

VIABILIDADE ECONÔMICA DA MINIGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BIOGÁS NO ATERRO SANITÁRIO DE GOIÂNIA

ECONOMIC VIABILITY OF ELECTRIC POWER MICROGENERATION USING BIOGAS AT THE GOIÂNIA LANDFILL

Vinicius Faria Costa Mendanha¹
Vinicius Andrade de Lima e Silva²
Thyago Carvalho Marques³

Resumo – A produção de energia elétrica renovável tem se destacado devido à crescente adoção de práticas sustentáveis. No entanto, é necessário avaliar se a utilização de biogás, derivado do metano gerado em aterros sanitários, é economicamente viável para a geração de energia elétrica. Este estudo apresenta a viabilidade econômica da conversão de metano em energia elétrica, utilizando um sistema de minigeração de 230 kW desenvolvido para o aterro sanitário de Goiânia. Os objetivos são prever a geração de metano no aterro e avaliar a viabilidade econômica do negócio. A metodologia adotada consiste na previsão da geração de metano por meio de um modelo de decaimento exponencial, seguida da análise dos indicadores de retorno e risco e uma avaliação de sensibilidade. A análise abrange a vida útil estimada do aterro, o histórico de disposição de resíduos e as projeções anuais de geração de metano. Os resultados demonstram uma alta viabilidade econômica da solução desenvolvida, com um Valor Presente Líquido (VPL) positivo, uma Taxa Interna de Retorno (TIR) de 46,17% ao ano e um período de payback entre dois e três anos. Esses valores ressaltam o significativo potencial econômico da abordagem desenvolvida, destacando sua importância para a transição energética.

Palavras-chave: Aterro Sanitário. Energia Renovável. Minigeração de Biogás. Viabilidade Econômica.

Abstract - The production of renewable electric energy has gained prominence due to the increasing adoption of sustainable practices. However, it is necessary to evaluate whether the use of biogas, derived from methane generated in landfills, is economically viable for electricity generation. This study presents the economic feasibility of converting methane into

¹ Mestrando em Engenharia Elétrica e de Computação na Universidade Federal de Goiás. E-mail: vinicius.fcfariacosta@gmail.com.

² Engenheiro Eletricista formado na Universidade Federal de Goiás. E-mail: vinicius.andrade.de.ls@gmail.com.

³ Doutor em Engenharia Elétrica e Computação pela Universidade de Campinas. Pós-graduado em Economia Financeira pela Universidade Estadual de Campinas (2006) e em Planejamento Tributário pela Faculdade de Administração e Ciências Econômicas (FACE) da UFG. E-mail: thyago@ufg.br.

electric energy using a 230 kW mini-generation system developed for the Goiânia landfill. The objectives are to forecast methane generation at the landfill and evaluate the economic feasibility of the project. The adopted methodology involves predicting methane generation through an exponential decay model, followed by an analysis of return and risk indicators and a sensitivity assessment. The analysis encompasses the estimated lifespan of the landfill, the historical disposal of waste, and annual methane generation projections. The results demonstrate a high economic feasibility of the developed solution, with a positive Net Present Value (NPV), an Internal Rate of Return (IRR) of 46.17% per year, and a payback period between two and three years. These values highlight the significant economic potential of the developed approach, emphasizing its importance for the energy transition.

Keywords: *Biogas Mini-Generation. Economic Viability. Landfill. Renewable Energy.*

I. INTRODUÇÃO

Estudos indicam que a crescente demanda por produtos e a ampliação da geração de riqueza têm resultado em consequências ambientais alarmantes (Barros e Silva, 2019; Mucelin e Bellini, 2008; Pereira e Curi, 2012; Rezende, 2016). Como alternativa para mitigar esses efeitos, o uso de energias renováveis tem se mostrado promissor. Assim, o objetivo deste trabalho é prever a produção de metano no aterro sanitário de Goiânia, resultante do descarte de lixo na cidade, para, em seguida, avaliar a viabilidade econômica de um sistema de geração de energia elétrica de 230 kW no local. Para isso, são empregados indicadores de retorno e risco cruciais para orientar as decisões de investimento, a saber: Valor Presente dos Benefícios (VPB), Valor Presente Líquido (VPL), Valor Presente Atualizado (VPLa), Índice de Benefício por Custo (IBC), Retorno Adicional sobre Investimento (ROIA), Taxa Interna de Retorno (TIR) e *payback*.

Nesse contexto, pesquisas como as de Atalla *et al.* (2024), Narciso *et al.* (2023) e Pepe e Junior (2024) ressaltam a importância da viabilidade técnica e econômica desses empreendimentos. No entanto, a aplicação de métricas essenciais para projetos de investimento em minigeração em aterros sanitários nem sempre é abordada de maneira completa e objetiva. Essas ferramentas são fundamentais para comparar os benefícios futuros com os custos iniciais, fornecendo uma base sólida para a tomada de decisões econômicas. Este trabalho, portanto, contribui significativamente ao apresentar cálculos detalhados de diversos indicadores de retorno e risco, proporcionando uma análise mais robusta e fundamentada para investidores e gestores.

