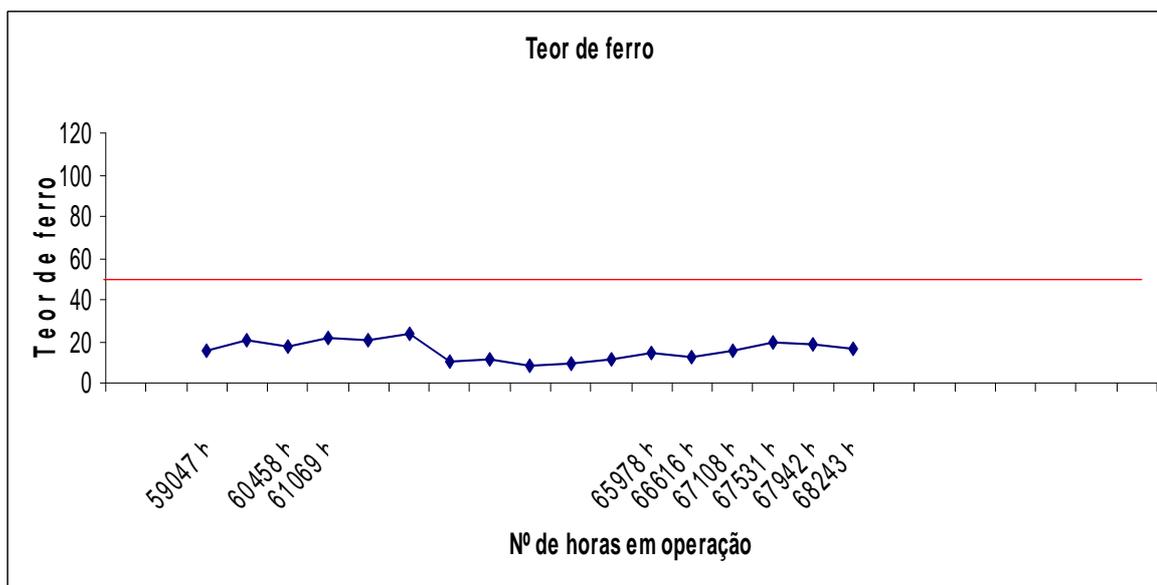
figuras 3.12 e 3.13 se mostram as análises de teor de cobre e teor de ferro para o estudo de caso da planta de Mauá. A presente figura informa os dados levantados apenas do motor 01 como exemplo.

Figura 3.12 - Análise semanal do óleo lubrificante do teor de cobre do motor/gerador 01.



Fonte: Autor (2017).

Figura 3.13 - Análise semanal do óleo lubrificante do teor de ferro do motor/gerador 01.



Fonte: Autor (2017).

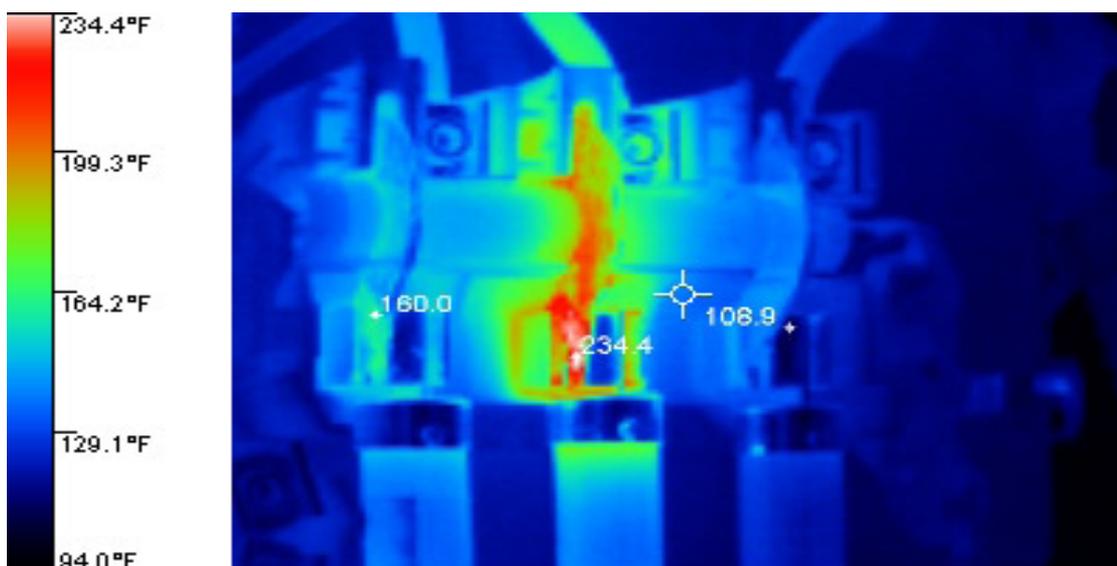
### 3.3.2.4 Análise da Termografia

Este estudo consiste na investigação dos fundamentos da radiação térmica, especificamente o uso de imagens térmicas aplicadas na prevenção da sobrecorrente. Materiais e métodos: a radiação infravermelha é a base dos estudos sobre imagens térmicas, que têm a função de capturar esta radiação, interpretando e gerando uma imagem quantitativa da temperatura do corpo estudado (LOPEZ-PEREZ e ANTONINO-DAVIU, 2017).

Um termograma é uma imagem que fornece a análise do objeto considerando a distribuição de sua temperatura. É uma técnica não destrutiva na qual as imagens são geradas a uma distância e é uma das maneiras mais eficazes de inspeção prévia para Sistemas elétricos (ANDRADE, 2015).

Assim, para identificar possíveis anomalias em equipamentos elétricos, foram realizadas análises periódicas de imagens térmicas de equipamentos e/ou circuitos usando uma câmera termográfica conforme figura 3.14 no gerador 01. Essa análise permitiu executar medições sem interrupção de operação. De acordo com os resultados da figura 3.14, a mufla do motor/gerador 01 apresenta uma temperatura mais elevada (vermelho), porém, fora dos limites toleráveis, de modo que, pelo critério de temperatura, o motor/gerador 01 não está apto ao pré-despacho.

Figura 3.14 – Análise mensal de termovisão do motor/gerador 01.



Fonte: O Autor (2017).

### 3.4 Conclusão do capítulo

Esta Tese apresenta uma nova proposta de solução, que contempla o pré-despacho de carga focado nas condições operacionais das máquinas utilizando inteligência computacional, especificamente a lógica *fuzzy*. Tal implementação caracteriza-se por incorporar algumas inovações, tais como o bom gerenciamento de manutenção via programa de TPM para tomada de decisão, considerando indicadores de desempenho das unidades geradoras com relação à vibração, ao óleo lubrificante, à temperatura, sendo possível dizer se a unidade geradora vai operar e manter a confiabilidade ou se entrará em manutenção devido ao mal desempenho diagnosticado.

---

## CAPÍTULO IV

---

### A LÓGICA *FUZZY* E SUA APLICAÇÃO AO DESPACHO DE CARGA

#### 4.1 Introdução

A teoria dos conjuntos clássicos baseia-se no conceito fundamental de um conjunto, no qual indivíduos são membros ou não membros. Existe uma distinção nítida entre um membro e um não membro para qualquer conjunto bem definido de entidades nesta teoria, e há um limite muito preciso e claro para indicar se uma entidade pertence a um conjunto. Assim, na teoria de conjuntos clássicos, um elemento não pode estar em um conjunto (1) ou em um conjunto (0) ao mesmo tempo. Isso significa que muitos problemas do mundo real não podem ser tratados pela teoria clássica. Pelo contrário, a teoria dos conjuntos difusos aceita valores de associação parcial  $\mu_f \in [0, +1]$  e, portanto, em certo sentido, generaliza a teoria dos conjuntos clássicos até certo ponto.

#### 4.2 A lógica *fuzzy* ou lógica difusa

Como o Prof. Lotfi A. Zadeh sugere pelo seu princípio de incompatibilidade: “Em quanto de mais perto se olha para um problema do mundo real, a lógica *fuzzy* torna-se a solução” e, assim, a imprecisão e a complexidade são correlacionadas (ZADEH, 1973).

A lógica *Fuzzy*, as Redes Neurais, os Sistemas Especialistas e os algoritmos genéticos fazem parte de um novo paradigma conhecido por sistemas inteligentes. Esses procuram fornecer respostas que solucionam problemas de forma apropriada às situações específicas destes problemas, mesmo sendo novas ou inesperadas (NELLES, 2013).

A lógica *fuzzy* tem como objetivo modelar o modo aproximado de raciocínio, tentando imitar a habilidade humana de tomar decisões racionais em um ambiente de incerteza e

imprecisão. Deste modo, essa lógica *fuzzy* é uma técnica inteligente, que fornece um mecanismo para manipular informações imprecisas – conceitos de pequeno, alto, bom, muito quente, frio – e que permite inferir uma resposta aproximada para uma questão baseada em um conhecimento inexato, incompleto ou não totalmente confiável (TANSCHKEIT, 2004).

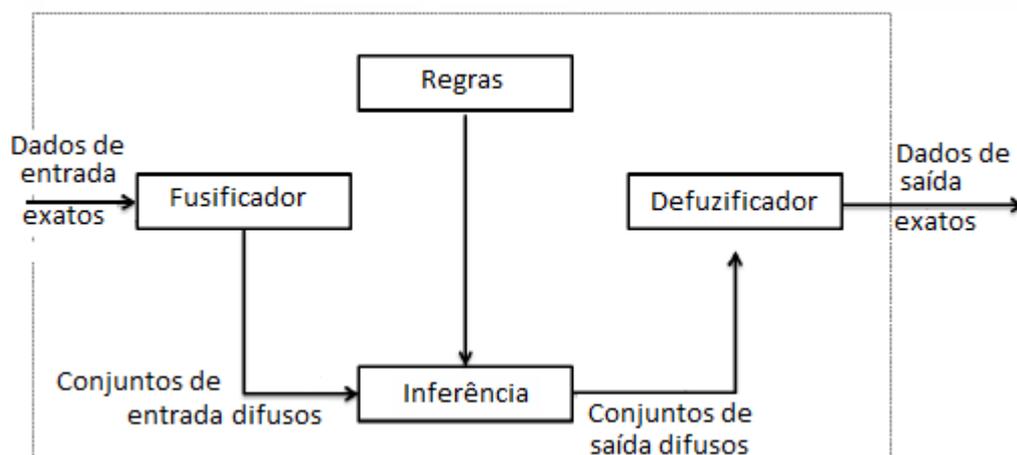
Nos últimos anos, tem havido um interesse crescente pela lógica difusa, tanto na indústria como na academia (FERREIRA, 2016; KAHRAMAN, 2016; AHN, 2017; DAN, 2017; ZOGHI, 2017).

As aplicações atuais incluem modelagem, avaliação, otimização, tomada de decisão, controle, diagnóstico e informação (GOTTWALD, 2013). Por exemplo, a lógica difusa foi aplicada em áreas como previsão de quebra de reatores nucleares na Europa, previsão de terremotos na China e controle de metrô no Japão.

### 4.3 Sistemas *Fuzzy*

Um sistema baseado em lógica *fuzzy*, como mostrado na figura 4.1, pode ter sua ação esquematizada pelos seguintes elementos constituintes: Fuzzificador; Regras, ou base de conhecimento; Inferência, ou lógica de tomada de decisões, e Defuzzificador (LARGUECH, 2016).

Figura 4.1. Sistema baseado em lógica *Fuzzy*.



Fonte: Larguech (2016).

(LARGUECH, 2016), o “fuzzificador” é responsável pelo mapeamento das entradas numéricas em conjuntos *fuzzy* e por convertê-las em variáveis linguísticas. A “inferência” é realizada mapeando-se valores linguísticos de entrada em valores linguísticos de saída com o uso das regras. Elas usam implicações *fuzzy* para simulação de decisões humanas, gerando ações de controle, chamadas de consequentes, partindo-se de um conjunto de condições de entrada, os antecedentes.

Esta base de conhecimento representa o modelo do sistema a ser controlado, consistindo em uma base de dados e uma base de regras *fuzzy* linguísticas. O “defuzzificador” mapeia valores linguísticos e os converte em valores numéricos de saída. Esta função é realizada por uma interface de defuzzificação, obtendo-se um valor discreto que possa ser usado em uma ação de controle no mundo real.

#### **4.4 Teoria dos Conjuntos *Fuzzy***

A base dos sistemas *fuzzy* é a teoria dos conjuntos *fuzzy*. Esses são extensões dos conjuntos convencionais, que permitem somente que elementos sejam verdadeiros ou falsos (lógica booleana, bivalente). Os conjuntos *fuzzy* permitem que seus elementos possuam certo “grau de pertinência” associado, sendo essa propriedade conhecida como “multivalência”. Isto permite a aproximação com o mundo real que não é bivalente, é, na realidade, multivalente com um vasto número de opções ao invés de somente duas. A lógica *fuzzy*, então, permite trabalhar com tais incertezas de fenômenos naturais de forma rigorosa e sistemática (DUBOIS, 2014).

