

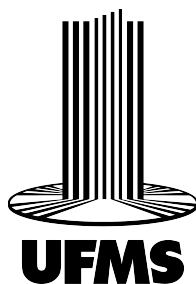
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Análise da estabilidade de tensão e frequência elétrica e análise de emissão de gases no Grupo Motor Gerador à GLP

Mateus Pereira das Chagas

Campo Grande - MS

12/07/2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
FACULDADE DE ENGENHARIAS, ARQUITETURA E URBANISMO E GEOGRAFIA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Análise da estabilidade de tensão e frequência elétrica e análise de emissão de gases no Grupo Motor Gerador à GLP

Mateus Pereira das Chagas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
como exigência para obtenção do grau de Ba-
charelado em Engenharia Elétrica da Universi-
dade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

Orientador: Prof. Dr. Cristiano Quevedo Andrea

Campo Grande - MS

12/07/2025

Análise da estabilidade de tensão e frequência elétrica e análise de emissão de gases no Grupo Motor Gerador à GLP

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Cristiano Quevedo Andrea

Membro da banca 1: Prof^ª. Dr^ª Andréa Teresa Riccio Barbosa

Membro da banca 2: Prof. Dr. Paulo Irineu Koltermann

Campo Grande - MS

12/07/2025

Agradecimentos

Agradeço a meus pais, Paulo Roberto Pereira das Chagas e Elisabete do Rocio das Chagas, primeiramente pela convivência, me ensinando a ser uma pessoa que busque sempre trabalhar pelo bem, sempre com fé em Deus. Por proporcionarem o necessário para que eu pudesse concluir a graduação, além de sempre estarem presentes nos momentos de dificuldade, me aconselhando e ajudando a seguir em frente.

Agradeço à minha companheira, Natalia da Rocha Pitzchk, pela convivência, pela amizade, pelo amor, carinho e companheirismo que sempre estiveram presentes na nossa relação. Suas virtudes e sua presença nas dificuldades que encontrei ao longo do curso me auxiliaram a seguir em frente.

Agradeço aos professores que dividiram comigo seus conhecimentos ao longo desses anos, especialmente aos que me acompanharam e me auxiliaram no desenvolvimento desse trabalho: meu orientador Cristiano Quevedo Andrea, Andréa Teresa Riccio Barbosa, Paulo Irineu Koltermann, Jair de Jesus Fiorentino e Jéferson Meneguín Ortega. A convivência durante a pesquisa e os procedimentos realizados para a concretização desse estudo me motivaram à persistir e concluir o curso.

Agradeço à empresa Copa Energia pela parceria firmada com a instituição Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, possibilitando a realização deste estudo.

Agradeço aos colegas que me acompanharam durante esse período, a convivência e a amizade foram grandes pilares para retirar muitas vezes o peso das situações difíceis que passamos juntos durante nossa formação. Agradeço em especial os que me acompanharam no desenvolvimento dessa pesquisa: Leonardo Ferreira Piñeiro e Vinícius dos Santos Clemente. Ao meu amigo Leonardo Muller Shinzato, pela cavinência e companhia durante esse curso. A todos desejo um futuro brilhante e de muito sucesso.

Resumo

O desenvolvimento industrial e tecnológico requer cada vez mais capacidade de geração da matriz energética brasileira, que é altamente dependente das hidrelétricas, que ficam sujeitas aos períodos de estiagem, criando dificuldades em suprir essa demanda de forma sustentável. A busca por fontes alternativas e renováveis, com a possibilidade do consumidor gerar sua própria energia por meio da geração distribuída são fundamentais para enfrentar os desafios energéticos, além de contribuir para diminuição de gases de efeito estufa e outros impactos ambientais. Este trabalho apresenta uma análise de qualidade de energia elétrica fornecida por um Grupo Motor Gerador, operando em paralelo com a rede de energia elétrica, com foco na estabilidade de tensão e frequência elétrica, além de apresentar o resultado dos gases de emissão gerados pelo motor e compará-los com outros combustíveis. Os resultados indicam que o gerador utilizado é altamente confiável e atende os requisitos ditados pela Agência Nacional de Energia Elétrica no tocante à qualidade de energia elétrica fornecida, respeitando os intervalos de tensão e frequência estabelecidos no módulo 8 do PRODIST. Já em relação a comparação das emissões, avaliou-se que o GLP gera maiores quantidades de óxidos de nitrogênio e menores quantidades de oxigênio residual, comparado a operação de um gerador em *bi-fuel* com diesel e gás natural. Contudo, o potencial do GLP como combustível de transição não deve ser descartado, o investimento em novas pesquisas para otimizar o processo de combustão do gás, aumentando a eficiência energética e diminuição de gases de emissão, juntamente com a criação de um marco regulatório para utilização específica desse combustível para motores, podem auxiliar a tornar o GLP uma alternativa no futuro, contribuindo para diversificar e tornar a matriz energética brasileira mais sustentável.

Palavras-chaves: GLP, Grupo Motor Gerador, Energia Elétrica, Fontes Renováveis.

Abstract

The industrial and technological development increasingly demands more from the Brazilian energy matrix, which is highly dependent on hydroelectric power plants. These plants are subject to drought periods, making it difficult to meet this demand sustainably. The search for alternative and renewable sources, along with the possibility for consumers to generate their own energy through distributed generation, is fundamental to addressing energy challenges, as well as contributing to the reduction of greenhouse gas emissions and other environmental impacts. This study presents an analysis of the quality of electric power supplied by a Generator Set operating in parallel with the electric grid, focusing on voltage and frequency stability. It also presents the results of the emission gases produced by the machine and compares them with those of other fuels. The results indicate that the generator used is highly reliable and meets the requirements set by the Brazilian Electricity Regulatory Agency (ANEEL) regarding the quality of electric power supplied, respecting the voltage and frequency ranges established in Module 8 of PRODIST. Regarding emissions, it was concluded that LPG produces higher amounts of nitrogen oxides and lower amounts of residual oxygen compared to a bi-fuel generator operating with diesel and natural gas. However, the potential of LPG as a transition fuel should not be overlooked. Investment in new research to optimize the combustion process of the gas—aiming to increase energy efficiency and reduce emissions—together with the creation of a regulatory framework for the specific use of this fuel in engines, can help make LPG a viable alternative in the future, contributing to the diversification and sustainability of the Brazilian energy matrix.

Keywords: LPG, Generator Engine Group, Electrical Energy, Renewable sources.

Lista de ilustrações

Figura 1 –	Matriz energética brasileira.	10
Figura 2 –	Recipientes de GLP	15
Figura 3 –	Ocupação do volume do recipiente de GLP.	15
Figura 4 –	Grupo Motor Gerador Utilizado	19
Figura 5 –	Motor MWM 6.12TCA	20
Figura 6 –	Alternador WEG	21
Figura 7 –	Diagrama de Blocos - LAMOSSE.	27
Figura 8 –	GMG LPG 95	28
Figura 9 –	Reservatório de gás LAMOSSE	28
Figura 10 –	Analizador ECIL Chemist 600	29
Figura 11 –	Controlador DEIF AGC 150	29
Figura 12 –	Potência ativa gerada	31
Figura 13 –	Tensão fase-fase	32
Figura 14 –	Frequência na fase A	32
Figura 15 –	Emissão de óxidos de nitrogênio	36
Figura 16 –	Emissão de monóxido de carbono	36
Figura 17 –	Emissão de dióxido de carbono	37
Figura 18 –	Emissão de oxigênio residual	37

Lista de tabelas

Tabela 1	–	Poder calorífico inferior e superior de combustíveis (0°C e 1 atm). . .	13
Tabela 2	–	Poder calorífico do GLP em relação a outros combustíveis	14
Tabela 3	–	Tipos de recipiente do GLP	14
Tabela 4	–	Dados para Realização do Ensaio de Caracterização do GLP. . . .	16
Tabela 5	–	Composição (%vol) - Análise por Cromatografia Gasosa - ASTM D2163.	16
Tabela 6	–	Características do GLP.	16
Tabela 7	–	Composição completa do GLP em %vol.	17
Tabela 8	–	Informações Técnicas do GMG.	20
Tabela 9	–	Informações Técnicas do Motor	21
Tabela 10	–	Informações Técnicas do Alternador	22
Tabela 11	–	Os efeitos e sintomas do monóxido de carbono em pessoas de acordo com concentração e tempo de exposição	25
Tabela 12	–	Prefixo dos hidrocarbonetos	26
Tabela 13	–	Gases emitidos pelo gerador LPG95	33
Tabela 14	–	Classificação das faixas de tensão	33
Tabela 15	–	Classificação dos eventos de curta duração	34
Tabela 16	–	Comparação de gases poluentes	37

