

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA ECONOMICIDADE DO USO DE GRUPO MOTOR GERADOR UTILIZANDO GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO OPERANDO EM DIFERENTES APLICAÇÕES

AUTORES:

Marcos Antônio dos Santos^{*1}, Natália de Almeida Menezes¹, Jair de Jesus Fiorentino²

* autor correspondente

INSTITUIÇÃO:

¹Copa Energia,

² Laboratório de Modelagem e Simulação de Sistemas Elétricos, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS)

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA ECONOMICIDADE DO USO DE GRUPO MOTOR GERADOR UTILIZANDO GÁS LIQUEFEITO DE PETRÓLEO OPERANDO EM DIFERENTES APLICAÇÕES

Resumo

O desenvolvimento de um país está intrinsicamente ligado à sua capacidade de suprir as demandas energéticas da indústria e das cidades em expansão, condição essencial para o crescimento econômico. O Brasil, cuja matriz energética é composta por diversas fontes, como hidrelétrica, biomassa, petróleo e gás natural, eólica, nuclear, solar e carvão mineral, vem diversificando ainda mais suas fontes geradoras em resposta ao crescente consumo de energia. Nesse contexto, o uso do Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) para geração de energia elétrica surge como uma alternativa promissora, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental. Enquanto o uso do GLP na geração de energia elétrica já é praticado em outros países, no Brasil essa aplicação é restrita pela Lei nº 8.176/91 e, portanto, para a realização desta pesquisa, foi necessária uma autorização específica da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Neste estudo, analisou-se a utilização do GLP como combustível em um Grupo Motor Gerador (GMG) para a geração distribuída (GD) de energia elétrica em diferentes aplicações - a Geração Distribuída e/ou isolada destaca-se como uma solução eficaz para aproximar a geração dos consumidores, reduzindo os custos de implementação e distribuição de energia elétrica; em comparação à geração centralizada, a GD oferece vantagens como a redução de perdas nas linhas de transmissão, maior estabilidade no fornecimento, menores impactos ambientais, e a possibilidade de atender de forma mais eficiente às áreas rurais, podendo operar tanto conectada à rede (*On Grid*) quanto de forma isolada (*Off Grid*). A eficiência técnica, econômica e ambiental do GMG alimentado por GLP, operando nos modos *Off e On Grid*, foram avaliadas e parâmetros de operação como corrente, frequência e tensão de saída do gerador foram monitorados. Adicionalmente, realizou-se uma análise detalhada do consumo específico, observando a dinâmica do fluxo de GLP durante a operação, e comparou-se este parâmetro entre grupos geradores a diesel e gás natural. Os testes *Off Grid* com carga resistiva demonstram a viabilidade e o potencial do GMG alimentado por GLP na geração de energia, com resposta robusta e estável mesmo sob distúrbios de carga. Além disso, o sistema a GLP destaca-se pela baixa emissão de poluentes, particularmente NOx, durante a operação, reforçando seu potencial como uma solução energética promissora.

Palavras-chave: GLP, Geração Distribuída, Sustentabilidade Energética

Abstract

The development of a country is intrinsically linked to its ability to meet the energy demands of its industry and expanding cities, a condition essential for economic growth. Brazil, whose energy matrix is composed of various sources such as hydroelectric, biomass, petroleum and natural gas, wind, nuclear, solar, and coal, has been further diversifying its generation sources in response to the growing demand for energy. In this context, the use of Liquefied Petroleum Gas (LPG) for electricity generation emerges as a promising alternative, both economically and environmentally. While the use of LPG for electricity generation is already practiced in other countries, in Brazil, this application is restricted by Law No. 8.176/91, and therefore, this research required specific authorization from the National Agency of Petroleum, Natural Gas, and Biofuels (ANP). In this study, the use of LPG as fuel in a Generator Set (GenSet) for distributed generation (DG) of electricity in various applications was analyzed—

Distributed Generation and/or isolated generation stands out as an effective solution to bring generation closer to consumers, reducing implementation and distribution costs; compared to centralized generation, DG offers advantages such as reduced transmission line losses, increased supply stability, lower environmental impacts, and the ability to serve rural areas more efficiently, operating either connected to the grid (On Grid) or in isolation (Off Grid). The technical, economic, and environmental efficiency of the LPG-fueled GenSet, operating in both Off and On Grid modes, was evaluated, and operational parameters such as current, frequency, and output voltage were monitored. Additionally, a detailed analysis of specific consumption was conducted, observing the dynamics of LPG flow during operation, and this parameter was compared with diesel and natural gas generators. The Off Grid tests with resistive load demonstrate the feasibility and potential of the LPG-fueled GenSet in energy generation, with robust and stable response even under load disturbances. Furthermore, the LPG system stands out for its low pollutant emissions, particularly NO_x, during operation, reinforcing its potential as a promising energy solution.