A determinação do grau de pertinência, para conjuntos *fuzzy* contínuos, se dá pela análise de “funções de pertinência”, que possibilitam o cálculo do grau de pertinência de acordo com o valor assumido pela variável. Elas representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas *fuzzy* (GANGA, 2011; MARQUES, 2016).

#### **4.5 Funções de pertinência *fuzzy***

As “Funções de Pertinência *Fuzzy*” representam os aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de um sistema *fuzzy*. Uma função de pertinência é uma função numérica gráfica ou tabulada que atribui valor de pertinências *fuzzy* para valores discretos de uma variável. Em seu universo de discurso, ela representa o intervalo numérico de todos os

possíveis valores reais que uma variável específica pode assumir (PAIVA, 2008; GABRIEL FILHO, 2011).

Um número difuso (neste caso, um indicador de desempenho) é uma generalização de um número real regular, no sentido de que não se refere a um único valor, mas sim a um conjunto conectado de valores possíveis, em que cada valor possível tem seu próprio peso entre 0 e 1. Este peso é chamado de função de associação. Assim como a lógica *fuzzy* é uma extensão da lógica booleana (que usa a verdade absoluta e falsidade apenas, e nada intermediária), os números difusos são uma extensão de números reais. Os cálculos com números difusos permitem a incorporação de incerteza em parâmetros, propriedades, geometria, condições iniciais etc. Podem ser representados pelos segmentos formados por atribuição a uma determinada função de índice de associação (triangular, trapezoidal, gaussiana, Bell generalizada, sigmoidal, gama etc.) (DUBOIS end PRADE, 2012).

A quantidade de funções em um universo de discurso e o seu formato são escolhidos com base na experiência, na natureza do processo a ser analisado ou em uma entrevista com o operador humano especializado que realiza as funções de controle manualmente.

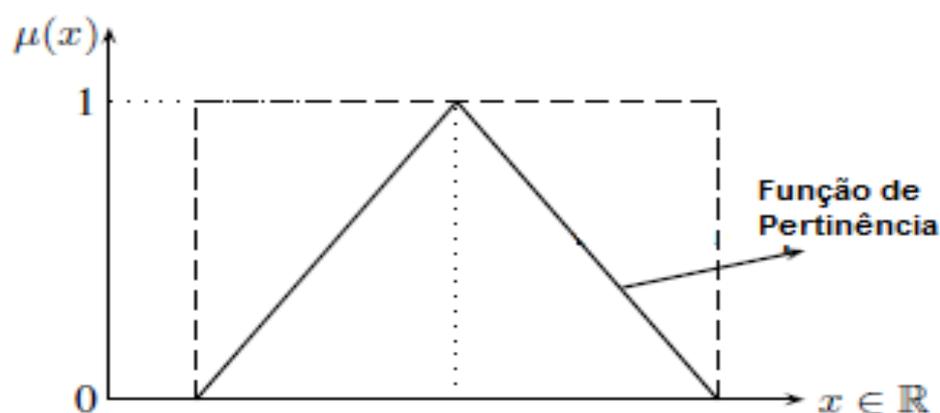
Os gráficos de funções de pertinências podem ter diferentes formas e representações, as mais comuns são a triangular, a trapezoidal e a gaussiana.

#### **4.5.1. Funções de Pertinência Triangular**

As funções de pertinência triangulares são caracterizadas por uma terna (a, b, c), em que “a” e “c” determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, e “b” é o ponto onde a função de pertinência é máxima (DE FIGUEIREDO, 2016). A Figura 4.2 exibe a curva de uma função de pertinência triangular onde são destacados “a”, “b” e “c”. Nessa figura, encontram-se no eixo vertical os valores da função de pertinência e, no eixo horizontal, os valores da variável que se quer estudar (BITTENCOURT, 2011).

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a} & \text{se } a < x \leq b \\ \frac{c - x}{c - b} & \text{se } b < x \leq c \\ 0 & \text{se } x > c \end{cases} \quad (4.1)$$

Figura 4.2. Função de Pertinência Triangular.

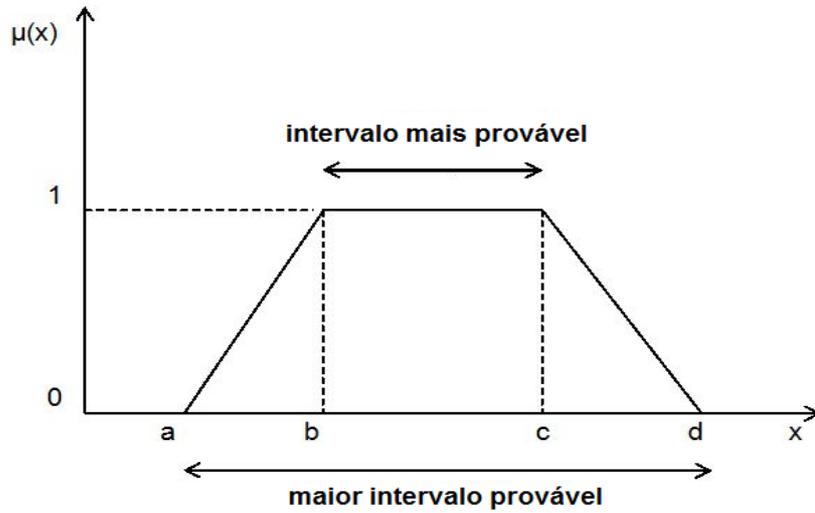


Fonte: Rodríguez e Huertas (2016).

#### 4.5.2. Funções de pertinência trapezoidal

As funções de pertinência trapezoidais são caracterizadas por um conjunto de quatro valores de “a”, “b”, “c” e “d”, em que “a” e “d” determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência assume valores diferentes de zero, enquanto “b” e “c” determinam o intervalo dentro do qual a função de pertinência é máxima e igual a 1. A Figura 4.3 mostra uma função de pertinência trapezoidal na qual são destacados os pontos “a”, “b”, “c” e “d”. Nesta Figura, encontram-se no eixo vertical os valores da função de pertinência e, no eixo horizontal, os valores da variável que se quer estudar.

Figura 4.3. Função de Pertinência Trapezoidal.



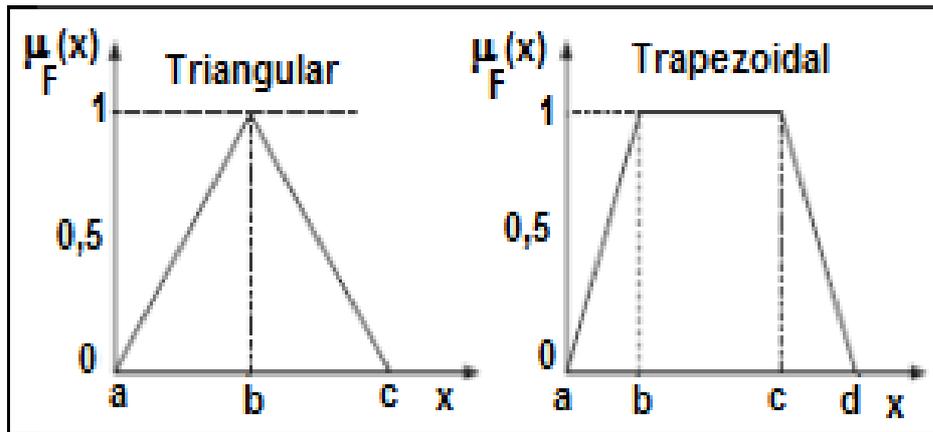
Fonte: Jones (2012).

As expressões para a função de pertinência trapezoidal são (BITTENCOURT, 2011):

$$\mu_A = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x \leq b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases} \quad (4.2)$$

Os números difusos triangulares e trapezoidais (Figura 4.4) são conhecidos por sua capacidade de serem adaptados, pois formalizam de forma confiável muitas situações organizacionais (JONES, 2012).

Figura 4.4. Comparação entre funções trapezoidais e triangulares



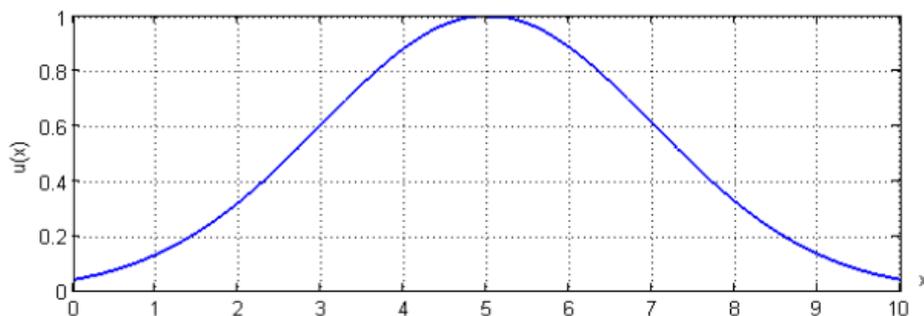
Fonte: Jones (2012).

### 4.5.3. Funções de Pertinência Gaussianas

As funções de pertinência Gaussianas são caracterizadas pela sua média ( $\mu$ ) e seu desvio padrão ( $\sigma$ ). Esse tipo de função de pertinência tem um decaimento suave e tem valores diferentes de zero para todo domínio da variável estudada. A Figura 4.5 exibe uma função de pertinência Gaussiana. Nesta figura, encontram-se no eixo vertical os valores da função de pertinência e, no eixo horizontal, os valores da variável que se quer estudar.

$$Gauss\mu(x) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (4.3)$$

Figura 4.5. Função de Pertinência Gaussiana.



Fonte: Carvalho e Cunha (2014).

#### 4.6. Regras *Fuzzy*

Uma regra difusa (se – então, regra de produção difusa) é expressa simbolicamente como:

SE <proposição difusa> ENTÃO <proposição difusa>

Pode-se definir uma proposição simples desse tipo por:

SE X é A ENTÃO Y é B

O antecedente e conseqüente de uma regra podem ter múltiplas partes.

Em sistemas difusos em que o antecedente é difuso, todas as regras são parcialmente executadas, e o conseqüente é verdade até certo ponto (se o antecedente for verdadeiro com algum grau de pertinência, o conseqüente é também certo grau).

As regras *fuzzy* são regras normais utilizadas para operar, da maneira correta, conjuntos *fuzzy*, com o intuito de obter conseqüentes. Para criar tais regras, é preciso de um raciocínio coerente com o que se deseja manusear e obter. Para isso, este raciocínio deve ser dividido em duas etapas: (1) avaliar o antecedente da regra e (2) aplicar o resultado no conseqüente. Por exemplo, considerando a sentença se x é alto, então x é pesado seguindo os passos 1 e 2 acima, tem-se que, para  $x = 1,70\text{m}$ , deve-se, primeiramente, verificar o grau de pertinência da entrada para o conjunto ao qual se encaixa, alto, que é, para este caso,  $\mu(x) = 0.5$ . Como o grau de pertinência da entrada x é esse, então se deve passar este valor de pertinência para um  $y = 80\text{ kg}$  (por exemplo), pertencente ao conjunto pesado. Para casos em que existam vários antecedentes, é preciso encontrar um grau de pertinência resultante de todos os dos antecedentes. Nos casos em que o conectivo entre os antecedentes seja “e”, devem-se utilizar métodos de combinação, contanto que o resultado não ultrapasse o valor de menor pertinência entre os antecedentes; um exemplo de método seria o mínimo das pertinências. Já nos casos em que o conectivo entre os antecedentes for “ou”, devem-se utilizar métodos de combinação, desde que o resultado não seja menor que o maior grau de pertinência. O raciocínio é bem mais simples para casos em que existam vários conseqüentes, pois o grau de pertinência resultante será o mesmo para todos os conseqüentes.

## 4.7 Conclusão do capítulo

Neste capítulo, a aplicação da lógica *fuzzy* se justifica pela capacidade de antever as inúmeras possibilidades do momento oportuno do pré-despacho de carga sobre as condições operacionais do equipamento.

A viabilidade do uso de números nebulosos para determinar variáveis imprecisas foi confirmada com a simulação no MATLAB 8.0, afirmando a viabilidade de desenvolvimento de um Algoritmo baseado em Lógica *Fuzzy*.

A Interface da ferramenta computacional desenvolvida alcançou a simplicidade desejada pelos próprios usuários, bem como a facilidade de aprendizado em sua operação.

O estudo de caso apresentado aqui poderá ser implantado em qualquer usina termelétrica, independente das cargas a serem despachadas, haja vista que as variáveis deste sistema são comuns a todos.

