



**Serviço Público Federal
Ministério da Educação
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO
GROSSO DO SUL**



PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RICARDO CAMPARIM

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE GRUPOS GERADORES QUANDO
CONECTADOS A UMA CARGA INDUTIVA**

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Luciana Cambraia Leite

Coorientador:

Prof. Dr. Valmir Machado Pereira

**Campo Grande – MS
Julho / 2015**



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO
GROSSO DO SUL**



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**“AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE GRUPOS GERADORES QUANDO
CONECTADOS A UMA CARGA INDUTIVA”**

RICARDO CAMPARIM

Orientadora: Prof^ª. Dr^ª. Luciana Cambraia Leite

Coorientador: Prof. Dr. Valmir Machado Pereira

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Energia, planejamento, operação e controle de sistemas elétricos

Campo Grande – MS
Julho/2015



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO
GROSSO DO SUL**



**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE GRUPOS GERADORES QUANDO
CONECTADOS A UMA CARGA INDUTIVA**

RICARDO CAMPARIM

‘Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul’

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Luciana Cambraia Leite
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS
Mato Grosso do Sul – MS

Prof. Dr. Leandro Sauer
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS
Mato Grosso do Sul – MS

Prof. Dr. Luigi Galotto Junior
Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS
Mato Grosso do Sul - MS

DEDICATÓRIA

Após muita determinação e dedicação chego ao fim de mais uma etapa em minha vida. Este caminhar só foi possível graças ao apoio da minha esposa Maria Eugênia Petenuci, por isso dedico este trabalho a ela.

AGRADECIMENTOS

A minha formação profissional não teria sido possível sem a presença de Deus que sempre esteve ao meu lado, meus pais Antônio Camparim e Francisca Freneda Camparim e minha irmã Adriana que no decorrer da minha vida, proporcionaram-me além conhecimento, perseverança e amor. Por essa razão, gostaria de agradecer e reconhecer a vocês, minha imensa gratidão.

À professora Luciana Cambraia Leite, por ter me orientado e dedicado o seu tempo durante todo o período que precisei.

Aos professores Luigi Galotto Junior, Valmir Machado Pereira e Ruben Barros Godoy pelos apontamentos levantado na minha qualificação onde foi possível finalizar este trabalho.

E claro não poderia deixar de agradecer a todos os meus professores da minha graduação da UNOESC, pois eles foram os maiores responsáveis por este mérito.

A todos vocês, meu muito obrigado.

RESUMO

Atualmente, devido à redução dos recursos hídricos em algumas regiões do país, ocorreu a diminuição da oferta de geração de energia elétrica e consequente aumento dos valores das tarifas. Assim, o uso de grupos geradores isolados do sistema elétrico, em horários onde o custo do kWh consumido se torna mais caro, vem se tornando uma alternativa de economia. Esses grupos, porém, se mal dimensionados, podem ocasionar problemas no sistema elétrico em que ele estiver inserido, quando submetidos às cargas para a qual foi previsto. Isso pode gerar, entre outros problemas, aumento do custo do kWh e baixo desempenho. O objetivo deste trabalho foi avaliar os impactos causados em duas modalidades de grupos motores geradores comerciais de até 3,5 kVA a gasolina e a diesel, quando submetidos a um banco de cargas resistivas e indutivas. O banco de cargas foi composto por 8 (oito) resistores com potência de 250W, ligados em paralelo para que cada estágio fornecesse 500W de potência. Para incremento e decremento de potência, cada estágio possui uma chave comutadora, possibilitando a variação do banco de carga em quatro níveis de potência: 25%, 50%, 75% e 100%. Os quatro estágios de potência foram projetados para trabalharem com ou sem a presença de indutores, inseridos em série entre a fonte de alimentação e os resistores. Os indutores possuem dois estágios, de 16 mH e 32 mH, respectivamente. Foram utilizados os grupos moto-geradores (GMGs) a diesel e gasolina, modelos GB 3500 de 3,5 kVA e B4T 2500 de 2,2 kVA, respectivamente. Através da análise dos parâmetros de qualidade da energia gerada, foram observadas distorções na forma de onda, tanto de corrente como de tensão para ambos os geradores quando submetidos ao banco de cargas. Para a comparação do comportamento dos GMGs diante dessas distorções, foi utilizada a análise de componentes principais que demonstrou que a taxa de distorção harmônica de tensão e potência reativa influenciaram negativamente na operação dos geradores, contribuindo para formação de dois grupos distintos. Analisando a composição da formação dos dois grupos, observou-se uma similaridade de operação para cargas resistivas e indutivas, checada através de análise estatística com nível de significância de 5%, verificando a possibilidade dos GMGs terem comportamentos semelhantes. Com os padrões observados na análise estatística, pode-se atribuir essa diferença de comportamento operacional ao tipo de excitação de cada máquina, o que ocasionou perdas internas maiores no grupo moto-gerador a diesel. Em suma, os grupos moto-geradores foram afetados significativamente em relação ao seu desempenho na geração de energia elétrica, acarretando ao sistema uma baixa qualidade da energia elétrica disponível para uso.