Sumário

1	Introdução	10
1.1	Objetivos	11
1.1.1	Objetivo Geral	11
1.1.2	Objetivos Específicos	11
1.2	Organização do Trabalho	11
2	Revisão Bibliográfica	12
2.1	Definições	12
2.1.1	Sistemas <i>on-grid</i>	12
2.2	GLP	12
2.2.1	Definição	12
2.2.2	Poder Calorífico: Inferior e Superior	13
2.2.2.1	Transporte do GLP	14
2.2.3	Características do GLP Utilizado no Estudo	15
2.3	Grupo Motor Gerador	17
2.3.1	Conceitos Básicos de Combustão	18
2.3.2	Características GMG Utilizado Neste Estudo	18
2.3.3	Motor	20
2.3.4	Alternador	21
2.3.5	Tensão e frequência no gerador síncrono	22
2.3.6	Gases de Exaustão do GMG Operando a GLP	23
2.3.6.1	O ₂	23
2.3.6.2	Óxidos de Nitrogênio	23
2.3.6.3	Gases CO e CO ₂	24
2.3.6.4	Hidrocarboneto C _x H _y	25
3	Metodologia	27
3.1	Materiais utilizados	28
3.1.1	GMG	28
3.1.2	Reservatório de GLP	28
3.1.3	Analisador de gases de emissão	29
3.1.4	Supervisório	29
3.1.5	Procedimentos	30
4	Resultados	31
4.1	Resultado dos ensaios <i>on-grid</i> do GMG operando à GLP	31

4.2	Interpretação dos resultados	33
4.2.1	Análise da estabilidade de tensão	33
4.2.2	Estabilidade de frequência	35
4.2.3	Gases de emissão	36
Conclusão		39
Referências		40

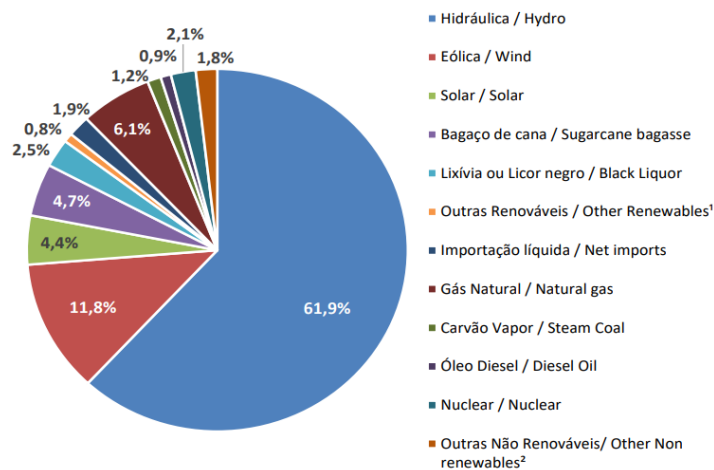
1 Introdução

O Brasil possui uma matriz energética predominantemente hídrica, que responde por cerca de 60% da eletricidade gerada no país, apresentado na Figura 1. No entanto, essa dependência de usinas hidrelétricas torna o sistema vulnerável a períodos de seca e variações climáticas. Diante disso, cresce a necessidade de diversificar a matriz energética com o aumento da participação de outras fontes. A diversificação da matriz energética é fundamental para garantir segurança no fornecimento de energia, promover a sustentabilidade ambiental e impulsionar o desenvolvimento econômico (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2021).

Além de novas fontes de geração de energia, a qualidade com que essa é entregue ao consumidor também é de grande importância, principalmente para garantir a alimentação contínua das cargas mantendo os níveis de tensão e frequência dentro dos limites estabelecidos.

Dessa forma, a busca por alternativas com menor impacto ambiental e mais eficientes serviu de motivação para esse estudo, no qual serão apresentados os resultados analisando a estabilidade de tensão e frequência elétrica, bem como suas emissões de gases, da operação de Grupo Motor Gerador (GMG) utilizando Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) como combustível, operando no modo *on grid*. Para essa pesquisa, foi necessária a autorização da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) para o uso do GLP na geração de energia, visto que é vetado o uso de GLP em motores de qualquer espécie, conforme a RESOLUÇÃO ANP Nº 957, DE 5 DE OUTUBRO DE 2023, Art. 25.

Figura 1 – Matriz energética brasileira.



Fonte: (EPE, 2023)

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como principal objetivo avaliar o desempenho e emissões de gases do Grupo Motor Gerador durante sua operação no modo *on grid*.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- Analisar a estabilidade de frequência e tensão elétrica do Grupo Motor Gerador operando conectado à rede de energia da concessionária utilizando como base os critérios de qualidade de energia previstas pelo PRODIST da ANEEL;
- Analisar a emissão dos gases O_2 , NO , CO , CO_2 , NO_x e C_xH_y durante sua operação e comparar com as emissões de outros tipos de combustível na geração de energia.

1.2 Organização do Trabalho

Para atingir o objetivo apresentado no item anterior e para facilitar a compreensão do assunto o presente trabalho foi dividido em 5 capítulos.

O Capítulo 1 conta com a introdução com dados sobre a matriz energética brasileira, além de apresentar o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

O Capítulo 2 conta com a revisão bibliográfica que apresenta a definição dos equipamentos e combustível utilizados na pesquisa, fundamentação teórica sobre as grandezas elétricas referenciadas, uma breve contextualização sobre o gases de emissão e sobre poder calorífico de um combustível.

O Capítulo 3 é dedicado a metodologia utilizada para o estudo. Neste capítulo são apresentados os materiais e equipamentos utilizados no estudo, bem como as configurações de operação dos equipamentos.

O Capítulo 4 apresenta os resultados recolhidos durante os ensaios realizados, por meio de gráficos e tabelas os resultados são analisados e discutidos individualmente. Ao final do capítulo, é feita a comparação dos gases de emissão com demais fontes de energia.

O Capítulo 5 apresenta a conclusão deste trabalho, nele é discutido se os objetivos iniciais foram atingidos, além de apresentar implicações futuras para o GLP em motores.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Definições

2.1.1 Sistemas *on-grid*

Um sistema elétrico *on-grid* é um arranjo de geração de energia elétrica que opera em conexão direta e síncrona com a rede elétrica da concessionária de energia, bem definida por sua designação *on-grid* (do inglês, na rede). A principal característica desses sistemas é a ausência de baterias para armazenamento de energia, dependendo integralmente da rede para suprir a demanda quando a geração própria é insuficiente, ou para absorver o excedente de energia gerada ([VILLALVA, 2012](#)).

2.2 GLP

2.2.1 Definição

O Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) pode ser definido como uma mistura de hidrocarbonetos leves, predominantemente propano (C_3H_8) e butano (C_4H_{10}), obtida a partir do refinamento do petróleo e do processamento do gás natural ([ANP, 2023](#)). Sua característica principal consiste na capacidade de ser mantido em estado líquido sob pressão para facilitar o transporte e o armazenamento, uma vez que a relação entre o volume do GLP gasoso e líquido é de aproximadamente 250:1, permitindo que uma quantidade considerável de energia seja estocada em um espaço reduzido ([CHAGAS, 2018](#)). Essa propriedade de liquefação facilita não apenas a logística de distribuição, mas também a sua aplicação em diversas escalas, desde o consumo doméstico – em que é popularmente conhecido como gás de cozinha – até em processos industriais.

Do ponto de vista ambiental, o GLP é reconhecido por sua combustão relativamente limpa, que minimiza a emissão de partículas e gases poluentes, como óxidos de enxofre e de nitrogênio, em comparação com outros combustíveis fósseis mais pesados, como a gasolina ([TASIC T.; POGOREVC, 2011](#)). Essa vantagem o posiciona como uma alternativa mais favorável em cenários que demandam eficiência energética e menor impacto ambiental. No entanto, a segurança no manuseio e armazenamento é um aspecto crítico, dada a sua inflamabilidade e a densidade do vapor, que, em caso de vazamento, tende a se acumular em locais baixos, aumentando o risco de acidentes ([CROWL D. A.; LOUVAR, 2019](#)). Para diminuir os riscos, a adição de odorizantes, em geral, etilmercaptan, e o cumprimento rigoroso de normas técnicas, como as estabelecidas pela ABNT

NBR 8460, são práticas mandatórias ([COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB, 2019](#)).

2.2.2 Poder Calorífico: Inferior e Superior

A quantificação da energia de um combustível é definida por meio do seu poder calorífico, que corresponde à quantidade de energia térmica liberada pela combustão completa de uma unidade de massa ou volume desse material ([SONNTAG RICHARD E.; BORGNACKE, 2011](#)). Essa quantificação é dividida em duas parcelas: o Poder Calorífico Superior (PCS) e o Poder Calorífico Inferior (PCI), em que diferença consiste no tratamento da água formada durante o processo de queima.

O Poder Calorífico Superior (PCS) representa o calor total liberado durante uma combustão completa e todos os produtos dessa reação, inclusive a água, são resfriados até a temperatura original, de forma que o vapor de água formado condense e libere seu calor latente de vaporização, portanto, o PCS possui essa parcela energética adicional proveniente da condensação da água ([INCROPERA, 2011](#)). O Poder Calorífico Inferior (PCI) considera que a água resultante da combustão permanece no estado de vapor e é expelida junto aos demais gases de exaustão, não havendo, portanto, a recuperação da parcela energética proveniente do calor latente de vaporização. Em aplicações práticas, como em motores de combustão interna, o PCI é a grandeza mais relevante para a determinação de sua eficiência energética, uma vez que a energia contida no vapor de água não é usualmente aproveitada ([TURNER, 2015](#)). A relação entre ambos é dada pela subtração do calor latente de vaporização da massa de água formada do PCS, evidenciando a parcela de energia que não é aproveitada na maioria dos processos térmicos ([SONNTAG RICHARD E.; BORGNACKE, 2011](#)). Na Tabela 1 é apresentado o poder calorífico inferior e superior de combustíveis.