Keywords: LPG, Distributed Generation, Sustainable Energy

Introdução

O desenvolvimento de um país está intrinsicamente ligado à sua capacidade de suprir as demandas energéticas da indústria e das cidades em expansão, condição essencial para o crescimento econômico. O Brasil, cuja matriz energética é composta por diversas fontes, como hidrelétrica, biomassa, petróleo e gás natural, eólica, nuclear, solar e carvão mineral, vem diversificando ainda mais suas fontes geradoras em resposta ao crescente consumo de energia (GERALDO DE OLIVEIRA; FRANCISCO; MENEZES, 2023).

Nesse contexto, o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), composto em essência por propano e butano em diferentes proporções (ANP, 2020), pode diversificar ainda mais a matriz energética do Brasil, surgindo como uma alternativa promissora, tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, para geração de energia elétrica. Apesar de ser um combustível de origem fóssil, sua baixa cadeia de carbono proporciona uma combustão mais limpa, eficiente, com menores emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e material particulado (PM) (SINDIGÁS, 2021). O GLP destaca-se, também, como uma fonte de energia com alta capilaridade na distribuição, devido à sua eficiente estrutura logística e facilidade de transporte, o que lhe confere uma vantagem competitiva em relação a outros energéticos, como a lenha, que representa cerca de 9% da matriz energética nacional (EPE, 2023).

Enquanto o uso do GLP na geração de energia elétrica já é praticado em outros países, no Brasil essa aplicação é restrita pela Lei nº 8.176/91 e, portanto, para a realização desta pesquisa, foi necessária uma autorização específica da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). Assim, o consumo de GLP no Brasil está praticamente limitado aos setores Residencial e Industrial, com pouca representatividade nos setores Agrícola, de Transportes, entre outros. Essa restrição foi inicialmente estabelecida para garantir o abastecimento doméstico em tempos de escassez e para evitar a competição entre setores pelo recurso. No entanto, com a evolução da infraestrutura de distribuição e o aumento da oferta de GLP, essa limitação tornou-se obsoleta. A ampliação do uso do GLP para geração de energia elétrica poderia contribuir para uma matriz energética mais diversificada e sustentável, sem comprometer o abastecimento dos setores já atendidos.

Neste estudo, analisou-se a utilização do GLP como combustível em um Grupo Motor Gerador (GMG) para a geração distribuída (GD) de energia elétrica em diferentes aplicações. A Geração Distribuída e/ou isolada destaca-se como uma solução eficaz para aproximar a geração dos consumidores, reduzindo os custos de implementação e distribuição de energia elétrica; em comparação à geração centralizada, a GD oferece vantagens como a redução de perdas nas linhas de transmissão, maior estabilidade no fornecimento, menores impactos ambientais, e a possibilidade de atender de forma mais eficiente às áreas rurais, podendo operar tanto conectada à rede (*On Grid*) quanto de forma isolada (*Off Grid*) (CESAR DOS SANTOS DA ROCHA FLORIAN PRADELLE, 2022). A eficiência técnica, econômica e ambiental do GMG alimentado por GLP, operando nos modos *Off e On Grid*, foram obtidas e avaliadas neste trabalho, reforçando o potencial do GLP como uma solução energética promissora para a geração de energia elétrica.

Metodologia

A metodologia para os ensaios desta pesquisa com o GMG operando a GLP foi elaborada utilizando a NBR 8528 como base. Os testes do grupo motor foram realizados na Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS, Câmpus Campo Grande/MS, no Laboratório LAMOSSE - Laboratório de Modelagem e Simulação de Sistemas Elétricos. Na Figura 1 é ilustrada a localização do GMG e do Reservatório de GLP em relação ao LAMOSSE.

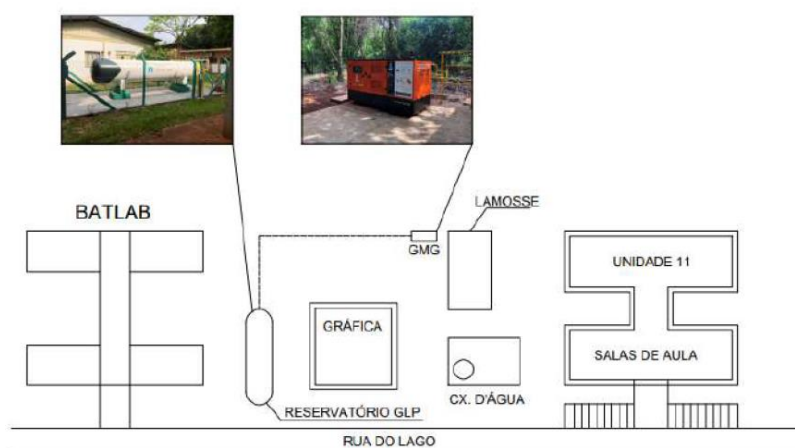


Figura 1: Localização dos testes. Fonte: autoria própria.