Palavras-chave: Grupos geradores isolados, Harmônica, Excitação.

ABSTRACT

Currently, due to the reduction of water resources in some regions of the country, there has been a decrease in the supply of electric power generation and a consequent increase in tariff values. Thus, the use of isolated electrical system generators has become an economic alternative at times when the cost of consumed kWh becomes higher. However, if these systems are poorly dimensioned, they can cause problems in the electrical system, especially when subjected to loads for which they were designed. Among other problems, underperforming and an increase in kWh cost can occur. The aim of this study was to evaluate the impacts caused in two types of commercial engine generator groups of 3.5 kVA (gasoline and diesel) when submitted to a bank of resistive and inductive loads. The load bank was composed by eight 250 W resistors connected in parallel so that each stage could provide 500W of power. Each stage has a key switch to increment and decrement output, which allows the load bank variation in four levels of power: 25%, 50%, 75% and 100%. These four power stages were designed to work with or without the presence of inductors inserted in series between the power source and the resistors. The inductors presented two stages: 16 mH and 32 mH, respectively. Two motor-generator groups (MGGs) were used, diesel and gasoline, model 3500 GB 3,5 kVA and model 2,2 kVA B4T 2500, respectively. In analyzing the quality parameters of the generated power, distortions in the waveform were observed, in current and voltage, in both generators when subjected to load bank. For the comparison of the MGGs behavior before these distortions, the analysis of the main component was used, which showed that total harmonic distortion voltage and reactive power negatively influenced on the generator operation. These variables contributed to the formation of two distinct groups, and the analysis of these two groups showed a similarity in operation for resistive and inductive loads. The similarity was checked by statistical analysis with 5% significance level, assessing the possibility of the MGGs gasoline and diesel having the same behavior. The standards of statistical analysis showed that the difference in operational behavior of MGGs can be attributed to the type of excitation of each machine, which led to higher internal losses in the diesel engine generator group. Finally, the engine generator groups were significantly affected in their performance in electricity generation, resulting in a low quality of electricity available for use.