Tabela 1 – Poder calorífico inferior e superior de combustíveis (0°C e 1 atm).

Combustível	PCI [MJ/kg]	PCS [MJ/kg]	Densidade [kg/m ³]
Gasolina	43,448	46,536	0,7447
Etanol	26,952	28,847	0,7892
Gás Natural	47,141	52,255	0,7769
Gás Liquefeito do Petróleo	46,607	50,152	0,5080
Butano	45,277	49,210	0,5846
Propano	46,269	50,235	0,5072

Fonte: ([SOUZA, 2006](#))

O poder calorífico por quantidade é apresentado na Tabela 2 para diversas fontes de combustão.

Tabela 2 – Poder calorífico do GLP em relação a outros combustíveis

Quantidade	Combustível	Poder Calorífico
1 kg	GLP	11.500 kcal
1 kg	Óleo Diesel	10.200 kcal
1 kw	Energia Elétrica	860 kcal
1 m ³	Gás Natural	9.400 kcal
1 m ³	Gás Natural	9.400 kcal

Fonte: ([MAZZONETTO ALEXANDRE WITIER; CARVALHO, 2018](#))

2.2.2.1 Transporte do GLP

O GLP é transportado por caminhões, navios, ou por meio de dutos. As distribuidoras envasam o combustível, que é distribuído a granel para o consumidor industrial ou revendido em botijões para o mercado composto por revendedores locais, que atendem a demanda comercial e residencial. O GLP pode ser comercializado em recipientes (botijões) que variam de 2 a 90 kg, no estado líquido. Desta forma, seu uso se torna mais conveniente em residências e locais remotos ([PETROBRAS, 2022](#)). Na Tabela 3 é descrito os tipos de botijões para o armazenamento do GLP.

Tabela 3 – Tipos de recipiente do GLP

Embalagem	Capacidade kg	Aplicação
P-2	2	Camping e ambulantes
P-5	5	Camping e ambulantes
P-7	7	Uso residencial
P-8	8	Uso residencial
P-13	13	Uso residencial
P-20	20	Empilhadeiras
P-45	45	Condomínio
P-90	90	Restaurantes

Na Figura 2 estão em destaque alguns recipientes de GLP citados na Tabela 3.

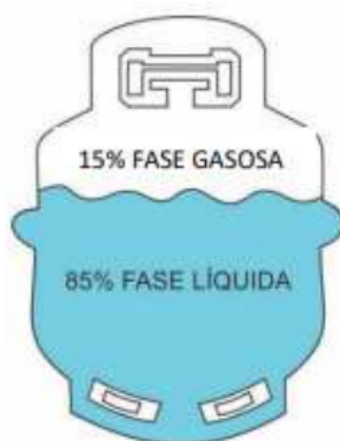
Figura 2 – Recipientes de GLP



Fonte: (CNGAS, 2024).

O GLP é engarrafado nas diversas embalagens, sendo a de 13 quilos a mais usual, seguindo para as revendedoras de GLP ou para o consumidor final (COPAGAZ, 2023). O GLP ocupa até 85% da capacidade máxima do recipiente, ilustrado na Figura 2. Os outros 15% de espaço restante é utilizado na vaporização do produto que ocorre com a troca de calor entre a parede do recipiente e o GLP armazenado na forma líquida - vaporização natural. Na Figura 3 é ilustrado o percentual de armazenamento no botijão.

Figura 3 – Ocupação do volume do recipiente de GLP.



Fonte: (GONÇALVES, 2021).

2.2.3 Características do GLP Utilizado no Estudo

A caracterização do GLP utilizado neste estudo foi realizado pelo Laboratório de Combustíveis (LABCOM/UFMS), sendo que o GLP foi fornecido pela Copa Energia. Na

Tabela 4 são descritos os dados preliminares para realização do ensaio de análise do GLP utilizado no estudo.

Tabela 4 – Dados para Realização do Ensaio de Caracterização do GLP.

N° de Controle da Amostra: Projeto GLP - LAMOSSE/UFMS	Data/Hora da Coleta: 22/08/2023, 16h30min	GLP	Mistura: Propano/Butano
N° do cilindro da amostra: 10103, 5003 e 043	Data/Hora de Recebimento: 22/08/2023, 17h00min	Cidade: Campo Grande	UF:MS
N° do lote: 01 - 2023		Local de Coleta: Centro de GLP LAMOSSE	

Fonte: (CARVALHEIRO, 2021)

Em um estudo da composição do GLP, encontrou-se a composição apresentada na Tabela 5

Tabela 5 – Composição (%vol) - Análise por Cromatografia Gasosa - ASTM D2163.

CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	C ₃ H ₆	Butanos	Buteno	C ₅ ⁺
0,0	0,9	56,1	10,6	17,3	15,0	0,1

Fonte: (CARVALHEIRO, 2021)

Com o estudo do GLP concluído, apresenta-se na Tabela 6 as características principais do GLP.

Tabela 6 – Características do GLP.

Características	Resultado	Unidade	Especificação	Método ASTM
Pressão de vapor a 37,5°, max	961	kPa	1430	D2598
Resíduo 100 mL evaporados, max	<0,05	mL	0,05	0,05
Teste da mancha	Passa	-	Passa	D2158
Pentanos e mais pesados, max	0,1	%Vol.	2,0	D2163
Enxofre Total, max	9	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Odorizante	0,030	g/m ³	Anotar	D5504
H ₂ S	Passa	-	Passa	D2420
Corrosividade ao cobre a 37,8°C, 1 hora, max	1	-	1	D1838
Corrosividade ao cobre a 37,8°C, 1 hora, max	529	kg/m ³	Anotar	D2598
Corrosividade ao cobre a 37,8°C, 1 hora, max	Ausente	-	Ausente	Visual

Fonte: (CARVALHEIRO, 2021)

Os testes realizados para obter as características do GLP seguem as especificações estabelecidas na Resolução nº858 de 28/08/2023. Por meio da análise da composição do GLP, obteve-se os dados da Tabela 7.

Tabela 7 – Composição completa do GLP em %vol.

Análise			
Componente	a	b	Média (% v/v)
Metano	0,00	0,00	0,00
Etano	0,95	0,94	0,9
Propano	56,07	56,04	56,1
Propeno	10,67	10,62	10,6
Isobutano	4,63	4,64	4,6
n-Butano	12,63	12,66	12,6
trans-2-Buteno	4,79	4,79	4,8
1-Buteno	2,70	2,75	2,7
Neo-pentano	0,02	0,02	0,0
Isobuteno	4,32	4,31	4,3
cis-2-Buteno	3,04	3,04	3,0
Isopentano	0,07	0,07	0,1
n-Pentano	0,01	0,01	0,0
1,3-Butadieno	0,12	0,12	0,1
n-Hexano	0,00	0,00	0,00

Fonte: (CARVALHEIRO, 2021)

2.3 Grupo Motor Gerador

A crescente demanda por fontes energéticas alternativas, motivada por desafios econômicos e pela urgência da questão ambiental, tem impulsionado a exploração de diversas fontes de combustível. O Gás Liquefeito de Petróleo, apesar de sua origem fóssil, é cotado como uma opção de transição. O objetivo primordial é a redução das emissões de gases de efeito estufa, alinhada ao desenvolvimento de soluções energéticas sustentáveis e economicamente viáveis. Nesse panorama, a Geração Distribuída (GD) surge como uma abordagem estratégica, capaz de aproximar a oferta de energia dos consumidores, otimizar os custos de implementação e minimizar as perdas na rede de distribuição elétrica.

A Geração Distribuída (GD) e ou isolada apresentam-se como soluções economicamente viáveis e sustentáveis, pois reduzem o custo de implementação e distribuição de energia, além de aproximar o consumidor da geração desse recurso. A Resolução Normativa da ANEEL nº 482/2012 possibilita o consumidor brasileiro a gerar energia para consumo próprio e fornecer a rede de distribuição o excedente da energia gerada a partir de fontes renováveis.

A Geração Distribuída apresenta como vantagens, em relação a geração centralizada, menores perdas de energia nas linhas de transmissão, maior estabilidade, redução no custo de fornecimento de eletricidade e maior alcance para consumidores rurais, podendo trabalhar conectada à rede (*on-grid*) ou isolada (*off-grid*). Nos dois casos, é necessário o controle do sistema devido ao regime intermitente de geração e a diminuição da inércia nas micro e minigerações. Quando o sistema opera conectado à rede, os níveis de tensão e frequência elétrica são fornecidas pela rede de distribuição. Quando o sistema é isolado, o controle de tensão e frequência é realizado pelo próprio sistema.

2.3.1 Conceitos Básicos de Combustão

Para melhor compreensão do processo de combustão e a posterior análise da emissão dos gases que são resultado desse processo químico, são listados os seguintes conceitos:

- Ar: O ar é agente oxidante: substâncias que fornecem oxigênio para o combustível;
- Combustível: O combustível é a substância capaz de reagir com os oxidantes. No caso deste estudo o combustível será o GLP;
- Reagente: É uma mistura de combustível e oxigênio (ar) capaz de reagir entre si com liberação ou absorção de calor;
- Gases de exaustão (escape): São substâncias residuais da reação dos reagentes. Poderão ser considerados elementos tais como O_2 , H_2O , CO , NO , hidrocarbonetos, material particulado e outros, dependendo das condições da reação química;
- Inerte: São substâncias químicas adicionadas aos reagentes que não reagem com o combustível nem com o oxidante e compõem os produtos.
- Calor de reação: É o calor liberado durante a combustão (reação química exotérmica).