---

## CAPÍTULO V

---

### APLICAÇÃO DA LÓGICA *FUZZY* PARA O PRÉ-DESPACHO DE CARGA: ESTUDO DE CASO

Este capítulo trata da aplicação da lógica *fuzzy* para o despacho de carga, mas com uma particularidade que é realizar o dito pré-despacho de carga levando em consideração o estado técnico dos motores/geradores, avaliado por diferentes variáveis relacionadas com a manutenção. Na primeira parte, se expõem o desenvolvimento das regras *fuzzy* e de todo o procedimento de inferência e, na segunda parte, são apresentadas todas as provas para avaliar a manutenção e o estado técnico dos motores. A aplicação da lógica *fuzzy*, serviu de base para a resolução de problema real de pré-despacho de carga para satisfazer os métodos racionalizados do *just in time* da UTE Mauá sobre condições operacionais dos equipamentos.

#### 5.1 Aplicações da Lógica *Fuzzy*

Neste contexto, abstraem-se os seguintes grupos de informações e dados: os valores de entrada, denominados *crisp*, as variáveis linguísticas e as variáveis *fuzzy*. A lógica *fuzzy* se justifica na solução deste estudo de caso em função das variáveis de entrada com melhor representatividade em conjuntos *fuzzy*. As variáveis, devido à dimensão do universo de estudo, foram divididas em entradas e saída, todas independentes entre si.

#### 5.2 Procedimentos para a aplicação da lógica *fuzzy*

O primeiro passo foi a determinação das variáveis a se utilizar para estabelecer as regras *fuzzy*. Para isso, foram levadas em conta as análises de vibrações, as análises do olho lubrificante e a termografia. Com base na classificação do estado dessas variáveis, se determinou o estado técnico dos motores conforme as regras *fuzzy* estabelecidas. Então, para

uma demanda de potência dada, o pré-despacho de carga pode ser feito utilizando os motores/geradores de melhor estado técnico para satisfazer a demanda.

### 5.3. Determinação das Variáveis de entradas *Fuzzy*

Para a determinação de cada variável, foi conveniente a divisão em faixas para uma maior aproximação da situação real que se deseja verificar:

#### 5.3.1. A variável de entrada “Análise de Vibração”.

O “Nível de vibração”, medição que é realizada a cada três meses, é a primeira variável de entrada por ser responsável pelas condições operacionais de despacho de carga para geração de energia. Os níveis de vibração foram subdivididos em 4 (quatro) variáveis, sendo cada uma correspondente a classificação dos níveis de vibrações, velocidade e deslocamento.

A classificação adotada para a severidade vibratória é função da potência do acionamento, velocidade de rotação da máquina, bem como do nível de criticidade para a produção. Será utilizada a classe IV, máquinas acima de 300 KW de potência conforme a Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Classificação das máquinas conforme a Potência.

• Classe I	• Máquinas de 0 a 15 kW de Potência
• Classe II	• Máquinas de 15 a 75 kW de Potência
• Classe III	• Máquina de 75 a 300 kW de Potência
• <b>Classe IV</b>	• <b>Máquina acima de 300 kW de Potência</b>

Fonte: Autor (2017).

Cada equipamento foi criteriosamente avaliado para que os níveis de vibração fossem compatíveis e cadastrados com a máxima fidelidade no Software *Prism 4*, visando ao gerenciamento e controle dos valores para análise dos pontos em estudo. A Tabela 5.2 apresenta a classificação dos níveis de vibração nos estados normal, permissível, alerta e

crítico, criando-se os códigos A, B, C e D, em que quem atende a esses níveis e a norma ISO 8528 de vibração, se aplica a motores de combustão interna recíprocos (RCI).

Tabela 5.2: Níveis Vibratórios.

<i>Classe</i>	<i>[N] Normal</i>	<i>[P] Permissível</i>	<i>[A] Alerta</i>	<i>[C] Crítico</i>
<i>Classe I</i>	0,18 a 0,71	0,71 a 1,80	1,80 a 4,50	Acima de 4,50 mm/s
<i>Classe II</i>	0,18 a 1,10	1,10 a 2,80	2,80 a 7,10	Acima de 7,10 mm/s
<i>Classe III</i>	0,18 a 1,80	1,80 a 4,50	4,50 a 11,2	Acima de 11,2 mm/s
<i>Classe IV</i>	<b>0,18 a 2,80</b>	<b>2,80 a 7,10</b>	<b>7,10 a 18,0</b>	<b>Acima de 18,0 mm/s</b>
<i>Código</i>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>

Fonte: Eletrobras Amazonas Energia (2017).

Futuramente, esses níveis poderão ser alterados conforme a periodicidade desejada a se alcançar pelas curvas de tendências, análise espectral e distribuição de vibrações pelo período de análise do acompanhamento evolutivo das vibrações em função das intervenções que foram ou não efetuadas pela manutenção, obedecendo, rigorosamente, ao plano de manutenção preditiva. No que se refere à tomada de decisão para o pré-despacho de carga das unidades geradoras, as unidades geradoras devem se enquadrar conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3. Função de pertinência da classificação da severidade da vibração.

<b>Zona de Vibração</b>	<b>Qualificação</b>	<b>Operação das máquinas</b>
Zona A	[N] Normal 0,18 a 2,80 rm/s	As máquinas comissionadas geralmente devem operar nesta zona.
Zona B	[P] Permissível 2,80 a 7,10 rm/s	É aceitável para operação irrestrita por longos períodos.
Zona C	[A] Alerta 7,10 a 18,0 rm/s	Insatisfatória para operações contínuas por longos períodos.
Zona D	[C] Crítica acima de 18,0 rm/s	É suficiente para causar danos à máquina em qualquer momento.

Fonte: Autor (2017).

### 5.3.2 A Variável de entrada “Análise de óleo lubrificante”

O “Nível de análise do óleo lubrificante aceitável”. De realização semanal refere-se à verificação do teor de água no óleo, teor de partículas sólidas no óleo lubrificante (ferro e cobre), por ser responsável pelas condições operacionais do despacho de carga para geração de energia. Os níveis de análise do óleo lubrificante aceitável foram subdivididos em 3 (três) variáveis, sendo cada uma correspondente à classificação da qualidade de óleo lubrificante aceitável conforme Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Análise periódica do óleo lubrificante.

Classe	[N] Normal	[A] Alerta	[C] Crítico
Água % Volume	≤ 0,2	0,3	Acima de 03
Teor de ferro micras	≤ 49	50	Acima de 51
Teor de cobre micras	≤ 19	20	Acima de 21
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>

Fonte: Eletrobras Amazonas Energia (2017).

As análises são feitas periodicamente (uma vez por semana), quando são acompanhadas as tendências apresentadas pelos gráficos, sendo elaborado um resumo. Esta tendência serve para tomada de decisão para o pré-despacho de carga das unidades geradoras, conforme Tabela 5.5.

Tabela 5.5. Função de pertinência da severidade conforme o óleo lubrificante.

Zona	Qualificação	Operação das máquinas
Zona A Água % Volume Teor de ferro micras Teor de cobre micras	[N] Normal ≤ 0,2 ≤ 49 ≤ 19	As máquinas comissionadas geralmente devem operar nesta zona.
Zona B Água % Volume Teor de ferro micras Teor de cobre micras	[A] Alerta ou insatisfatória 0,3 50 20	Insatisfatória para operações contínuas por longos períodos.
Zona C Água % Volume Teor de ferro micras Teor de cobre	[C] Crítica ou severa Acima de 0,3 Acima de 51 Acima de 21	É suficiente para causar danos à máquina em qualquer momento.

Fonte: Autor (2017)

### 5.3.3 A Variável de entrada “Termografia”

O “Nível da análise da Termografia” realizada frequentemente (mensalmente) é a terceira variável de entrada por ser responsável pelas condições operacionais de despacho de carga para geração de energia. Os níveis da análise da termografia aceitável foram subdivididos em 4 (quatro) variáveis, sendo cada uma correspondente à classificação da confiabilidade dos equipamentos de geração aceitável (ver Tabela 5.6).

Tabela 5.6 - Valores limites conforme a termografia para determinar pontos quentes.

<b>NORMA:</b>	<b>ANÁLISE DA TERMOGRAFIA</b>	
<b>A</b>	<b>[N] Normal Menor ou igual 94.0 F</b>	
<b>B</b>	<b>[P] Permissível</b>	
<b>B / C</b>	<b>94.0 F</b>	<b>64,2 F</b>
<b>C</b>	<b>[A] Alerta</b>	
<b>C / D</b>	<b>164,2 F</b>	<b>199,3 F</b>
<b>D</b>	<b>[C] Crítico Maior ou igual 199,3 F</b>	

Fonte: Manual do Fabricante Fluke (2016).

As análises de termografia são realizadas uma vez ao mês, quando se detecta os pontos quentes através de uma rota de verificação, onde são acompanhadas as tendências apresentadas pelo termovisor, sendo elaborado um resumo. Esta tendência serve para tomada de decisão para o pré-despacho de carga das unidades geradoras, conforme Tabela 5.7.

Tabela 5.7. Função de pertinência da classificação severidade da termografia.

<b>Zona</b>	<b>Qualificação Conforme a Temperatura</b>	<b>Operação das Máquinas</b>
Zona A	[N] Normal ( $T \leq 34,5^{\circ}\text{F}$ )	As máquinas comissionadas geralmente devem operar nesta zona.
Zona B	[P] Permissível ou Aceitável ( $34,5^{\circ}\text{F} < T \leq 73,5^{\circ}\text{F}$ )	Aceitável para operação irrestrita por longos períodos (24h).
Zona C	[A] Alerta ou Insatisfatória ( $73,5^{\circ}\text{F} < T \leq 93^{\circ}\text{F}$ )	Insatisfatória para operações contínuas por longos períodos. (24 hs).
Zona D	[C] Crítica ou severa ( $T > 93^{\circ}\text{F}$ )	É suficiente para causar danos à máquina em qualquer momento.

Fonte: Autor (2017).

#### 5.4 Variável de saída “Estado técnico do motor”

O “Estado técnico do motor (ETM)” é a variável de saída do sistema, ou seja, a relação entre as variáveis de entrada (Vibração), Óleo lubrificante (água, ferro e cobre), Termografia para a variável ETM de saída para pré-despacho de carga. O estado técnico do motor vai ser estabelecido mediante inferência *fuzzy* através das variáveis de entrada e das regras *fuzzy* estabelecidas. O estabelecimento das regras foi feito consultando os engenheiros de mais experiência na usina e alguns professores de diferentes universidades. O estado técnico do motor foi transferido para uma escala percentual de onde a variável ÓTIMA/NORMAL corresponde à faixa percentual de 76 a 100%, a PERMISSÍVEL corresponde à faixa percentual de 51 a 75%, a ALERTA corresponde à faixa percentual de 26 a 50% e a variável CRÍTICO corresponde à faixa percentual de 0 a 25%, isto serve para tomada de decisão no pré-despacho de carga das unidades geradoras conforme apresentado na Tabela 5.8:

Tabela 5.8: Variável “Estado Técnico do Motor”.

Estado Técnico do Motor (ETM) para Condições Operacionais		Operação das Máquinas
Normal	76 a 100%	As máquinas comissionadas geralmente devem operar nesta zona.
Permissível	51 a 75%	Aceitável para operação irrestrita por longos períodos (24 h).
Alerta	26 a 50%	Insatisfatória para operações contínuas por longos períodos (24 h).
Crítico	0 a 25%	É suficiente para causar danos à máquina em qualquer momento.

Fonte: Autor (2017).

#### 5.5. Simulação *Fuzzy*

A simulação *fuzzy* contendo as variáveis do sistema foi realizada utilizando-se a ferramenta MATLAB versão 2017, o modelo *fuzzy* aplicado nesta simulação foi de Mamdani. Esse modelo é caracterizado por adotar as regras semânticas utilizadas para o processamento de inferências e é comumente denominado de inferência de máximo-mínimo. Tal modelo de inferência aplica-se bem a este tipo de problema haja vista que utiliza as operações de união e

intersecção entre conjuntos. A implementação é realizada pelo modelo de Mamdani aplicada a este estudo de caso conforme Figura 5.1. Após a edição das funções de pertinência de todas as variáveis, foram estabelecidas as regras *fuzzy* para o processo de inferência, que aparecem na Tabela 5.9.

Tabela 5.9: Regras de Inferência.