Keywords: Isolated Electrical System Generators, Harmonics, Excitation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Geração de energia – Hidráulica.	12
Figura 2.1. Esquema de funcionamento de um motor Ciclo Diesel.	19
Figura 2.2. Esquema de funcionamento de um motor Ciclo Otto.	20
Figura 2.3. Diagrama esquemático máquina síncrona.	22
Figura 2.4. Rotor polos lisos (A) e polos salientes (B).	22
Figura 2.5. Máquina síncrona com campo fixo.	23
Figura 2.6. Máquina síncrona com campo móvel.	24
Figura 2.7. Circuito equivalente gerador síncrono.	25
Figura 2.8. Diagrama fasorial gerador síncrono.	25
Figura 2.9. Forma de onda de tensão distorcida.	26
Figura 2.10. Forma de onda de corrente distorcida.	27
Figura 2.11. Excitação shunt.	28
Figura 2.12. Gerador CC montado no eixo máquina principal.	28
Figura 3.1. Representação vetorial de tensões equilibradas.	35
Figura 3.2. Oscilografias de tensão e corrente em fases (FP unitário).	36
Figura 3.3. Distúrbios forma de onda de corrente com harmônicas.	38
Figura 3.4. Resposta senoidal carga linear resistiva.	38
Figura 3.5. Resposta senoidal carga linear indutiva.	39
Figura 3.6. Distorção não linear.	39
Figura 4.1. Banco de carga de 2kW com coolers.	44
Figura 4.2. GMGs diesel e gasolina.	45
Figura 4.3. Tensão de referência.	46
Figura 4.4. Oscilografia de tensão e corrente carga resistiva início.	47
Figura 4.5. Dados de potência e energia inicial.	47
Figura 4.6. Fasor de corrente carga resistiva inicial.	48
Figura 4.7. Dados de potência e energia final.	48
Figura 4.8. Imagem térmica inicial sem ventilação forçada.	49
Figura 4.9. Imagem térmica inicial e final com ventilação forçada.	49
Figura 4.10. Oscilografia de tensão e corrente carga indutiva.	50
Figura 4.11. Dados de potência e energia carga indutiva.	50
Figura 4.12. Fasor de corrente carga indutiva.	50

Figura 4.13. Equipamentos para aquisição de dados.	51
Figura 4.14. Acesso excitação geradores.	52
Figura 5.1. Oscilografia de tensão e frequência do GMG a gasolina a vazio.	54
Figura 5.2. Oscilografia de tensão e frequência do GMG a diesel a vazio.	54
Figura 5.3. Rotor bobinado com anéis coletores.	55
Figura 5.4. Excitação Brushless com capacitor de excitação.	55
Figura 5.5. Rotor bobinado com diodo em série.	56
Figura 5.6. Oscilografia do GMG a gasolina com carga linear resistiva.	57
Figura 5.7. Oscilografia do GMG a diesel com carga linear resistiva.	57
Figura 5.8. Fasor do GMG a gasolina com carga linear resistiva	58
Figura 5.9. Fasor do GMG a diesel com carga linear resistiva.	58
Figura 5.10. Oscilografia do GMG a gasolina com carga linear indutiva.	59
Figura 5.11. Oscilografia do GMG a diesel com carga linear indutiva.	59
Figura 5.12. Fasor do GMG a gasolina com carga linear indutiva.	60
Figura 5.13. Fasor do GMG a diesel com carga linear indutiva.	60
Figura 5.14. Visualização espacial das potências de um sistema com harmônicas.	61
Figura 5.15. Triângulo de potência.	61
Figura 5.16. Os autovalores e autovetores da matriz de correlação	63
Figura 5.17. Distribuição das variáveis no plano das CPs (CP1 x CP2).	63
Figura 5.18. Projeção dos grupos no plano das CPs (CP1 x CP2).	65
Figura 5.19. Regiões de aceitação e rejeição teste F unilateral.	69
Figura 5.20. Regiões de aceitação e rejeição bicaudal t-Student.	69
Figura B1. Ponte retificadora de onda completa em ponte	84
Figura B2. Verificação do nível de tensão com osciloscópio	84
Figura C1. Pintura e fixação dos resistores.	86
Figura C2. Verificação do fator de potência inserindo os indutores	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1. Especificações técnicas do GMG - Motor Diesel.....	45
Tabela 4.2. Especificações técnicas GMG – Gasolina.....	46
Tabela 4.3. Os autovalores e autovetores da matriz de correlação.....	62
Tabela 4.4. Valores para as correlações entre variáveis e as CPs.....	64
Tabela 4.5. Teste F e t-Student para o GMG gasolina com cargas R e RL.....	67
Tabela 4.6. Teste F e t- Student para o GMG diesel com cargas R e RL.....	67
Tabela 4.7. Teste F e t-Student para os GMGs gasolina/diesel com carga R.....	68
Tabela 4.8. Teste F e t-Student para os GMGs gasolina /diesel com carga RL.....	68
Tabela 4.9. Comparação da carga linear resistiva e indutiva para o GMG a gasolina.....	71
Tabela 4.10. Comparação da carga linear resistiva e indutiva para o GMG a diesel.....	71
Tabela A1. Amostras GMG gasolina com carga linear resistiva.....	80
Tabela A2. Amostras GMG gasolina com carga linear indutiva.....	81
Tabela A3. Amostras GMG diesel com carga linear resistiva	82
Tabela A4. Amostras GMG diesel com carga linear indutiva.....	83

