



UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA E GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA

André Luiz de Almeida Neves

Leonam de Souza Cordeiro

ANÁLISE DE FALHAS EM GRUPOS MOTO-GERADORES

Santarém – Pará

2019

André Luiz de Almeida Neves

Leonam de Souza Cordeiro

ANÁLISE DE FALHAS EM GRUPOS MOTO-GERADORES

Trabalho de conclusão de curso submetido à Banca Examinadora do Programa de Ciência e Tecnologia do Instituto de Engenharia e Geociências da Universidade Federal do Oeste do Pará como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientadora: Prof.^a Dra. Eng^a. Paula Renatha Nunes da Silva

Santarém – Pará

2019

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/ UFOPA**

C794a Cordeiro, Leonan de Souza
Análise de falhas em grupos moto-geradores./ Leonan de Souza Cordeiro
e André Luiz de Almeida Neves – Santarém, 2019.
83 p.: il.
Inclui bibliografias.

Orientadora: Paula Renatha Nunes da Silva
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do
Oeste do Pará, Instituto de Engenharia e Geociências, Curso Bacharelado em
Ciência e Tecnologia.

1. Grupo moto-gerador. 2. Motor diesel. 3. Energia elétrica. I. Neves, André
Luiz de Almeida, II. Silva, Paula Renatha Nunes da, *orient.* III. Título.

CDD: 23 ed. 621.313

André Luiz de Almeida Neves

Leonam de Souza Cordeiro

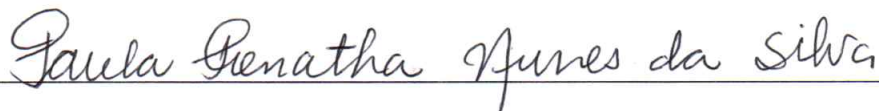
ANÁLISE DE FALHAS EM GRUPOS MOTO-GERADORES

Trabalho de conclusão de curso submetido à Banca Examinadora do Programa de Ciência e Tecnologia do Instituto de Engenharia e Geociências da Universidade Federal do Oeste do Pará como requisito para obtenção do grau de Bacharel em Ciência e Tecnologia.

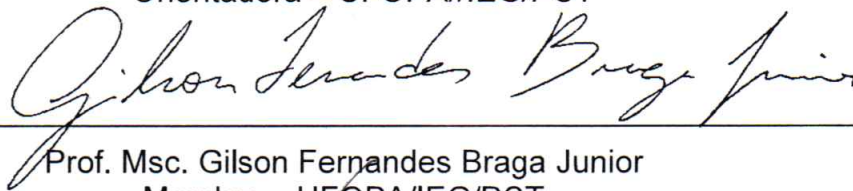
DATA DA AVALIAÇÃO: 05 / 04 / 2019

CONCEITO: 8.9

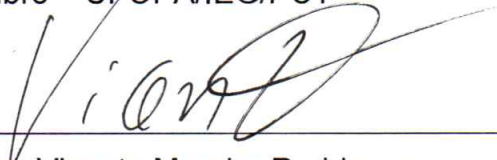
BANCA EXAMINADORA



Prof.^a Dra. Eng.^a. Paula Renatha Nunes da Silva
Orientadora – UFOPA/IEG/PCT



Prof. Msc. Gilson Fernandes Braga Junior
Membro – UFOPA/IEG/PCT



Prof. Msc. Vicente Moreira Rodrigues
Membro – UFOPA/IEG/PCT

AGRADECIMENTOS

Agradecemos primeiramente a Deus, pela força e sabedoria a nós concedidas todos os dias, nos guiando e iluminando em nossa trajetória acadêmica, e por toda as nossas vidas.

Eu, André, agradeço a minha família, pela ajuda e apoio em todos os momentos.

Eu, Leonam, agradeço a minha mãe Mônica Cordeiro, pois, tudo o que sou devo a ela, a minha irmã Irlen Cordeiro, a minhas avós, tios, sobrinhos, primos e minha namorada Thalia, pessoas que sempre me ajudaram e compreenderam nos momentos difíceis.

À Professora Paula Renatha Nunes da Silva, por sua orientação e paciência, extremamente importantes para a realização desse trabalho de conclusão de curso.

À banca examinadora, representada pelos professores Gilson Fernandes Braga Junior e Vicente Moreira Rodrigues, pelas contribuições significativas por eles dadas, enriquecendo o conteúdo deste trabalho.

Aos nossos amigos de curso, Acylino, Adebraldo, Gilberson, João Pedro, Joedson, Lucas, Luís, Mailla, Marcelo, Thayná, Túlio e Yahgo, por todo apoio e incentivo.

À empresa ELETROMOTORES LTDA, especialmente ao Sr. Tony, por nos abrir as portas da desta empresa, permitindo nosso acesso aos equipamentos e pela verdadeira aula que nos proporcionou sobre Grupos Geradores.

Ao SENAI – Santarém, representado pelo seu diretor, Sr. Peter Rasera, que foi muito solícito, nos ajudando na coleta das informações necessárias para compor este trabalho.

A todos os professores do curso, fundamentais na nossa formação acadêmica, dos quais, tivemos a honra de sermos alunos.

RESUMO

A busca por fontes energéticas devido a crises no setor elétrico brasileiro impulsionou o desenvolvimento, pesquisas e uso de Grupos Moto-Geradores (GMGs), como fonte de energia elétrica autônoma e independente. Sociedades consolidadas e em constante evolução, utilizam a eletricidade como fonte de energia para milhares de equipamentos elétricos, desempenhando diversas atividades fortalecendo sua estrutura econômica e social. Nesse contexto, GMGs desempenham extrema relevância, pois, seu uso permite a conversão eletromecânica, gerando tensão em seus terminais, produzindo energia elétrica. Ambientes onde a interrupção de energia elétrica causaria risco de vida ou prejuízos econômicos, há uma maior utilização de GMGs. O entendimento das Leis que regem o seu funcionamento, em conjunto com outros conhecimentos, propiciou muitas inovações tecnológicas no âmbito de motores e geradores elétricos ao longo do tempo e, proporcionou a construção de dispositivos e equipamentos mais sofisticados. Esses equipamentos são submetidos a esforços internos e externos, no qual ficam suscetíveis a falhas. Essas falhas devem ser sanadas, pois, podem causar a inutilização permanente dessas máquinas. Sendo assim, o estudo e implementação de métodos capazes de diagnosticar falhas no processo de monitoração e controle de GMGs é de extrema importância. Este trabalho aplicou a técnica de Análise de Árvore de Falhas, relacionando causas e efeitos das principais falhas que ocorrem no funcionamento de GMGs, tanto de ordem mecânica como de ordem elétrica, a fim de localizar e solucionar tais falhas de maneira prática e rápida.

Palavras-chave: Grupo Moto-Gerador, falhas, gerador, motor diesel, energia elétrica.

ABSTRACT

The search for energy sources due to crises in the Brazilian electric sector boosted the development, research and use of Moto-Generator Groups (GMGs), as a source of autonomous and independent electricity. Consolidated and constantly evolving companies use electricity as a source of energy for thousands of electrical equipment, carrying out various activities, strengthening their economic and social structure. In this context, GMGs play an extremely important role, since their use allows the electromechanical conversion, generating voltage at their terminals, producing electric energy. Environments where the interruption of electric power would cause life-threatening or economic losses, there is a greater use of GMGs. The understanding of the Laws governing its operation, together with other knowledge, has provided many technological innovations in the field of electric motors and generators over time and has provided the construction of more sophisticated devices and equipment. These equipment are subjected to internal and external stresses, in which they are susceptible to failures. These faults should be remedied as they may cause the permanent destruction of these machines. Therefore, the study and implementation of methods capable of diagnosing failures in the GMGs monitoring and control process is of extreme importance. This work applied the Fault Tree Analysis technique, relating causes and effects of the main faults that occur in the operation of GMGs, both of mechanical and electrical order, in order to locate and solve such faults in a practical and fast way.

Keywords: Group Moto-Generator, faults, generator, diesel engine, electric power.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

figura 1 - Grupo Moto-Gerador (GMG)	21
figura 2 - Formatação básica de um motor diesel	25
figura 3 - (a) Bloco de cilindros; (b) Cilindros (tipo camisa úmida)	27
figura 4 - (a) Exemplo de um pistão; (b) Anéis de segmento do pistão	28
figura 5 - (a) Biela de motor diesel; (b) bronzinas.....	29
figura 6 - Árvore de manivelas ou virabrequim	30
figura 7 - Volante do motor	30
figura 8 - Cabeçote do motor.....	31
figura 9 - (a) Eixos de camos de comando de válvulas; (b) Válvulas	32
figura 10 - Câster de óleo	33
figura 11 - Circuito de combustível.....	33
figura 12 - Filtros de combustível	34
figura 13 - Vela incandescente	35
figura 14 - Circulação do óleo lubrificante	35
figura 15 - (a) Bomba de óleo (o tipo com engrenagens é o mais utilizado); (b) Filtro do óleo lubrificante	36
figura 16 - Radiador e ventoinha	37
figura 17 - Turbocompressor	38
figura 18 - Filtro de ar	39
figura 19 - Curso do pistão	41
figura 20 - Os 4 tempos do motor de ignição por compressão	42
figura 21 - Representação esquemática de um campo magnético criado pelo fluxo de corrente em um condutor	46
figura 22 - Seção transversal de um gerador de 4 pólos.....	47
figura 23 - Partes integrantes um gerador síncrono WEG Linha AG10.....	52
figura 24 - Estator de um Gerador Síncrono Trifásico	53
figura 25 - Rotores com seis pólos salientes de uma máquina síncrona.....	53
figura 26 - Rotor de 4 pólos de um gerador e ventoinha	54
figura 27 - Rotores de pólos lisos.....	54
figura 28 - Rotores de pólos lisos, vistas frontal e lateral	54

figura 29 - (a) Rotor de oito pólos salientes; (b) Único pólo saliente de um rotor, sem os enrolamentos de campo; (c) Um único polo saliente, com os enrolamentos de campo instalados	55
figura 30 - Pólo saliente apresentando as barras de enrolamento amortecedor	55
figura 31 - Enrolamento dos pólos de um rotor	56
figura 32 - Estator do conjunto da excitatriz	57
figura 33 - Estator de um gerador com seu respectivo conjunto de excitatriz	58
figura 34 - Rotor de 4 pólos com seu ventoinha e excitatriz, rotor da excitatriz acoplado, estator da excitatriz (ao lado)	59
figura 35 - Sistema de diagnóstico na monitoração do funcionamento de processos	61
figura 36 - Modelo de diagrama de Ishikawa.....	66
figura 37 - Diagnóstico de falhas usando métodos de inferência: (a) redes causais e (b) árvores de sintomas de falhas	67
figura 38 - Imagem ilustrativa de um módulo USCA ST2130	67
figura 39 - Estrutura básica para criação de uma FTA.....	71
figura 40 - Portas lógicas "E" e "OU"	72
figura 41 - Representação de eventos	72
figura 42 - Árvore de falha mecânica do motor diesel estacionário	79
figura 43 - Árvore de falha do gerador síncrono, perda de excitação.....	80
figura 44 - Árvore de falha do gerador síncrono, sub-Árvore	81

LISTA DE SIGLAS

ANSI – American National Standard Institute

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

CV – Cavalo Vapor

e – evento

ETA – Event Tree Analysis

f – falha

FDI – Fault Detection Isolation

FTA – Fault Tree Analysis

GC – Geração Centralizada

GD – Geração Distribuída

GMG – Grupo Moto-Gerador

IEC – International Electrotechnical Commission's

MVA – Mega Volt Ampère

n_f – número de falhas

n_s – número de sintomas

PMI – Ponto Morto Inferior

PMS – Ponto Morto Superior

rpm – rotações por minuto

s – sucesso

USCA – Unidade de Supervisão de Corrente Alternada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Descrição do Problema	13
1.2	Objetivos	15
1.3	Justificativa	16
1.4	Metodologia	17
1.5	Introdução a manutenção	18
2	GRUPO MOTO-GERADOR	20
2.1	Componentes e sistemas do motor diesel	22
2.2	Requisitos desejados em um motor diesel	23
2.3	Principais características do óleo diesel	23
2.4	Componentes e sistemas do motor diesel	25
2.4.1	Componentes	25
2.4.2	Sistemas	33
2.5	Funcionamento do motor diesel	39
2.5.1	Tempos e ciclos de um motor diesel	41
2.5.2	Cilindrada e Taxa de compressão	43
2.6	Máquinas elétricas	44
2.6.1	Gerador síncrono (Alternador)	45
2.6.2	Partes construtivas do gerador	51
3	MÉTODOS TRADICIONAIS DE DETECÇÃO E DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS	60
3.1	Definições de diagnósticos de falhas	60
3.2	Técnicas de diagnósticos de falhas aplicadas a GMGs	64
3.3	Análise de árvore de falhas (FTA)	69
4	MÉTODO FTA APLICADO AO DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM GMGs	74
4.1	Principais Falhas em Grupo Moto-Geradores	74
4.1.1	Falhas no motor diesel	74
4.1.2	Falhas no gerador síncrono	75

4.2	Aplicação da FTA.....	76
4.2.1	FTA aplicada ao motor diesel	76
4.2.2	FTA aplicada ao gerador síncrono.....	77
5	CONCLUSÃO	82
	REFERÊNCIAS	83

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do Problema

Atualmente, a geração de eletricidade advém de usinas hidrelétricas, termoelétricas, sistemas solares e eólicos. O fornecimento mais comum de eletricidade, via concessionárias brasileiras, suprida por Geração Centralizada (GC), é sobrecarregado pela grande demanda consumidora e, em paralelo a geração de eletricidade, buscou-se a implantação e operação de Grupo Moto-Geradores. Essa busca, visa sempre obter maior segurança, autonomia e confiabilidade na obtenção de eletricidade atuando de maneira emergencial ou ininterrupta.

Diante desse cenário, outras fontes energéticas foram surgindo de forma alternativa, e criou-se assim, centrais de Geração Distribuída (GD), que são sistemas isolados de geração de energia elétrica, consumida nas proximidades do local onde a eletricidade é gerada. Ambientes nos quais a interrupção ou oscilações de eletricidade causariam risco de vida ou perdas econômicas, como em hospitais, indústrias e aeroportos são os locais que geralmente percebe-se a utilização de GMGs.

A alta demanda em determinados períodos do dia, inviabilidade da implantação de linhas de transmissão de energia a locais remotos, crises energéticas climatológicas e a problemática de impasses ambientais são fatores que contribuiram para governo e sociedade de maneira geral buscassem o uso de Grupos Geradores. Esses fatores favoreceram a existência de grandes empresas multinacionais, fabricando e abastecendo o mercado brasileiro com GMGs. Conseqüentemente, houve a necessidade de Grupos Geradores operando por mais tempo sem as preocupantes interrupções. Contudo, durante as condições normais de operação, esses equipamentos são submetidos a esforços diversos, internos e externos, que devem ser considerados no desenvolvimento de projeto, com especificações de instalação.

O equipamento GMG possui motor (diesel, gasolina ou gás) de reconhecida performance, acoplado a um gerador de moderna tecnologia montada sobre uma base metálica, com acionamento manual ou automático contendo proteção opcional contra intempéries, possuindo ou não carenagem silenciada tanto em unidades móveis ou estacionárias. GMGs são projetados para atuarem até mesmo sob condições adversas, onde seus componentes são afetados por distúrbios de origem, térmicas,

elétricas e mecânicas que podem atuar juntas ou separadamente, agindo de diversas maneiras em seu rendimento, confiabilidade e vida útil.

A inoperância de GMGs, que fazem parte de linhas de produção com alimentação de cargas, podem causar prejuízos técnicos e financeiros. Falhas que ocorrem por operação e manutenção inadequadas, envelhecimento de componentes elétricos e mecânicos, juntamente com especificações incorretas são geralmente responsáveis pela falha no Grupo Gerador. Uma falha, geralmente provoca queda de eficiência e, em caso mais grave uma parada do equipamento, portanto, a detecção, avaliação e gerenciamento de falhas em GMGs têm importância, pois visa um monitoramento baseado numa manutenção preditiva, reconhecendo as falhas em estágios iniciais, atuando principalmente em setores que demandam grandes potências.

Ter ciência de como se opera um circuito, motor, gerador, ou algum equipamento elétrico, não incide em simplesmente liga-lo a rede elétrica, pois, também é preciso saber as características internas de cada tipo de equipamento, assim como seus procedimentos de funcionamento e as especificações de segurança para cada tipo de serviço. Também se deve saber as normas da concessionária de energia elétrica local, para que este processo de instalação tenha qualidade SILVA, (2013) apud AFFONSO, (2017).

Um significativo número de pesquisas, tem se dedicado ao desenvolvimento de metodologias computacionais, as quais utilizam análises de confiabilidade em sistemas, técnicas numéricas e analíticas, para obter-se um sistema de diagnóstico inteligente, que seja capaz de detectar uma vasta quantidade de falhas em Grupos Geradores. O desenvolvimento de tais estudos que faz a detecção, diagnóstico, isolamento e localização de falhas melhoram a eficiência de procedimentos operacionais, estimando a previsibilidade de falhas em tempo real, minimizando riscos.

Os GMGs, utilizam o princípio da conversão eletromecânica e são máquinas rotativas, nas quais as tensões podem ser geradas em enrolamentos ou grupos de bobinas através de três formas básicas: (1) Rotação mecânica dos enrolamentos num campo magnético; (2) Campo magnético girante atravessando um enrolamento; (3)

Variação da relutância do circuito magnético devido a rotação de uma das partes do circuito GALDINO, (2011).

A descoberta, por Michael Faraday em 1831, que o movimento entre campo magnético e um condutor de eletricidade gerava tensão, ou seja, que um campo magnético girante pode produzir corrente, tal fato, surpreendeu a todos e criou-se assim os princípios básicos do eletromagnetismo: indução eletromagnética e força eletromagnética. Nesse contexto, a compreensão desses fenômenos propiciou a idealização e posterior construção e a correta instalação de equipamentos e dispositivos capazes de propiciar o funcionamento de qualquer motor e gerador de eletricidade.

Sistemas eletromecânicos que usam campos magnéticos como meio de conversão apresentam forças e conjugados onde a maioria dos dispositivos contém material ferromagnético. No entanto conforme UMANS, (2014), “Técnicas de cálculo detalhado e localizado de forças que atuam sobre os materiais magnéticos são extremamente complexas e exigem conhecimento minucioso da distribuição dos campos por toda a estrutura. Felizmente, a maioria dos dispositivos de conversão eletromecânica de energia é construída com estruturas rígidas indeformáveis. O desempenho desses dispositivos é determinado normalmente pela força líquida, ou conjugado, que atua sobre o componente móvel. Raramente é necessário calcular os detalhes de distribuição interna das forças”.

Fica evidente, que o entendimento do princípio de funcionamento, dos principais sistemas que envolvem GMGs, abrange conhecimento de como o processo de operação pode falhar. Portanto, deve-se avaliar na prática a condição do conjunto motor e gerador, monitorando todas as variáveis de interesse para a formulação de ferramentas capazes de identificar falhas e comparar o resultado, com dados previamente adquiridos e definidos como estado normal.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é identificar as principais falhas em Grupo Moto- Geradores utilizando a técnica de Análise de Árvore de Falhas (FTA - *Fault Tree Analysis*) que permita o diagnóstico de falhas, relacionando suas causas e efeitos.

Os objetivos específicos:

- i) descrever os sistemas e componentes que constituem o motor diesel estacionário de um grupo gerador;
- ii) descrever o princípio de funcionamento do motor diesel;
- iii) descrever como as Leis Físicas que regem o funcionamento do gerador, responsável pela conversão eletromagnética, identificando suas partes construtivas com seus respectivos componentes e dispositivos;
- iv) buscar em estudos bibliográficos algumas técnicas de detecção de falhas avaliando qual método se adequa melhor a relação causa-efeito provocada por anomalias em GMGs;
- v) aplicar a FTA em GMGs capaz de diagnosticar falhas simples afim de dirimi-las.