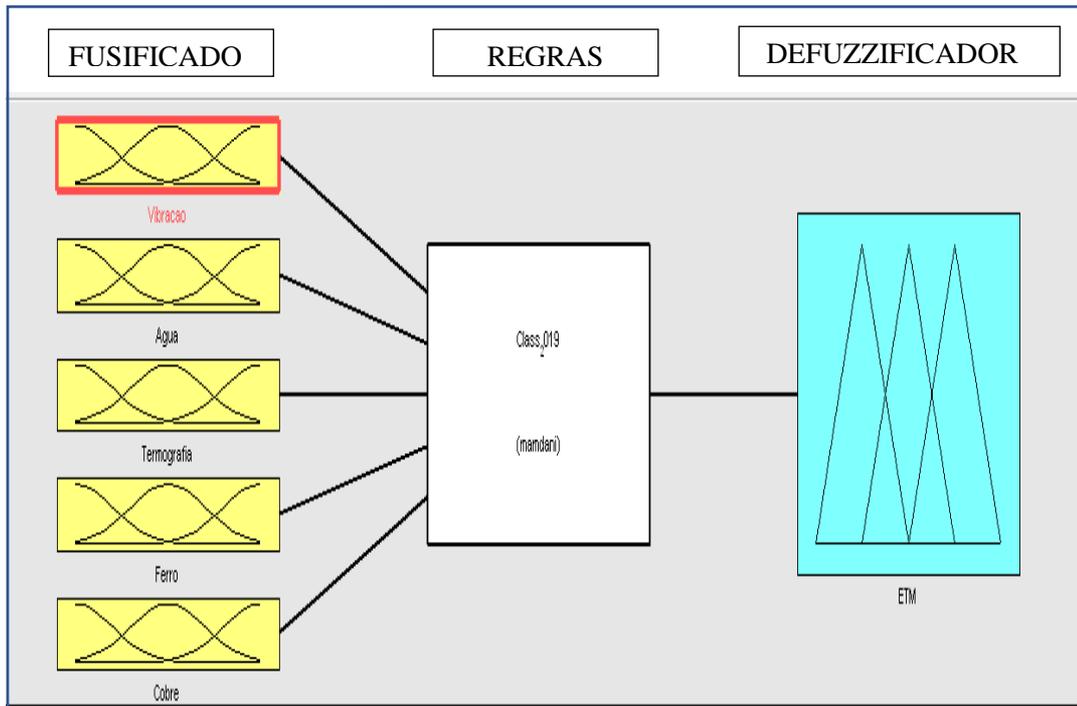
<b>Vibração</b>	<b>Água</b>	<b>Termografia</b>	<b>Ferro</b>	<b>Cobre</b>	<b>ETM</b>
Normal	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal
Permissível	Normal	Permissível	Normal	Alerta	Alerta
Alerta	Normal	Alerta	Normal	Crítico	<b>Crítico</b>
Crítico	Normal	Crítico	Alerta	Normal	<b>Crítico</b>
Normal	Normal	Normal	Alerta	Alerta	Alerta
Permissível	Normal	Permissível	Alerta	Crítico	<b>Crítico</b>
Alerta	Normal	Alerta	Crítico	Normal	<b>Crítico</b>
Crítico	Normal	Crítico	Crítico	Alerta	<b>Crítico</b>
Normal	Normal	Normal	Crítico	Crítico	<b>Crítico</b>
Permissível	Alerta	Permissível	Normal	Normal	Alerta
Alerta	Alerta	Alerta	Normal	Alerta	Alerta
Crítico	Alerta	Crítico	Normal	Crítico	<b>Crítico</b>
Normal	Alerta	Normal	Alerta	Normal	Alerta
Permissível	Alerta	Permissível	Alerta	Alerta	Alerta
Alerta	Alerta	Alerta	Alerta	Crítico	<b>Crítico</b>
Crítico	Alerta	Crítico	Crítico	Normal	<b>Crítico</b>
Normal	Alerta	Normal	Crítico	Alerta	<b>Crítico</b>
Permissível	Alerta	Permissível	Crítico	Crítico	<b>Crítico</b>
Alerta	Crítico	Alerta	Normal	Normal	<b>Crítico</b>
Crítico	Crítico	Crítico	Normal	Alerta	<b>Crítico</b>
Normal	Crítico	Normal	Normal	Crítico	<b>Crítico</b>
Permissível	Crítico	Permissível	Alerta	Normal	<b>Crítico</b>
Alerta	Crítico	Alerta	Alerta	Alerta	<b>Crítico</b>
Crítico	Crítico	Crítico	Alerta	Crítico	<b>Crítico</b>
Normal	Crítico	Normal	Crítico	Normal	<b>Crítico</b>

Fonte: Autor (2017).

As regras de Inferência foram feitas conforme dados elaborados com 512 combinações (vibração, água, ferro, cobre e termografia), mas na tabela 5.9 foram apresentadas apenas 26 combinações como exemplo.

Todas as variáveis são inseridas considerando os intervalos determinados nas regras de inferência conforme figura 5.1.

Figura 5.1- Modelo de Mamdani.

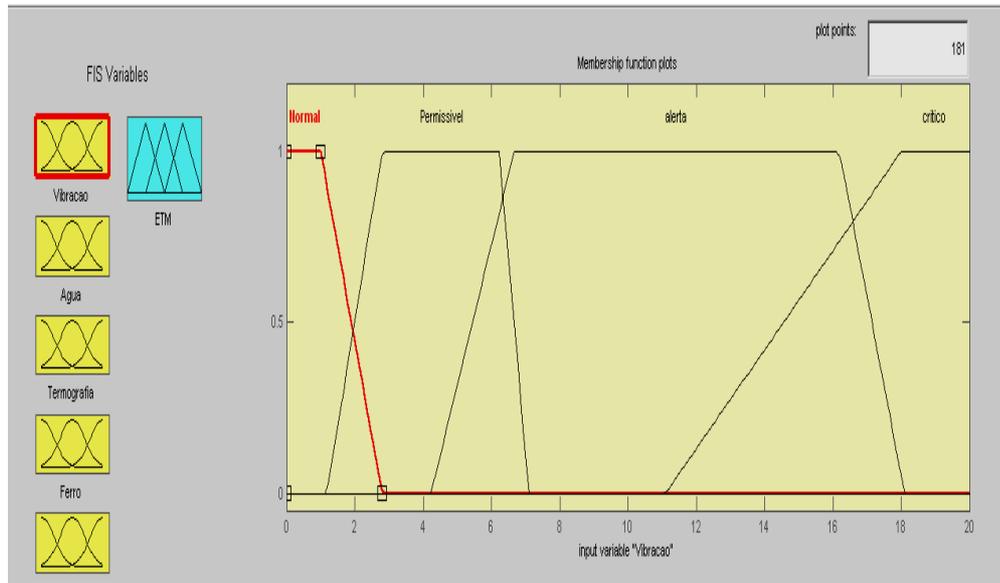


Fonte: Autor (2017).

O controle *fuzzy*, então, procura incorporar a forma humana de pensar em sistemas de controle. Os controladores obtidos têm uso em sistemas dinâmicos complexos, de comportamento não-linear. A lógica *fuzzy* é uma técnica de Inteligência artificial, disciplina que busca por maneiras de máquinas simularem o raciocínio humano na solução de problemas diversos. Essa abordagem procura mimetizar a forma humana de atuar. Um sistema baseado em lógica *fuzzy*, Figura 5.1, pode ter sua ação esquematizada pelos seguintes elementos constituintes: Fuzzificador (vibração, termografia, água, ferro e cobre); Regras, ou base de conhecimento; Inferência, ou lógica de tomada de decisões; Defuzzificador (estado técnico do motor).

Nas figuras 5.2 até 5.6 apresentam-se as implementações de todas as variáveis de entrada ao sistema *fuzzy*.

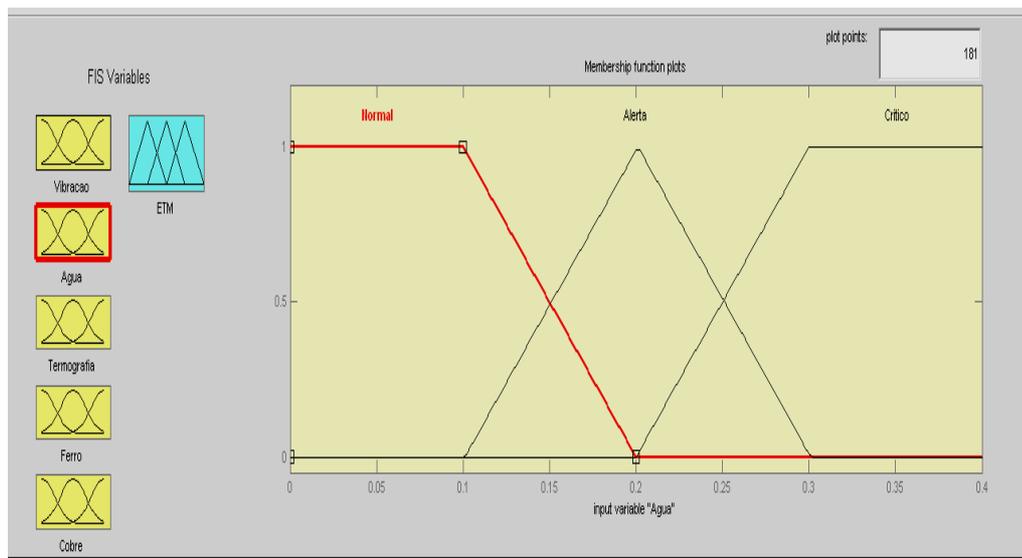
Figura 5.2: Primeira variável de entrada: “Nível de Vibração”.



Fonte: Autor (2017).

Todas as variáveis são inseridas considerando os intervalos determinados nas regras de inferência. A Figura 5.2 demonstra a primeira variável “Vibração”, conforme a Tabela 5.3.

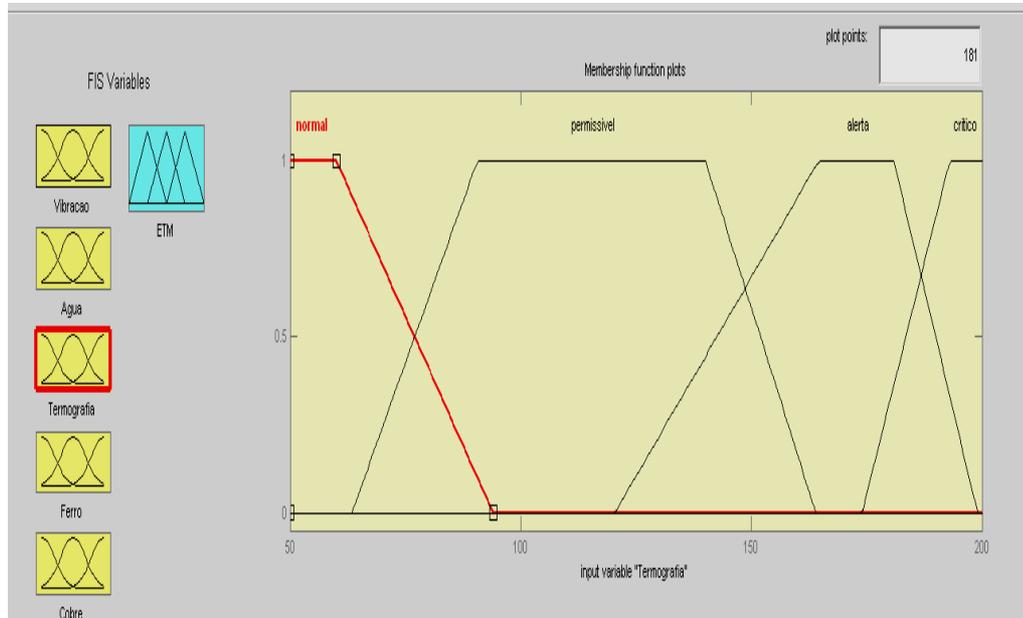
Figura 5.3: Segunda variável de entrada: “Água”.



Fonte: Autor (2017).

A segunda variável de entrada é a água (Figura 5.3) produzida pelas análises físico-químicas do óleo nas unidades geradoras. De acordo com a Tabela 5.5.

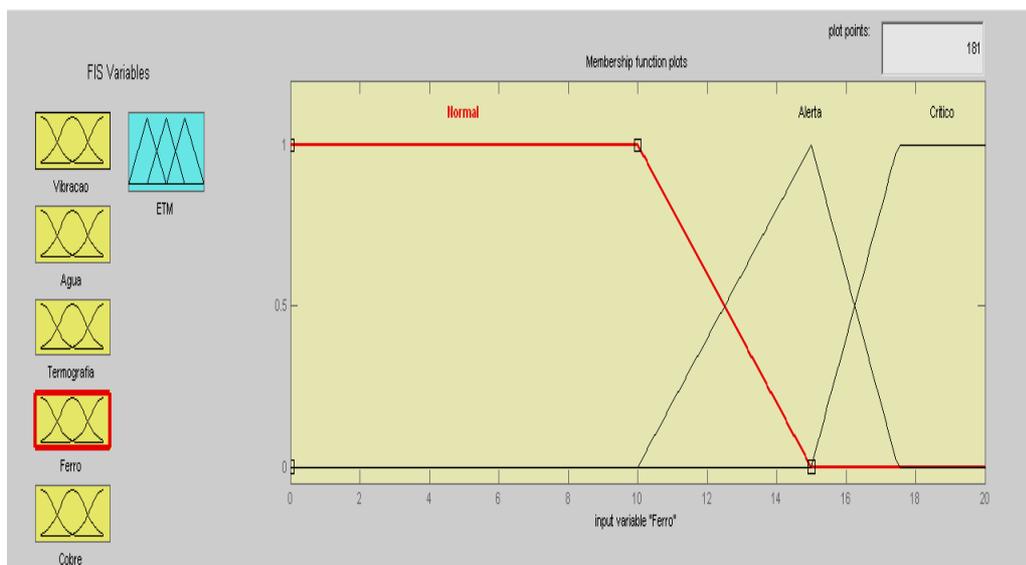
Figura 5.4: terceira variável de entrada: “Termografia”.