Os ensaios foram realizados em dois diferentes modos de operação:

- (i) Operação no modo *Off Grid* com Carga Resistiva;
- (ii) Operação no modo *On Grid* fornecendo energia elétrica para o laboratório LAMOSSE/UFMS e o restante injetado na rede elétrica;

Em cada modo de operação, parâmetros como corrente, frequência e tensão de saída do gerador foram monitorados. Adicionalmente, monitorou-se o consumo específico, observando a dinâmica do fluxo de GLP durante a operação, e emissões dos poluentes CO₂ (%) e NO_x (ppm), através do uso do analisador de gases ECIL 600X. Com o consumo específico possível realizar análises econômicas, comparando os custos/kWh de GMGs a diesel, a GN e da rede da concessionária. A emissão de poluentes do GMG a GLP também foi comparada a geradores a diesel e a GN encontrados na literatura.

O GMG utilizado nesta pesquisa foi o modelo LPG95, desenvolvido especificamente para o GLP do Brasil e fruto de uma parceria colaborativa entre a UFMS, Copa Energia e Aggreko. O modelo tem capacidade de produzir energia em 76 kW/95 kVA em modo contínuo e foi projetado/fabricado atendendo as normas NBR 8528, NBR 5410 e NR10 (informações técnicas na tabela 1).

Tabela 1: Informações Técnicas do Grupo Motor Gerador LPG95.

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

Resultados

Os resultados de cada modo de operação encontram-se abaixo descritos:

Operação no modo *Off Grid* com Carga Resistiva

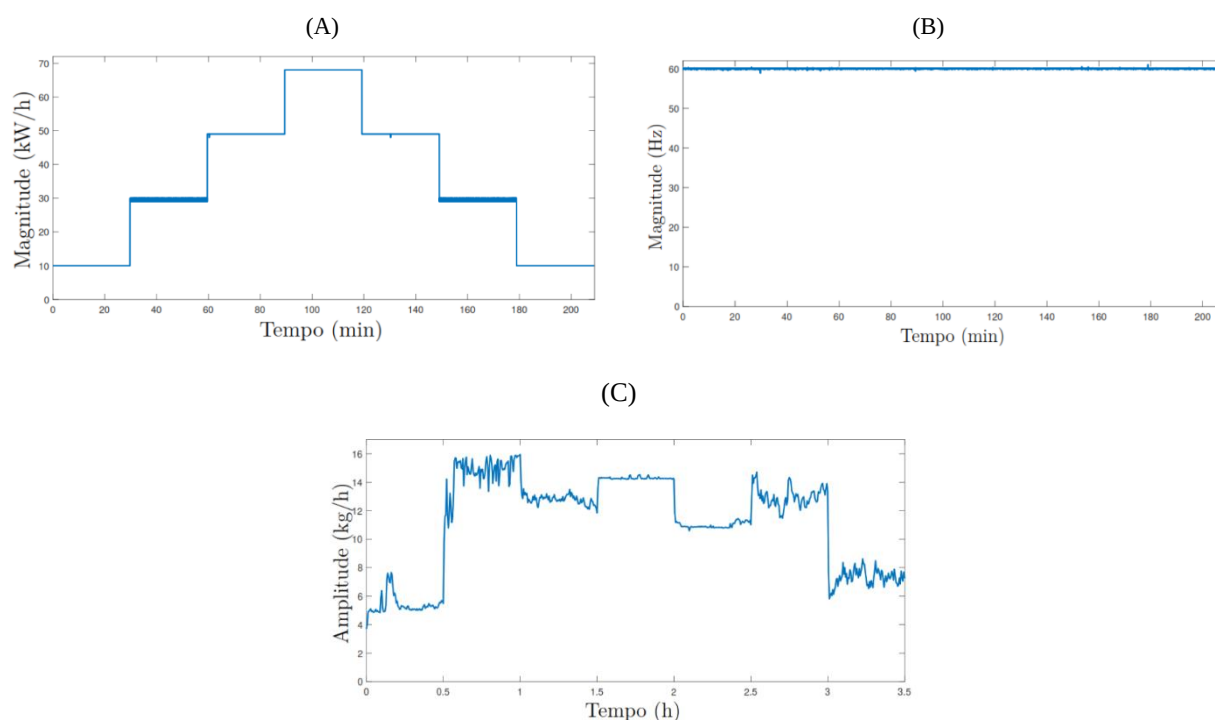


Figura 2: Resultados dos ensaios realizados com operação no modo *Off Grid*: (A) Resposta do GMG aos degraus de aumento e diminuição de carga resistiva: 10 kW, 29 kW, 48 kW, 67 kW, 48 kW, 29 kW e 10 kW. (B) Frequência da Fase A; (C) Vazão com o aumento e diminuição de carga.

O consumo específico do GMG no modo *Off Grid* foi de 0,204 kg/kWh e a emissão de poluentes como CO₂ foi de aproximadamente 8,1% e de NO_x de 488 ppm.

Operação no modo *On Grid*

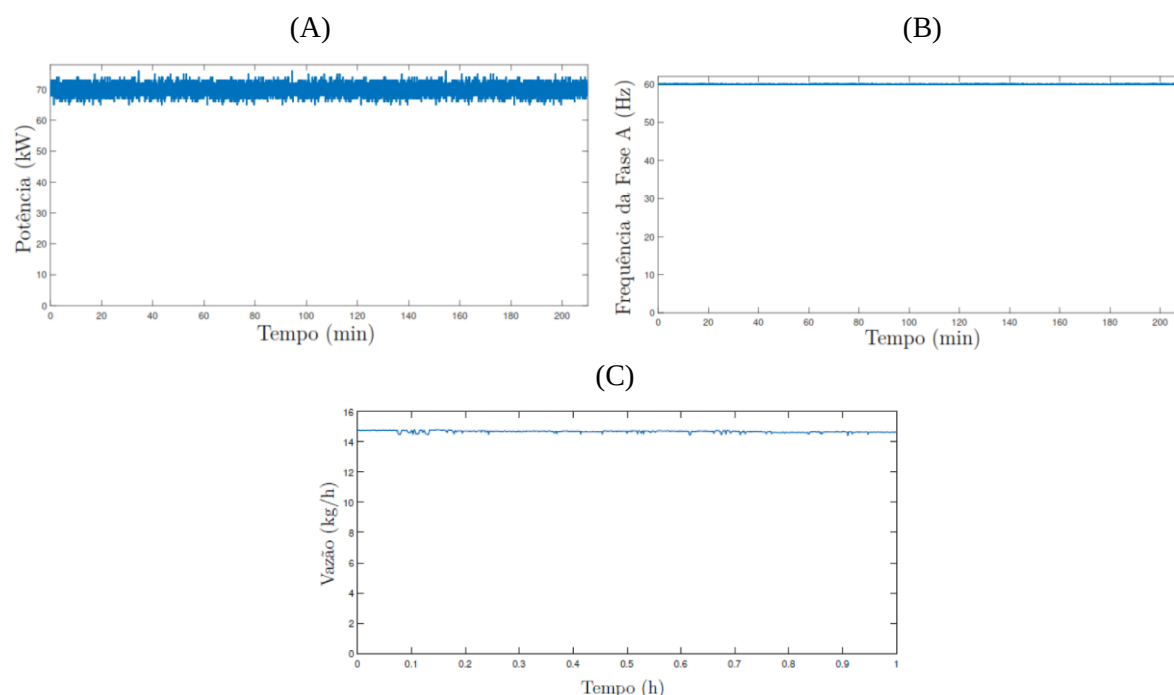


Figura 3: Resultados dos ensaios realizados com operação no modo *On Grid*: (A) Resposta do GMG com injeção de energia na rede; (B) Frequência da Fase A; (C) Vazão do GMG durante a operação *on grid*.

O consumo específico do GMG no modo *On Grid* foi de 0,209 kg/kWh e a emissão de poluentes como CO₂ foi de aproximadamente 8,1% e de NO_x de 488 ppm.

Estudo comparativo

Na tabela 2 encontram-se os dados de consumo específico e custo de geração para o GMG LPG95, GMG a GN (FERRAZ, 2014), GMG a diesel (INMETRO, 2019) e consumo da concessionária do MS (Energisa).

Tabela 2: Dado de consumo específico e custo de geração para o GMG LPG95, GMG a GN, GMG a diesel e consumo da concessionária do MS (Energisa).