2.3.2 Características GMG Utilizado Neste Estudo

Um Grupo Motor Gerador (GMG) é um dispositivo eletromecânico com o propósito de gerar energia elétrica a partir de uma fonte primária de energia mecânica (WEG, 2017). Um GMG consiste em um motor, que atua como máquina motriz, acoplado mecanicamente a um gerador elétrico. O motor primário tem a função de consumir uma forma de energia – seja ela elétrica ou proveniente da combustão de um combustível – para produzir energia mecânica na forma de rotação de um eixo. Subsequentemente, o gerador, converte essa energia mecânica rotacional em energia elétrica, apresentando as características de tensão e frequência desejadas na saída.

Estes dispositivos tem diversas aplicações, como: prover energia em locais isolados, com geração de energia autônoma; geração de energia para redução de custos operacionais, com geração via grupo gerador em horários de ponta; fornecer emergencialmente energia a hospitais, supermercados, shoppings, entre outros; servir de fonte de alternativa em sistemas híbridos de geração de energia (SALAS; SILVEIRA, 2017).

Na Figura 4 é ilustrado o Grupo Motor Gerador utilizado neste estudo.

Figura 4 – Grupo Motor Gerador Utilizado



Fonte: Autoria própria.

Um gerador síncrono, também conhecido como alternador, é uma máquina elétrica rotativa que converte energia mecânica em energia elétrica na forma de corrente alternada (CA). Sua característica que lhe dá o nome síncrono, é que a frequência da tensão elétrica gerada é diretamente proporcional (ou seja, está em sincronismo) com a velocidade de rotação do eixo da máquina.

A operação do gerador síncrono baseia-se na Lei da Indução de Faraday, que afirma que uma tensão é induzida em um condutor quando ele se move por meio de um campo magnético ou quando um campo magnético variável o atravessa. No gerador síncrono, um campo magnético é criado no rotor e, ao girar, este campo induz uma tensão trifásica nos enrolamentos localizados no estator (CHAPMAN, 2012).

O gerador síncrono pode ser classificado em dois tipos, gerador de polos salientes e gerador de polos lisos. O gerador de polos salientes possuem grande diâmetro e pequeno comprimento com os pólos aparafusados no núcleo do rotor. Sua construção é mecanicamente adequada para as baixas velocidades e os grandes torques encontrados em aplicações hidrelétricas (SEN, 2013), necessitando um grande número de polos para atingir a frequência de 60 Hz. Já o de polos lisos conta com o rotor forjado com ranhuras distribuídas ao longo de sua superfície para abrigar os condutores do enrolamento de campo, lhe atribuindo a característica de pequeno diâmetro e grande comprimento axial. Sua construção é adequada para operar em velocidades mais elevadas, necessitando de um número menor de polos para atingir a frequência de 60 Hz.

O GMG utilizado neste estudo foi o de modelo LPG95, desenvolvido para o GLP utilizado no Brasil, fruto de parceria entre Copa Energia e Aggreko. Sua capacidade de geração original é de 95kW / 119 kVA, mas foi limitado eletronicamente para potência de 76 kW/ 95 kVA devido à regulamentação do uso em microgeração e ao posto de transformação ter capacidade de 75 kVA. Sua motorização é fornecida pela MWM, empresa brasileira voltada ao desenvolvimento e fabricação de motores a Diesel. Na Tabela 8 é apresentado as informações técnicas do gerador.

Tabela 8 – Informações Técnicas do GMG.

Combustível	GLP
Potência Nominal (Regime Contínuo)	76 kW/95 kVA
Eficiência ¹	35%
Frequência Nominal	60 Hz
Rotação Nominal	1800 rpm
Número de Fases	Trifásico
Modelo Motor	MWM 6.12TCA
Alternador	WEG
Massa - Sistema aberto	1330 kg
Dimensões - Sistema aberto (C×L×A) [cm]	2.100 × 950 × 1.360
Massa - Cabinado 75 dB	2880 kg
Dimensões - Cabinado 75 dB (C×L×A) [cm]	3.400 × 1.400 × 2.040
Massa - Cabinado 85 dB	2780 kg
Dimensões - Cabinado 85 dB (C×L×A) [cm]	3.400 × 1.305 × 2.040

Fonte: Manual de Operação e Manutenção - LPG95 (MWM 6.12TCA) DEIF.

2.3.3 Motor

O modelo da motorização do GMG é o 6.12TCA, o qual possui módulo que controla a centelha para ignição, comando de válvulas no cabeçote, no turbo e no coletor de escape arrefecido a ar, kit regulador de gás composto por válvulas mecânicas e eletromecânicas, regulador de velocidade para manter sua velocidade estável em +/- 5% da nominal. Suas buchas e bielas foram condicionadas para evitar problemas provenientes de abrasão e corrosão. Na Figura 5 é ilustrado o motor do GMG, e suas informações técnicas apresentadas na Tabela 9.

Figura 5 – Motor MWM 6.12TCA



Fonte: (DEIF, 2023)

Tabela 9 – Informações Técnicas do Motor

MOTOR MWM 6.12TCA	
Número de Cilindros	6 Cilindros em Linha
Volume do Motor	7,8 L
Aspiração	Turbo Intercooler
Tipo de Refrigeração	Água
Pressão de Óleo na Temperatura de Operação	4,5 bar
Volume de Óleo Lubrificante com Filtro	14,7 – 18,7 L
Temperatura do Fluido de Arrefecimento	80°C – 90°C
Volume do Sistema de Arrefecimento (sem radiador)	9 L
Tensão do Sistema	24 V
Motor de Partida	4 kW / 24 Vcc
Alternador do Motor	28 Vcc / 80 A
Baterias	2 Unidades (em gel) – 12 Vcc – 50 Ah
Fluxo de Gás de Escape à Plena Carga	830 kg/h
Temperatura do Gás de Escape	600°C
Ignição	Ignição Eletrônica com Bobinas Independentes
Controle de Combustível	Controle Eletrônico da Relação Ar/Combustível, Lean-Burn
Controle de Velocidade	Regulador Eletrônico com Válvula Borboleta e Atuador

Fonte: (DEIF, 2023)

2.3.4 Alternador

Na operação do GMG, o alternador funciona como um gerador de corrente alternada, responsável pela transformação da energia mecânica em energia elétrica. Para o gerador utilizado neste estudo foi utilizado um gerador síncrono, trifásico, com placa de regulação automática de tensão (AVR, *Automatic voltage regulation*). O dispositivo também apresenta fechamento em estrela com neutro acessível, sendo seu dimensionamento realizado para temperatura ambiente de 40°C/ $\Delta T=125^{\circ}\text{C}$. Dessa forma, o GMG pode operar por um número ilimitado de horas por ano, mas sem sobrecarga neste regime de funcionamento, de acordo com as normas ISO 8528, IEC 60034 e NEMA MG1.

Na Figura 6 é ilustrado o alternador WEG GTA 202AI36B15T utilizado no GMG LPG95, e seus dados técnicos são apresentados na Tabela 10.

Figura 6 – Alternador WEG



Fonte: (DEIF, 2023)

Tabela 10 – Informações Técnicas do Alternador

ALTERNADOR WEG	
Rotação Nominal	1800 RPM / 60 Hz
Sistema de Excitação	Brushless com Bobina Auxiliar
Número de Polos	4
Mancal	Único
Acoplamento	Rígido
Classe de Isolação	180 °C (H)
Fator de Potência	0,8
Grau de Proteção	IP21
Refrigeração	ICO01
Regulador de Tensão	Resposta Dinâmica de 8 a 400 ms / Precisão $\pm 0,5\%$
Distorção Harmônica sem Carga	$<3\%$
Número de Terminais	12

Fonte: (DEIF, 2023)

2.3.5 Tensão e frequência no gerador síncrono

É primordial que um gerador síncrono em um sistema elétrico de potência forneça energia elétrica com tensão e frequência constantes, independente da variação da carga. A regulação de tensão é o mecanismo que mantém a tensão nos terminais do gerador em um valor predefinido ou muito próximo a ele. A tensão interna gerada (força eletromotriz - FEM) em um gerador síncrono (E_A) é diretamente proporcional à velocidade com que o eixo da máquina gira (ω) e à magnitude do fluxo magnético do circuito de campo do rotor (ϕ). A equação matemática que representa a FEM é demonstrada a seguir:

$$E_A = K.\omega.\phi \quad (2.1)$$

No sistema de potência brasileiro, a frequência nominal da rede é de 60 Hz, o que força o gerador a operar numa velocidade de rotação fixa. Dessa forma, a variável de controle para a tensão é o fluxo magnético do rotor, que por sua vez é produzido pelo enrolamento de campo do rotor e é diretamente proporcional à corrente de campo, uma corrente contínua que circula nesse enrolamento (CHAPMAN, 2012). O gerador utilizado na pesquisa possui o Regulador Automático de Tensão (AVR - *Automatic Voltage Regulator*), que é um sistema de controle em malha fechada que opera continuamente para manter a tensão terminal do gerador em um valor de referência. Com base no sinal de erro lido no sistema de controle, o AVR ajusta seu sinal de saída para o sistema de excitação da máquina para o controle da tensão.