Fonte: Autor (2017).

A terceira variável de entrada é termografia (Figura 5.4) produzida pelas análises de vibração nas unidades geradoras. De acordo com a Tabela 5.7.

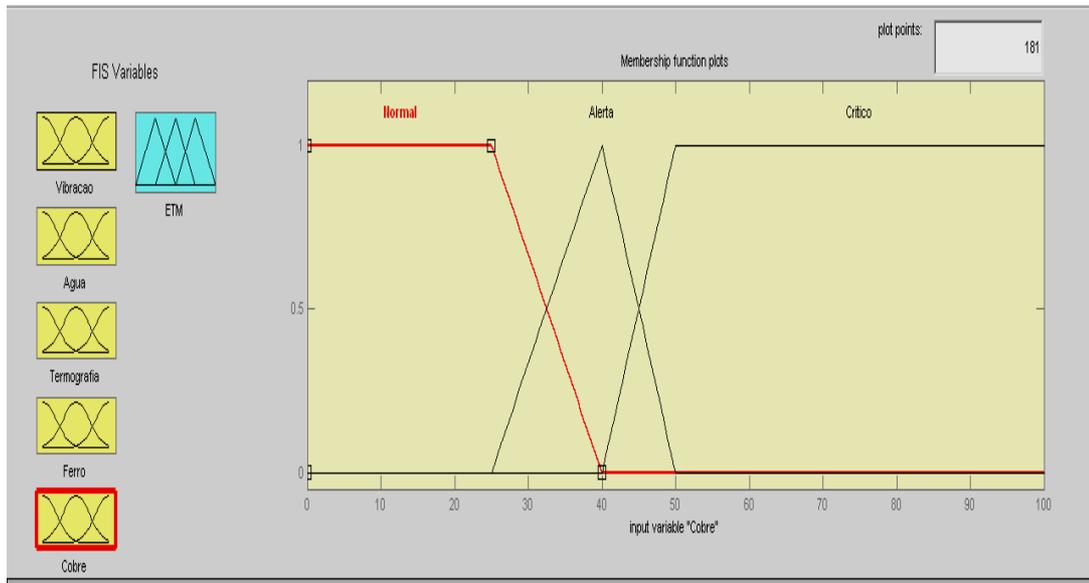
Figura 5.5: quarta variável de entrada: “Ferro”.



Fonte: Autor (2017).

A quarta variável de entrada é o ferro (Figura 5.5) produzida pelas análises físico-químicas do óleo nas unidades geradoras. De acordo com a Tabela 5.5.

Figura 5.6: A quinta variável de entrada: “Cobre”.

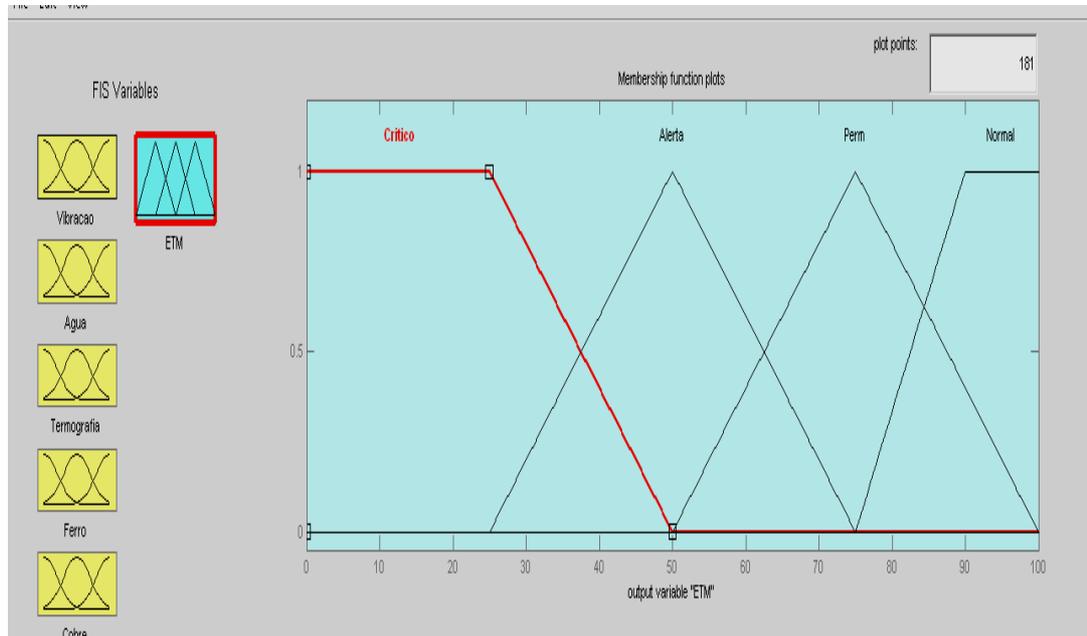


Fonte: Autor (2017).

A quinta variável de entrada é o cobre (Figura 5.5), foi produzida pelas análises físico-químicas do óleo nas unidades geradoras. De acordo com a (Tabela 5.5).

O Estado Técnico do Motor é produto da relação entre a variável de entrada e variável de saída, que compõem as funções de pertinência expressas nas curvas da Figura 5.7.

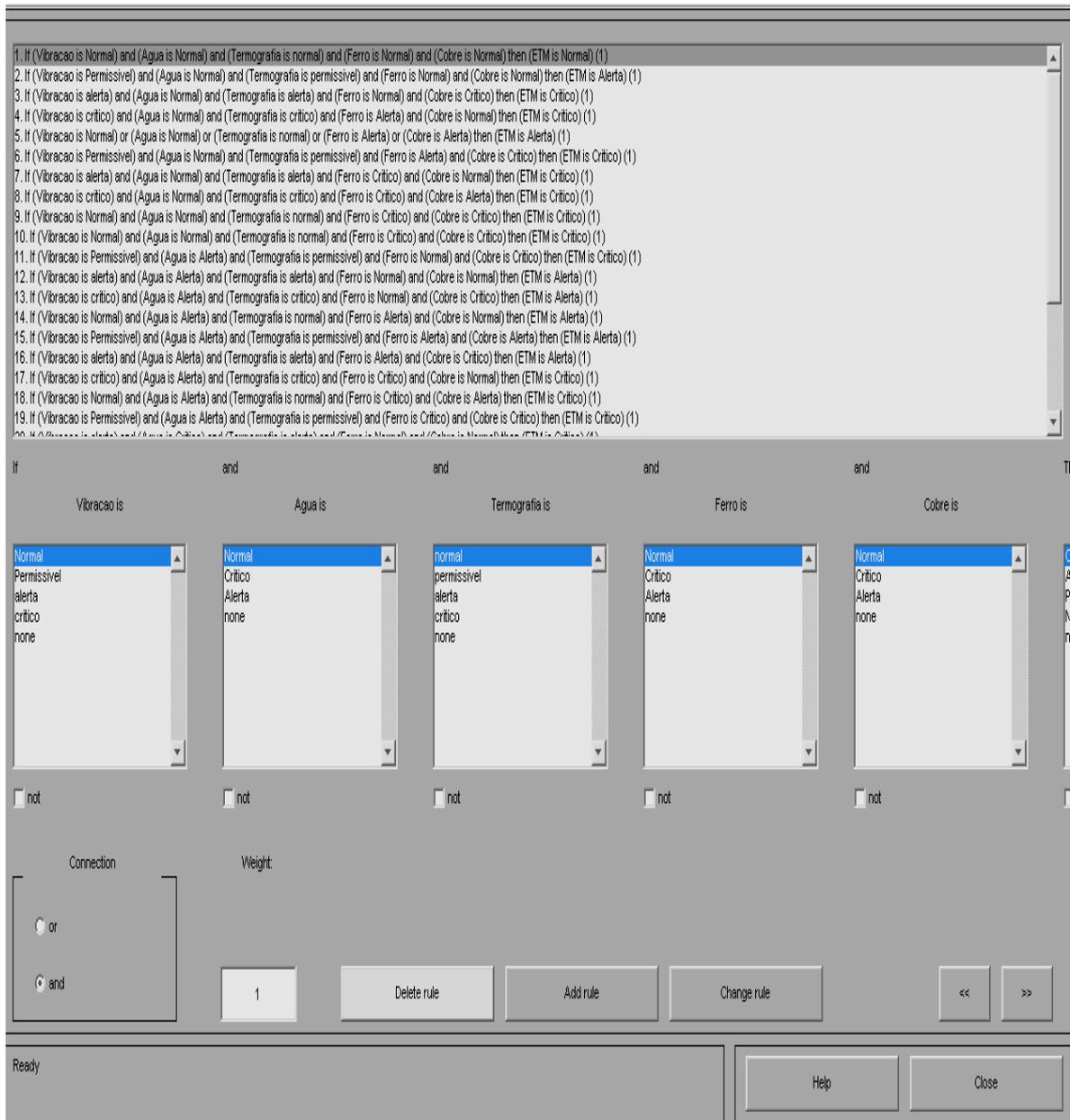
Figura 5.7: Variável de Saída: Estado Técnico do Motor.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 5.8 exibe como exemplo a combinação de algumas das variáveis linguísticas formando, assim, os antecedentes e os consequentes com base nas regras de inferência *fuzzy*. Como muitas combinações são praticamente idênticas e não alteram os dados de saída, foram realizadas 120 combinações no MATLAB.

Figura 5.8: Algumas das Regras de Inferência Implementadas.

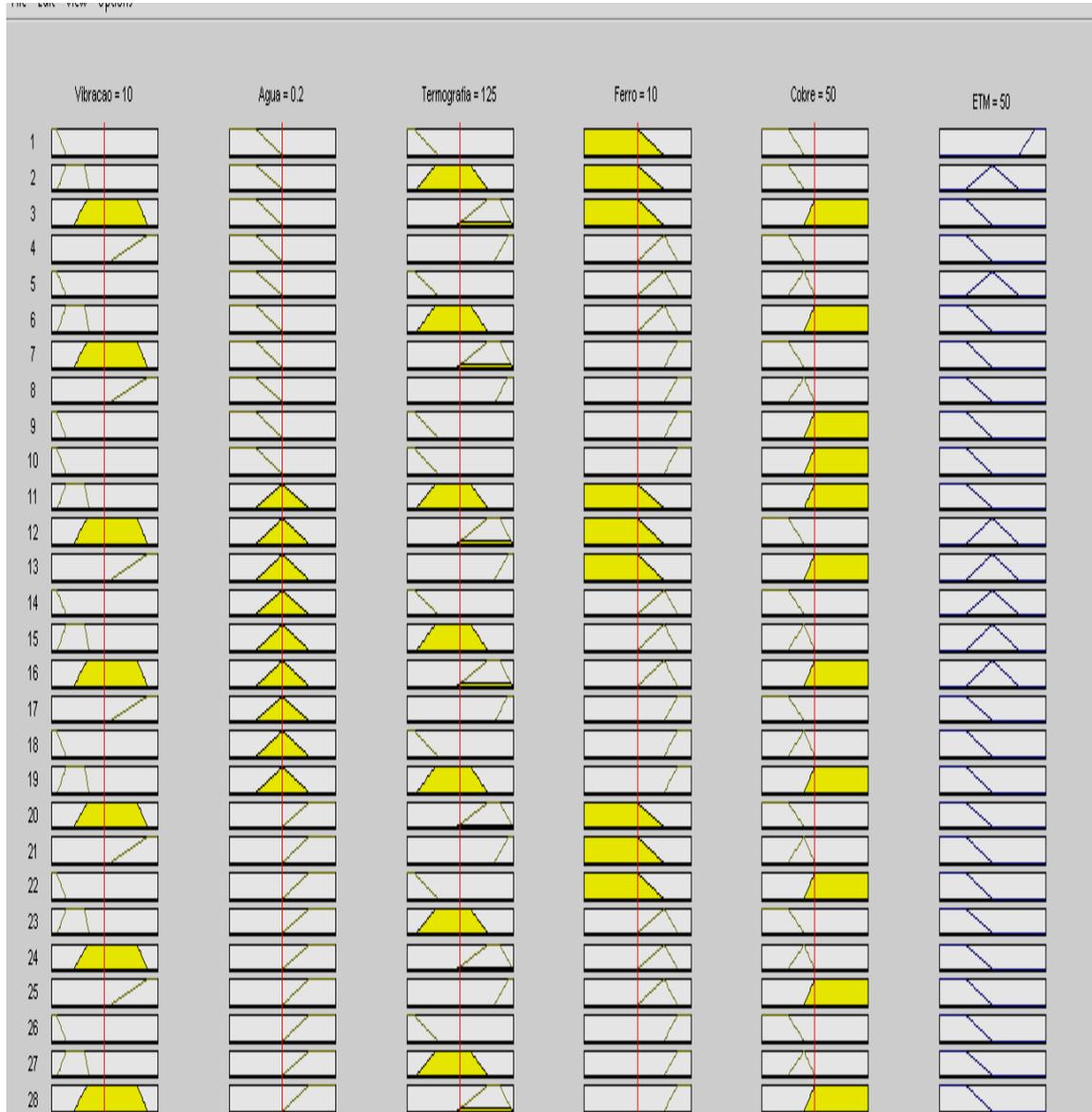


Fonte: Autor (2017).