1.3 Justificativa

A justificativa inicial para o desenvolvimento deste trabalho surgiu a partir de observações feitas a estudos bibliográficos sobre as fontes de eletricidade no município de Santarém, e como a utilização de geradores tornaram-se fontes complementares diante dos problemas de fornecimento de energia elétrica.

Percebeu-se a grande utilização de GMGs, neste município de Santarém, tanto em setores privados como em setores de ordem pública. Contudo, o acompanhamento e monitoramento do processo de instalação, requer conhecimento especializado, fornecendo uma operação mais confiável e com suprimento de potência, adequado às cargas

Aspectos de dimensionamento, alimentação da carga e comportamento da fonte, ou seja, como o gerador comporta-se em condições de operação, requer correta leitura de todas as variáveis que fazem parte do sistema elétrico de potência e mecânico vinculadas a GMGs. Problemas de curto-circuito nos enrolamentos do gerador levam a sobreaquecimento onde recursos simples de detecção não localizam essas falhas de forma fácil. Anomalias de subexcitação ou sobre-excitação podem ser provenientes tanto de problemas mecânicos ou elétricos.

Diante deste cenário resolveu-se avaliar as causas e efeitos relacionadas as principais falhas de geradores de eletricidade. Conhecendo toda dinâmica do sistema e verificando como componentes atuam de forma conjunta, seguindo uma metodologia hierarquizada para a identificação de falhas em seu estágio inicial, evitando em casos graves, a perda definitiva da máquina. Grandes paradas também, acumulariam outros prejuízos. Portanto, é relevante a aplicação uma técnica de diagnóstico dessas falhas, afim de auxiliar de maneira prática aqueles que trabalham com Grupo Moto Geradores.

1.4 Metodologia

Por meio de pesquisas bibliográficas, buscou-se a fundamentação necessária, para reunir as ideias e conhecimentos de outros autores, que seguiram em uma linha de estudos, sobre os defeitos em Grupos Geradores. Tendo conhecimento destas ocorrências, buscamos aprofundamento nos princípios de funcionamento dos componentes que formam o Grupo Gerador.

Com intuito de mostrar e explicar, as leis físicas que regem, a maneira como o gerador (alternador) efetua a geração de eletricidade e como o motor diesel opera. Fomos em busca de informações técnicas e imagens, em uma empresa especializada na montagem, rebobinagem de geradores e motores elétricos, e aluguel de GMG. Para observar o funcionamento desses equipamentos no dia a dia, observando seus modos de operação, e situações que possam provocar, algum dado, imediato ou futuro nos componentes e conseqüentemente no equipamento.

Além disso, tivemos acesso a uma instituição de ensino técnico e profissional, presente em praticamente todo o território nacional. Também, com o intuito de colher informações e imagens, fornecendo subsídios técnicos a este trabalho. Logo, em posse desses conteúdos, foi possível averiguar com clareza, quais o principais motivos e causas, de danos ocorridos em Grupos Geradores.

A partir de então, decidir a técnica, dentre as tradicionais existentes, que melhor nos atendesse. A técnica de Análise da Árvore de Falhas (FTA), foi a escolhida. Pois, a bibliografia nos mostrou, que se trata de uma técnica que frisa os componentes, o que permite chegar aos caminhos, que levam até a falha principal, de maneira mais específica.

1.5 Introdução a manutenção

Quando falamos em manutenção, devemos ter em mente que, trata-se de um item importantíssimo para toda e qualquer empresa, que preze por sua qualidade de produtos ou serviços prestados. Seja este empreendimento constituído por veículo para a venda de lanches, ou até mesmo um grande conglomerado tecnológico, a manutenção dos equipamentos e seus componentes devem estar dia, afim de se evitar infortúnios e contratemplos, que prejudiquem a produtividade e eficiência dos negócios. A seguir temos os tipos mais conhecidos de manutenção.

Manutenção Preventiva: se uma empresa apresentar em sua linha produtiva, maquinário complexo, que não podem parar de operar, pois, ocasionará prejuízos. Logicamente, não é viável esperar a ocorrência de uma falha, para assim, entrar com medidas de manutenção. Sem dúvida, a melhor medida é a prevenção. Por exemplo, um veículo que tenha sistema de arrefecimento a água, e para manter a funcionalidade do sistema, é necessário verificar constantemente o nível de água, evitando assim, o superaquecimento do motor. Esta ação reduz a possibilidade de problemas nesse sistema. Portanto, podemos classificar este tipo de manutenção, que se antecipa à falha, como uma manutenção preventiva.

Manutenção Preditiva: conforme comentamos anteriormente, se um maquinário ou equipamento, apresenta alguma falha que impeça seu correto funcionamento, obviamente prejuízos serão contabilizados. Porém, a medida que essas máquinas apresentam algum problema, costumam dar sinais antes de falharem de forma concreta. Sabendo disso, os responsáveis pela manutenção devem monitorar esses sinais, que são essenciais para que, medidas de precaução sejam adotadas em tempo hábil. Este tipo de manutenção é uma forma mais elaborada da manutenção preventiva. E tem como foco, os sinais indicativos que o equipamento emite quando não está operando adequadamente.

Manutenção Corretiva: trata-se da forma mais óbvia de manutenção e também a mais primária, seguindo a lógica de; corrigir o defeito no equipamento, assim que ele acontece. Porém, trata-se de um tipo de manutenção que deve ser utilizada apenas em casos emergenciais, pois, se aplicada em uma empresa de porte, que tenha equipamentos que não podem parar de funcionar, certamente irá trazer prejuízos. Portanto, a manutenção corretiva deve ser utilizada para complementar as demais

formas de manutenção. Utilizar-se somente da manutenção corretiva, pode reduzir significativamente a vida útil dos equipamentos

2 GRUPO MOTO-GERADOR

Os grupos geradores são utilizados como fonte principal ou como fonte auxiliar de energia elétrica, pois geram energia confiável e limpa (dependendo do gerador), ou seja, podem ser utilizados como um complemento há um sistema já existente de rede elétrica ou como uma fonte de energia “fora da rede”, dependendo das necessidades do usuário, por exemplo, quando a rede elétrica é inacessível durante uma queda de energia, o gerador pode fornecer energia para as necessidades de uma localidade, PEREIRA, (2013).

Sistemas considerados de pequeno porte são sistemas até 1 ou 1,2 MVA e os sistemas ditos de médio porte são sistemas de 1 a 4 ou 5 MVA (este não é um conceito rígido, na verdade é tomado de análises empíricas, pois dependendo da situação de disponibilidade monetária para instalação, disponibilidade de acesso a combustível ou mesmo localização pode-se viabilizar ou inviabilizar a implantação de Motor Geradores), FIGUEIREDO, (2009).

Acionados por motor a explosão estes equipamentos se diferenciam pela queima direta de combustível sem a necessidade de utilização de caldeiras. Podem ser implantados em sistemas de médio e grande porte e utilizam fluidos (gás natural, óleo diesel, biogás e etc.), FIGUEIREDO, (2009).

São muitos os fatores a serem considerados antes da aquisição de um equipamento adequado. Esse equipamento pode ser usado de forma isolado ou em paralelo com outros grupos geradores podendo formar usinas de até 30 MVA. Nesse sentido, para podermos proceder na implantação de um GMG, além das características construtivas, de desempenho e carga que o GMG deverá suprir, deve-se buscar um detalhado planejamento que inclui:

- Análise do perfil do consumidor;
- Condições e localização da instalação do GMG;
- Disponibilidade e custo de transporte do combustível a ser utilizado;
- Sistema de Supervisão e Controle.

Grupo Moto Gerador é um equipamento acionado por motor de combustão a diesel, gasolina ou gás acoplado a um gerador montado sobre base metálica. Em escala industrial, fornecedores de grupo moto-geradores tendem a padronizar os seus produtos, porém a variabilidade de ambientes e aplicações não permite tal prática forçando fornecedores a atenderem requisitos e características especiais a

consumidores que solicitam sob encomenda tal equipamento. De forma mais específica pode-se elaborar algumas perguntas para correto dimensionamento de um GMG. Por meio da figura 1 abaixo, permite-se, ter uma ideia básica da configuração de um GMG.

Segundo PEREIRA, (2009), perguntas devem ser respondidas, tais como:

- Qual tipo de carga? (iluminação, motores de indução, fornos, canteiro de obras, retificadores de corrente, equipamento de telecomunicações);
- Qual local do serviço? (mar, terra, ambientes com atmosfera explosiva);
- Quais características do local? (temperatura, altitude, humidade do ar, nível de partículas em suspensão);
- Qual regime de operação? (horas de operação dia)
- Quais riscos envolvidos no caso de falha e interrupção de energia do equipamento?

figura 1 - Grupo Moto-Gerador (GMG)



Fonte: autores (2019)

Um GMG a Diesel, por exemplo é composto de:

- Motor diesel estacionário;
- Base horizontal (chassi);
- Radiador;
- Gerador (Alternador);

- Bateria;
- Painel manual de partida com frequencímetro;
- Voltímetro;
- Disjuntor;
- USCA - Unidade de Supervisão de Corrente Alternada (definição pág. 53)
- Ohmímetro;
- Medidor de temperaturas;
- Tanque de combustível;
- Filtro de ar;
- Cabine acústica com espuma anti-chamas

2.1 Componentes e sistemas do motor diesel

O motor diesel

Segundo Leve, METAL LEVE, (2016), motor se traduz em “Máquina destinada a converter qualquer forma de energia (térmica, elétrica, hidráulica, etc.) em energia mecânica. No caso dos motores de combustão interna, há transformação de energia térmica em energia mecânica”. Assim, motores são máquinas rotativas destinadas a prover energia mecânica.

Idealizados no século XIX e aprimorados no século XX, motores à combustão são muito mais eficientes do que as máquinas a vapor e bombas de calor usados nas fábricas e usinas da época. Sua dinâmica de funcionamento é dividida, em 4 tempos, conhecido como ciclo Otto. Nome usado devido ao seu criador Nikolaus August Otto, fundamentava-se na autoignição de combustível com ar submetido à alta pressão em que energia química é transformada em energia mecânica. Visando desenvolver trabalhos pesados sua aplicabilidade é encontrada em caminhões, guindastes, elevadores, trens, ônibus etc. Assim, motores diesel são acoplados a um alternador (gerador de corrente alternada), dão origem ao que chamamos de Grupo Moto- Gerador. Neste caso, os motores a diesel são chamados de motores estacionários, atuando como máquina primária, mantendo uma rotação contínua, e gerando potência mecânica para o acionamento do alternador.

De maneira geral existem dois tipos básicos de motores: os que necessitam de gasolina, álcool ou gás natural, para sua locomoção, também chamados de motores de ciclo Otto, e os motores diesel, que consomem óleo diesel.

2.2 Requisitos desejados em um motor diesel

Conforme relata RACHE, (2004), as características mais relevantes no que tange aos aspectos construtivos e aplicativos dos motores diesel na atualidade são:

- Menor peso por Cavalos Vapor (CV).
- Menor consumo de combustível.
- Maior elasticidade, dentro do seu campo de aplicação.
- Durabilidade e robustez.
- Baixo custo de fabricação.
- Perigo de incêndio reduzido.
- Baixo índice de emissões e poluentes.

2.3 Principais características do óleo diesel

Apesar do óleo diesel não ser listado como um componente de um Grupo Gerador, seu entendimento é essencial, pois, se suas propriedades químicas não estiverem de acordo com os padrões operacionais necessários para o devido desempenho o motor diesel, problemas serão encontrados.

Sendo assim, o óleo diesel é tido como um produto que sobra da destilação do petróleo, possuindo uma densidade e viscosidade elevada, por isso, é qualificado como óleo. Pelo fato de sua queima proporcionar energia térmica, podendo ser utilizada na forma de energia dos gases de expansão dos gases de combustão e conseqüentemente aproveitada como energia mecânica. Ao se avaliar a capacidade que um combustível tem em produzir energia térmica por meio de sua combustão, alguns índices obtidos por meio de testes devem ser levados em consideração, e para o óleo diesel, esses índices são:

- Poder calorífico.
- Número de cetano.
- Viscosidade.

- Teor de pureza
- Baixo teor de enxofre
- Ponto de névoa

Poder calorífico: esta característica diz respeito a capacidade que uma determinada quantidade de combustível tem de produzir calor durante sua queima. Assim, quanto maior for o poder calorífico do combustível, maior será a quantidade de calor que sua queima irá produzir, gerando assim, energia térmica. Para produzir potência necessária ao motor, é importante que o combustível tenha poder calorífico elevado.

Número de cetano: por meio de ensaios e testes é possível analisar o índice de cetano de um dado combustível. Tal análise, tem por intuito de averiguar a tendência que o respectivo combustível tem de se alto-inflamar de maneira espontânea quando submetido a uma determinada temperatura. Logo, quanto maior for o número de cetano, maior será sua inflamabilidade. Os ensaios geralmente são feitos em motores monocilíndricos especiais.

Viscosidade: como a fonte principal de combustível de um GMG de grande potência é o óleo Diesel, portanto, é muito conveniente dar atenção a essa propriedade muito presente nos óleos, a viscosidade. É a propriedade que um líquido apresenta ao resistir ao deslocamento em relação a si próprio. Portanto, quanto maior for a viscosidade, maior será a atração das partículas do óleo, umas pelas outras, fazendo com que seu atrito interno também seja maior.

Além do mais, a viscosidade vai depender da temperatura na qual o teste foi realizado. A capacidade de pulverização e de formar uma boa mistura ar-óleo para o diesel, depende diretamente de sua viscosidade, propriedade da qual dependerá uma boa combustão. Para ser mais claro, com a diminuição da viscosidade há uma melhora na pulverização e na mistura ar-óleo. Em contraponto, ocorre uma piora nas condições de lubrificação dos componentes da bomba de combustível (que será detalhada mais adiante), ocasionando desgaste prematuro da mesma. Logo, um ponto de equilíbrio da viscosidade, deve ser encontrado a fim de satisfazer às necessidades operacionais do motor diesel.

Teor de pureza: como em qualquer outro combustível de motores a combustão interna, o óleo diesel não deve apresentar impurezas ou partículas estranhas como;

água, poeira, etc. Ou seja, livre de matérias que podem prejudicar sua eficiência dentro do motor, e provocar o entupimento dos orifícios das bombas e bicos injetores.

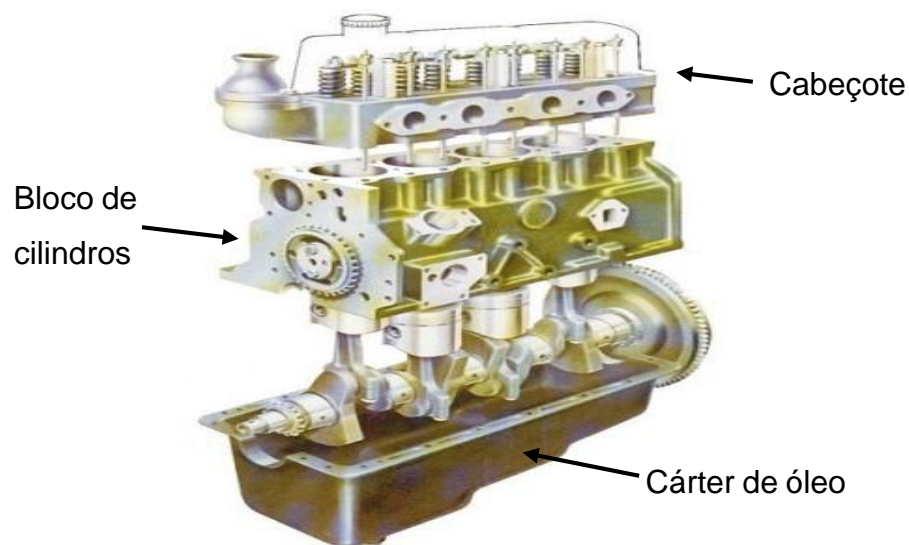
Baixo teor de enxofre: o teor de enxofre do óleo diesel não deve apresentar um valor elevado, pois, o mesmo pode ocasionar corrosões nos componentes, além, de ser muito poluidor para o ambiente.

Ponto de névoa: é caracterizado por uma temperatura que abaixo da qual a parafina começa a se separar.

2.4 Componentes e sistemas do motor diesel

Em termos de estrutura, motor diesel tem como formatação básica; o bloco de cilindros, o cárter onde se deposita o óleo lubrificante, e o cabeçote do motor, a figura 2 ilustra bem esta configuração.

figura 2 - Formatação básica de um motor diesel



Fonte: Varella & Santos (2010)

2.4.1 Componentes

Abaixo seguem listados, os componentes essenciais que integram um motor diesel, além dos que já foram citados acima, que serão descritos com mais detalhes a seguir, que estão evidenciados na tabela 2.1, abaixo:

tabela 2.1

Bloco de cilindros	Árvore de manivelas (ou Virabrequim)
Cilindros	Volante
Pistões	Cabeçote
Anéis de segmento	Eixo de comando de válvulas
Bielas	Válvulas
Bronzinas	Cárter do óleo

Bloco de cilindros

É a principal estrutura do motor, projetada para suportar todos os esforços, aos quais, o mesmo seja submetido. Construído em ferro fundido, o bloco de cilindros de um motor diesel é muito mais reforçado que de um motor a gasolina, e conseqüentemente mais pesado. Uma característica importante, é quanto as camisas dos cilindros (serão detalhadas na parte de “cilindros” a seguir), que podem ser secas ou úmidas. As camisas do bloco são cilindros, que podem ser removidos. Em blocos de motores refrigerados a água e com camisas secas, estão presentes as câmaras para a refrigeração da água, além, dos furos por onde passam os cilindros, varetas e as hastes que fazem parte do mecanismo de comando de válvulas, e parafusos que fixam vários acessórios do bloco. Já em caso de motores que tem refrigeração a água e camisas úmidas, há a presença de espaços vazios em volta dos cilindros, para que sejam instaladas as camisas dos mesmos, a figura 3(a) a seguir, ilustra um modelo de bloco de cilindros. Alguns dos componentes listados na tabela 2.1 acima, são partes integrantes, ou trabalham dentro do bloco de cilindros, e serão detalhados em seguida.

Os cilindros são fixados no bloco do motor, e geralmente podem ser removidos, para possibilitar sua troca ou algum reparo. Em motores de grande potência, é muito comum a utilização de cilindros removíveis, o que em aspectos construtivos facilita bastante, pois, a confecção de blocos sem camisas removíveis leva a blocos mais pesados e dificuldades de usinagem. Devido as diferenças de temperatura entre o cilindro e sua parte exterior, podem acarretar em diferentes dilatações, estas ocorrências, em motores maiores poderão gerar trincas, deformações no bloco ou até deformação dos cilindros, impedindo o funcionamento correto do motor. Portanto,

camisas de cilindros que possam ser retiradas, para reparos separadamente do bloco, são vantajosas também, por permitir a remoção de crostas de material calcário, devido a água de refrigeração que percorre o interior do bloco.

As camisas, também conhecidas como cilindros removíveis, são classificadas em dois tipos:

Camisas úmidas: são chamadas assim devido estarem em contato direto com a água que refrigera o sistema, e ao redor destas camisas há necessidade de anéis de borracha, acoplados na parte inferior e superior, para a devida vedação. É possível ver pela figura 3(b), um exemplo de camisa úmida, já com certa oxidação devido ao líquido arrefecedor.

Camisas secas: estas são, normalmente, de menor espessura em comparação com as camisas úmidas, além de entrarem de maneira forçada no bloco, necessitando para isso, a utilização de uma prensa.

figura 3 - (a) Bloco de cilindros; (b) Cilindros (tipo camisa úmida)



(a)



(b)

Fonte: autores (2019)

Por vezes também chamado de êmbolo, o pistão é o componente que efetua o movimento alternativo no interior do cilindro, empurrando a biela, que por sua vez, irá empurrar o moente da árvore de manivelas, fazendo a mesma girar. Portanto, a cada combustão que ocorre no cilindro, o pistão recebe uma “pancada” em sua porção superior, ou cabeça. E devido ao fato de trabalhar sob elevadas temperaturas e se deslocar em altas velocidades, ele precisa ser bastante resistente e leve o suficiente. Na figura 4(a) abaixo, é possível ver um modelo de pistão.

figura 4 - (a) Exemplo de um pistão; (b) Anéis de segmento do pistão



(a)

(b)

Fonte: autores (2019)

Os anéis de segmentos são aros que tem uma certa elasticidade e possuem diâmetro ligeiramente maior que o dos pistões, contém uma fenda ou corte, que permite aos mesmos serem acoplados nos pistões, antes de serem introduzidos nos cilindros. A principal função dos anéis, é evitar a fuga dos gases de combustão, além de impedir a passagem do óleo lubrificante para o interior da câmara de combustão, mas também, garantindo a redução do atrito do pistão com as paredes do cilindro.