A frequência elétrica (f) gerada por um gerador síncrono é determinada por duas de suas características: o número de polos magnéticos (P) e sua velocidade de rotação (n) em rotações por minuto (RPM). A equação matemática que expressa a frequência no

gerador síncrono é apresentada a seguir:

$$f = \frac{P.n}{120} \quad (2.2)$$

Como o número de polos é uma característica construtiva da máquina, a variável de controle da frequência elétrica é a velocidade de rotação do eixo, portanto, para regular a frequência é impeditivo regular a velocidade do conjunto motor-gerador (KUNDUR, 2007). A velocidade, por sua vez, é ditada pelo balanço entre potência mecânica fornecida pela máquina primária (motor à GLP) e a potência elétrica drenada pela carga. O dispositivo responsável por realizar esse ajuste é o regulador de velocidade, que atua como um sistema de controle em malha fechada para que a frequência elétrica se mantenha no valor pré definido.

2.3.6 Gases de Exaustão do GMG Operando a GLP

Durante a realização deste estudo, foram analisados os gases poluentes provenientes da queima do GLP. Foi utilizado um analisador de gases para monitorar os seguintes compostos: O₂%, NO (ppm), CO (ppm), CO₂%, NO_x (ppm) e C_xH_y (ppm).

2.3.6.1 O₂

Em uma combustão completa, todo o oxigênio O₂ presente deve ser utilizado (TURNS, 2013). A concentração de O₂ costuma ser monitorada por alguns motivos, dos quais:

- Mensurar a eficiência no processo de combustão: a utilização de sensores para medir a concentração de oxigênio no escapamento de geradores visa obter informações relacionadas a eficiência da combustão do GLP. Caso haja excesso de O₂, pode ser um indicador que a mistura de ar com GLP pode estar não adequada no processo de combustão. Caso contrário, a mistura está com a concentração adequada.
- Caracterizar os gases que estão sendo emitidos pelo GMG: se a mistura de ar e GLP resultar em um gás com baixa concentração de GLP, isto pode resultar em um aumento na produção de NO_x. Caso contrário, pode-se observar altas emissões de CO. Dessa forma, utiliza-se a concentração de oxigênio na saída para ajustar a mistura de ar e GLP na operação do motor do GMG.

2.3.6.2 Óxidos de Nitrogênio

O monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_x) são elementos presentes na combustão do GLP, geralmente, são os óxidos de nitrogênio mais emitidos

durante a queima do combustível. O termo NO_x é usado para indicar a soma de NO mais NO_2 .

$$\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2 \quad (2.3)$$

Durante a operação do GMG, apesar da quantidade de NO formada ser maior que a de NO_2 (JR, 2003), quando em contato com a atmosfera, ele reage com o O_3 produzindo NO_2 , reação catalisada pela incidência de luz.



Os óxidos de nitrogênio, ao entrarem em contato com vapor d'água, formam ácido nítrico, que, em conjunto com o H_2SO_4 formado a partir da emissão de SO_2 durante a queima de combustíveis com teores de enxofre provocam chuva ácida, causando o aumento no nível de acidez no solo e nas águas. Além da chuva ácida, a interação dos raios ultravioleta (UV) com o NO_2 ocasiona uma reação química que resulta na produção de ozônio O_3 .



A presença do ozônio no nível do solo (troposfera) tem consequências completamente diferentes da sua presença na estratosfera, sendo um risco para a saúde humana, provocando problemas como tosse e diminuição de capacidade pulmonar (JR, 2003). Já na estratosfera (15 a 40 km acima do solo), a camada de ozônio tem as funções de agir como barreira para absorver parte dos raios ultravioleta (UV), evitando que eles alcancem o solo e causem danos aos animais, plantas e seres humanos e controlar o fluxo de calor da atmosfera por absorver a radiação solar refletida.

2.3.6.3 Gases CO e CO_2

O monóxido de carbono (CO) é uma substância presente numa combustão incompleta do combustível, sendo um indicador de perda de energia, além de poluir a atmosfera. O monóxido de carbono é um poluente inodoro e venenoso, os efeitos e sintomas da inalação desse gás são apresentados da Tabela 11. Os valores são aproximados, podendo variar de indivíduo para indivíduo.

Tabela 11 – Os efeitos e sintomas do monóxido de carbono em pessoas de acordo com concentração e tempo de exposição

ppm	Efeitos e sintomas na pessoa	Tempo
35	Nível permissível de exposição	8 horas
200	Dor de cabeça leve, desconforto	3 horas
400	Dor de cabeça, desconforto	2 horas
600	Dor de cabeça, desconforto	1 hora
1.000-2.000	Confusão, dor de cabeça, náusea	2 horas
1.000-2.000	Tendência a cambalear	1 1/2 hora
1.000-2.000	Palpitação no coração	30 minutos
2.000-2.500	Perda de consciência	30 minutos
4.000	Fatal	Menos de 1 hora

Fonte: (JR, 2003)

A combustão dos hidrocarbonetos é iniciada com a quebra do combustível, tendo como subproduto o monóxido de carbono (CO), que é oxidado posteriormente formando o dióxido de carbono (CO₂). Tal fenômeno de oxidação é descrita pelas seguintes equações estequiométricas:



A oxidação completa do CO em CO₂ não soluciona totalmente o problema da emissão de poluentes em processos de combustão. A ausência do CO em áreas urbanas é sempre desejável, por causa de sua alta toxicidade. No entanto, o CO₂ na atmosfera é um dos gases que absorvem a radiação infravermelha, contribuindo para o aquecimento global, ou seja, o chamado efeito estufa. O CO₂ e traços de outros gases permitem a penetração da radiação solar na superfície da Terra, mas reabsorvem a radiação infravermelha emitida desta (JR, 2003).

2.3.6.4 Hidrocarboneto C_xH_y

A nomenclatura C_xH_y é a representação genérica de hidrocarbonetos que tem em sua composição apenas carbono e hidrogênio. Os hidrocarbonetos não queimados, formam-se junto às paredes da câmara onde a temperatura não é suficiente para completar a reação e são expelidos pelo sistema escapamento do GMG (FERREIRA, 2017).

De acordo com (COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB, 2019), os hidrocarbonetos são substâncias que auxiliam na formação do smog fotoquímico, um fenômeno que pode ser definido como o acúmulo de partículas poluentes

no ambiente atmosférico próxima à superfície em forma de grandes nuvens de fumaça, e são tratados como compostos orgânicos voláteis, excluindo-se o metano. Portanto, é preciso atenção no controle da concentração desses elementos durante o processo de combustão.

O componente C_xH_y pode ser encontrado em diversas substâncias, tais como petróleo, gás natural, GLP, entre outros. Sua nomenclatura segue uma metodologia estabelecida, e este nome é relacionado com o número de carbonos presentes na cadeia de uma dada substância. Na Tabela 12 são descritos os prefixos dos hidrocarbonetos.

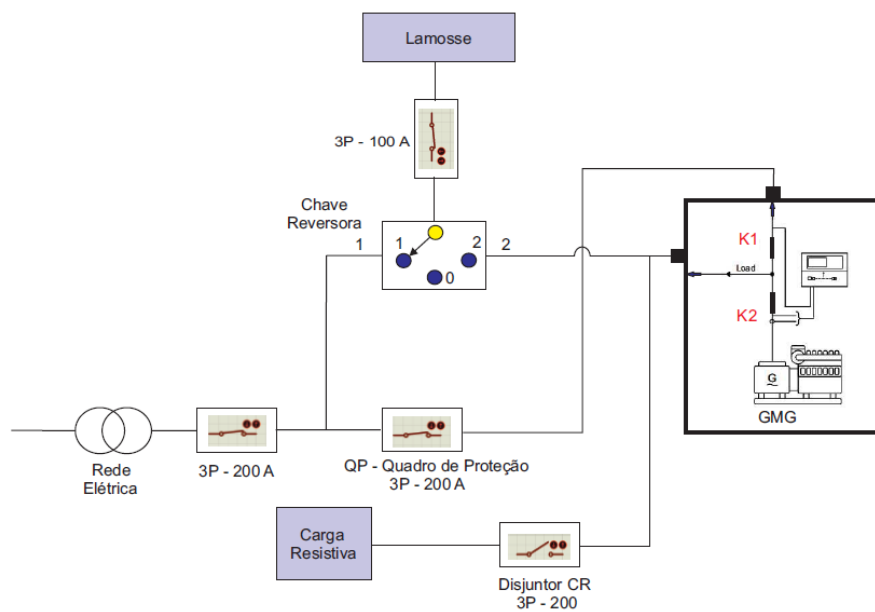
Tabela 12 – Prefixo dos hidrocarbonetos

1 carbono	MET
2 carbono	ET
3 carbono	PRO
4 carbono	BUT
5 carbono	PENT
6 carbono	HEX
7 carbono	HEPT
8 carbono	OCT
9 carbono	NON

3 Metodologia

Os ensaios com o GMG foram realizados no LAMOSSE - Laboratório de Modelagem e Simulação de Sistemas Elétricos. Para realizar os ensaios *on grid*, as chaves foram configuradas de modo que o gerador alimentava o laboratório e o excedente de energia era injetado na rede de distribuição. Durante os ensaios, o consumo de GLP por geração de energia foi registrado, assim como os gases emitidos pelo escapamento do motor por meio de um analisador de gases. Além disso, a qualidade da energia injetada na rede, bem como demais grandezas elétricas foram medidas e registradas por dois supervisórios: O *Utility* do controlador DEIF e o *Radiocontrol* para a vazão de gás. Na Figura 7 é ilustrado a configuração utilizada para realização dos ensaios *on-grid*.