	Consumo Específico	Custo (R\$/kWh)
GMG LPG95 operando a GLP <i>Off Grid</i>	0,204 kg/kWh	1,568
GMG LPG95 operando a GLP <i>On Grid</i>	0,209 kg/kWh	1,608
GMG a GN	0,349 m ³ /kWh	1,856
GMG a Diesel	0,222 L/kWh	1,419
Consumidor de Energia, T. H. Verde, Energisa (MS)	fora de horário de ponta	0,58
Consumidor de Energia, T. H. Verde, Energisa (MS)	no horário de ponta	2,30
Consumidor de Energia, T. H. Azul, Energisa (MS)	fora de horário de ponta	0,59
Consumidor de Energia, T. H. Azul, Energisa (MS)	no horário de ponta	1,75

Na tabela 3 encontram dados de emissão dos poluentes CO₂ (%) e NO_x (ppm) para o GMG LPG95, GMG a GN (FERRAZ, 2014), GMG a diesel (INMETRO, 2019):

Tabela 3: Dados de emissão dos poluentes CO₂ (%) e NO_x (ppm) para o GMG LPG95, GMG a GN GMG a diesel:

Emissões	Valores experimento	Valores literatura (FERRAZ, 2014; INMETRO, 2019)	
	GLP	Diesel	GN
CO ₂ (%)	8,1	10,6	6,8
NO _x (ppm)	488	1222	1200

Conclusões

Considerando todos os resultados dos testes *Off Grid* e *On Grid* do GMG alimentado a GLP, conclui-se que o gerador é potencial viável no processo de geração e injeção de energia na rede elétrica. O GMG a GLP apresentou resposta estável e robusta sob a presença de distúrbios de carga resistiva. O sinal de tensão gerado apresentou frequência regulada em 60 Hz e com controle de amplitude adequado para diversas aplicações, tais como geração de energia. A produção de energia elétrica por GMG alimentado a GLP é promissora, e tem-se diversas vantagens neste tipo de geração, tais como:

- (i) condições de transporte e armazenagem: no caso do GLP pode-se transportar na forma líquida, armazenado em botijões e reservatórios, o que resulta no simples manuseio e fácil estocagem;
- (ii) capilaridade de distribuição de GLP;
- (iii) baixa emissão de poluentes na atmosfera.

Constatou-se que o custo da tarifa verde de energia elétrica fora do horário de ponta obteve o menor custo, seguido pela tarifa azul fora do horário de ponta e pela geração de energia por geradores a Diesel. No entanto, a geração de energia com GMG operando a GLP obteve menor custo em relação ao custo da geração de energia de GMG alimentado por GN, e as tarifas verde e azul de energia elétrica da distribuidora Energisa no estado de Mato Grosso do Sul no horário de ponta, o que torna a geração de energia utilizando geradores operando a GLP atrativa para empresas, indústrias, hospitais, shoppings, entre outros.

Outro fator que se ressalta é o resultado da análise da concentração de gases poluentes presentes no escape do GMG a GLP. Estes poluentes analisados apresentaram menores concentrações de NO_x comparado com a geração de energia via GMG utilizando GN, como pode ser observado em (FERRAZ, 2014). Neste mesmo contexto, constatou-se que concentração NO_x no escape do GMG também é menor comparado a GMG operando a Diesel (INMETRO, 2019).

Assim, pode se concluir que o GLP é uma fonte energética promissora, economicamente, tecnicamente e ambientalmente viável para a produção de energia elétrica, que contribuir fortemente em deixar a matriz energética brasileira ainda mais sustentável.

Referências Bibliográficas

ANP. **Resolution 825**. Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2020. Disponível em: <<https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/resolucao-n-825-de-28-de-agosto-de-2020-274891354>>. Acesso em: 7 ago. 2022

CESAR DOS SANTOS DA ROCHA FLORIAN PRADELLE, J. **Geração Distribuída no Brasil: Cenário atual e previsão de crescimento do setor**.

EPE. **ABCD Energia: Matriz Energética e Elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 31 jul. 2024

FERRAZ, F. B. **Análise de desempenho de um motor diesel turboalimentado otolizado para gás natural**. 2014.

GERALDO DE OLIVEIRA, M.; FRANCISCO, D.; MENEZES, N. **O Cenário de Produção de Energia Elétrica a partir de fontes renováveis no Brasil** Revista Argumentum-RA. Disponível em: <<https://www.iea.org/data-and->>.

INMETRO. **Relatório Final da Comparação Interlaboratorial em Ensaio de Emissões em Motores Ciclo Diesel**. 2019.

SINDIGÁS. **Sobre o Gás Liquefeito de Petróleo (GLP)**. Disponível em: <https://www.sindigas.org.br/?page_id=12>. Acesso em: 13 jul. 2024.