No geral, existem duas classificações para os anéis de segmento; os anéis de compressão, que fazem a vedação e impedem a fuga dos gases de combustão e do ar de admissão, para o cárter. E o outro tipo é o anel de óleo, normalmente posicionados na parte inferior do pistão, encarregado de raspar o óleo lubrificante nas paredes do cilindro, através da figura 4(b), é possível visualizar os anéis de segmento, instalados no pistão.

Na figura 5(a) é possível ver um modelo, de biela de motor diesel. Esta se encarrega, de transformar o movimento giratório da árvore de manivelas, em movimentos alternativos, e quase que retilíneos dos pistões. Por conta disso, está sujeita a ação de forças, vibrações e choques, necessitando assim, ser fabricada por um material resistente e leve ao mesmo tempo. Portanto, a grande maioria é confeccionada em aço forjado. E para amenizar o atrito, são utilizadas bronzinas (serão detalhadas no próximo item) feitas em material antifricção nos alojamentos dos mancais. A biela pode ter cabeça reta ou abaulada. O motivo de se utilizar bielas com cabeça abaulada, é para reduzir o tamanho da cabeça para que biela passe pelo

interior da camisa, facilitando a desmontagem do conjunto composto por biela, pino e pistão pela parte superior do cilindro.

figura 5 - (a) Biela de motor diesel; (b) bronzinas



(a)



(b)

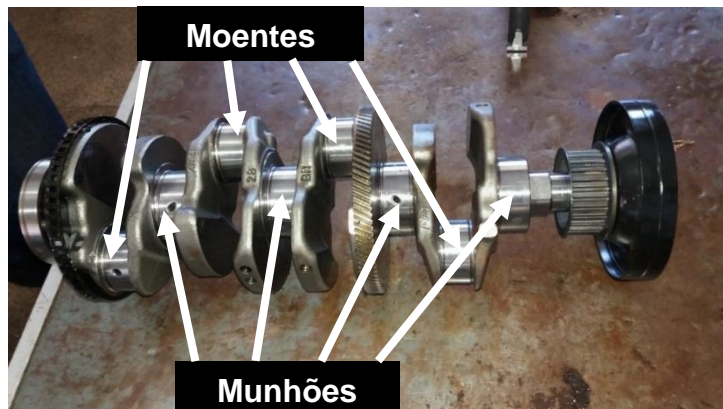
Fonte: autores (2019)

As bronzinas, ou casquilhos como também são conhecidas, ilustradas na figura 5(b) acima, são buchas bipartidas, geralmente, constituídas pela junção de três ligas metálicas, como, aço-cobre-estanho. Essa configuração é necessária para a redução o atrito e poder resistir as cargas elevadas a que são submetidas. Elas possuem ressaltos em alguns pontos de sua geometria, o que assegura o correto posicionamento, além de impedir que se desloque lateralmente, assim como, canais e orifícios que facilitam sua lubrificação.

Por vezes também chamada de virabrequim, a árvore de manivelas, é a peça responsável por transformar os movimentos alternativos dos pistões, em movimentos giratórios. Recebe uma carga elevada e grandes vibrações, provenientes das pancadas que se iniciam nos pistões, passam pelas bielas e chegam até a árvore de manivelas, portanto, é um componente que precisa ser muito resistente, robusto e leve ao mesmo tempo. Conforme enuncia VARELLA & SANTOS, (2010), normalmente a árvore de manivelas é confeccionada em aço forjado ou ferro fundido nodular. Apoiado no bloco do motor ou no cárter, por meio dos munhões, que se encontram nas extremidades e no meio do bloco. Citado anteriormente, os munhões, formam a linha de eixo do virabrequim, assentados em pontos fixos do bloco, já os moentes, ficam acoplados às cabeças das bielas, e executam o movimento giratório

que o motor necessita. Na figura 6 é possível se ter uma noção e um virabrequim, com seus munhões e moentes.

figura 6 - Árvore de manivelas ou virabrequim



Fonte: autores (2019)

O volante do motor, ilustrado na figura 7, destina-se principalmente, a proporcionar equilíbrio e regularidade, ao movimento da árvore de manivelas. Ele absorve a energia da combustão e devolve essa energia aos tempos do motor. Normalmente, construído por meio de fundição ou de aço moldado. Motores com número reduzido de cilindros, necessitam de um volante de grande tamanho, em contrapartida, a medida que quantidade de cilindros for aumentado no motor, o volante que irá equipá-lo, será mais leve. Logo, o peso e dimensão do volante, depende diretamente no número de cilindros do motor.

figura 7 - Volante do motor



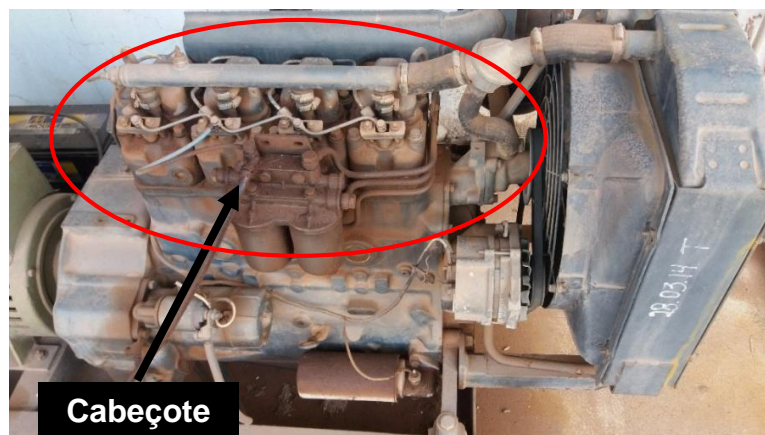
Fonte: autores (2019)

Cabeçote

Conforme a figura 8 abaixo ilustra, é o componente que fica na parte superior do bloco de cilindros, sendo encarregado de tampar os cilindros, estando então,

submetido a altas pressões. É no cabeçote que estão os dutos de escape e admissão, geralmente, possui orifícios rosqueados para a fixação dos bicos injetores (serão tratados mais adiante), se for o caso de o motor ter válvulas nesta parte do motor, as mesmas estarão protegidas pelo cabeçote. Também estão inclusos no cabeçote, o eixo de comando de válvulas, que será evidenciado logo em seguida.

figura 8 - Cabeçote do motor



Fonte: autores (2019)

Os cabeçotes possuem galerias internas para a passagem do líquido arrefecedor (água). Estas galerias foram feitas durante sua fundição, e após a usinagem ficam as aberturas, onde são colocados os selos para a vedação da água. Entre o cabeçote e o bloco é montada uma junta, com a finalidade de vedar a pressão da combustão, evitar vazamento de água e óleo. A junta deve suportar a alta temperatura da combustão, não deformar com o aperto dos cabeçotes e resistir a oxidação da passagem de água.

Por meio da figura 9(a) a seguir, observa-se um modelo de eixo de comando de válvulas, e neste, estão presentes os ressaltos ou também conhecidos por (camos), que proporcionam a abertura das válvulas de acordo com os tempos do motor. Sua fabricação normalmente é em aço carbono com ligas de cromo, também, recebem um tratamento térmico, conhecido por cementação, garantindo uma maior dureza em sua superfície, conseqüentemente, aumentando sua resistência ao desgaste.

figura 9 - (a) Eixos de camos de comando de válvulas; (b) Válvulas



Fonte: (a) autores (2019); (b) Varella & Santos (2010)

Outra peça importante, presente no cabeçote do motor, são as válvulas. Componentes responsáveis por fazer a vedação dos cilindros, sendo classificadas como, válvulas de admissão e válvulas de escape. Elas permitem a entrada de ar saída dos gases provenientes da combustão, em movimentos rápidos e devidamente sincronizados com os tempos do motor, acionadas pelo mecanismo de comando de válvulas. Normalmente, as válvulas de admissão são maiores em relação as de escape. Sua estrutura é composta por: cabeça, haste e extremidade. A cabeça da válvula recebe uma retifica bem cuidadosa, de modo a garantir uma superfície lisa e uniforme, pois, é a parte que fica em contato com a sede de válvula, o que assegura a correta vedação, não permitindo que o ar ou gases sob pressão escapem do cilindro. Já as válvulas de escape, estão sujeitas a altas temperaturas, por isso, são fabricadas por aços resistentes as temperaturas elevadas. Através da figura 9(b) acima, é possível observar alguns exemplos de válvulas.

Cárter de óleo

O cárter corresponde ao reservatório do óleo lubrificante que circula pelo motor, localizado na parte inferior do bloco de cilindros, ilustrado na figura 10 abaixo. Ele serve também, como proteção para a árvore de manivelas, e apresenta uma junta constituída de material especial, que evita vazamentos no trecho entre o bloco e o cárter. Geralmente, os suportes dos mancais de apoio da árvore de manivelas são fixados no cárter.

figura 10 - Cárter de óleo



Fonte: autores (2019)

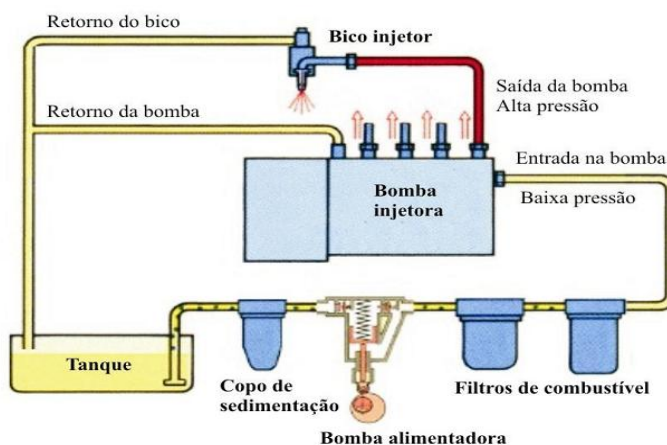
2.4.2 Sistemas

Abaixo seguem listados e descritos, os sistemas essenciais que integram um motor diesel de um GMG:

Sistema de injeção de óleo diesel

É um sistema que vem sofrendo constantes aperfeiçoamentos ao longo do tempo, para garantir motores mais econômicos, eficientes e versáteis dentro de sua área de aplicação. E conseguir que o motor produza mais potência, com uma quantidade cada vez mais reduzida e combustível. E o consumo reduzido de combustível é conseguido, quando o óleo diesel é injetado na medida e tempo exatos, não deixando que o óleo injetado fique sem sofrer a combustão. O circuito de combustível que está ilustrado na figura 11, permite visualizar o percurso do óleo diesel até o bico injetor.

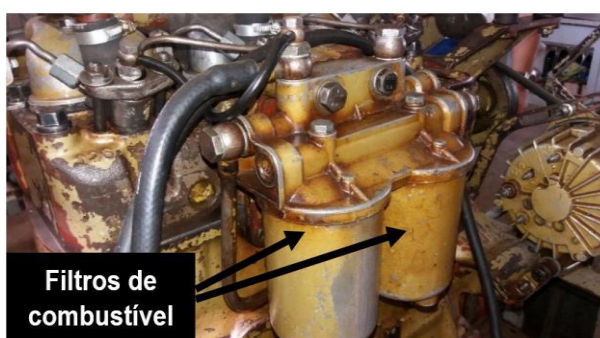
figura 11 - Circuito de combustível



Fonte: Varella & Santos (2010)

O funcionamento do sistema de injeção de óleo diesel, consiste essencialmente, pelo fluxo do óleo, do taque até o filtro de combustível, impulsionados pela bomba de combustível. Após a filtragem, o óleo percorre pela tubulação até chegar a um filtro secundário, entrando logo em seguida na bomba injetora. É a bomba injetora que se encarrega de distribuir o combustível para cada injetor, proporcionando o controle rigoroso da vazão do óleo Diesel injetado no cilindro, tendo como resultado um jato finamente pulverizado. Na figura 12 abaixo, temos exemplificação de dois filtros de combustível.

figura 12 - Filtros de combustível



Fonte: autores (2019)

É um dos itens de filtragem, essenciais ao bom funcionamento do motor, pois, partículas abrasivas e de impurezas, que vem com o combustível e depositam no interior do motor após a queima. Porém, como todo e qualquer componente, tem sua vida útil, devendo ser substituído quando atingir o tempo de uso estipulado pelo fabricante do mesmo.

Existem motores diesel, que apresentam câmaras indiretas de combustão, também conhecidas como; pré-câmara de combustão, estes são assim chamados, motores diesel de injeção indireta. No entanto, motores com esta configuração, tem uma certa dificuldade em dar a partida quando o mesmo está frio. Por isso, há a necessidade de utilização de dispositivos, que facilitem a partida nessas ocasiões. O dispositivo que se destina a essa finalidade, é a vela incandescente, que tem modelo ilustrativo na figura 13. Elas se aquecem com facilidade, quando percorridas por uma corrente elétrica, até ficarem incandescentes.

Normalmente, instaladas opostamente ao bico injetor, em uma parte da câmara indireta de combustão, e interligadas ao circuito elétrico que compõe o motor. As velas

incandescentes, entram em ação momentos antes da partida, assim, que o motor entra em funcionamento, elas desligam-se automaticamente.

figura 13 - Vela incandescente

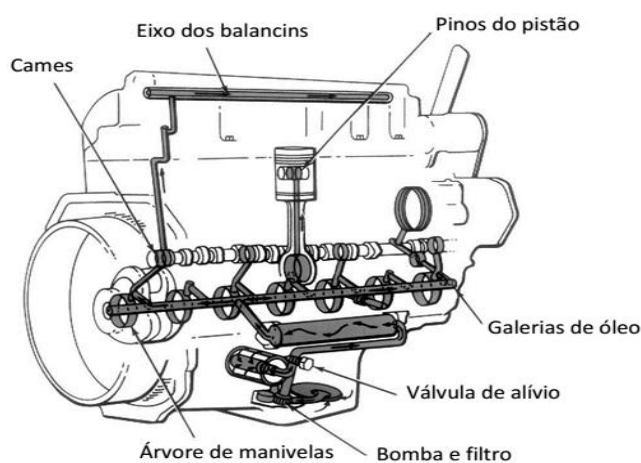


Fonte: <http://pt.bosch-automotive.com/pt/internet/parts/parts_and_accessories/motor_and_sytems/diesel/glow_plugs/glow_plugs_diesel_motorsys_parts.html> Acesso em: 06/03/2019.

Sistema de lubrificação

Todo e qualquer mecanismo que se atrita, sofre algum tipo de desgaste, e com o motor diesel não é diferente, suas partes móveis, que recebem ou transmitem forças e vibrações, provenientes do processo de combustão. Sabendo disso, é necessário adotar um sistema que garanta o aporte de algum tipo de lubrificação, evitando o desgaste prematuro dos componentes do motor. O sistema de lubrificação, como o próprio nome sugere, proporciona isso, impedindo o contato direto das peças metálicas, e o calor excessivo gerado pelo atrito. A figura 14 permite visualizar os canais de circulação do óleo lubrificante.

figura 14 - Circulação do óleo lubrificante

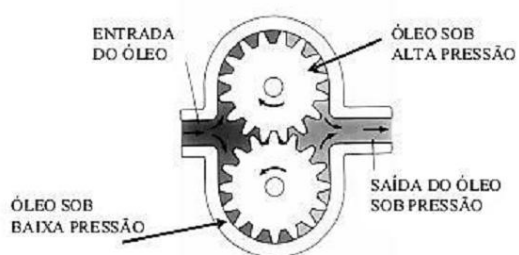


Fonte: Varella & Santos (2010)

Conforme comenta VARELLA & SANTOS, (2010), o mecanismo de lubrificação tem a função de armazenar, filtrar e levar o lubrificante até as peças que entram em atrito, sob a ação da pressão proporcionada pela bomba de óleo, ilustrada na figura 15(a). Permitindo que o lubrificante alcance as frestas e espaço existentes entres os componentes. O mecanismo de lubrificação é constituído em sua maioria por: cárter de óleo, bomba de óleo, filtros, tubulações e válvulas de descarga e por bicos pulverizadores de óleo.

Outro item que compõe esse mecanismo e exerce um papel relevante, é o filtro de óleo, que é exemplificado na figura 15(b) e de maneira similar ao filtro de combustível, se encarrega de impedir que matérias abrasivas adentrem o motor prolongando sua vida útil. O lubrificante durante seu percurso dentro do motor, acaba sendo contaminado por produtos da oxidação e decomposição química do Diesel, e por partículas e limalhas de aço, das peças que se atrim. Portanto, o filtro do lubrificante, assegura que todas essas impurezas fiquem retidas para não provocar problemas maiores no motor.

figura 15 - (a) Bomba de óleo (o tipo com engrenagens é o mais utilizado); (b) Filtro do óleo lubrificante



(a)



(b)

Fonte: (a) Varella & Santos (2010); (b) autores (2019)

Sistema de refrigeração

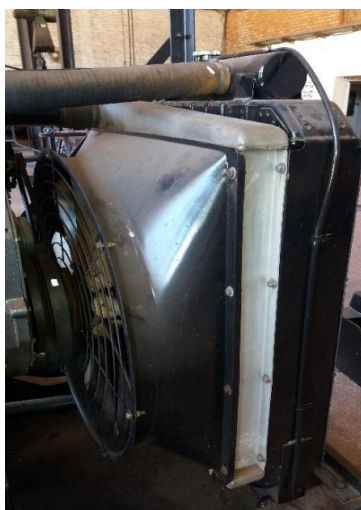
Segundo comenta TILLMANN, (2013), conforme os metais vão se aquecendo, por conta do trabalho do motor, a resistência destes metais inclina-se a diminuir devido à alta temperatura, e tendem a ficarem pastosos. Se tal fenômeno ocorrer no interior do motor, irá acontecer algo conhecido por engripamento, o que provocará a parada

do motor. As peças que não sofrem tanto aquecimento, geralmente se quebram. Juntando-se com o metal pastoso, e acabam por serem empurradas para outros pontos do motor, seguido provocando graves danos. E por muitas vezes esses danos são irreparáveis, condenando grande parte dos componentes do motor à sucata.

Com a finalidade de evitar tamanho prejuízo como este, existe o sistema de refrigeração, que tem o objetivo de retirar o excesso de calor do motor, mantendo-o a uma temperatura entre 85°-95°C. Os meios utilizados para arrefecimento são a água ou o ar. O fluido arrefecedor ao entrar em contato com as partes aquecidas do motor, absorvendo o calor e transferindo para o ambiente. Os dois tipos de sistemas de arrefecimento são:

Refrigeração a ar: é um sistema pouco utilizado, por conta de suas limitações na sua capacidade de refrigeração. Porém, apresenta algumas vantagens, como; um motor mais leve, pois, não necessita de tantos componentes para equipar o sistema, e como não existe líquido refrigerante, não é necessário o uso de vedações para impedir vazamentos. No entanto, esse tipo de sistema, para ser mais efetivo, necessita que o motor esteja se deslocando contra o ar, ou seja, instalado em um veículo. Contudo, nosso trabalho se restringe à GMGs, que são equipamentos estacionários, logo, não poderão ser deslocados contra o ar. Desta forma, para os Grupo Geradores de grande porte, este tipo de arrefecimento não é o mais indicado, salvo em casos de equipamentos de menor porte, em que este tipo de sistema já é o suficiente.

figura 16 - Radiador e ventoinha



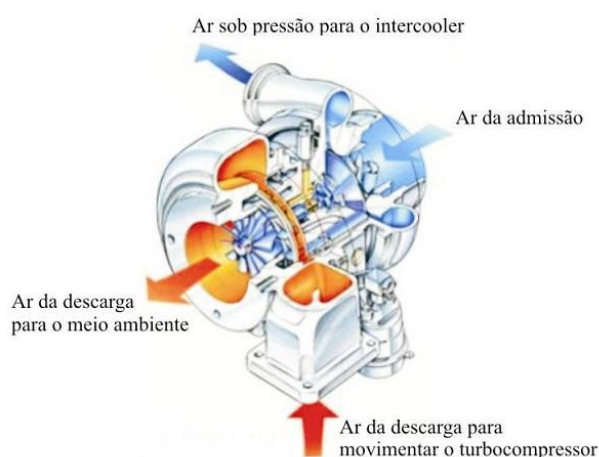
Fonte: autores (2019)

Refrigeração a água: trata-se do sistema mais empregado em motores diesel de maior potência, pois, a água se apresenta como um excelente meio de condução de calor, este sistema tem como componentes mais importantes; o radiador, bomba de água, válvula termostática, ventoinha, camisas d'água e mangueiras. É um sistema mais complexo em relação ao de arrefecimento a ar, garantindo uma efetividade de resfriamento ao motor muito maior. Para o caso de motores diesel estacionários, que equipam os GMGs. Algumas adaptações são feitas nesse sistema, para canalizar melhor o fluxo de ar gerado pela ventoinha em direção ao radiador. Isso, para evitar de perdas neste fluxo, conforme ilustra a figura 16 acima.