Figura 7 – Diagrama de Blocos - LAMOSSE.



Fonte: Autoria própria.

- Configuração *on grid*: GMG alimentando o laboratório e injetando o excedente de energia na rede de distribuição

Para tal configuração, é necessário que a chave reversora esteja na posição 1 indicada na Figura 7, ambas as contadoras (K1 e K2) devem estar fechadas e o disjuntor da carga resistiva desarmado.

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 GMG

Conforme mencionado na Seção 2.3.2, o modelo do GMG utilizado foi o LPG95, operando com GLP, conforme ilustrado na Figura 8.

Figura 8 – GMG LPG 95



Fonte: Autoria própria.

3.1.2 Reservatório de GLP

O reservatório fornecido pela Copa Energia é de modelo P-4000, de uso industrial, com capacidade para 4000 kg de gás, ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Reservatório de gás LAMOSSE



Fonte: Autoria própria.

3.1.3 Analisador de gases de emissão

Para coletar os gases emitidos pela combustão do GMG durante seu funcionamento foi utilizado o analisador ECIL Chemist 600, apresentado na Figura 10.

Figura 10 – Analisador ECIL Chemist 600



Fonte: Autoria própria.

3.1.4 Supervisório

Como interface homem-máquina, foi utilizado o controlador DEIF AGC 150, ilustrado na Figura 11. A chave à direita será nomeada como contatora K1 enquanto a chave à esquerda como contatora K2.

Figura 11 – Controlador DEIF AGC 150



Fonte: Autoria própria.

3.1.5 Procedimentos

Para realizar a coleta de dados do GMG operando *on grid* foram tomados os seguintes procedimentos:

1. O GMG é ligado a vazio por um período de cinco minutos para estabilização, os dados foram recolhidos após esse período de tempo.
2. É realizado a conexão do GMG à rede de distribuição fechando a contatora K1 e K2, aguardando o controlador realizar o sincronismo;
3. O GMG opera por 1 hora conectado a rede elétrica injetando 70 kW;
4. Nesta etapa, a frequência e a tensão fornecidas são registrados por um analisador de energia e pelo controlador DEIF;
5. Em dois momentos distintos, os gases emitidos na queima do GLP (CO_2 , N_2 , NO , NO_x , CO e C_xH_y) são registrados e analisados por meio do analisador de gases. Outras variáveis como temperatura dos gases de exaustão, temperatura ambiente, entre outros, também serão registradas no aparelho.
6. O GMG é desconectado da rede elétrica, abrindo-se o contato K1 e opera a vazio por 5 minutos para limpar qualquer resíduo de gás restante no sistema de alimentação.

4 Resultados

4.1 Resultado dos ensaios *on-grid* do GMG operando à GLP

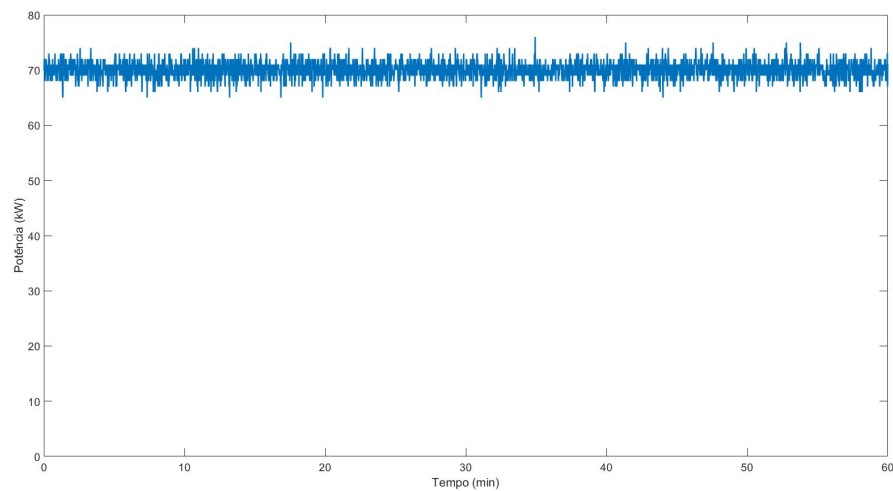
Data do ensaio: 31/10/2023

Horário: 13h40min

Temperatura: 32°C

Para o ensaio o GMG foi configurado para operar conectado à rede de distribuição de energia, alimentando o laboratório LAMOSSE e injetando o excedente de energia na rede, na Figura 12 é ilustrada a potência ativa gerada durante o procedimento, que foi de 70 kW.

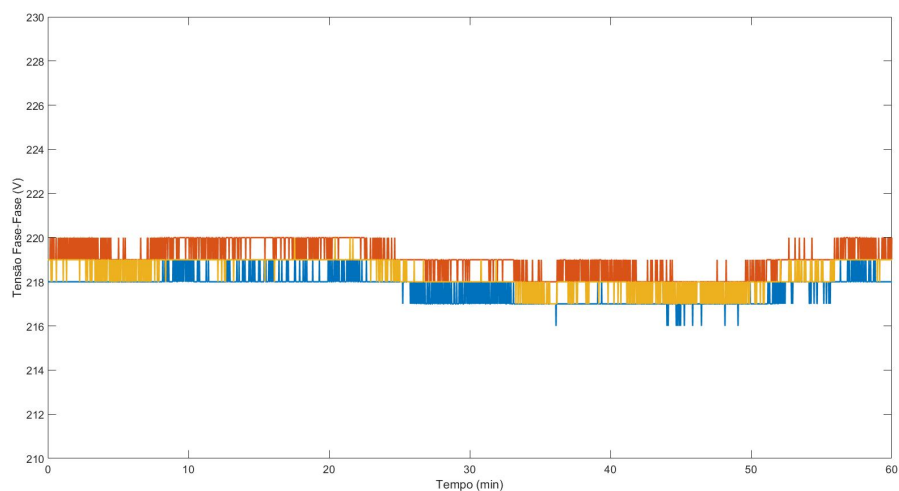
Figura 12 – Potência ativa gerada



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 13 é apresentado a tensão de linha do gerador.

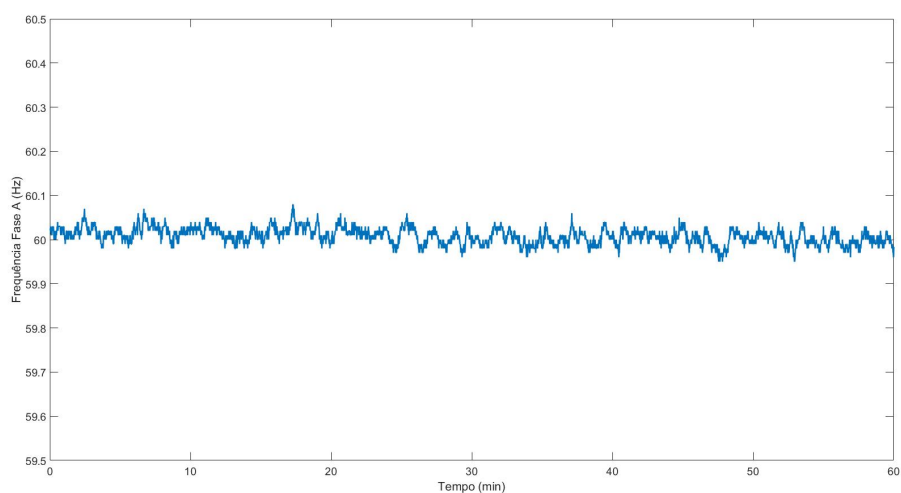
Figura 13 – Tensão fase-fase



Fonte: Autoria própria.

Na Figura 14 é apresentado a frequência da fase A do gerador.

Figura 14 – Frequência na fase A



Fonte: Autoria própria.

A análise da concentração de poluentes para o ensaio é baseada em uma medição durante cada degrau de carga. Na Tabela 13 são registrados os resultados obtidos pelo analisador para as leituras realizadas durante cada etapa da operação do GMG. Como descrito na Seção 3.1.5, os dados de gases poluentes foram coletados duas vezes durante o ensaio, o primeiro transcorridos 30 minutos de operação e o segundo ao final de 1 hora de ensaio.