Após a edição das funções de pertinência de todas as variáveis, as regras implementadas estão dispostas na Tabela 5.9.

Para uma melhor compreensão, a tela expressa na figura 5.9 demonstra todas as possibilidades que a simulação pode produzir. A movimentação das linhas vermelhas determina a outra regra que se deseja avaliar.

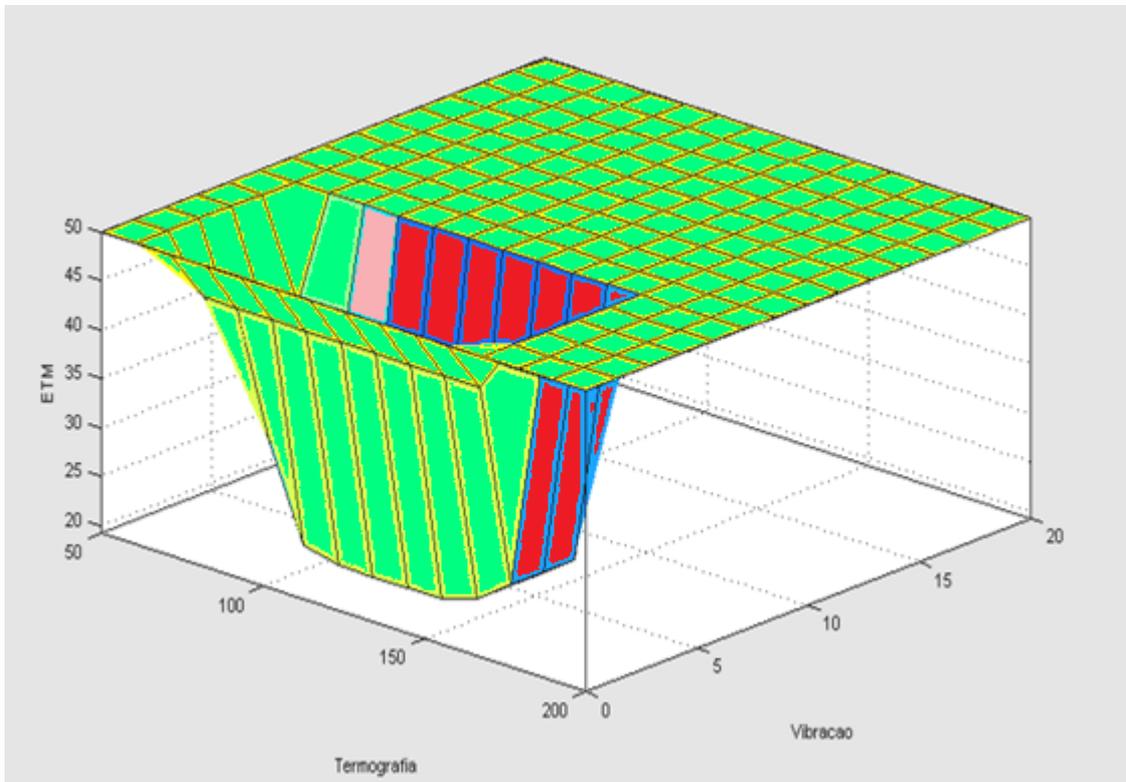
Figura 5.9: Associação das Variáveis de Entrada e Saída.



Fonte: Autor (2017).

Os valores que são produzidos por esta inferência podem ser interpretados pelo especialista de forma que ele possa verificar conforme as figuras 5.10 a 5.13, nas quais se exhibe o resultado do processamento das regras de inferência *fuzzy* através da superfície do gráfico em 3D. Nestas curvas estão presentes todas as situações possíveis que as variáveis podem assumir dentro da simulação.

Figura 5.10: Superfície Resultante (Termografia x Vibração).

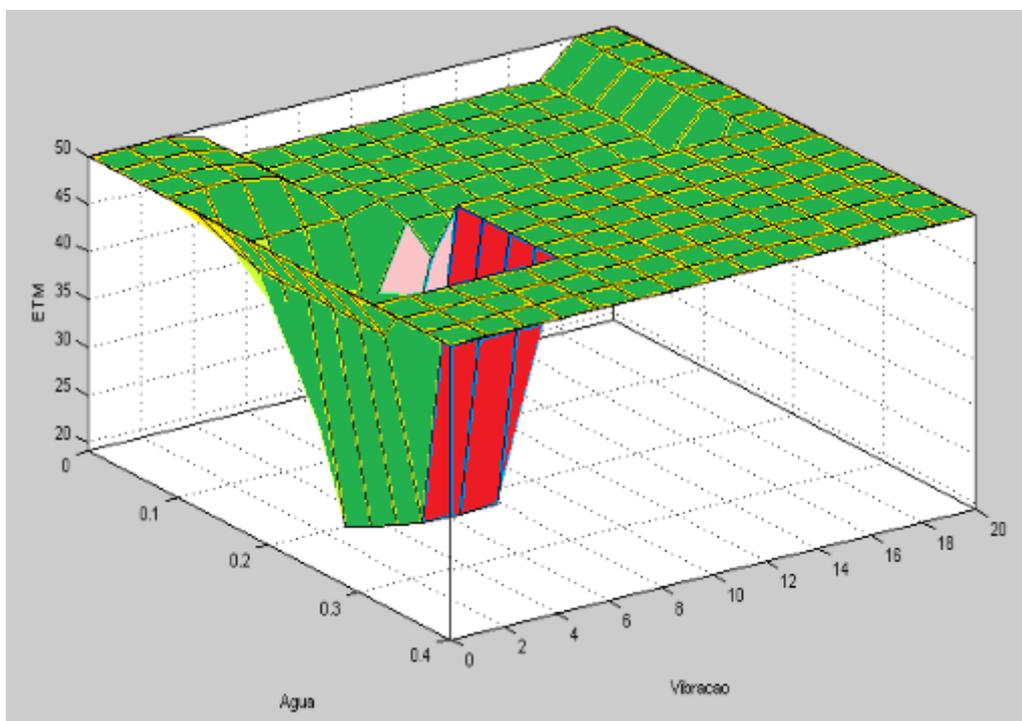


Fonte: Autor (2017).

A área superior da curva possui cor verde, representando a zona de conforto do sistema, ou seja, quando a variável “Vibração” tende a assumir valor mínimo (normal) ou permissível e a “Termografia” tende a assumir valor mínimo (normal) ou permissível, enquanto a variável “Estado Técnico do Motor” assumirá valor máximo.

A área vermelha da curva representa a zona de desconforto do sistema, ou seja, quando a variável “Vibração” tende a valor máximo (Crítico) ou (Alerta), a variável “Termografia” assumirá valor máximo (Crítico) ou (Alerta), enquanto a variável “Estado Técnico do Motor” assumirá valor mínimo.

Figura 5.11: Superfície Resultante (Água x Vibração).

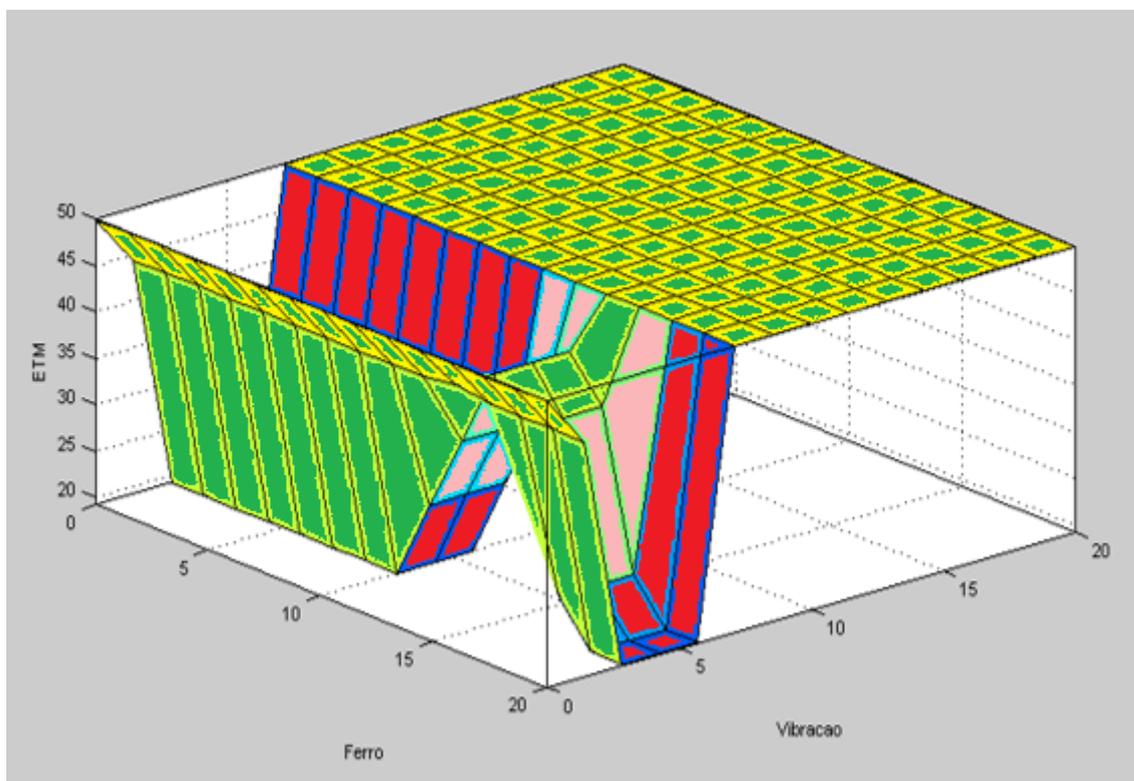


Fonte: Autor (2017).

Em relação à Figura 5.11, na área superior em verde, encontra-se a zona de conforto do sistema, ou seja, quando a variável “Vibração” tende a assumir valor mínimo (normal) ou permissível e a “Água” tende a assumir valor mínimo (normal), enquanto a variável “(ETM) Estado Técnico do Motor” assumirá valor máximo.

A área vermelha da curva representa a zona de desconforto do sistema, ou seja, quando a variável “Vibração” tende a valor máximo (Crítico) ou alerta e a variável “Água” assumirá valor máximo (Crítico), enquanto a variável “Estimativa” assumirá valor mínimo.

Figura 5.12: Superfície Resultante (Ferro x Vibração).

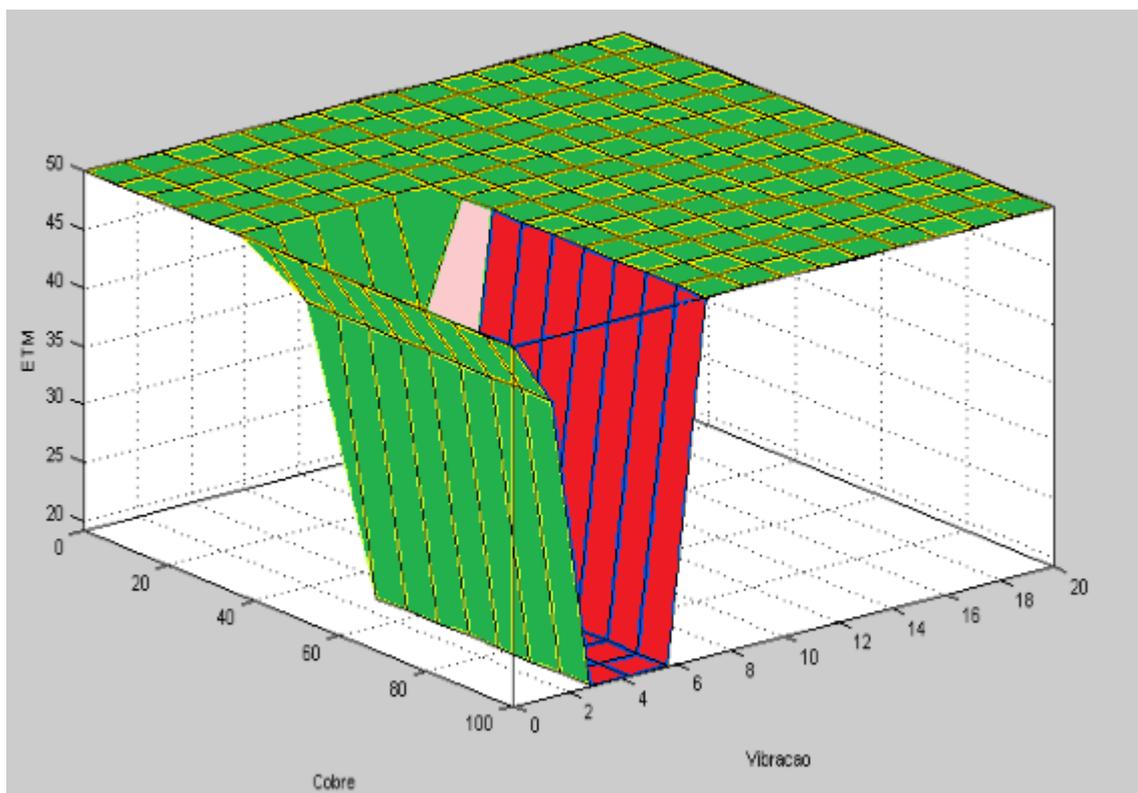


Fonte: Autor (2017).