Sistema de superalimentação

Da necessidade em aumentar a potência do motor, aliado a uma economia no consumo de combustível, surge o turbocompressor. Conhecido também por turbina, turbocharger, turboalimentador ou simplesmente turbo. Segundo nos diz TILLMANN, (2013), que através de testes, observou-se que nem todo o oxigênio presente no ar de admissão era misturado com óleo diesel no interior da câmara de combustão. Logo, quanto mais ar fosse colocado na mistura, melhor seria a combustão, tendo um significativo aumento de potência. Foi observado, que o consumo de combustível praticamente não aumentou, principalmente quando o funcionamento era a velocidades constantes.

figura 17 - Turbocompressor



Fonte: Varella & Santos (2010)

Portanto, para permitir a entrada de uma quantidade maior de ar no interior do cilindro, e conseqüentemente mais oxigênio, é necessário que o ar de admissão seja

comprimido, e a figura 17 acima permite visualizar a saída os gases de escape, que movem o rotor do turbo compressor, pressurizando o ar de admissão. Como ocorre uma melhora na combustão, a expansão dos gases de combustão será maior, e conseqüentemente a força sobre o pistão, também será maior, transmitindo à biela, aos mancais e à árvore de manivelas, essa força. Portanto, para garantir a mesma durabilidade e robustez do motor, é preciso fazer reforços adicionais em sua estrutura, caso a compressão do ar seja muito elevada.

Portanto, para ter melhor qualidade, de toda a massa de ar que o motor aspira, é necessário o uso de elementos filtrantes. O filtro de ar, ilustrado na figura 18, é um componente que faz parte do conjunto de admissão do motor, e seu bom funcionamento colabora significativamente para uma maior durabilidade do motor. Sua presença é muito relevante, pois, o ar que o motor admite para o interior o cilindro, geralmente, vem carregado com várias partículas de impurezas, que podem se depositar internamente nos cilindros, provocando danos a componentes importantes. Portanto, é preciso verificar este elemento, a cada vez que ocorrerem manutenções no motor, averiguando se o mesmo está danificado ou com excesso de impurezas.

figura 18 - Filtro de ar



Fonte: autores (2019)

2.5 Funcionamento do motor diesel

Praticamente todos os motores à combustão interna funcionam baseados no mesmo mecanismo que ocorre no pedal de uma bicicleta, onde, diante do ciclo de rotação da coroa, o ciclista começa a aplicar a maior parte da força, quando o pedal está em uma angulação um pouco superior a 90° em relação ao solo.

Logo, tendo esse princípio como base; o combustível quando é queimado dentro da câmara de combustão, gera os gases que irão se expandir, promovendo o movimento dos pistões, gerando uma força. Esta força, é transferida para árvore de manivelas.

Como falamos anteriormente, os motores de ciclo diesel, funcionam com base no aproveitamento da energia proveniente da queima do combustível, sendo geralmente o óleo Diesel. No entanto, com o advento dos biocombustíveis, o uso de óleos vegetais em misturas com o óleo diesel convencional, tem sido um fato crescente no Brasil, com a finalidade de reduzir os gases poluentes provenientes da combustão.

O processo de combustão do óleo é viabilizado pela combinação do oxigênio que está presente no ar, com o carbono e o hidrogênio contidos no óleo diesel, sendo esta reação é conhecida como exotérmica, ou seja, produz calor. Segundo relata RACHE, (2004), para que uma determinada de óleo diesel seja queimada por completo, é necessária uma certa quantidade de ar. A proporção de ar que é colocada junto ao óleo diesel para que o mesmo entre em combustão, vai variar conforme o regime de funcionamento, a proporção pode ser 23 a 30 partes de ar para 1 parte de óleo, ou 20 partes de ar para 1 parte de óleo; porém, podem ocorrer casos de que a proporção seja de 14,3 partes de ar para cada 1 de óleo. Desta maneira é formada a mistura ar-combustível que quando aquecida até a temperatura de combustão, se inflama. Diferentemente, de um motor de ciclo Otto, que gera a queima do combustível por meio de uma centelha, o ciclo diesel provoca a queima por meio da alta compressão dentro da câmara de combustão.

Uma peculiaridade do motor diesel muito perigosa, é o fato de ele autoacelerar-se, por conta de defeitos nos anéis de segmento, o que permite a entrada de óleo lubrificante onde ocorre a combustão. A parte inferior os pistões, em alguns momentos fazem uma aspiração (criando um vácuo), sugando o lubrificante do cárter e o queimando ao mesmo tempo, conseqüentemente, acabará extinguindo o óleo lubrificante. Sem lubrificação, e também, devido ao trabalho descontrolado, o motor tende a fundindo-se. Nessa situação, a única alternativa para impedir a perda total do motor, é interromper a entrada de ar na admissão, imediatamente.

2.5.1 Tempos e ciclos de um motor diesel

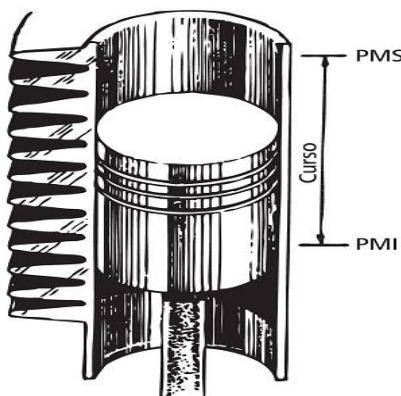
O conjunto de operações de forma sequencial e repetitiva que um motor realiza, é chamado de ciclo do motor. Para o nosso caso em questão que trata especificamente de motores de ciclo diesel, que geram força motriz através da combustão de óleo Diesel, ou óleo combustível, ou óleos vegetais. Sendo assim, o ciclo geralmente é classificado por algumas etapas.

Conforme enuncia MARTINS, (2006), motores como os de ciclo diesel, executam o processo de combustão interna, por meio de 4 tempos, que são: admissão, compressão, combustão e escape, podendo ser de 2 ou 4 cursos. Para elucidar essa diferença é preciso saber que; em motores de 4 cursos cada tempo se realiza em um curso do pistão, e para os de 2 cursos, tem-se dois tempos para cada curso do pistão.

O curso do pistão representa a distância que o mesmo percorre dentro do cilindro, deslocando-se desde o chamado Ponto Morto Superior (PMS), até o Ponto Morto Inferior (PMI), neste ponto o pistão se encontra o mais próximo possível da linha de centro da árvore de manivelas. É possível observar esta descrição na figura 19 abaixo.

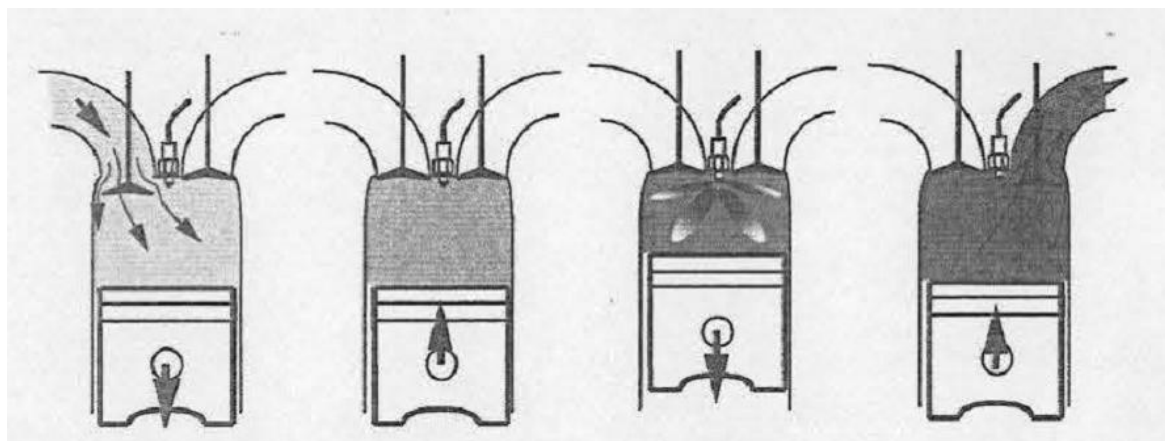
Portanto, é conveniente dizer que em motores de 2 tempos observa-se 2 cursos, e nos de 4 tempos são observados 4 cursos. Porém, MARTINS, (2006), relata que, na realidade os tempos não coincidem com os cursos dos pistões, mas, que esta nomenclatura e forma de abordagem é necessária para evitar dúvidas ou confusões.

figura 19 - Curso do pistão



Fonte: Tillmann (2013)

figura 20 - Os 4 tempos do motor de ignição por compressão



(a) Admissão

(b) Compressão

(c) Expansão

(d) Escape

Fonte: Martins (2006)

Admissão: é tipo como o primeiro tempo, pois, no ato de abertura da válvula de admissão, o pistão se encontra no Ponto Morto Superior (PMS) pronto para iniciar seu curso descendente, conforme ilustra a figura 20(a). Neste momento, o pistão que está conectado por meio da biela à árvore de manivelas, segue descendo acompanhando o giro da mesma, indo em direção ao Ponto Morto Inferior (PMI) este movimento permite a entrada ar, preenchendo o espaço no interior do cilindro.

Compressão: ao chegar no Ponto Morto Inferior, o pistão inicia seu retorno em direção o Ponto Morto Superior, segundo ilustra a figura 20(b). O que ocorre durante este curso, é o fechamento das válvulas tanto de admissão quanto de escape, aprisionando a massa de ar, que está gradativamente sendo comprimida dentro do cilindro, essa massa de ar chega a ficar cerca de 15 a 20 vezes menor, segundo (MARTINS, 2006). Por consequência desta forte compressão, a temperatura do ar se eleva, alcançado valores de 700°C , e pressões que variam de 30 a 40 kgf/cm^2 . Pouco antes do pistão chegar ao PMS, o bico injetor excuta sua função, injetando o óleo diesel para ser queimado devida a alta compressão.

Expansão: com a entrada do óleo diesel no cilindro, sob a forma pulverizada proporcionada pelo bico injetor. No momento da combustão, a pressão dentro do cilindro é muito alta, segundo afirma MARTINS, (2006), podendo, em alguns casos, ser o dobro da pressão máxima que ocorre em um cilindro de ciclo Otto. A entrada do óleo diesel não é imediata, é algo que demora um pequeno intervalo de tempo, após esse intervalo, o óleo é injetado e entra em contato com ar, que se encontra sob

elevadas temperaturas e pressões, proporcionando, assim, a que queima gradativa do óleo diesel.

Esta peculiaridade, caracteriza uma importante diferença em relação ao ciclo Otto. Pois, no ciclo diesel, a queima do combustível ocorre de forma progressiva, daí o fato de serem chamados de motores de combustão interna, por ocasião da combustão ocorrer internamente no motor. Sendo que, no ciclo Otto, a gasolina ou o álcool, que são seus combustíveis mais usuais, ocorre uma queima muito rápida da mistura ar-combustível, por tal fato, sendo classificados como, motores a explosão. No mais, o que acontece com maior relevância no tempo de expansão do pistão, é a formação gases de combustão em alta pressão, que ao se dilatarem dentro do cilindro, empurram o pistão em direção ao PMI, ocasionando o giro da árvore de manivelas. Algo que fica claro por meio da figura 20(c).

Escape: este é o momento em que os gases de produzidos pela combustão são eliminados, empurrados pelo pistão que está vindo do PMI, conforme ilustra figura 20(d). Os gases fluem para fora do cilindro pela válvula de escape. Estes gases seguem o percurso pela tubulação de escape, indo em direção a descarga do motor, porém, os mesmos, ainda apresentam alguma energia, e por mais que essa energia seja pequena, ela é suficiente para movimentar turbocompressores, em motores que possuam esse equipamento.

2.5.2 Cilindrada e Taxa de compressão

Cilindrada: em um motor é valor que corresponde a soma das cilindradas de cada cilindro que o compõe, podendo ser indicada em; polegadas cúbicas, centímetros cúbicos ou litros. A cilindrada representa o volume que o pistão percorre, quando é deslocado do PMS ao PMI, volume este, ocupado pelo ar que entra pela válvula de admissão. No momento em que o pistão está no Ponto Morto Superior, existe um pequeno espaço que sobra, que também deve ser contabilizado no cálculo da cilindrada. É uma cavidade que pode ficar na cabeça ou em uma parte lateral do pistão, sendo este, o espaço necessário para iniciar a queima do combustível.

Taxa de compressão: Conforme diz VARELLA & SANTOS, (2010), trata de quantas vezes a mistura é comprimida durante a fase de compressão. O rendimento de um motor é proporcional à sua taxa de compressão, porém, esta é limitada pela

capacidade do combustível de resistir à compressão, medida pela octanagem. As taxas variam conforme o combustível utilizado. Para motores diesel a taxa fica em torno de 20:1.

2.6 Máquinas elétricas

Máquinas elétricas rotativas com alimentação trifásica são dispositivos que podem funcionar como máquinas CC (motor), ou máquinas CA (gerador). Nos motores o indutor é o estator e provoca um movimento de rotação induzida no rotor, sendo este o induzido. Para geradores, o estator é onde a força eletromotriz é induzida, por meio de seu rotor, o indutor. Este trabalho focou nas máquinas CA (geradores síncronos), no qual o movimento rotacional de um rotor é formado por bobinado transportando corrente. Essa corrente é geralmente suprida por um conjunto de excitatriz e cria um campo magnético girante por movimento rotacional. Esse movimento de rotação advém de máquina primaria, neste caso aqui um motor a diesel, e produz tensão induzida em bobinas estacionarias alojadas no estator. O campo girante envolve o enrolamento fixo do estator onde três bobinas estão posicionadas 120 graus defasadas entre si gerando tensão trifásica. As máquinas rotativas de corrente alternada desempenham relação de sincronismo entre frequência da tensão de alimentação e velocidade de rotação.

Geradores são utilizados na conversão de energia mecânica em energia elétrica e motores fazem o processo inverso. Motores e geradores reais dependem de fluxo magnético para produzir tensão e conjugado. Na prática, as máquinas reais fazem a conversão da energia de uma forma ou de outra pela ação de um campo magnético.

Existem duas classes principais de máquinas (CA): geradores síncronos e geradores de indução. A diferença entre os dois está no que diz respeito ao rotor. As máquinas de indução sempre têm rotores cilíndricos, enquanto as síncronas podem ter rotores de pólos lisos ou salientes. Outra diferença também, está no fornecimento de corrente ao enrolamento de campo. Em geradores síncronos, uma corrente CC da potência ao campo, em geradores de indução corrente (CA) é utilizada. Essas correntes, atuando pelo deslocamento de cargas, produzem o aparecimento de um campo magnético.

A relação de movimento entre campo magnético e induzido sugere vários tipos de máquinas no que diz respeito a suas construções e aplicabilidade, porém aqui nos deteremos a um gerador síncrono de corrente alternada (CA) com campo magnético rotativo produzido no rotor com estator condutivo de armadura fixa. As possibilidades construtivas das máquinas elétricas diante de razões específicas de engenharia irão ditar a escolha de quem irá proporcionar fluxo magnético: ou estator ou rotor.

Segundo KOSOW, (1985) as construções diversas das máquinas elétricas em função de como o fluxo magnético é gerado são:

1. A máquina de corrente contínua (CC) que tem armadura rotativa e um campo estacionário – (Gerador Dínamo, Motor);
2. A máquina síncrona (CA) com uma armadura rotativa e um campo estacionário – (Motor Síncrono);
3. A máquina síncrona (CA), com um campo rotativo e uma armadura fixa – (Gerador Síncrono);
4. A máquina assíncrona (CA), que possui ambos, enrolamentos de armadura estacionários e rotativos – (Gerador de Indução, Motor de Indução).

2.6.1 Gerador síncrono (Alternador)

Os geradores síncronos são responsáveis por quase toda a energia elétrica gerada no mundo, pelo fato de terem maior rendimento que as outras máquinas, por produzirem tensão terminal de frequência constante e, portanto, não precisam de conversores eletrônicos em seus terminais para correção de frequência, como ocorre nos geradores de indução, que é a máquina que mais se aproxima das características da máquina síncrona, sendo seu concorrente mais próximo FAJONI, (2010).

A maioria dos grandes sistemas de energia elétrica atualmente é composta essencialmente de diversos sistemas trifásicos que operam em sincronismo, ou seja, os geradores operam em velocidade constante fazendo com que a frequência elétrica do sistema seja constante assim como as tensões terminais, SUNI, (2009).

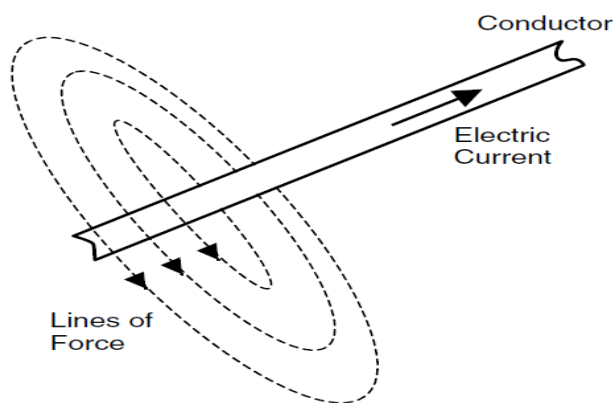
Geradores síncronos são denominados assim pois a frequência elétrica da tensão produzida está em sintonia com a velocidade de rotação do eixo do gerador.

São conhecidos também como alternadores justamente porque são excitados por corrente CC e produzem para uso corrente CA.

Segundo UMANS, (2014), um gerador síncrono simples, quando fornece potência a uma impedância de carga, atua como fonte de tensão, cuja frequência é determinada pela velocidade de seu acionador mecânico primário. O induzido da máquina síncrona é formado por um enrolamento distribuído geralmente trifásico e com mais de um par de polos. Quanto ao indutor, este é constituído por um enrolamento monofásico alimentado por uma corrente contínua (eletroímã), entretanto, em pequenas unidades, são substituídos por ímãs permanentes. Ainda são elementos constitutivos de uma máquina síncrona o conjunto de excitatriz, tendo um gerador CC para alimentação do enrolamento de campo, escovas e anéis coletores as quais fazem a ligação entre a fonte externa e o enrolamento de campo.

Consistindo essencialmente de um rotor (indutor) e de um estator (induzido) no qual o rotor em movimento transporta o campo magnético, formado por seus pólos, ao estator. O gerador é construído de tal forma que as linhas de força do campo magnético cortam perpendicularmente os enrolamentos do induzido figura 21.