Tabela 13 – Gases emitidos pelo gerador LPG95

Poluentes	Medição 1	Medição 2	Média
O ₂ %	3	3	3
NO ppm	582	575	578,5
CO ppm	1115	1118	1116,5
CO ₂ %	12,79	12,12	12,455
Nox ppm	611	604	607,5
CxHy ppm	2500	2900	2700

Fonte: Autoria própria

4.2 Interpretação dos resultados

Para análise de estabilidade de tensão e frequência do gerador, os dados da Figura 13 e da Figura 14 foram analisados de acordo com a RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 956 (ANEEL, 2021), em específico sobre os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST Módulo 8 - Qualidade da energia elétrica.

4.2.1 Análise da estabilidade de tensão

O primeiro critério ao analisar a estabilidade de tensão do gerador operando à GLP em relação ao regime permanente foram as faixas de tensão em relação à de referência, que definem a tensão de atendimento em três itens: adequada, precária e crítica. A Tabela 14 ilustra os valores citados para a tensão nominal igual ou inferior a 1kV.

Tabela 14 – Classificação das faixas de tensão

Classificação da faixa de tensão	
Tensão Adequada	202,4 V a 231,0 V
Tensão Precária	198,0 V a 202,4 V ou 231,0 a 233,2 V
Tensão Crítica	Abaixo de 198,0 V ou Acima de 233,2 V

(ANEEL, 2021)

Os valores máximo e mínimo de tensão de linha registrados no gráfico ilustrado pela Figura 13 são de 219,7 V entre fases AB e CA e 211,3 V entre fase CA respectivamente, com um baixíssimo desvio em relação à referência, os quais se enquadram como tensão adequada.

O segundo critério é em relação ao regime transitório, abordando as variações de tensão de curta duração, que são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos, considerando que o valor de 1 p.u (por unidade) é de 220 V. A tabela 15 ilustra a classificação dos eventos de curta duração.

Tabela 15 – Classificação dos eventos de curta duração

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

(ANEEL, 2021)

A aquisição de dados pelo supervisão é a cada segundo, considerando que o valor mais baixo de tensão registrado foi de 211,3 V, o qual é um valor superior ao limiar de 198 V que define um afundamento de tensão. Em relação ao valor mais alto registrado, de 219,7 V, que é um valor inferior ao limiar de 242 V que define uma elevação de tensão.

Considerando que um ciclo à 60 Hz equivale a um intervalo tempo de aproximadamente 16,7 milissegundos, e que o supervisão utilizado coleta dados de um em um segundo, podemos mensurar dentro da classificação de variação momentânea de tensão apenas o evento de interrupção momentânea de tensão. Já na classificação de variação temporária de tensão, todos os itens podem ser analisados.

Convertendo os valores da unidade de p.u (por unidade) para o valor em volts (V) obtemos os seguintes resultados:

- 0,1 p.u é igual a 22 V;

- 0,9 p.u é igual à 198 V;
- 1,1 p.u é igual à 242 V.

O valor máximo de tensão registrado durante o ensaio foi de 219,7 V, o qual tem boa margem em relação ao valor que indica a detecção de um evento de elevação temporária de tensão. O valor mínimo registrado foi de 211,3 V, o qual está bem distante dos valores que classificam o início de um evento de interrupção momentânea ou temporária de tensão.

A estabilidade de tensão, evidenciada por um desvio padrão mínimo e pela manutenção dos valores dentro da faixa de tensão adequada do PRODIST, evidenciam a eficácia e a robustez do sistema de Regulação Automática de Tensão (AVR) do gerador à GLP. A capacidade do AVR em compensar as variações de carga e as reatâncias internas da máquina, mantendo a tensão terminal estável e equilibrada entre as três fases, é um indicador de um sistema de controle bem projetado e calibrado, essencial para garantir a integridade de cargas sensíveis.

4.2.2 Estabilidade de frequência

Para analisar o critério da frequência, o módulo 8 do PRODIST ([ANEEL, 2021](#)) cita os possíveis valores e intervalos de tempo em que a frequência pode variar.

- Em condições normais, o sistema de distribuição de energia elétrica deve operar no intervalo de frequência compreendidos entre 59,9 Hz e 60,1 Hz.
- Quando ocorrer distúrbios no sistema de distribuição, a geração deve garantir que a frequência retorne aos valores de 59,5 Hz a 60,5 Hz após 30 segundos.
- Havendo necessidade de corte de geração ou de carga, durante os distúrbios no sistema de distribuição a frequência:
 - 1. Não pode exceder 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz em condições extremas;
 - 2. Pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo 30 segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos;

Analizando os dados da Figura 14, os valores máximos e mínimos de frequência registrados de um em um segundo foram de 60,09 Hz e 59,92 Hz, com um desvio mínimo em relação à referência, os quais respeitam com boa margem os critérios do PRODIST.

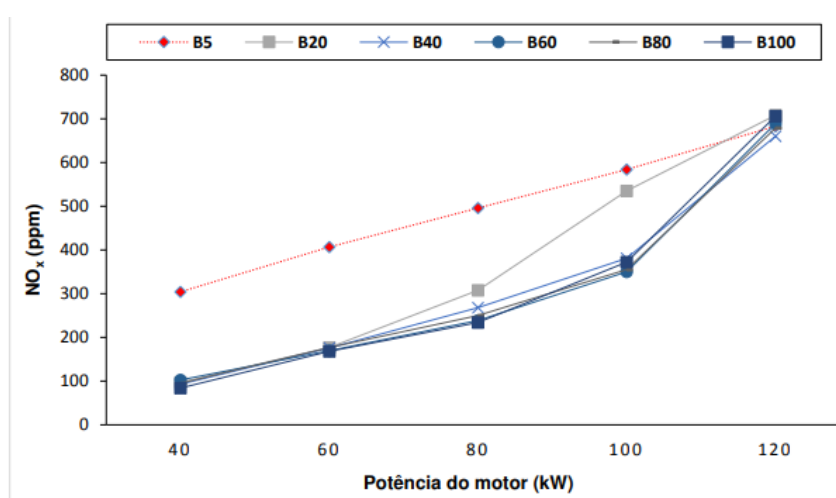
A estabilidade da frequência, que permaneceu extremamente próxima do valor nominal de 60 Hz com uma variação mínima, mostra um alto desempenho e uma rápida resposta do seu controlador de velocidade. A precisão com que o controlador manteve o

balanço entre a potência mecânica fornecida ao eixo e a potência elétrica demandada pela carga demonstra um sistema de controle confiável, crucial para a estabilidade não apenas do gerador em modo isolado, mas também para sua potencial operação no modo *on-grid*.

4.2.3 Gases de emissão

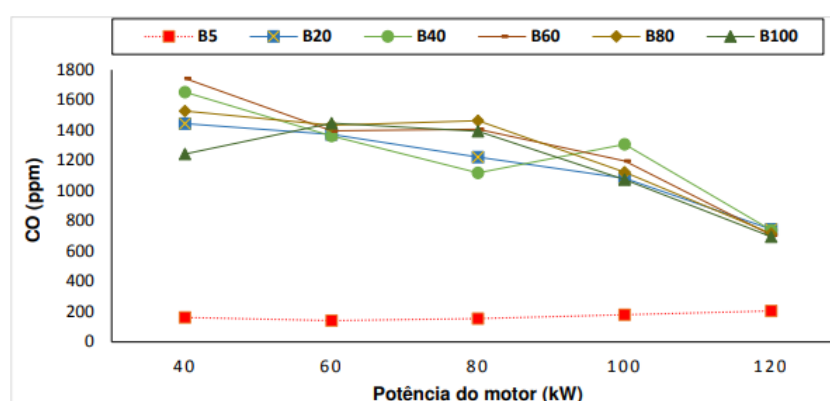
Para efeito de comparação, nas Figuras 15, 16, 17, 18 são ilustradas as emissões de um motor ciclo diesel de 206 kW utilizando diesel e composições de diesel/biodiesel e gás natural.

Figura 15 – Emissão de óxidos de nitrogênio



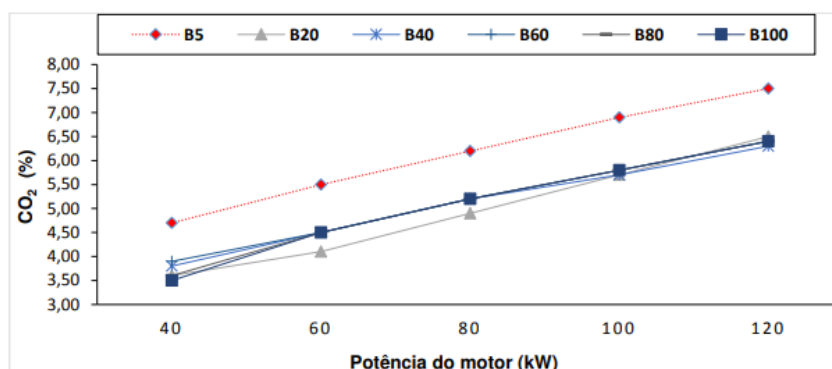
Fonte: (LUCENA, 2015)

Figura 16 – Emissão de monóxido de carbono



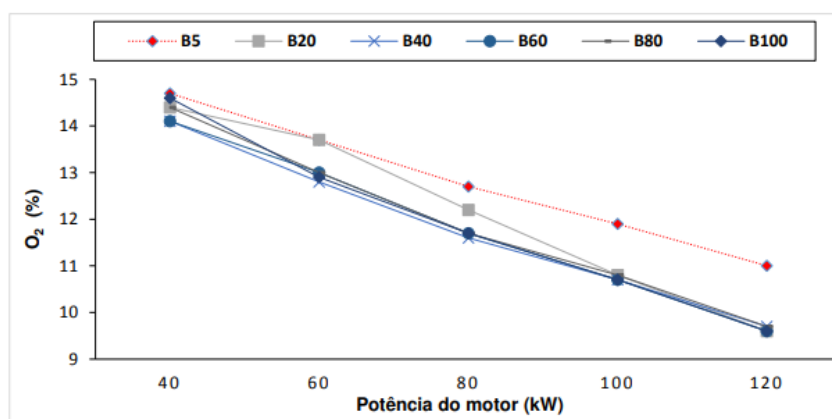
Fonte: (LUCENA, 2015)

Figura 17 – Emissão de dióxido de carbono



Fonte: (LUCENA, 2015)

Figura 18 – Emissão de oxigênio residual



Fonte: (LUCENA, 2015)

A Tabela 16 evidencia a comparação entre os gases poluentes, foram utilizadas as médias dos dados do gerador do estudo de (LUCENA, 2015) considerando a potência de 80 kW, que é a potência mais próxima do gerador à GLP.