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1 Aplicação de grupos moto-geradores e considerações	13
1.1.1 Classificação dos grupos moto-geradores	13
1.1.2 Vantagens e desvantagens do uso dos grupos moto-geradores	14
1.1.3 Considerações iniciais	15
1.2 Objetivo	16
1.2.1 Objetivo geral	16
1.2.2 Objetivo específico	16
1.3 Estrutura da dissertação	16

CAPÍTULO II - CONFIGURAÇÕES PARA OS GRUPOS MOTO-GERADORES

2. CONFIGURAÇÕES PARA OS GRUPOS MOTO-GERADORES	18
2.1 Motores de combustão interna	18
2.1.1 Ciclo Diesel	18
2.1.2 Ciclo Otto	19
2.1.3 Motores monocilíndricos	20
2.2 Geradores elétricos	21
2.2.1 Características do gerador síncrono	21
2.2.2 Características elétricas do gerador síncrono	24
2.3 Sistema de excitação	27
2.3.1 Função do regulador de tensão	29
2.3.2 Autoexcitação Brushless com compensação por capacitor	30

CAPÍTULO III - EFICIÊNCIA E ANÁLISE ESTATÍSTICA

3. EFICIÊNCIA E ANÁLISE ESTATÍSTICA	31
3.1 Eficiência energética	31
3.2 Qualidade de energia	31
3.3 Condições ideais de operação de um sistema elétrico	32
3.3.1 Forma senoidal	32
3.3.2 Amplitude constante	33
3.3.3 Frequência constante	33
3.3.4 Fases equilibradas	34
3.3.5 Fator de potência unitário	35
3.3.6 Perdas nulas	36

3.4	Cargas elétricas	37
3.4.1	<i>Carga linear.....</i>	38
3.4.2	<i>Carga não linear.....</i>	39
3.5	Teste T-Student	41
3.6	Teste F.....	42
3.7	Teste de Tukey.....	42
3.8	Análise multivariada de componentes principais	43
CAPITULO IV - ANÁLISE EXPERIMENTAL		
4.	ANÁLISE EXPETIMENTAL.....	44
4.1	Montagem do banco de carga linear.....	44
4.2	Grupos moto-geradores	45
4.3	Aquisição dos valores de referência	46
4.3.1	<i>Dados de referência carga linear resistiva com ventilação forçada</i>	47
4.3.2	<i>Dados de referência carga linear indutiva 32 mH e ventilação forçada</i>	49
4.4	Análise da qualidade de energia.....	51
4.5	Metodologia para execução dos ensaios.....	52
4.6	Análise estatística	53
CAPITULO V - RESULTADOS E DISCUSSÕES		
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1	Análise da qualidade da energia elétrica gerada.....	54
5.2	Análise estatística dos dados.....	62
5.2.1	<i>Análise de componentes principais (ACP)</i>	62
5.2.2	<i>Teste t-Student.....</i>	66
5.2.3	<i>Teste de Tukey.....</i>	70
CAPITULO VI - CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS		
6.	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	72
6.1	Conclusões	72
6.2	Trabalhos futuros.....	74
REFERÊNCIAS.....		75
APÊNDICES		
APÊNDICE A.....		80
APÊNDICE B		84
APÊNDICE C.....		86
APÊNDICE D.....		87