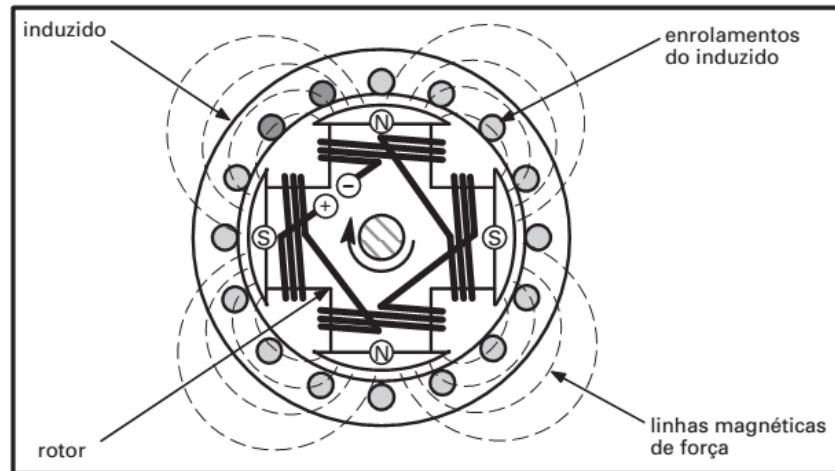
figura 21 - Representação esquemática de um campo magnético criado pelo fluxo de corrente em um condutor



Fonte: Klempner (2004)

O campo magnético é alimentado por uma fonte CC (corrente contínua) chamada de excitador, a qual é conectada aos terminais "+" e "-" dos enrolamentos de campo. Quando o eixo do motor que está acoplado ao rotor gira, induz tensão no enrolamento de armadura, conforme ilustra a figura 22.

figura 22 - Seção transversal de um gerador de 4 pólos



Fonte: Cummins (2011)

Para entendermos o processo de funcionamento das máquinas elétricas, devemos ter bem definido as Leis Físicas que regem seu funcionamento pois constituem elementos básicos para posterior construção de dispositivos ou componentes necessários à sua aplicação. Os campos magnéticos constituem mecanismo fundamental no funcionamento de geradores de eletricidade. Segundo Chapman, a lei fundamental que rege a produção de um campo magnético por uma corrente é a Lei de Ampère:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \int_S \vec{J} \cdot d\vec{A} \quad (2.1)$$

Em que \vec{H} é a intensidade de campo magnético produzido por uma corrente num elemento diferencial de comprimento $d\vec{l}$. E \vec{J} é a densidade de corrente, $d\vec{A}$ é o elemento diferencial de área.

Em um enrolamento com N espiras envolvendo material ferromagnético, cujo l_n é o comprimento do caminho médio do núcleo, em que corrente elétrica i relaciona-se com o campo magnético H . Logo, a lei Ampère torna-se:

$$H = \frac{Ni}{l_n} \quad (2.2)$$

A intensidade de campo magnético H depende do material que é composto o núcleo magnético, assim ocorre uma densidade de fluxo magnético B , ou seja, produz uma indução magnética:

$$B = \mu H \quad (2.3)$$

Onde,

H = intensidade de campo magnético;

μ = permeabilidade magnética do material;

B = densidade de fluxo magnético produzido.

Podemos constatar que:

$$B = \mu H \frac{\mu N i}{l_n} \quad (2.4)$$

Com isso pode-se definir o fluxo total fazendo uma integração:

$$\Phi = \int_A \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (2.5)$$

Fazendo relação entre corrente e fluxo em que A é área da seção reta que corta o núcleo, podemos afirmar que:

$$\Phi = BA = \frac{\mu N i A}{l_n} \quad (2.6)$$

Então, devido ao movimento relativo do campo magnético dos pólos do rotor, a intensidade do campo magnético que atravessa os enrolamentos do estator irá variar no tempo, no qual, pela Lei de Faraday, uma indução de tensões aos terminais do enrolamento do estator irá acontecer devido a distribuição espacial trifásicas dessas bobinas proporcionando tensões alternadas e senoidais. Existem vários modos no qual um campo magnético pode afetar sua vizinhança e a Lei de Faraday afirma que

havendo variação de fluxo magnética passando através de fio condutor, então ocorrerá corrente elétrica induzida. Isso é demonstrado pela equação:

$$e = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2.7)$$

Em que:

e = tensão induzida na bobina do estator

N = número de espiras de fio da bobina

ϕ = fluxo que passa através da bobina

O sinal negativo que aparece na equação é devido a contribuição feita em 1834 pelo físico e químico Heinrich Lenz, que percebeu que “uma corrente induzida flui sempre na direção que promova oposição a mudança que a produziu” GONICK E HUFFMAN, (1994).

Assim, essa tensão dependerá de três fatores: (1) A intensidade do fluxo de campo magnético na máquina; (2) A velocidade angular de rotação; (3) O Número de Espiras, “comprimento do enrolamento”, variando com a construção de cada máquina. Além disso, uma vez estando ligado à rede elétrica deve-se considerar que o gerador síncrono apresenta relação constante entre sua velocidade mecânica e sua frequência elétrica, fato que não ocorre com geradores de indução.

A Lei de Lenz explica um fenômeno que ocorre na indução eletromagnética. Quando uma carga é ligada ao gerador síncrono fechando o circuito, corrente alternada circulará na armadura e pela carga devido a tensão alternada induzida. O fluxo dessa corrente elétrica no condutor, isto é, o deslocamento de corrente no enrolamento da armadura produzirá seu próprio campo magnético reagindo de modo oposto com o campo magnético do enrolamento de campo. Desse modo, a energia elétrica da carga opõe-se a energia mecânica da máquina primária (motor diesel), ou seja, quanto maior for a potência solicitada pela carga, mais forte será o campo produzido por uma corrente de maior solicitação no condutor em oposição ao campo produzido em função da potência advinda da máquina primária despendendo deste modo mais energia fornecida da queima de combustível.

No gerador síncrono o conjugado eletromagnético opõe-se à rotação, enquanto que o conjugado mecânico é a favor da rotação que mantém o movimento. Dessa forma, o conjugado eletromagnético é o efeito que converte a energia mecânica em energia elétrica UMANS, (2014).

O conjugado também pode ser chamado de torque binário e confirmando o que foi citado acima podemos afirmar que força eletromotriz produzirá um torque resistente ou oposto a rotação do rotor, pois assim, irá ocorrer a transferência de energia do gerador para a carga.

Com a equação de Biot-Savart podemos entender que um torque é aplicado pelo gerador quando uma determinada carga é solicitada no circuito pois uma força induzida fará oposição ao seu movimento tendo em mente que esta lei relaciona campo elétrico com corrente, isto é, uma força é gerada quando um condutor de comprimento L , transportando corrente i , encontra-se vinculado a um campo magnético B , com isso:

$$F = B \cdot L \cdot i \quad (2.8)$$

A interação entre dois campos magnéticos provoca o aparecimento de uma força. Se um condutor em condução for introduzido no seio de um outro campo magnético, este condutor vai ficar sujeito a uma força. Por outras palavras, a força eletromagnética que surge é tanto maior quanto mais forte for o campo magnético B , à corrente I que atravessa o condutor a ao comprimento l do condutor ALVES, (2003)

As Leis de Faraday, Lenz e de Ampere-Biot-Savart estão de acordo com a Lei de Conservação de Energia. Essas quatro leis constituem base física e teórica do funcionamento de qualquer máquina elétrica que atuam na conversão eletromecânica, ou seja, há uma manutenção do sistema sendo necessário algum trabalho para provocar uma variação no fluxo e conseqüentemente induzir corrente.

Os geradores síncronos trifásicos podem ter rotores de pólos lisos ou de polos salientes. Os geradores de pólos salientes são usados em aplicações de baixa velocidade, menores que 1800 rpm no qual o diâmetro do rotor pode ser muito grande podendo acomodar grandes quantidades de pólos, sendo comumente usados em usinas hidrelétricas. Os geradores síncronos de pólos lisos são construídos para

velocidades angulares altas, geralmente entre 1800 rpm a 3600 rpm em 60 Hz, tendo menor diâmetro com 2 ou 4 polos no máximo.

A escolha da quantidade de pólos é ditada pela rotação da máquina primária. A vantagem de um gerador síncrono trifásico ter maior rendimento que um gerador de indução permitiu seu uso mais comum quando se trata na obtenção de potências elevadas embora sua construção seja relativamente mais cara do que a do gerador de indução.

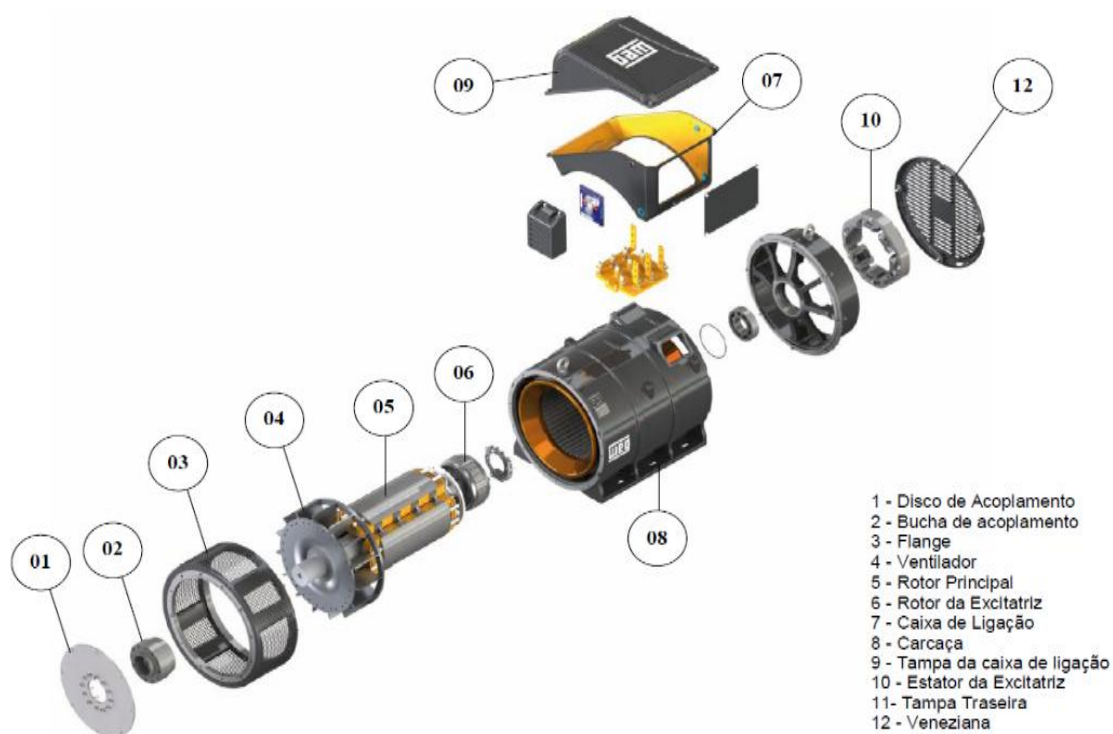
O emprego de correntes elétricas, que circulam em bobinas acomodadas em estruturas compostas de materiais magnéticos, constitui-se na principal técnica de obtenção de campos magnéticos intensos. Caso nenhuma corrente CC seja fornecida ao enrolamento de campo nenhum torque ocorrerá, pois, a corrente que flui na bobina do rotor produz ela própria um campo magnético e conforme a Lei de Ampère a intensidade do campo magnético é diretamente proporcional à corrente que flui no enrolamento de campo.

Tendo em mente que uma corrente elétrica circulando no enrolamento de um gerador CA real, produzirá conjugado e que seu campo varia não sendo constante podemos afirmar que três fatores influenciarão no seu torque: (1) intensidade do campo magnético do rotor; (2) intensidade do campo magnético do estator; (3) geometria angular dos itens anteriores definido na construção da máquina.

2.6.2 Partes construtivas do gerador

Estator e rotor são as partes principais de um gerador, pois a transformação de energia dar-se-á entre a interação desses dois componentes. A conversão de energia, sempre ocorrerá pela atuação de um campo magnético. Assim sendo, tal fenômeno é o mecanismo fundamental pelo qual a energia mecânica é convertida em energia elétrica. É possível observar pela vista explodida na figura 23, além do rotor e estator, as principais peças que integram um gerador síncrono.

figura 23 - Partes integrantes um gerador síncrono WEG Linha AG10



Fonte: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracter-sticas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>> Acessado em: 01/02/2019.

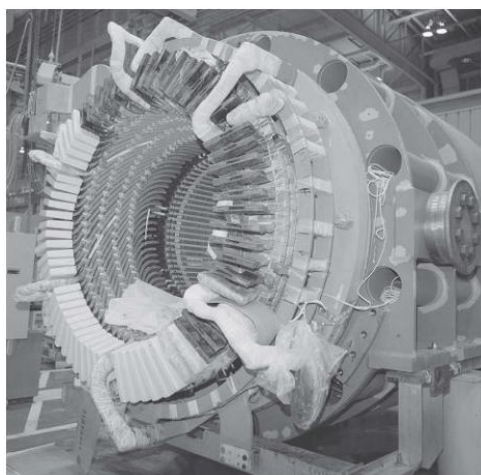
Estator

O estator é a parte fixa da máquina síncrona e é construído de chapas de aço laminadas dotadas de ranhuras axiais onde se encontra alojado o enrolamento do estator. As chapas apresentam características magnéticas de alta permeabilidade, o que permite criar um caminho magnético de baixa relutância para o fluxo, diminuindo o fluxo disperso e concentrando o campo no entreferro (UMANS, 2006).

O enrolamento do estator também é conhecido como enrolamento da armadura porque o estator do gerador síncrono constitui a parte magnética chamada de armadura no qual ocorre uma força eletromotriz induzida responsável pela tensão terminal do gerador. O estator independe do tipo de rotor sendo monofásico ou trifásico, sendo este último de uso mais comum com três enrolamentos distribuídos, balanceados iguais e defasados de 120 graus um em relação aos outros as tensões são geradas nesses enrolamentos quando um campo magnético gira mecanicamente

próximo a eles conduzindo corrente alternada. A figura 24 abaixo, ilustram de maneira mais clara o formato e constituição de um estator.

figura 24 - Estator de um Gerador Síncrono Trifásico



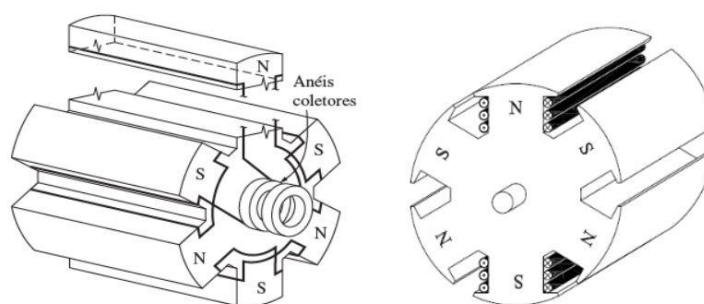
Fonte: Umans, 2014

Rotor

O rotor, parte girante do alternador, é construída de chapas de aço laminado, pode apresentar duas formas físicas distintas. Logo, podemos ter dois tipos de rotor: (I) rotor de pólos salientes, multipolar, vistos nas figura 25 e figura 26; (II) rotor de pólos lisos, cilíndricos, bipolar ou tetra polar. A figura 27 e figura 28, evidenciam esses modelos, já a figura 29 ilustra o pólo saliente de um rotor, com e sem o enrolamento, e um exemplo de rotor de 8 pólos salientes.

O rotor, conhecido também como indutor, acomoda o enrolamento de campo e é responsável pela excitação da máquina e produção de fluxo magnético.

figura 25 - Rotores com seis pólos salientes de uma máquina síncrona



Fonte: Chapman (2013)

figura 26 - Rotor de 4 pólos de um gerador e ventoinha



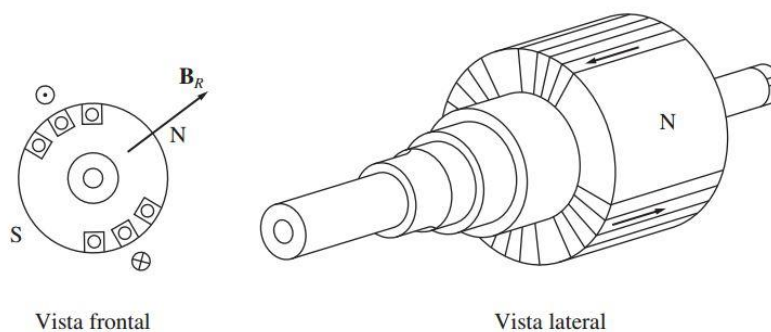
Fonte: autores (2019)

figura 27 - Rotores de pólos lisos



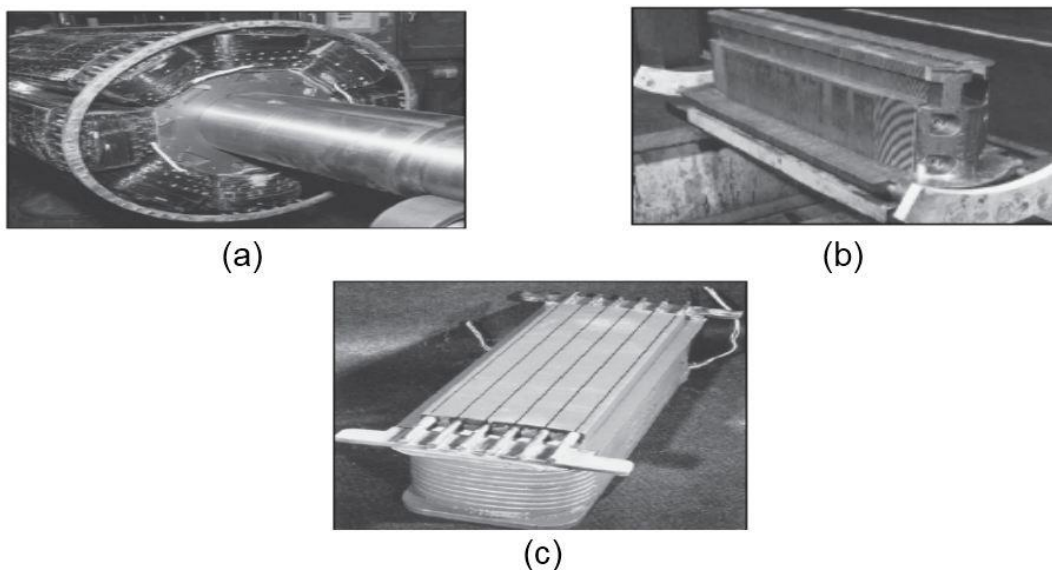
Fonte: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracteristicas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>> Acessado em: 01/02/2019.

figura 28 - Rotores de pólos lisos, vistas frontal e lateral



Fonte: Chapman (2013)

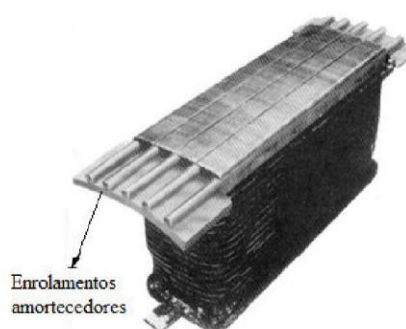
figura 29 - (a) Rotor de oito pólos salientes; (b) Único pólo saliente de um rotor, sem os enrolamentos de campo; (c) Um único polo saliente, com os enrolamentos de campo instalados



Fonte: Chapman (2013)

Estão fixados também no rotor os enrolamentos amortecedores, de acordo com ilustração da figura 30, e amortecem as oscilações mecânicas transitórias causadas por variações bruscas de cargas, alterações de tensão e variações melhorando e estabilizando a tensão produzida no induzido.

figura 30 - Pólo saliente apresentando as barras de enrolamento amortecedor



Fonte: Peres (2013)

Assim, no gerador síncrono de rotor de pólos salientes o enrolamento de campo é concentrado em cada pólo físico da máquina chamado peça polar formado por pacotes de chapas, ou seja, os enrolamentos do eletroímã envolvem o próprio pólo. Já no caso do rotor de polos lisos os enrolamentos são encaixados em ranhuras na

superfície do rotor totalmente nivelados. A figura 31, ilustra como é feito o enrolamento dos pólos de um rotor.

figura 31 - Enrolamento dos pólos de um rotor



Fonte: <<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracter-sticas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>> Acessado em: 02/02/2019.