Tabela 16 – Comparação de gases poluentes

Poluentes	GLP	Diesel/Biodiesel + GN
NOx (ppm)	607,5	340
O2 (%)	3	12,15
CO (ppm)	1116,5	1172
CO2 (%)	12,5	5,55

Fonte: Autoria própria

A formação de NO_x é altamente dependente da temperatura no interior da câmara de combustão, altas temperaturas favorecem a oxidação do nitrogênio presente no ar (BRUNETTI, 2012). A operação dual-fuel (Diesel/GN) pode resultar em temperaturas de combustão mais baixas, justificando a expressiva redução.

A análise dos gases oxigênio (O_2) e dióxido de carbono (CO_2) são indicadores da eficiência da combustão. A queima do GLP apresentou um percentual de O_2 residual de 3% e uma concentração de CO_2 de 12,5%. Estes valores indicam um processo de combustão com uma relação ar/combustível mais próxima da ideal (estequiométrica), resultando em baixo excesso de oxigênio e alta conversão de carbono em CO_2 .

Apesar de gerar mais óxidos de nitrogênio, o GLP apresentou características de uma combustão mais eficiente. As maiores vantagens do GLP são em relação à seu armazenamento e transporte. O armazenamento na forma líquida em recipientes sob pressão, no botijão, apresenta uma grande vida útil, aproximadamente 15 anos (ANP, s.d.), dessa forma, para aplicações de emergência, em que o gerador pode ficar meses sem uso, o GLP oferece uma confiabilidade maior em relação ao diesel, que se degrada de forma mais rápida. Em caso de vazamento, embora necessite de ventilação adequada, o GLP vaporiza e se dissipa na atmosfera, além de não contaminar o solo e lençóis freáticos. Sua flexibilidade no abastecimento é outro ponto a ser ressaltado, podendo ser feito por meio da troca de botijões, dispensando o uso de rede de gasodutos, muito comum no transporte de gás natural.

Mesmo que os resultados das emissões não apresentarem uma grande vantagem sobre outros combustíveis, buscar um marco regulatório que permita o uso do GLP como combustível em motores estimularia a realização de novos estudos e auxiliaria no desenvolvimento de um sistema mais robusto para controle das emissões do GLP, como utilização de filtros, catalisadores e buscar uma relação entre ar/combustível que seja mais eficiente para a combustão do gás.

Conclusão

Em resumo, o estudo apresenta o grupo motor gerador a GLP como uma solução de engenharia de alta confiabilidade e de flexibilidade logística. O desempenho dos seus sistemas de controle de tensão AVR e de velocidade garante a qualidade no fornecimento de energia elétrica, em plena conformidade com as normas brasileiras. Isso posiciona a tecnologia como uma opção segura e robusta para várias aplicações, incluindo sistemas de backup em caso de emergência, fornecimento de energia elétrica a consumidores isolados e geração distribuída.

Referências

ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 956, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021*. [S.l.], 2021. Disponível em <<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>>. Acesso em 22-06-2025.

ANP. *Resolução ANP Nº 957, de 5 de outubro de 2023*. 2023. <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=449231>. Acesso em: 27 de maio de 2025.

ANP. *GÁS DE BOTIJÃO GLP*. s.d. <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/cartilhas-e-guias/arq/gas-botijao-glp-10-orientacoes/cartilha-glp.pdf>. Acessado: 28-06-2025.

BRUNETTI, F. *Motores de combustão interna*. [S.l.]: São Paulo: Blucher, 2012. v. 2.

CARVALHEIRO, L. F. Relatório de ensaio, código dq-046.[s.l.]: Laboratório de combustíveis - labcom/ufms. 2021.

CHAGAS, M. R. *GESTÃO DO NÍVEL DE GÁS DE COZINHA (GLP)*. B.S. thesis — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.

CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: Mc Graw Hili, 2012. v. 5.

CNGAS. 2024. <https://cngas.com.br/2024/06/09/botijao-de-gas-capacidade-de-armazenamento/>. Acessado: 04-06-2025.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. *Ficha de Informação de Segurança de Produto Químico (FISPQ): Gás Liquefeito de Petróleo*. 2019. Disponível em: <[https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1-.asp?consulta=G%C3%81S%20\(ES\)%20DE%20PETR%C3%93LEO,%20LIQ%C3%9CEFEITO%20](https://sistemasinter.cetesb.sp.gov.br/produtos/ficha_completa1-.asp?consulta=G%C3%81S%20(ES)%20DE%20PETR%C3%93LEO,%20LIQ%C3%9CEFEITO%20)>

COPAGAZ. *Embalagens de Gás*. 2023. <https://www.copagaz.com.br/blog/tipos-de-botijao-de-gas/>. Acesso em: 15 de jun. 2025.

CROWL D. A.; LOUVAR, J. F. *Chemical Process Safety*. [S.l.]: Pearson, 2019. v. 4.

DEIF. *Controlador DEIF AGC 150*. [S.l.], 2023. Disponível em <<https://www.deif.com.br/documentation/agc-150-stand-alone/>>. Acesso em 16-06-2025.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. *Plano Decenal de Expansão de Energia 2031*. Brasília, DF, 2021. <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2031>. Acesso em: 04 jul. 2025.

EPE. *Balanco Nacional Energético*. 2023. Acesso em: 28-06-2025. Disponível em: <[urlhttps://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pd](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pd)>.

- FERREIRA, M. C. *Estudo da combustão com adição de hidrogênio em motor a diesel*. Dissertação (B.S. thesis) — Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2017.
- GONÇALVES, D. d. S. Causas e condições de incêndio envolvendo o gás liquefeito do petróleo no ambiente doméstico. UEMA, 2021.
- INCROPERA, F. P. e. a. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*. [S.l.]: LTC, 2011. v. 1.
- JR, J. A. de C. S. *Emissões em processos de combustão*. [S.l.]: Unesp, 2003.
- KUNDUR, P. *Power system stability and control*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2007. v. 10.
- LUCENA, L. Roberto Rocha de. *ANALISE DAS EMISSÕES, EFICIÊNCIA E CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO DE UM MOTOR DO CICLO DIESEL DE 206 kW, OPERANDO EM MODO DUAL COM DIESEL/BIODIESEL E GÁS NATURAL*. B.S. thesis — Universidade Federal de Campina Grande, 2015.
- MAZZONETTO ALEXANDRE WITIER; CARVALHO, F. H. d. e. a. Eficiência de um motorizador a gasolina adaptado para glp. 2018.
- PETROBRAS. *Gas Liquefeito de Petroleo - Informaçõeses Técnicas*. [S.l.], 2022. Disponível em <<http://petrobras.com.br/quem-somos/assistencia-tecnica>>. Acesso em 03 out. 2023.
- SALAS, C. S. S.; SILVEIRA, L. H. S. Eletrificação de regiões remotas: estudo de alternativas e aplicação no pantanal sul-mato-grossense. ed. *Bragança Paulista, SP: Margem da Palavra*, 2017.
- SEN, P. C. *Principles of Electric Machines and Power Electronics*. [S.l.]: Hoboken: John Wiley Sons, 2013. v. 3.
- SONNTAG RICHARD E.; BORGNAKKE, C. *Fundamentos da Termodinâmica Clássica*. [S.l.]: Edgard Blücher, 2011. v. 8.
- SOUZA, M. Eduardo Alves Olinda de. *Estudo de um processo de combustão de gás totalflex para calcinação da Gipsita em regiões remotas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2006.
- TASIC T.; POGOREVC, P. B. T. Gasoline and lpg exhaust emissions comparison. advances in production engineering management. 2011.
- TURNER, W. C. *Energy Management Handbook. 9. ed. Lilburn, GA: Fairmont Press*. [S.l.]: Fairmont Press, 2015. v. 9.
- URNS, S. R. *Introdução à Combustão-: Conceitos e Aplicações*. [S.l.]: S.l: AMGH Editora, 2013. v. 3.
- VILLALVA, M. G. *Energia Solar Fotovoltaica Conceitos e Aplicações*. [S.l.]: Ética, 2012.
- WEG. Características e especificações de geradores. 2017.