Em relação à Figura 5.12, a área superior da curva possui cor verde, representando a zona de conforto do sistema, ou seja, quando a variável “Vibração” tende a assumir valor mínimo (normal) ou permissível e a “Ferro” tende a assumir valor mínimo (normal), enquanto a variável “Estado Técnico do Motor” assumirá valor máximo.

A área vermelha da curva representa a zona de desconforto do sistema, ou seja, quando a variável “Vibração” tende a valor máximo (Crítico) ou alerta e a variável “Ferro” assumir valor máximo (Crítico), enquanto a variável “Estado Técnico do Motor” assumirá valor mínimo.

Figura 5.13: Superfície Resultante (Cobre x Vibração).



Fonte: Autor (2017).

Com relação à Figura 5.13, a área superior da curva possui cor verde, representando a zona de conforto do sistema, ou seja, quando a variável “Vibração” tende a assumir valor mínimo (normal) ou permissível e a “Cobre” tende a assumir valor mínimo (normal), enquanto a variável “Estado Técnico do Motor” assumirá valor máximo.

A área vermelha da curva representa a zona de desconforto do sistema, ou seja, quando a variável “Vibração” tende a valor máximo (Crítico) ou alerta e a variável “Cobre” assumir valor máximo (Crítico), enquanto a variável “Estimativa” assumirá valor mínimo.

## 5.6 Procedimento Usando a Lógica *Fuzzy* no Motor/Gerador 01

Para as condições medidas/calculadas de vibração, termografia, água, ferro e cobre nos dez grupos motor/gerador da UTE Mauá, foi aplicado o procedimento de pré-despacho proposto, utilizando-se as regras *fuzzy* desenvolvidas anteriormente. Para os grupos motor/gerador de números 02, 03, 04, 05, 06, 07, 08, 09 e 10 obtiveram-se resultados na Zona A, ou seja, região normal de operação para todos os atributos utilizados, isto é, vibração, água, termografia, ferro e cobre, de modo que a variável de saída representando o estado de operação desses motores foi classificada como normal. Dessa forma, todos esses grupos motor/gerador foram classificados como aptos para o despacho.

No entanto, para o grupo gerador 01, os resultados apontaram condição normal (zona A) para as referências de vibração, água, ferro e cobre, e indicaram condição crítica (zona D) para as referências (termografia), o que resultou para a variável de saída a classificação de (zona D), ou crítica, que impede o grupo motor/gerador ser despachado nestas condições. Os resultados da inferência *fuzzy* para o motor/gerador 01 estão apresentados na figura 5.14.

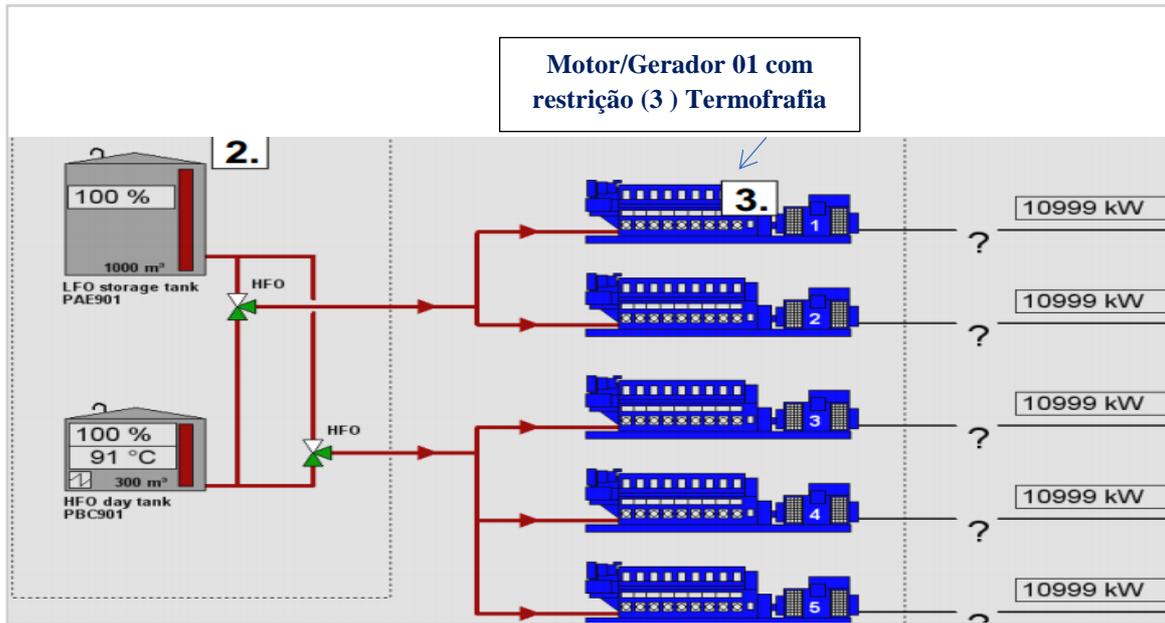
Figura 5.14: Associação das Variáveis de Entrada e Saída motor/gerador 01.



Fonte: Autor (2017).

A Figura 5.15 mostra a tela de supervisão do despacho de carga, informando à operação que o motor/gerador 01 não está apto ao despacho de carga, sendo, portanto, encaminhado aos procedimentos de inspeção/manutenção preditiva.

Figura 5.15: Pré-despacho centrado na confiabilidade dos equipamentos.



Fonte: Autor (2017).

Como apresentado, a lógica *fuzzy* serviu de base para a resolução de problema real de pré-despacho centrada na confiabilidade dos equipamentos para satisfazer aos métodos racionalizados do *just in time* da usina térmica com motores de combustão interna. Para poder implementar satisfatoriamente todo o procedimento desenvolvido usando a lógica *fuzzy*, é preciso conhecer o estado técnico dos motores através da manutenção e as análises de diagnósticos, o que foi realizado por meio da implantação do programa TPM.

## 5.7 Conclusões do capítulo

Neste capítulo, foi estabelecida a relação existente entre a manutenção, o diagnóstico e o pré-despacho de carga. Foi desenvolvido um procedimento usando a lógica *fuzzy* que permite avaliar o estado técnico dos motores e a sua disposição para poderem ser usados no pré-despacho de carga quando o cursor vermelho estiver bem à esquerda de cada elemento (vibração, água, termofrafia, ferro e cobre) as unidades geradoras estarem apta para o pré-despacho de carga de acordo com as condições operacionais dos equipamentos.

---

## CAPÍTULO VI

---

### CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

#### 6.1 Conclusão

A partir dos resultados obtidos nesta tese, são possíveis as seguintes conclusões:

O principal objetivo da implantação do TPM na UTE Mauá foi introduzida uma metodologia de manutenção que possibilitou um o planejamento e controle dos equipamentos de forma correta e adequada para melhorar a confiabilidade referente a eles. Assim, foi atingido o objetivo proposto, cuja estrutura tradicional do TPM composta de oito pilares, onde foram modificadas para o uso de somente quatro pilares, voltados especificamente para UTE Mauá com motores de combustão interna (MCI), cujos objetivos principais foram alcançados como se pode ler na lista seguir:

- ✓ Foi maximizado a eficiência global dos equipamentos e da operação através da análise e eliminação das perdas operacionais do TPM;
- ✓ Foram capacitados todos os operadores, que mantiveram os locais apontados pelo programa do TPM limpos, organizados e inspecionandos, seguindo procedimentos operacionais;
- ✓ Foram criados modelos de gestão corporativa da manutenção para todos os motores e equipamentos auxiliares da UTE Mauá, para otimizar as intervenções e reduzir os custos de manutenção, garantindo a performance dos motores e equipamentos auxiliares;

Foram utilizadas como modelo de inovação as análises de vibração, análises do óleo e da temperatura para diagnosticar o estado técnico dos motores utilizando lógica *fuzzy* para tomada de decisão para o despacho de carga:

✓ Foi implantado um programa de manutenção preditiva para análise de vibrações com periodicidade trimestral em todos os conjuntos geradores. Ele teve como objetivo minimizar os custos oriundos de manutenções preventivas e corretivas desnecessárias;

✓ Conforme as amostras realizadas semanalmente do óleo de lubrificante do motor, conseguimos identificar precocemente a água no óleo lubrificante e verificar se ele estava contaminado com material sólido, como ferro e cobre, e, com isso, evitamos futuras quebras dos equipamentos obtendo deles uma confiabilidade no processo para o pré-despacho de carga sob as condições operacionais dos equipamentos a serem disponibilizados para o sistema;

Com a implantação das análises termografia mensalmente, conseguimos identificar precocemente as possíveis anomalias em equipamentos elétricos, onde foram realizadas conforme mostra a Figura 3.14 no gerador 1. Assim sendo, esta análise permitiu executar medições para garantir a confiabilidade dos equipamentos para o pré-despacho de carga para tomada de decisão.

Conseguiu-se reduzir as quantidades de falhas e, conseqüentemente, das paradas para manutenção com a implantação do programa TPM/MP no ambiente de produção da UTE Mauá, permitindo que se realizasse um diagnóstico real das condições de operações dos motores e geradores e equipamentos auxiliares, gerando-se informações estatísticas para melhorar o desempenho da UTE Mauá, na qual se obteve ganhos expressivos. Essa abordagem é apresentada como uma proposta desta tese, utilizando-se regras *fuzzy* construídas a partir dos resultados das análises de vibração, análise de óleo e análise de termografia.

Foi desenvolvida uma ferramenta computacional utilizando lógica *fuzzy* para o pré-despacho de carga conforme o estado técnico dos motores da UTE Mauá. Para isso, foram levantadas em conta as análises de vibrações, do óleo lubrificante e a termografia. Com base na classificação do estado dessas variáveis, se determinou o estado técnico dos motores conforme a regras *fuzzy* estabelecidas para tomada de decisão através da lógica *fuzzy* para o pré-despacho de carga sob as condições operacionais dos motores e geradores a serem disponibilizados para o sistema para a confiabilidade do estado técnico do motor.

Portanto, o objetivo geral do trabalho foi alcançado com o desenvolvimento de um modelo para o pré-despacho de carga baseado no gerenciamento de manutenção

utilizando lógica *fuzzy* aplicada em UTE Mauá, para assegurar maior competitividade garantindo as condições operacionais dos equipamentos para fornecimento de energia.

## 6.2 Propostas para Trabalhos Futuros

A partir dos resultados obtidos até o presente momento, podem-se considerar as seguintes pesquisas para o futuro:

- 1) Nova solução para o DE e para o DEA, contemplando o estado técnico do motor;
- 2) Utilizar os mesmos procedimentos apresentados nesta tese para a classificação do estado das máquinas e usar a técnica árvore de regressão para gerar a lista de unidades despacháveis;
- 3) Desenvolver esta mesma metodologia com outras técnicas computacionais para analisar sua eficiência, visando a tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

- AGHDAM, F. H. AND M. T. HAGH. "Security Constrained Unit Commitment (SCUC) formulation and its solving with Modified Imperialist Competitive Algorithm (MICA)." Journal of King Saud University - Engineering Sciences, 2017.
- AHN, J.; CHO, S.; CHUNG, D. H. **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, v. 190, p. 222-231, 2017. ISSN 0306-2619.
- ALAM, N., M. F. KARIM, S. A. ISLAM AND A. N. AHSAN. "A 0/1 mixed integer linear programming approach to establish an effective preventive maintenance policy for power plant." International Journal of Industrial and Systems Engineering 25(4): 478-498, 2017.
- ALASWAD, S. AND Y. XIANG. "A review on condition-based maintenance optimization models for stochastically deteriorating system." Reliability Engineering & System Safety 157: 54-63, 2017.
- ALSYOUF, I. **Improving reliability of repairable systems using preventive maintenance and time-between-failures monitoring.** European Journal of Industrial Engineering, v. 10, n. 5, p. 596-617, 2016. ISSN 1751-5254.
- ALCARAZ, J. L. G.; INIESTA, A. A.; MACÍAS, A. A. M. **Human factors related to success of total productive maintenance. Human Work Productivity: A Global Perspective,** p. 41, 2016. ISSN 1439874158.
- ARATO JR, A. **Manutenção preditiva usando análise de vibrações:** Barueri: Manole 2004.
- ARNOLD, B. C. **Pareto distribution.** Wiley Online Library, ISBN 1118445112, 2015
- Arya, R. "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, 2016.
- ATTRI, R. **An ism approach for modelling the enablers in the implementation of total productive maintenance (tpm).** International Journal of System Assurance Engineering and Management, v. 4, n. 4, p. 313-326, 2013. ISSN 0975-6809.
- AZADEH, A., S. M. ASADZADEH, N. SALEHI AND M. FIROOZI. "Condition-based maintenance effectiveness for series-parallel power generation system—A combined Markovian simulation model." Reliability Engineering & System Safety 142: 357-368, 2015.
- BAIDYA, R. AND S. K. GHOSH. "Model for a Predictive Maintenance System Effectiveness Using the Analytical Hierarchy Process as Analytical Tool." IFAC-PapersOnLine 48(3): 1463-1468, 2015.
- BALAJI, G., R. BALAMURUGAN AND L. LAKSHMINARASIMMAN. "Mathematical approach assisted differential evolution for generator maintenance scheduling." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 82: 508-518, 2016.