O movimento rotacional do rotor atribui a ele uma velocidade mecânica (W_{rm}) e devido á corrente aplicada em seu enrolamento que produz um campo magnético girante no seu entreferro. Atribui-se a esse campo girante, que induz correntes trifásicas defasadas 120 graus entre si no enrolamento de armadura, uma velocidade angular e uma frequência elétrica. A velocidade do campo girante fica:

$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{P} \quad (\text{rpm}) \quad (2.9)$$

Onde:

n_s = Velocidade síncrona (rpm)

P = Número de pólos

f_e = Frequência elétrica (Hz)

Eixo: o eixo do rotor é comumente fabricado em aço forjado com carbono de uma só peça tratada termicamente para alcançar uma estrutura homogênea livre de tensão.

Carcaça: a carcaça tem essencialmente a função de suporte mecânico do estator com entreferro radial e rotor em seu interior.

Sistema de Excitação

A diversidade dos tipos de sistemas de excitação é grande e a aplicação da eletrônica nesses sistemas é vasta, mas no geral estes sistemas podem ser classificados em sistemas de excitação rotativos e sistemas de excitação estáticos. O enrolamento de campo, tanto do rotor de pólo saliente como do rotor de pólo liso de geradores síncronos precisam ser alimentados por corrente contínua CC constituindo características importantes de construção.

Máquina síncrona convencional com alimentação de campo externa: os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua levada até eles através de anéis deslizantes e escovas. O inconveniente neste tipo de máquina, é que esta necessita de uma fonte de tensão externa contínua ajustável UMANS, (2014).

Máquina síncrona convencional com excitatriz interna: os enrolamentos de campo são alimentados com corrente contínua a partir de um gerador interno conhecido por excitatriz acoplado diretamente ao eixo da máquina. Neste tipo de máquina não há escovas reduzindo as manutenções.

figura 32 - Estator do conjunto da excitatriz



Fonte: autores (2019)

Sistemas de excitação com excitatriz interna são formados por um rotor e estator de menor porte acoplados no mesmo eixo do rotor principal de uma máquina síncrona e tem a função de fornecer e controlar a tensão nos terminais dos enrolamentos de campo. A tensão gerada no conjunto de excitatriz é alternada sendo preciso ser convertida em contínua através de ponte retificadora (diodos) para que

assim forneça corrente contínua ao enrolamento de campo do rotor principal. A figura 32 acima, ilustra um rotor de uma excitatriz de gerador síncrono.

Um regulador de tensão controla a corrente de sistemas auto excitados e sistemas excitados separadamente aumentando ou diminuindo a saída de corrente desses excitadores, ou seja, o regulador de tensão é um equipamento capaz de estabilizar a corrente de excitação da bobina de campo mantendo a potência reativa desejada. Essa regulação de tensão geralmente é uma função externa do conjunto de excitatriz. Assim, o regulador de tensão tem a função de fornecer potência a excitatriz principal fazendo comparação entre o valor teórico e a tensão de referência mantendo a tensão no valor desejado.

Passa pelo regulador de tensão a tensão trifásica de saída gerada nos terminais do enrolamento de armadura. O regulador possui uma tensão programada e quando por queda de tensão não se possui a leitura da tensão ajustada, o regulador libera corrente ao estator do conjunto de excitatriz. Este por sua vez, gera uma tensão regulada no rotor de excitatriz, no qual por meios retificadores liberam e regulam por meio de corrente o campo produzido no rotor principal produzindo a tensão pretendida no estator da armadura. A figura 33 e a figura 34 ilustram o rotor de um gerador síncrono, com seu conjunto de excitatriz, além do rotor e estator da mesma.

figura 33 - Estator de um gerador com seu respectivo conjunto de excitatriz



Fonte: autores (2019)

figura 34 - Rotor de 4 pólos com seu ventoinha e excitatriz, rotor da excitatriz acoplado, estator da excitatriz (ao lado)



Fonte: autores (2019)

Escovas e anéis têm a função de conectar a fonte de corrente CC com os pólos do rotor e considerando que ao longo do tempo estes componentes se desgastam podendo produzir faíscas, geradores geralmente são empregados sem escovas. O estudo desses dois processos básicos para sistemas de excitação permitiu uma ampla diversidade de características e desempenho.

Segundo BIM EDSON, (2015), podemos ter três situações para a excitação de enrolamento de campo nos geradores síncronos CA de armadura estacionária e campo rotativo, que são:

1. Gerador CC montado no próprio eixo do rotor da máquina principal (excitação com escovas e comutador usando diodos retificadores);
2. Conversor estático CA/CC ou Retificador (excitação com escovas e anéis coletores);
3. Gerador CA, de armadura rotativa e campo estacionário, montado no próprio eixo do rotor da máquina principal (excitação sem escovas e com ponte de diodos, sistema "Brushless").

3 MÉTODOS TRADICIONAIS DE DETECÇÃO E DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS

O estudo e descrição de técnicas de detecção e diagnósticos de falhas mecânicas ou elétricas, para identificação de causas e efeitos nos principais componentes de GMGs é o objetivo deste capítulo. Tal conhecimento, permite encontrar soluções preditivas que vão desde instalação, até elaboração de projetos de GMGs. Independente do objetivo buscado no uso desses equipamentos, é de extrema importância, o monitoramento e supervisão de seu funcionamento de forma contínua, agregando maior previsibilidade de tais falhas.

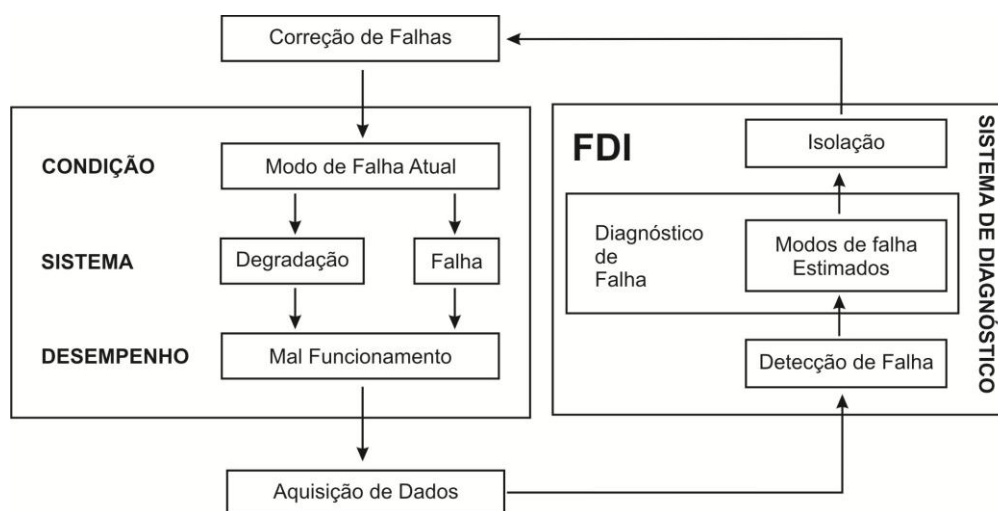
A monitoração de um sistema com finalidade de predição de falhas requer a detecção de falhas incipientes, seu diagnóstico, isolamento e localização. Antes de diagnosticar uma falha é necessário detectá-la. O processo de detecção consiste em determinar a presença de anomalias nos componentes que integram o sistema PAU *et al.*, (1975); FÉRNANDEZ *et al.*, (2004).

Deve-se ressaltar que as ferramentas de análise de falhas aqui citadas permitirão calcular a confiabilidade do sistema por modo de falha afim de reduzir a probabilidade de ocorrência de tais falhas e também planejar métodos de manutenção tornando o sistema mais eficiente.

3.1 Definições de diagnósticos de falhas

Um sistema para diagnóstico de falhas é efetivo quando além de detectar, diagnosticar e isolar (*Fault Detection Isolation – FDI*), também corrige a falha. Esta efetividade pode ser observada na figura 35, onde um sistema que apresenta um sinal de degradação ou uma falha que implica em um mau funcionamento afetando o seu desempenho, tem seus sinais adquiridos e tratados pelo sistema de diagnóstico para correção das falhas. O mau funcionamento pode ser detectado pela não ocorrência de determinados eventos esperados na dinâmica do sistema. Assim, pode-se constatar que as condições de operação de um sistema podem ser verificadas pela identificação dos modos de falha, ou seja, pela maneira como o mau funcionamento ocorre. O sistema de diagnóstico só se torna efetivo se existe algum mecanismo de correção da falha, o que o também o torna adaptável e robusto.

figura 35 - Sistema de diagnóstico na monitoração do funcionamento de processos



Fonte: PAU (1975)

Um sistema robusto com estrutura rígida, possui mais restrições para se adaptar do que um sistema que possui uma estrutura flexível, pois além de robustos e flexíveis, estes devem ser reconfiguráveis. Um sistema de diagnóstico reconfigurável, além de detectar, identificar e isolar (*FDI*) o colapso, modifica as leis de controle para manter o seu funcionamento aceitável. Um sistema que é tolerante a colapsos através de reconfiguração é adaptável e redundante STENGEL, (1991).

A descrição da efetividade um sistema de diagnóstico, conforme mostrado na figura 35, utiliza uma terminologia técnica que deve ser formalmente transcrita para sua correta interpretação. Estes conceitos podem ser agrupados em três grupos conforme sugere PAU, (1975). O primeiro trata dos eventos básicos, os termos encontrados ou usados para o diagnóstico de falha formam o segundo grupo, e o terceiro grupo pode ser constituído de termos empregados na estrutura de controle que integra o sistema de diagnóstico, conforme apresentados na tabela 3.1 abaixo.

tabela 3.1

EVENTOS BÁSICOS	
Terminologia	Descrição
Anomalia (<i>fault</i>)	Anomalia, falta ou falha é definida como uma condição anormal ou defeito de um componente, equipamento ou subsistema de realizar um serviço de sua tarefa ou missão. Uma anomalia pode causar um colapso (<i>failure</i>) (ISO/CD 10303-226). De acordo com a Federal Standard 1073C dos estados Unidos, em sistemas de energia elétrica, uma falta (<i>fault</i>) é um curto-circuito. Por outro

	lado, um curto circuito pode ser considerado um defeito catastrófico, pois resulta em retirada de serviço (<i>failure</i>). Neste trabalho será empregado somente o termo falha (<i>failure</i>) para evitar se confundir com falta (<i>fault</i>).
Colapso (<i>failure</i>)	É o insucesso de um serviço, tarefa ou missão. É a condição ou estado caracterizado pela incapacidade do material, da estrutura ou do sistema em atender plenamente seus propósitos (tarefas ou missão), resultando na retirada de serviços (PAU, 1975). A falha que leva ao colapso todos os serviços é denominada uma falha catastrófica.
Falha Incipiente (<i>fault incipient</i>)	É quando uma falha não é catastrófica, ou seja, quando um sistema, subsistema ou equipamento se mantém em serviço apesar da ocorrência de uma falha de um de seus componentes. Uma falha é incipiente quando esta se manifesta antes que o colapso ocorra e produza um processo irreversível de degradação do funcionamento do sistema FERNÁNDEZ, (2004).
Degradação (<i>degradation</i>)	É um evento que prejudica ou deteriora a capacidade de desempenho de uma determinada tarefa ou missão, inclusive comandos inadequados e meio ambiente PAU, (1975).
Mau Funcionamento (<i>malfunction</i>)	É a incapacidade de operar de maneira normal ou de alcançar um determinado nível de desempenho PAU, (1975).
Modo de falha (<i>fault mode</i>)	É uma maneira particular no qual um evento esperado não acontece (ou desempenho de uma tarefa). É dito incipiente quando a não ocorrência do evento esperado não provoca por si só ou em curto prazo um colapso no sistema.
DIAGNÓSTICO	
Terminologia	Descrição
Detecção de Falha (<i>fault detection</i>)	Determina a presença de falhas nos componentes que integram o sistema FERNANDEZ, (2004), PAU, (1975).
Localização ou Identificação de Falha (<i>fault location</i>)	Designa o material, estrutura, componente ou subsistema onde tem ocorrido a falha (PAU, 1975). O termo identificação da falha (<i>fault identify</i>) também é usado no sentido da localização da falha.
Isolamento de Falhas (<i>fault isolation</i>):	Determina o conjunto de componentes do sistema que está afetado pelas falhas detectadas FERNANDEZ, (2004).
Correção de falhas incipientes (<i>fault accomodation</i>)	Atua corrigindo as falhas incipientes diagnosticadas. Quando esta tarefa é realizada através de ação do sistema de controle do processo, é dito que a correção é automática FERNANDEZ, (2004).
ESTRUTURA DE CONTROLE	

Terminologia	Descrição
Detecção e Isolação de Falhas (Fault Detection Isolation - FDI)	Capacidade de detectar, identificar e isolar uma falha.
Robustez	Um sistema é dito robusto quando é insensível a ruídos e a possíveis valores pontuais e atípicos nas medidas de modo que não se produza falsos alarmes FERNANDEZ, (2004). Pode-se dizer também que um sistema é robusto quando mantém um desempenho satisfatório na presença de variações do modelo, sem mudar sua estrutura ou seus parâmetros STENGEL, (1991).
Adaptabilidade	Avalia o nível de dificuldade de adaptação do sistema em relação à mudanças no seu comportamento CORRÊA <i>et al.</i> , (2008).
Redundância (redundance)	Habilidade para superar capacidade perdida usando os recursos remanescentes STENGEL, (1991).

Em análise prática, consultando a literatura a respeito do tema, pode-se dizer que ocorre uma segregação entre os métodos detecção e diagnóstico. Tais métodos, se baseiam nos dados de funcionamento do sistema, sejam estes determinísticos ou probabilísticos. A comparação entre estes dados obtidos de leituras do sistema com aqueles obtidos por um modelo gera desvios. Se os desvios forem desprezíveis o funcionamento é normal. Se os desvios forem significativos pode-se afirmar que o sistema tem um mau funcionamento, que pode ser diagnosticado como uma falha ou não. Estes desvios, portanto, poderão ser utilizados para identificar o modo de falha e diagnosticar o estado do sistema. Quando a este diagnóstico é associado ao tempo pode-se verificar a evolução de um mau funcionamento e prever o instante em que ocorrerá o defeito, ou seja, pode-se realizar, uma predição.

Os métodos de detecção de falhas aplicadas na monitoração em contínuo podem ser ou não associados ao tempo, podem ainda utilizar técnicas qualitativas ou quantitativas. Caso haja uma associação com o tempo é possível desenvolver métodos de predição e assim mitigar ou mesmo eliminar o defeito do sistema. Caso contrário esta detecção será útil apenas para a engenharia diagnosticar e localizar o defeito, além de acrescentar automaticamente o evento no histórico do processo.

Já o processo de diagnóstico está, tanto para medições automáticas como para observações humanas e consiste na determinação do tipo de falha com o mínimo de detalhes possíveis, tais como tamanho, localização e tempo de falha.

Caso nenhuma informação causa-efeito da falha esteja disponível experimentalmente, podem ser aplicados métodos de classificação para o diagnóstico de falhas, os quais fornecem uma base de conhecimento não estruturado.

A análise de falhas de um equipamento deve estar associada com às tarefas de averiguação efetuadas no mesmo ou por ventura em algum de seus componentes, isso, após a ocorrência de sintomas ou problemas devido a sua operação. Com base nisso a análise de falhas vem a ter duas finalidades principais:

- Averiguar o motivo da falha para que medidas sejam tomadas no intuito de extinguir a possibilidade de repetição futura;
- Alertar o usuário sobre o que possivelmente pode ocorrer caso o equipamento seja operado indevidamente.

No entanto, para uma análise efetiva, não basta apenas analisar isoladamente a falha ou dano, mas também, é essencial fazer um levantamento de como o processo que ocasionou a falha ocorreu; quais sintomas apresentavam; se o problema já tinha ocorrido anteriormente; o intervalo de tempo que o grupo gerador permaneceu operando, desde a sua aquisição até sua última manutenção; quais foram os tipos de reparos que foram feitos no equipamento; em quais regimes de trabalho que ocorreu a falha; quais foram os reparos e serviços feitos anteriormente; quem era o operador do equipamento (verificando se o mesmo tinha qualificação para a operação), e por quanto tempo permaneceu nesta função; assim como, toda e qualquer informação que venha a contribuir para a localização da causa do problema ocorrido.

3.2 Técnicas de diagnósticos de falhas aplicadas a GMGs

Na identificação dos efeitos e causas relacionadas a análise falhas pertinentes a GMG, para posterior diagnóstico, algumas técnicas podem ser utilizadas, tais como: Diagrama de Ishikawa, Análise de Árvore de Eventos (ETA - *Event Tree Analysis*), Análise da Árvore de Falhas (FTA - *Fault Tree Analysis*).

Segundo SAKURADA, (2001), o diagrama de Ishikawa organiza (agrupa) as causas que conduzem a um efeito e o Método da Análise da Árvore de Falhas relaciona as causas, através do uso de portas lógicas, que conduzem a um dado efeito. Ambos os métodos tratam de causas e efeitos de falha, no entanto, com diagrama de Ishikawa não é necessário que se tenha tanto conhecimento do sistema

em estudo quanto no Método da Árvore de Falhas. Já a Árvore de Eventos é um método que permite obter a probabilidade de falha ou a não-confiabilidade do sistema.

O diagrama de Ishikawa foi desenvolvido por Kaoru Ishikawa e é também conhecido como diagrama de “Causa e Efeito”, ou “Espinha de Peixe”. É uma ferramenta de fácil utilização, permitindo abordar problemas em diversas áreas.

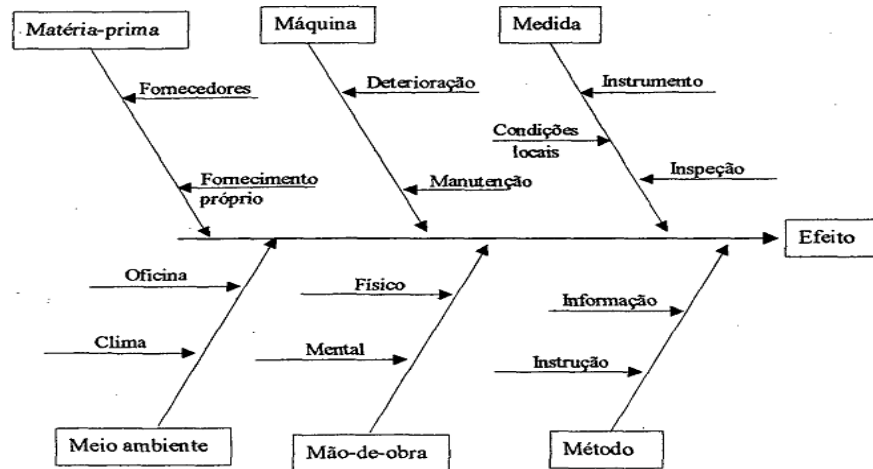
O diagrama de Ishikawa é uma ferramenta muito indicada para iniciar uma análise sobre as falhas de um sistema, pois apresenta uma visão panorâmica propiciando uma visão mais prática do problema. Entretanto, outras ferramentas devem ser utilizadas e implementadas incorporando informações mais detalhadas relacionadas ao sistema a fim de se ter um estudo mais aprofundado.

Conforme Sakurada, (2001), na construção do Diagrama Causa e Efeito deve-se seguir os seguintes passos:

- ◆ Estabelecer o efeito da falha;
- ◆ Encontrar o maior número possível de causas que possam afetar o efeito;
- ◆ Estipular uma importância para cada causa, que pareça ter uma relação significativa com o efeito;
- ◆ Registrar quaisquer informações necessárias.