BANDEIRA, G.; ABREU, G.; GIANELLI, R. **Vibração e ruído em manutenção preditiva.** Universidade Estadual “Julio de Mesquita Filho”. Disponível em: [http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo\\_12.pdf](http://wwwp.feb.unesp.br/jcandido/manutencao/Grupo_12.pdf), acessado em junho de, 2015.

BARANI, F., M. MIRHOSSEINI, H. NEZAMABADI-POUR AND M. M. FARSANGI. "Unit commitment by an improved binary quantum GSA." *Applied Soft Computing* 60: 180-189, 2017.

BITTENCOURT, C. G. D. **Aplicação da lógica fuzzy em um sistema de pré-análise de oscilografias em unidades de geração.** 2011. Universidade Tecnológica Federal do Paraná

BRUNNER, F. J. JAPANISCHE ERFOLGSKONZEPTE. **Kaizen, kyp, lean production management, total productive maintenance shopfloor management, toyota production system, gd3-lean development.** Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017. ISBN 3446453946.

BOZORGI, A., M. M. PEDRAM AND G. R. YOUSEFI. "Unit Maintenance Scheduling: A robust model, based on fuzzy cost factors and peak loads." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 79: 142-149, 2016.

CHENG, Y.-S., M.-T. CHUANG, Y.-H. LIU, S.-C. WANG AND Z.-Z. YANG. "A particle swarm optimization based power dispatch algorithm with roulette wheel re-distribution mechanism for equality constraint." *Renewable Energy* 88: 58-72, 2016.

DAN, J. G.; ARNALDOS, J.; DARBRA, R. **Introduction of the human factor in the estimation of accident frequencies through fuzzy logic.** *Safety science*, v. 97, p. 134-143, 2017. ISSN 0925-7535.

DE ASSIS CABRAL, J.; LEGEY, L. F. L.; DE FREITAS CABRAL, M. V. **Electricity consumption forecasting in brazil: A spatial econometrics approach.** *Energy*, v. 126, p. 124-131, 2017. ISSN 0360-5442.

DE FIGUEIREDO, M. O.; TASINAFFO, P. M.; DIAS, L. **Modeling autonomous nonlinear dynamic systems using mean derivatives, fuzzy logic and genetic algorithms.** *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, v. 12, n. 5, p. 1721-1743, 2016.

DUBOIS, D.; PRADE, H. **Fundamentals of fuzzy sets.** Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 1461544297.

EYGELAAR, J., D. P. LÖTTER AND J. H. VAN VUUREN. "Generator maintenance scheduling based on the risk of power generating unit failure." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 95: 83-95, 2018.

FERREIRA, R.; FERREIRA, R.; MACEDO, H. **Fuzzy logic for estimating replacement items in inventory management.** *Telematics and Information Systems (EATIS), 2016 8th Euro American Conference on, 2016*, IEEE. p.1-4.

FROGER, A., M. GENDREAU, J. E. MENDOZA, É. PINSON AND L.-M. ROUSSEAU . "Maintenance scheduling in the electricity industry: A literature review." *European Journal of Operational Research* 251(3): 695-706, 2016.

GABRIEL FILHO, L. R. **Application of fuzzy logic for the evaluation of livestock slaughtering.** *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 4, p. 813-825, 2011. ISSN 0100-6916.

Gao, Q. and Y. Ge (2015). "Maintenance interval decision models for a system with failure interaction." *Journal of Manufacturing Systems* 36: 109-114.

GANGA, G. M. D.; CARPINETTI, L. C. R.; POLITANO, P. R. A fuzzy logic approach to supply chain performance management. *Gestão & Produção*, v. 18, n. 4, p. 755-774, 2011. ISSN 0104-530X.

GOETSCH, D. L.; DAVIS, S. B. **Quality management for organizational excellence.** pearson Upper Saddle River, NJ, 2014. ISBN 1292022337.

GOTTWALD, S. **Fuzzy sets and fuzzy logic: The foundations of application—from a mathematical point of view.** Springer-Verlag, 2013. ISBN 3322868125.

GOUDARZI, A., A. G. SWANSON, J. VAN COLLER AND P. SIANO. "Smart real-time scheduling of generating units in an electricity market considering environmental aspects and physical constraints of generators." *Applied Energy* 189: 667-696, 2017.

JAIN, A.; BHATTI, R.; SINGH, H. **Total productive maintenance (tpm) implementation practice: A literature review and directions.** *International Journal of Lean Six Sigma*, v. 5, n. 3, p. 293-323, 2014. ISSN 2040-4166.

JAGTAP, H. P. AND A. K. BEWOOR. "Development of an Algorithm for Identification and Confirmation of Fault in Thermal Power Plant Equipment Using Condition Monitoring Technique." *Procedia Engineering* 181: 690-697, 2017.

JAGTAP, H. P. AND A. K. BEWOOR. "Use of Analytic Hierarchy Process Methodology for Criticality Analysis of Thermal Power Plant Equipments." *Materials Today: Proceedings* 4(2, Part A): 1927-1936, 2017.

JASIULEWICZ-KACZMAREK, M. "SWOT analysis for Planned Maintenance strategy-a case study." *IFAC-PapersOnLine* 49(12): 674-679, 2016.

JENSEN, W. A. **Statistical Process Control for the FDA-Regulated Industry.** *Journal of Quality Technology*, v. 47, n. 2, p. 204-206, 2015. ISSN 0022-4065.

JIANG, J.-L.; CHANG, H.-C.; KUO, C.-C. **Operating Monitoring and Fault Types Classification for Motors through Vibration Signal.** *Computer, Consumer and Control (IS3C), 2016 International Symposium on*, 2016, IEEE. p.61-64.

JONES, A.; KAUFMANN, A.; ZIMMERMANN, H.-J. **Fuzzy sets theory and applications.** Springer Science & Business Media, 2012. ISBN 9400946821.

KAHRAMAN, C.; KAYMAK, U.; YAZICI, A. **Fuzzy Logic in Its 50th Year: new developments, directions and challenges.** Springer, 2016. ISBN 3319310933.

KUMAR, N. A non convex cost function based optimal load dispatch using tlbo algorithm. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, v. 10, n. 1, 2017. ISSN 1791-2377.

KUMARAPPAN, N. AND K. SURESH. "Combined SA PSO method for transmission constrained maintenance scheduling using leveled risk method." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 73: 1025-1034, 2015.

LARGUECH, S. **Fuzzy sliding mode control for turbocharged diesel engine.** *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, v. 138, n. 1, p. 011009, 2016. ISSN 0022-0434.

LINDSTRÖM, J. **Towards intelligent and sustainable production: Combining and integrating online predictive maintenance and continuous quality control.** *Procedia CIRP*, v. 63, p. 443-448, 2017. ISSN 2212-8271.

LIN, Z.-L., Y.-S. HUANG AND C.-C. FANG. **"Non-periodic preventive maintenance with reliability thresholds for complex repairable systems."** *Reliability Engineering & System Safety* 136: 145-156, 2015.

LOPEZ-PEREZ, D.; ANTONINO-DAVIU, J. **Application of infrared thermography to failure detection in industrial induction motors: case stories.** *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2017. ISSN 0093-9994.

MAATOUK, I., N. CHEBBO, I. JARKASS AND E. CHATELET. **"Maintenance Optimization using Combined Fuzzy Genetic Algorithm and Local Search."** *IFAC-PapersOnLine* 49(12): 757-762, 2016.

MA, H. **Multi-objective biogeography-based optimization for dynamic economic emission load dispatch considering plug-in electric vehicles charging.** *Energy*, v. 135, p. 101-111, 2017. ISSN 0360-5442.

MARÇAL, R. F.; SUSIN, A. A. **Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas.** *Revista Gestão Industrial*, v. 1, n. 2, 2005. ISSN 1808-0448.

MARQUES, J. I. **Fuzzy modeling in the prediction of climate indices and productive performance of quails kept in climate chamber.** *Engenharia Agrícola*, v. 36, n. 4, p. 604-612, 2016. ISSN 0100-6916.

MELCHOR-HERNÁNDEZ, C. L., F. RIVAS-DÁVALOS, S. MAXIMOV, V. H. CORIA AND J. L. GUARDADO. **"A model for optimizing maintenance policy for power equipment."** *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 68: 304-312, 2015.

MOUASSA, S., T. BOUKTIR AND A. SALHI. **"Ant lion optimizer for solving optimal reactive power dispatch problem in power systems."** *Engineering Science and Technology, an International Journal* 20(3): 885-895, 2017.

NADERI, E., A. AZIZIVAHED, H. NARIMANI, M. FATHI AND M. R. NARIMANI. **"A comprehensive study of practical economic dispatch problems by a new hybrid evolutionary algorithm."** *Applied Soft Computing*, 2017.

NELLES, O. **Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models.** *Springer Science & Business Media*, 2013. ISBN 3662043238.

NG SHIN MEI, R., M. H. SULAIMAN, Z. MUSTAFFA AND H. DANİYAL. **"Optimal reactive power dispatch solution by loss minimization using moth-flame optimization technique."** *Applied Soft Computing* 59: 210-222, 2017.

NUAEKA EW, K., P. ARTRIT, N. PHOLDEE AND S. BUREERAT. **"Optimal reactive power dispatch problem using a two-archive multi-objective grey wolf optimizer."** *Expert Systems with Applications* 87: 79-89, 2017.

PACKER, M. J. **The science of qualitative research.** Cambridge University Press, 2017. ISBN 1108417124.

PAIVA, M. **Aplicação de Sistemas Baseados em Regras Fuzzy para o Roteamento em Redes Ópticas.** 2008. Universidade Federal do Espírito Santo

Piasson, D., A. A. P. Bíscao, F. B. Leão and J. R. S. Mantovani (2016). "A new approach for reliability-centered maintenance programs in electric power distribution systems based on a multiobjective genetic algorithm." *Electric Power Systems Research* 137: 41-50.

PLESS, J.; FELL, H. BRIBES, **bureaucracies, and blackouts: Towards understanding how corruption at the firm level impacts electricity reliability.** *Resource and Energy Economics*, v. 47, p. 36-55, 2017. ISSN 0928-7655.

PRAJAPAT, N., A. TIWARI, X.-P. GAN, N. Z. INCE AND W. HUTABARAT. **Preventive Maintenance Scheduling Optimization: A Review of Applications for Power Plants.** *Advances in Through-life Engineering Services, Springer:* 397-415, 2017.

QIU, Q., L. CUI AND H. GAO. "Availability and maintenance modelling for systems subject to multiple failure modes." *Computers & Industrial Engineering* 108: 192-198, 2017.

RAZA, A. AND V. ULANSKY. "Modelling of Predictive Maintenance for a Periodically Inspected System." *Procedia CIRP* 59: 95-101, 2017.

SAKR, W. S., R. A. EL-SEHIEMY AND A. M. AZMY. "Adaptive differential evolution algorithm for efficient reactive power management." *Applied Soft Computing* 53: 336-351, 2017.

SILVA, S. G. **Sistema interligado nacional: Análise das penalizações impostas às transmissoras com foco na aplicação da parcela variável,** 2016.

TANSCHKEIT, R. **Sistemas fuzzy.** Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

YIN, R. K. **Case study research: Design and methods.** Sage publications, 2013 a. ISBN 1483322246.

ZADEH, L. A. **Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes.** *IEEE Transactions on systems, Man, and Cybernetics*, n. 1, p. 28-44, 1973. ISSN 0018-9472.

ZHANG, Y., Y. ZHANG, F. WEN, C. Y. CHUNG, C.-L. TSENG, X. ZHANG, F. ZENG AND Y. YUAN. "A fuzzy Petri net based approach for fault diagnosis in power systems considering temporal constraints." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 78: 215-224, 2016.

ZOGHI, M. **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*, v. 68, p. 986-996, 2017. ISSN 1364-0321.

ZURN, H. H., D. TENFEN, J. G. ROLIM, A. RICHTER AND I. HAUER. "Electrical energy demand efficiency efforts in Brazil, past, lessons learned, present and future: A critical review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 67: 1081-1086, 2017.