Como ilustrado na figura 36, a estrutura de um Diagrama de Ishikawa em que foram identificadas diversas causas no qual atuando em conjunto ou isoladamente irão desencadear um efeito geralmente indesejado ou anormal. Essas principais causas geralmente estão agrupadas em certos fatores ou características inerentes a essas causas e que tem influência sobre elas.

figura 36 - Modelo de diagrama de Ishikawa



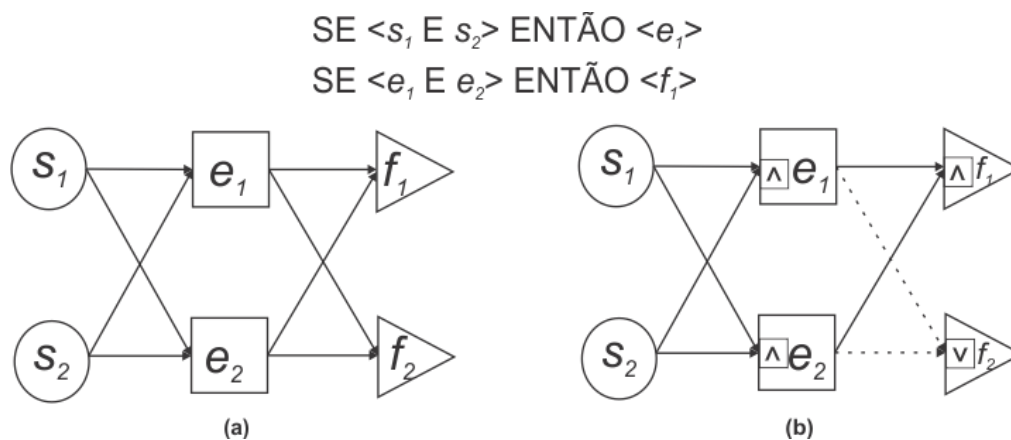
Fonte: Sakurada (2001)

A Análise da Árvore de Eventos (ETA – *Event Tree Analysis*), é representada através de ramificação binária. Este método de análise de sistemas, ilustra todos os eventos que podem ocorrer, quando determinado sistema está em operação. A ocorrência de eventos sempre associada aos componentes que compõe um determinado sistema, resume-se a dois tipos de casos: sucesso ou falha.

A Árvore de Eventos, é uma técnica tanto qualitativa como quantitativa, segundo SAKURADA, (2001). Ela é utilizada de forma qualitativa para identificar as decorrências do evento inicial. O cálculo quantitativo é utilizado para estimar a frequência de cada ocorrência ou a probabilidade de falha acontecer.

Na figura 37 é ilustrada uma rede causal, com os nós como estados e limites como as relações. O fundamento dessas causalidades sugere a Análise da Árvore de Eventos (ETA – *Event Tree Analysis*), iniciando nos sintomas para as falhas utilizando Encadeamento para Frente (*Forward Chaining*). Para realizar um diagnóstico, este conhecimento qualitativo pode ser agora expresso em forma de regras, SE <condição> ENTÃO <conclusão>. A parte das condições (premissas) contém fatos na forma de sintomas s_i como entradas, e a parte das conclusões incluem eventos e_k e falhas f_j como uma causa lógica dos fatos. Para alguns processos técnicos, as relações básicas entre falhas e sintomas são, pelo menos parcialmente conhecidas na forma de relações causais: falhas \rightarrow eventos \rightarrow sintomas.

figura 37 - Diagnóstico de falhas usando métodos de inferência: (a) redes causais e (b) árvores de sintomas de falhas



Fonte: Isermann, (2006)

Uma forma complementar, extremamente importante e de fácil utilização no diagnóstico de falhas, é a utilização da unidade de supervisão de corrente alternada (USCA). Este dispositivo se compromete em monitorar a tensão proveniente da concessionária de energia elétrica local, e em caso falta de eletricidade e posterior retorno, esta unidade de monitoração, por meio de seus dispositivos internos microprocessados, permite a partida ou parada de maneira segura do equipamento. Além disso, conforme a figura 38 ilustra, o equipamento possui uma interface homem máquina (IHM), constituído de display de cristal líquido, no qual indica com informações o funcionamento, normal ou não, do GMG. Em geral, podemos fazer a leitura dos seguintes dados:

figura 38 - Imagem ilustrativa de um módulo USCA ST2130



Fonte: <<https://www.mfrural.com.br/detalhe/usca-st-2000-stemac-venda-base-de-troca--66335.aspx>>

Acessado em: 01/02/2019.

- Tensão (V) de fase (entre fase e neutro) e de linha (entre fase e fase)
- Frequência (Hz)
- Correntes das fases (A)
- Potência ativa (Kw), reativa (KVAr) e aparente (KVA)
- Energia ativa (Kwh) e reativa (KVArh)
- Fator de potência
- Rotações por minuto do motor (rpm)
- Temperatura do líquido do arrefecimento (°C)
- Tensão da bateria do motor (V)
- Pressão do óleo de lubrificação (bar)
- Números de partidas
- Tempo de funcionamento do GMG
- Intervalos de manutenção do equipamento
- As proteções (ANSI)

Em relação as proteções ANSI (American National Standard Institute) / IEC (International Electrotechnical Commission's) 61850, norma esta, que fomenta os códigos implementadas na USCA. Podendo estar no modo gerador ou modo rede, logo, os códigos poderão estar dispostos da seguinte forma:

Modo gerador:

- Subtensão (ANSI 27)
- Sobretensão (ANSI 59)
- Subfrequência (ANSI 81)
- Sobrefrequência (ANSI 81)
- Sobrecarga (ANSI 32O)
- Sobrecorrente instantânea (ANSI 50)
- Baixa pressão do óleo lubrificante (ANSI 63)
- Alta temperatura (ANSI 26)
- Nível de água no radiador (ANSI 71)
- Sobrevelocidade (ANSI 12)
- Baixa temperatura da água do radiador (ANSI 26L)
- Sequência de fase (ANSI 47)
- Check de sincronismo (ANSI 25)

Modo rede:

- Subtensão (ANSI 27)
- Sobretensão (ANSI 59)
- Subfrequência (ANSI 81)
- Sobrefrequência (ANSI 81)
- Sobrecarga (ANSI 320)
- Sobrecorrente instantânea (ANSI 50)
- Sequência de fase (ANSI 47)
- Check de sincronismo (ANSI 25)

Os códigos de falhas citados acima, indicam ao operador do GMG, o funcionamento do equipamento durante seu período de operação, e em caso de anomalias, medidas devem ser tomadas afim de evitar danos maiores. Alguns códigos, tem somente a motivação de registrar informações importantes para o monitoramento do equipamento.

3.3 Análise de Árvore de Falhas (FTA)

Árvores de falhas são boas ferramentas gráficas intuitivas para exibir relações binárias que levarão as falhas. A estrutura hierárquica auxilia a compreensão humana, e são comuns para análise e diagnóstico em aplicações de segurança crítica. Probabilidades quantitativas de falhas podem, também, ser resultantes de uma árvore de falhas. Estas necessitam de informação sobre a probabilidade de falhas dos elementos individuais, pela combinação desses elementos com a Árvore de Falhas, é possível calcular a probabilidade de defeito no sistema.

Desenvolvido por H.A. Watson, do Bell Telephone Laboratories em 1961, para avaliar o grau de segurança do sistema de controle de lançamento de mísseis Minuteman, foi posteriormente adaptado a outras funções. Sua utilização abrange aspectos diversos que vão desde projetos de máquinas e equipamentos até à análise de processos industriais ou administrativos.

A FTA “é uma técnica dedutiva formalizada que permite a investigação das possíveis causas da ocorrência de estados pré-identificados indesejados do sistema. Esse estado, referido como evento de topo, está associado com o comportamento

anormal do sistema, causado por uma falha no equipamento, ou erros humanos e/ou por perturbações externas” CONTINE, (1995).

Segundo BILLINTON e ALLAN, (1985), a técnica é frequentemente usada como um método de avaliação qualitativa, para auxiliar na compreensão de como um sistema pode falhar, e que medidas podem ser usadas para remover as causas da falha. O método também pode ser usado para uma avaliação quantitativa, em que as causas da falha do sistema são gradualmente separadas em um aumento do nível hierárquico até alcançar um nível, no qual os dados de confiabilidade são suficientes ou precisos para ser feita uma avaliação quantitativa.

Na análise quantitativa a probabilidade da ocorrência da falha juntamente, com outros índices quantitativos são calculados matematicamente no qual uma taxa de falhas indica quais componentes do sistema são mais críticos.

Por se tratar de um procedimento altamente detalhado, a FTA requer um grande número de informações e um profundo conhecimento do processo em estudo. A partir do momento que se obtém o conjunto de eventos que constituem o limite da árvore e identificadas as causas através de seus efeitos, deverá ser elaborado um plano de ação com propósito de solucionar a falha em questão. Seu modelo gráfico, permite de maneira mais simples identificar a sequência dos diferentes eventos que podem resultar o evento do topo. A análise é conduzida até atingir situações básicas de simples solução.

Segundo Helman & Andery, (1995), sua aplicação tem como finalidade:

- Estabelecer um método padronizado de análise de falhas ou problemas, verificando como ocorrem em um equipamento ou processo;
- Auxiliar o analista identificar dedutivamente as falhas dos sistemas e leva-lo a uma maior compreensão em relação ao comportamento do mesmo;
- Apontar os aspectos mais importantes ou críticos do sistema em relação a uma falha particular;
- Priorizar as ações corretivas que serão tomadas;
- Analisar e projetar os sistemas de segurança ou sistemas alternativos em equipamentos;
- Compilar as informações para manutenção de sistemas, elaborar procedimentos de

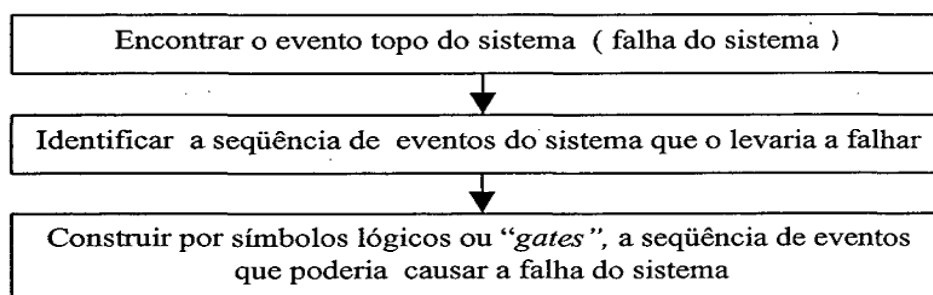
manutenção, treinar a operação de equipamentos e planejar os testes e a inspeção;

- Simplificar e otimizar os equipamentos;
- Analisar a confiabilidade do produto ou processo.

A FTA parte de uma situação anormal (sintoma) do sistema e desce até as causas mais básicas, responsáveis por ela. Por causa disso, essa técnica é conhecida com (*top-down*) que significa “de cima para baixo”.

Conforme SOUZA, (1999), a estrutura básica para formar uma árvore de falhas é mostrada na figura 39 abaixo:

figura 39 - Estrutura básica para criação de uma FTA



Fonte: Souza (1999)

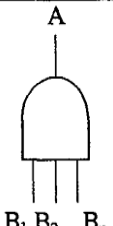
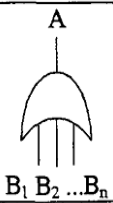
A Análise de Árvore de Falhas é uma boa técnica quando se pretende identificar as causas que podem causar um efeito indesejável, normalmente falha ou avaria do sistema. Este método pode ser desenvolvido através das seguintes etapas:

- Identificar o objetivo da Árvore de Falhas;
- Definir o evento de topo;
- Definir o âmbito da Árvore de Falhas;
- Definir as regras base da Árvore de Falhas;
- Construir a Árvore de Falhas;
- Avaliar a Árvore de Falhas;
- Interpretar os resultados.

A estrutura básica de uma árvore de falha consiste em vários níveis hierárquicos relacionados ao evento topo dependendo da complexidade do sistema. Esses níveis hierárquicos formam um encadeamento de eventos e são combinados através de portas lógicas, geralmente “E” e “OU”. Esses eventos são representados por quatro símbolos básicos (retângulos, círculos, losangos e triângulos), frisando que

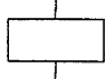
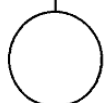
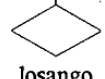

o losango simboliza um evento não desenvolvido por falta de informações, presentes no projeto da peça ou componente. Assim, cada símbolo denota uma particularidade do evento e correspondem aos acontecimentos relacionadas a cada falha. A graduação ou posição dos níveis hierárquicos dependerá de quão o evento está relacionado ao evento topo, isto é, um nível superior que esteja mais próximo do evento topo está ligado a ele de forma mais direta. A figura 40 e a figura 41, apresentam as portas lógicas e os símbolos mais utilizados que constituem o esqueleto estrutural de uma árvore de falhas com suas respectivas relações e significados.

figura 40 - Portas lógicas "E" e "OU"

Símbolo	Nome	Relação causal
	E	O evento de saída "A" ocorre se todos os eventos de entrada "B ₁ , B ₂ ...B _n " ocorrerem simultaneamente.
	OU	O evento de saída "A" ocorre se qualquer um dos eventos de entrada "B ₁ , B ₂ ...B _n " ocorrer ou qualquer combinação destes ocorrer.

Fonte: Sakurada (2001)

figura 41 - Representação de eventos

 <p>retângulo</p>	Evento representado por uma porta lógica.
 <p>círculo</p>	Evento básico com dados suficientes.
 <p>losango</p>	Evento não desenvolvido
 <p>"transfer out" e "transfer in"</p>	Símbolo transferência.

Fonte: Sakurada (2001)

Este trabalho restringe-se a FTA aplicada a Grupo Moto-Geradores. Sua efetividade na identificação e mitigação de falhas deve ser implementada de forma conjunta a outras técnicas de detecção e diagnóstico de falhas.

É importante salientar que, as árvores apresentadas para aplicações industriais não são utilizadas para análises de confiabilidade, e sim para o diagnóstico, isto é, para visualizar o raciocínio diagnóstico dos sintomas às falhas. Então é necessário projetar uma árvore de falhas para cada uma das n_f falhas. As folhas da árvore são compostas de n_s sintomas disponíveis. A identificação da falha ocorrida é uma simples avaliação binária de diferentes árvores. Em muitas aplicações, contudo, esta representação binária não é suficiente, sendo mais comum que certos sintomas sejam claramente reconhecidos ou que estes sejam incertos.

4 MÉTODO FTA APLICADO AO DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM GMGS

As falhas em Grupos Geradores podem ser classificadas em dois tipos de acordo com sua natureza: falha de natureza mecânica e falha de natureza elétrica. Seguindo a os passos da técnica de análise de falhas mencionada em detalhes anteriormente, podemos fazer uso desta, para obter um caminho lógico do que ocasionou problema a determinada peça ou componente. Contudo, efetuar uma análise, para cada peça passiva de falhas e danos, que compõe um GMG, é uma tarefa muito massiva, requerendo um significativo intervalo de tempo. Portanto, restringimos nossa análise a uma falha de ordem mecânica, e uma de ordem elétrica, estas falhas, por si só, já se correlacionam com um gama enorme de possibilidades que podem ser causadoras das falhas.

4.1 Principais Falhas em Grupo Moto-Geradores

4.1.1 Falhas no motor diesel

Em um motor diesel estacionário, existem muitas peças que são passivas de defeitos, sejam eles por má operação ou erros construtivos. Porém, GIRUX, (2018), comenta que, um bom plano de manutenção contribui e muito para prolongar a vida útil do equipamento. Mesmo assim, em um dado momento alguma falha irá acontecer, pois, é natural devido ao uso. Esses problemas são em muitas vezes relacionados à lubrificação, problemas como: consumo excessivo de óleo lubrificante; desgaste excessivo de cilindros/camisas; pistões e anéis de segmento; formação de borras; desgaste excessivo das bronzinas; formação de borras de depósitos em pistões, cilindros/camisas, válvulas e colagem dos anéis de segmento; perda de pressão do óleo; dificuldade na partida ou corrosão no cárter

Além disso, falhas prematuras (falhas ocorridas antes do fim da vida útil estimada para o componente) em pistões podem ser observadas, e estas, geralmente tem relação com erros na montagem dos mesmos. Mas também, podem ter suas causas devido ao mau funcionamento do motor, como por exemplo: danos má por detonação da mistura ar-combustível; excesso de combustível injetado; falta de refrigeração; erosão do topo; trincas na saia do pistão ou deformação da parte superior da camisa.

As bronzinas também são peças de grande relevância ao motor, e são projetadas justamente para se sujeitarem ao desgaste, preservando as partes móveis. Porém, seus danos podem ser prematuros, devido a erros de montagem, que podem ser: contaminação por impureza; alojamento ovalizado; biela empenada ou torcida; bloco deformado ou virabrequim deformado.

Sabendo de todos esses problemas causadores de danos ao motor, é conveniente ficar atento a sinais que o motor emite, quando está com alguma falha, ou entrando em processo de falha, estes sinais podem ser: coloração estranha dos gases de escapamento; consumo elevado de combustível; irregularidades na combustão; ruídos no motor; perda de potência; produção excessiva de gases pelo motor ou superaquecimento.

4.1.2 Falhas no gerador síncrono

Segundo RIGONI, (2014), as principais causas para o surgimento de faltas em máquinas síncronas ocorrem por contaminação por partículas sólidas ou umidade, resfriamento insuficiente, relés de proteção com acionamento inadequados, desgastes de isolantes por envelhecimento ou vibração excessiva, corrosão dos materiais isolantes, problemas de fabricação ou manuseio inadequado durante operação e instalação.

Falhas elétricas nos enrolamentos de campo e armadura não são raros devido a curto-circuito entre as espiras, provenientes de rompimento de isolamentos causando danos de graves. Segundo LEITE, (2007), esta falta produz sobreaquecimento, desbalanceamento térmico, vibração, desbalanceamento de impedâncias e corrente de excitação excessiva.

O gerador está sujeito a diversas condições anormais de funcionamento, tais como: sobreaquecimento, sobretensões, perda de excitação, etc. Dentre essas condições anormais, destaca-se a perda de excitação, fenômeno para o qual utiliza-se uma proteção específica (função ANSI 40), a qual detecta a subexcitação da máquina e a desconecta da rede mantendo a estabilidade do sistema elétrico de potência, ITCZAK, (2016).

Quando o gerador está operando sem excitação ou parcialmente excitado ele pode sofrer danos decorrentes de sobreaquecimento imposto aos enrolamentos do estator, corpo do rotor, anéis de retenção e demais extremidades do núcleo do estator,

especialmente em máquinas com rotores cilíndricos, produzindo instabilidade e colapso de tensão, GAZEN, (2015).

4.2 Aplicação da FTA

4.2.1 FTA aplicada ao motor diesel

A figura 42 abaixo, permite visualizar os caminhos obtidos pelas as constatações feitas, com base naquilo que foi citado anteriormente sobre falhas mecânicas. Os passos seguidos são conexões, com os prováveis causadores do problema. Em conformidade com as explicações detalhadas no capítulo 3, sobre a simbologia que a figura apresenta, e suas porta lógicas. Seguindo este conceito chegamos ao formato Árvore de falha mecânica, que a figura demonstra.

As falhas em pistões e anéis de seguimento do motor estacionário, podem partir principalmente, de dois sistemas que compõem o mesmo: o sistema de lubrificação e de arrefecimento. No sistema de lubrificação, pode ter várias causas como motivo de falhas, porém, selecionamos quatro principais causadores de defeitos neste sistema, alguns listados dentro de círculos, denotando ser uma falha básica, ou seja, com medidas simples de manutenção ou substituição, se resolve o problema. E estão conectados pela porta lógica “ou”, significa que um, ou todos, podem ocasionar a falha, as causas são:

- (1) Baixa pressão do óleo por bomba de óleo estar danificada;
- (2) Baixa pressão do óleo por mola da válvula de segurança estar fraca, deixando-a aberta, vazamentos;
- (3) Nível de óleo do motor baixo, que tem como causa ou: i) juntas do motor ressecadas, vazamentos, ii) furos ou trincas no cárter, iii) anéis de segmento;
- (4) Lubrificante contaminado por sujeira ou material abrasivo, tendo como causa ou: i) ausência do filtro de malha de aço na entrada da tubulação de óleo, ii) filtro lubrificante inadequado.

Agora, o outro sistema que pode ser causador de falhas em pistões e anéis de segmento, é o sistema de arrefecimento. E mais uma vez frisamos que, muitos outros fatores podem motivar tais falhas nesse sistema, porém, registramos as mais prováveis, que são oito, e estão conectadas pela porta lógica “ou”, são elas:

- (1) Vazamentos de água (pela mangueira do radiador);

- (2) Entupimento do radiador, que pode ser causado ou por: i) partículas estranhas no fluido de arrefecimento, formação de depósitos sólidos;
- (3) Falhas mecânicas na bomba de água;
- (4) Vazamentos pelas passagens e câmaras de refrigeração, tendo como causas, ou: i) trincas no bloco do motor na região das câmaras de água, ii) anéis de vedação das camisas dos cilindros danificados;
- (5) Falta de água no radiador;
- (6) Correia do ventilador gasta ou rompida;
- (7) Válvula termostática com defeito;
- (8) Perda de força elástica da mola da válvula de pressão da tampa do radiador.

4.2.2 FTA aplicada ao gerador síncrono

Conforme ilustrado na figura 43, pode-se constatar que o evento topo (efeito) da árvore de falhas é a perda de excitação, pois, é um evento que pode causar uma série de danos aos componentes do GMG e estudos sobre métodos de proteção ainda são muito pesquisados.

Segundo dados obtidos através da literatura, as causas primárias de perda de excitação são:

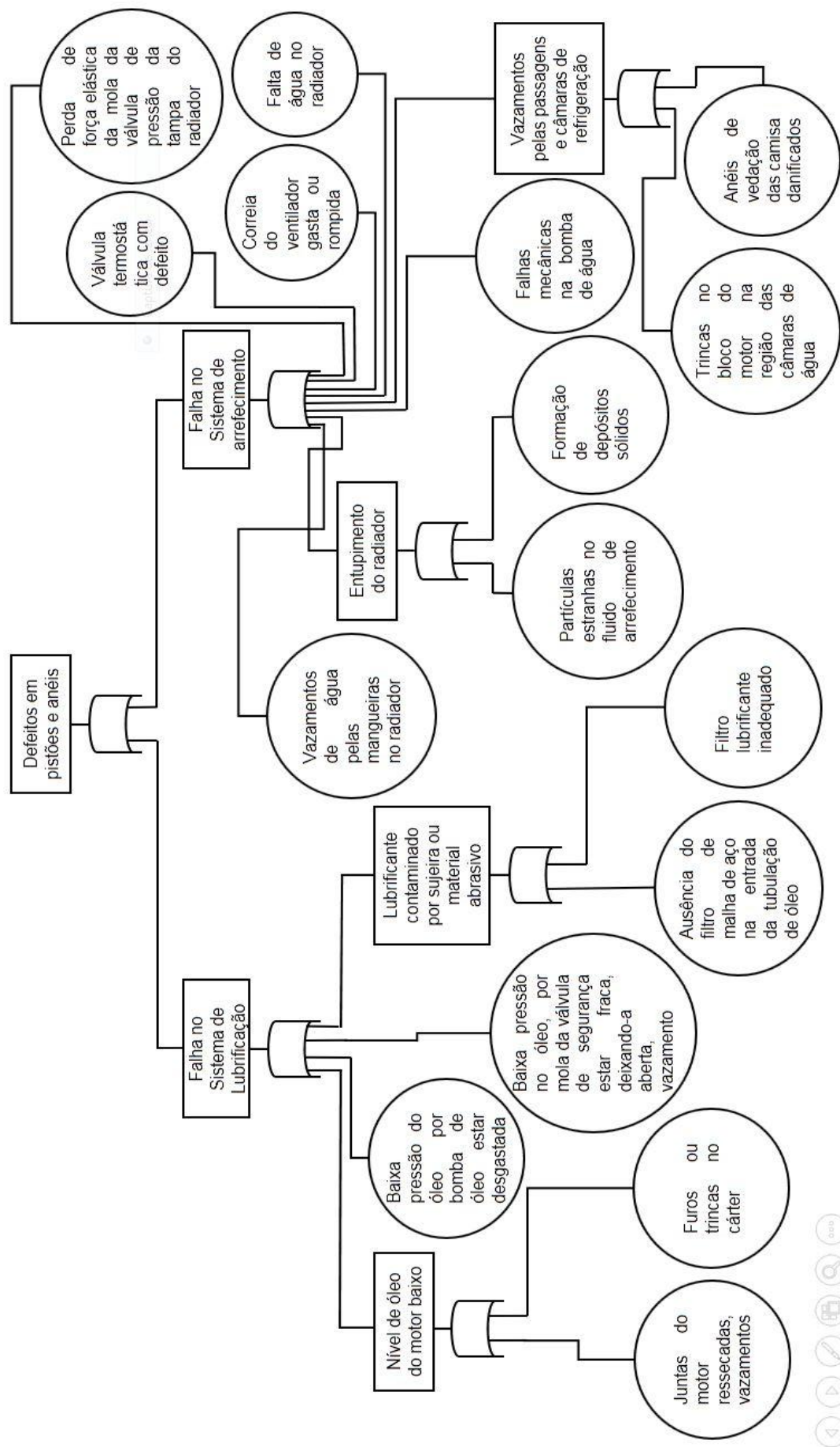
- i. Abertura acidental do disjuntor;
- ii. Tensão acima da nominal;
- iii. Curto-circuito no enrolamento de campo;
- iv. Falha no regulador de tensão;
- v. Mau contato das escovas da excitatriz;
- vi. Problemas mecânicos nos componentes do conjunto de excitação.

Pode-se verificar também que a perda de sincronismo irá ocorrer, porém, somente se um sistema de proteção for de baixa atuação.

Segundo método sequencial, com a utilização de portas lógicas e símbolos de eventos, foi diagnosticado falhas secundárias chegando-se até as causas mais básicas que causaram o evento topo.

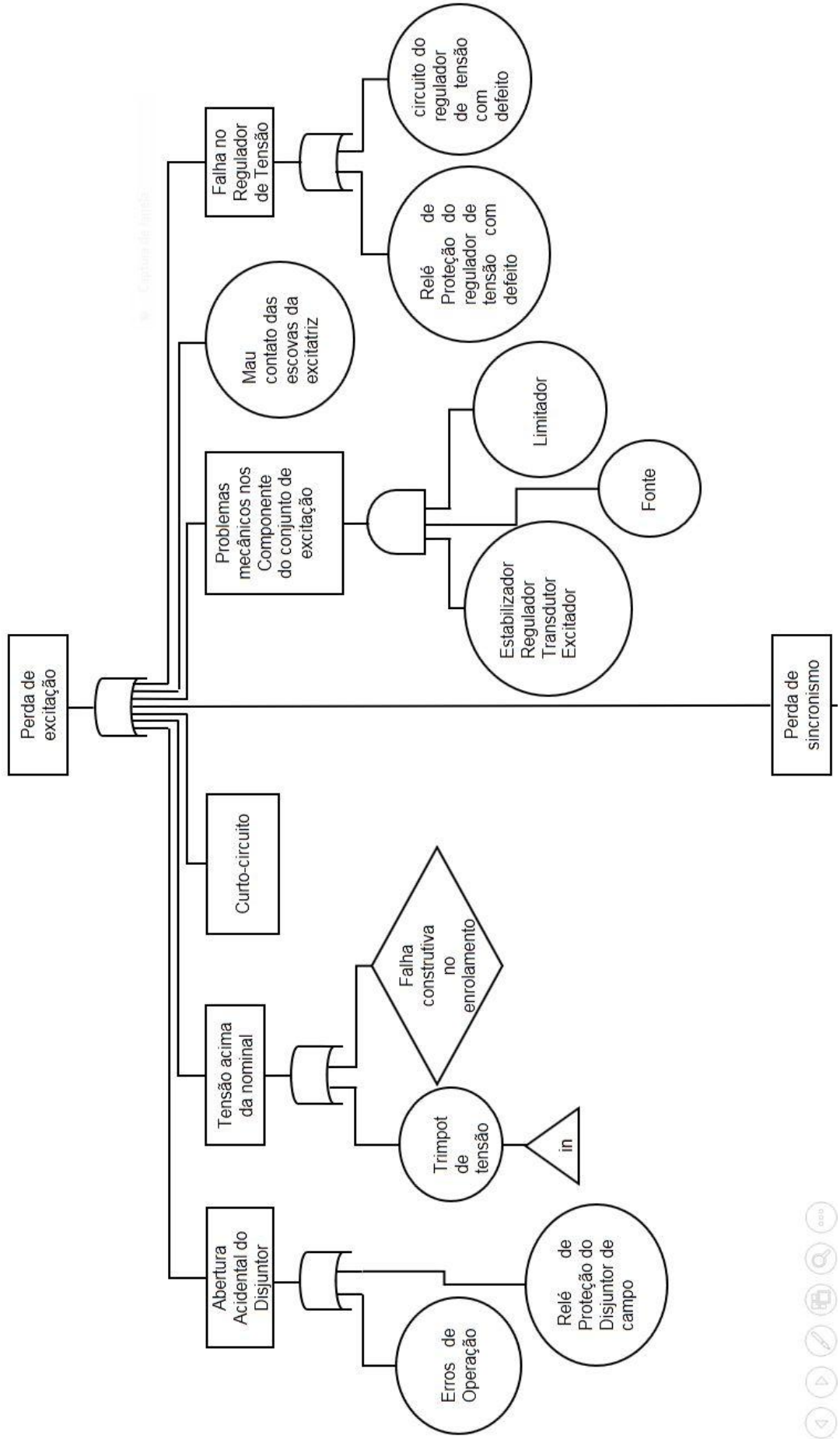
Foi desenvolvido também uma sub-árvore, apresentado na figura 44, que é uma ramificação causal da perda de excitação com seus respectivos desmembramentos causais em relação ao efeito topo.

figura 42 - Árvore de falha mecânica do motor diesel estacionário



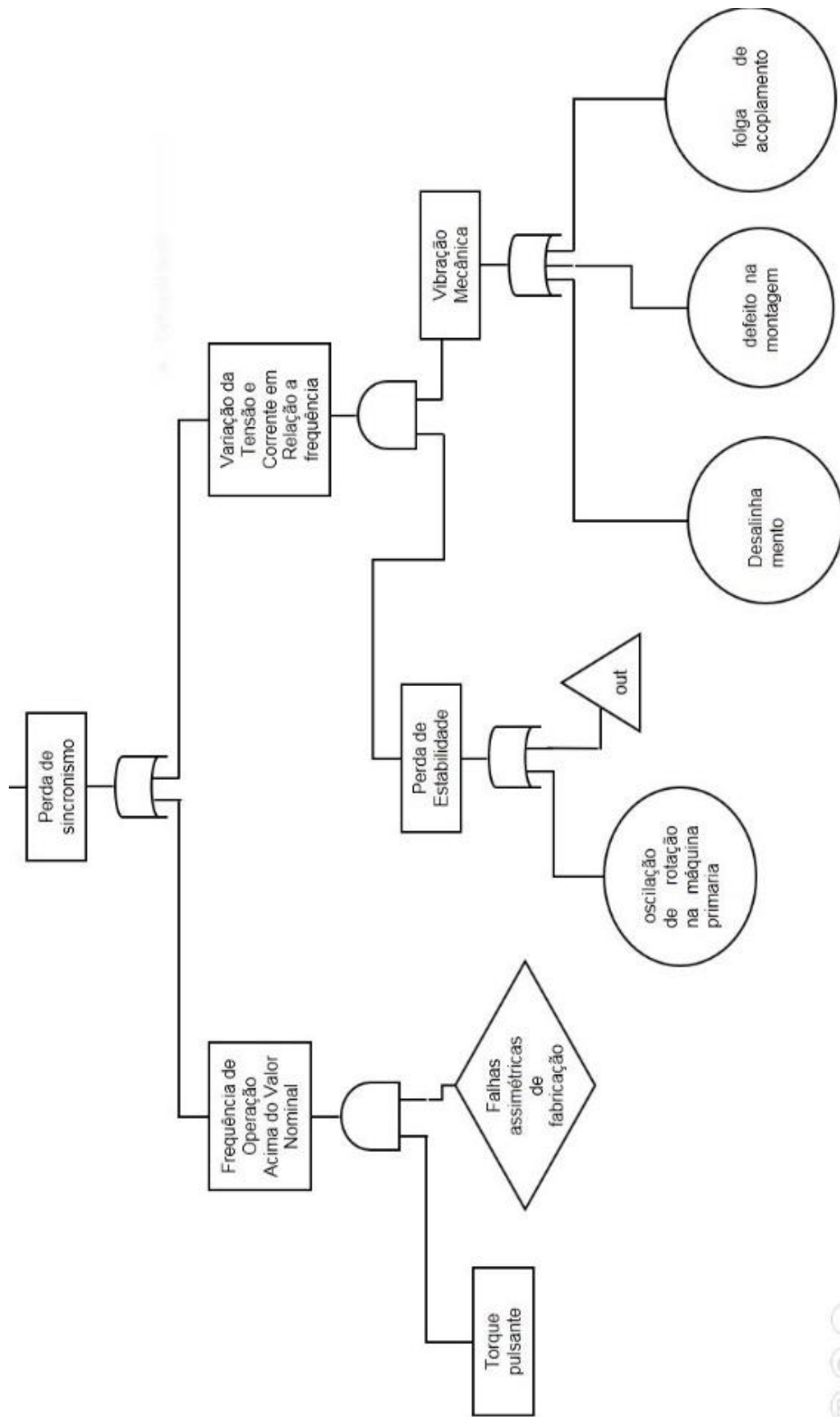
Fonte: Autores (2019)

figura 43 - Árvore de falha do gerador síncrono, perda de excitação



Fonte: Autores (2019)

figura 44 - Árvore de falha do gerador síncrono, sub-Árvore



5 CONCLUSÃO

Este trabalho se propôs em explicar as principais formas de análise de falhas, em peças e componentes, que integram um Grupo-Gerador. Com a finalidade de mapear os eventos ou situações que levaram à ocorrência da problemática. Aplicando este conceito para proporcionar uma melhor gestão e operacionalização de um GMG. Um equipamento que, mesmo frente a tantas formas alternativas de geração de energia elétrica existentes na atualidade, ainda é muito demandado pela sociedade, haja vista, a ocorrência frequente de falta de fornecimento de energia elétrica pelas concessionárias de energia elétrica locais.

Portanto, a técnica, dentre as existentes, que se mostrou mais adequada para nossa proposta de analisar estas falhas, tanto de ordem elétrica quanto mecânica de um GMG, foi o método da árvore de falhas. Essa técnica se mostrou muito específica e direcionada, convergindo para o caminho lógico e o mais provável ocasionador de uma determinada falha.

Como é sabido, a grande maioria das empresas presam por sua lucratividade e estabilidade de operação, assim como, instituições e prédios públicos, portanto, para não serem surpreendidos com a falta de fornecimento elétrico em momentos de grande demanda de funcionamento ou mesmo pelo simples fato de que não podem interromper sua operação, previnem-se adquirindo Grupos-Geradores para eventuais emergências ou redução de custos com conta de energia elétrica. Por isso, o estabelecimento de planos de manutenções periódicas é fundamental para evitar surpresas durante a operação do equipamento, haja vista, que é inevitável o desgaste das peças, tanto do motor Diesel estacionário, como do gerador (alternador) em si.

A técnica da árvore de falhas é apenas uma ferramenta para se chegar até as alternativas de solução de determinado problema no equipamento, e no caso deste trabalho, a técnica se ateve em analisar dois problemas pontuais, um de ordem mecânica e outro de ordem elétrica que podem afetar um GMG. No entanto, como se trata de um equipamento composto por dezenas de peças, analisar todas elas, é uma tarefa muito massiva. Portanto, diante deste fato, surge a oportunidade para trabalhos futuros, seguindo essa linha de raciocínio. Fazendo uso de programas de inteligência computacional que possibilitem uma gestão mais precisa das falhas.

REFERÊNCIAS

- AFFONSO, Guilherme Machado. Automação de grupo gerador para utilização em emergência e redução da demanda no horário de ponta. 2017.
- ALVES, Mário Ferreira. ABC das máquinas elétricas. **D. d. E. Eletrotécnica, Ed**, 2003.
- BIM, Edson. Máquinas elétricas e acionamento. 2015.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. AMGH editora, 2013.
- CUMMINS, P. G. **Engenharia de Aplicações**: manual de aplicações para Grupos Geradores arrefecidos a água, 2011.
- CURSO MAHLE METAL LEVE, **MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**, Manual Técnico, março 2016. Disponível em: <<https://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-latin-america/catalogs/manuais-tecnicos/2016-04-19-manual-curso-de-motores-2016.pdf>>. Acesso em janeiro 2019
- FAJONI, Fernando Cardoso. Estudo sobre determinação de parâmetros elétricos de geradores síncronos de polos salientes. 2010.
- FERNANDES, João Leal. **Máquina síncrona em regime transitório após brusco curto-circuito no estator**, 2006. Tese de Doutorado. FCT-UNL.
- FIGUEIREDO, Ricardo (RF Eletro-Eletrônica Ltda). Sistema Inteligente Para Controle, Supervisão e Gerenciamento de Grupos Geradores – Gestal. 2009. Pdf. Disponível em: <<http://www.gestal.com.br>>. Acessado em novembro 2018.
- GALDINO, J. C. S. Apostila: **Grupo Moto Gerador**. 2011. Disponível em <http://www3.ifrn.edu.br/~jeangaldino/dokuwiki/lib/exe/fetch.php?media=apostila_grupo_motor_gerador1.pdf>. Acesso em dezembro de 2018.
- GIRUX, **Análise de Falhas em Motores**. Motores de Combustão Interna: Falhas e Troubleshooting. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/100687177/Analise-de-Falhas-Em-Motores-Diesel>>. Acesso em dezembro 2018.
- GONICK, Larry; HUFFMAN, Art. DE MENEZES, Luis Carlos. Introdução à Física. Harbra, 1994.
- HALLIDAY & RESNICK. **Fundamentos de física**, vol. 1: mecânica – 10ª ed., 2016.
- HELMAN, Horacio; ANDERY, Paulo Roberto Pereira. Análise de falhas:(aplicação dos métodos de FMEA e FTA). 1995.
- <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h68/h68/WEG-curso-dt5-caracteristicas-e-especifica-o-de-geradores-artigo-tecnico-portugues.pdf>
- ISERMANN, R. Fault-Diagnosis Systems: Na Introduction From Fault Detection to Fault Tolerance. Springer Berlin, 2006.
- KLEMPNER, Geoff; KERSZENBAUM, Isidor. Operation and maintenance of large turbo-generators. 2004.

KOSOW, Irving L. Máquinas elétricas e transformadores. 1985.

MARTINS, Jorge. **Motores de Combustão Interna**, 2ª ed. Publindústria, 2006.

PAU, Lois-François, Failure Diagnosis and Performance Monitoring, Marcel Dekker Inc., 1975, ISBN: 0-8247-1087-5.

PEREIRA, J. C. **Motores e geradores**: princípios de funcionamento, instalação, operação e manutenção de grupos diesel geradores, 2003. Disponível em: < <http://www.joseclaudio.eng.br> >. Acesso em dezembro de 2018.

PERES, Larissa Marques. Estudos de desempenho dinâmico de geradores síncronos de produtores independentes em sistemas de geração distribuída via ATPDraw, 2013.

RACHE, A. M. Marco. **Mecânica Diesel**: Caminhões – Pick-ups – Barcos, 2004.

SAKURADA, Eduardo Yuji. As técnicas de Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos e Análise da Árvore de Falhas no desenvolvimento e na avaliação de produtos, 2001.

SILVA, Charlise Martins da. A geração distribuída e o uso de grupos geradores. **Engenharia Elétrica Telemática-Pedra Branca**, 2013.

SOUZA, Rubens Antônio de. **Confiabilidade e Falhas de Campo – Uma Metodologia para Suporte ao Projeto**: Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, Florianópolis – SC, 1999.

SUNI, Pequena; CARLOS, Juan. Sobre a determinação de parâmetros de geradores síncronos para estudos de comportamento dinâmico de sistemas elétricos. 2009.

TILLMANN, Carlos Antônio da Costa. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas**: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Sul-Rio-Grandense Pelotas – RS, 2013.

UMANS, Stephen D. Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley-7. 2014.

VARELLA & SANTOS. **Noções Básicas de Motores Diesel**: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, 1ª ed. Julho 2010.