Em relação à matéria-prima do negócio, tem-se o biogás, que é um combustível gasoso com conteúdo energético elevado, semelhante ao gás natural, podendo ser utilizado para geração de energia elétrica (Lima *et al.*, 2024). Trata-se de um produto resultante da fermentação anaeróbia de materiais orgânicos, incluindo resíduos industriais, sólidos urbanos, florestais, agrícolas e de animais (Werncke, 2014). Os principais componentes do biogás são o metano e gás carbônico. Nesse sentido, as metas de redução da emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) vêm gerando uma nova "moeda" no cenário econômico mundial, chamada de Créditos de Carbono ou Reduções Certificadas de Emissão (RCEs), que são negociados internacionalmente em um mercado próprio, denominado Mercado Internacional de Comercialização de Créditos de Carbono (Souza *et al.*, 2013; Lamenza, 2017).

No Brasil, utiliza-se o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL), um instrumento de flexibilização voluntário que contempla a participação de países não obrigados pelo acordo a reduzir as suas emissões de GEE. Isso abrange vários setores da economia, tais como: energias renováveis, substituição de combustíveis fósseis,

sequestro de carbono/reflorestamento, manejo de resíduos animais, indústrias químicas e indústrias de base. Potencialmente, até 2016, existiam cinquenta e um projetos brasileiros de aterros sanitários e aproveitamento do biogás listados na plataforma da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC) para MDL (ONU, 2023).

Portanto, este estudo de caso sobre o aterro sanitário de Goiânia abrange as estimativas de geração de créditos de carbono e ganhos financeiros. Projetos de biogás e biometano podem produzir créditos de carbono devido à queima do metano no *flare*, transformando-o em dióxido de carbono e reduzindo seu potencial como gás de efeito estufa (Vanzin, 2006). O local avaliado cobre uma área de 451.000 m² (Prefeitura Municipal de Goiânia, 2016) e possui queimadores de metano em operação, evidenciando o potencial para a geração de biogás e, conseqüentemente, a produção de créditos de carbono.

II. METODOLOGIA

Para análise da viabilidade econômica do uso do biogás para geração de energia elétrica no aterro sanitário de Goiânia, são usados os seguintes indicadores de retorno e risco (Hirschfeld, 2009):

- **Valor Presente dos Benefícios (VPB)**, correspondente à soma de todos os benefícios no instante $n = 0$.
- **Valor Presente Líquido (VPL)**, conforme (1), em que n é o número de períodos, i é a taxa de juros comparativa ou mínima de atratividade e F_n é cada um dos valores envolvidos no fluxo de caixa no instante n .

$$VPL = \sum_{j=0}^n F_n (1+i)^{-n} \quad (1)$$

- **Valor Presente Atualizado (VPLa)**, conforme (2), sendo i a taxa de juros, geralmente, a Taxa Mínima de Atratividade e n o número de períodos da análise.

$$VPLa = VPL \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

- **Índice de Benefício por Custo (IBC)**, conforme (3).

$$IBC = \frac{\text{Valor presente do fluxo de benefícios}}{\text{Valor presente do fluxo de investimentos}} \quad (3)$$

- **Retorno Adicional sobre o Investimento (ROIA)** representa, em termos percentuais, a riqueza gerada pelo projeto, sendo n o número de períodos da análise.

$$ROIA = \sqrt[n]{\frac{\text{Valor presente do fluxo de benefícios}}{\text{Valor presente do fluxo de investimentos}}} - 1 \quad (4)$$

- **Retorno Adicional sobre o Investimento (ROI)**, conforme (5).

$$ROI = (1 + TMA)(1 + ROIA) - 1 \quad (5)$$

- **Taxa Interna de Retorno (TIR)**, como em (6), com FC_j sendo o Fluxo de Caixa no instante j .

$$\sum_{j=0}^n \frac{FC_j}{(1 + TIR)^j} = 0 \quad (6)$$

- **Payback**: é o número de períodos necessários para que o fluxo de benefícios supere o capital investido.

A relação de conversão usada considera cada tonelada de metano equivalente a 21 toneladas de CO₂. Os cálculos de geração de metano são efetuados a partir de estimativas, conforme metodologia sugerida em Vanzin (2006), a partir de (7), sendo: LFG a emissão do metano, em m³/ano; k , a constante de decaimento; L_0 o potencial de geração de metano, em m³/tonelada; R o fluxo médio por ano de resíduos durante a operação do aterro, em tonelada; c tempo desde o fechamento do aterro; e t o tempo desde a abertura do aterro.

$$LFG = R \cdot L_0 \cdot (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad (7)$$

A obtenção de L_0 é dada em (8), sendo: MCF o fator de correção do metano; DOC a fração de carbono orgânico degradável do lixo; DOC_F a fração de DOC que pode se decompor; e F a fração de metano no gás (Prefeitura Municipal de Goiânia, 2016; Figueiredo, 2011).

$$L_0 = \left(\frac{16}{12}\right) \cdot MCF \cdot DOC \cdot DOC_F \cdot F \quad (8)$$

Para a obtenção da fração de carbono orgânico degradável no lixo, para cada tipo de resíduo, utiliza-se (9), sendo: DOC_j a fração de carbono degradável no tipo de resíduo j ; e w_j a fração do tipo de resíduo j por categoria de resíduo.

$$DOC = DOC_j \cdot w_j \quad (9)$$

Os valores utilizados dos parâmetros de (7) até (9) estão apresentados na Tabela 1. O valor de DOC foi obtido da gravimetria do aterro, resultando em 30,4\% (Prefeitura Municipal de Goiânia, 2016).

Tabela 1 – Resumo dos dados obtidos para os cálculos de geração de biogás.

Parâmetro	Valor	Fonte	Observações
LFG	Cálculo da série histórica	Calculado	---
L_0	98,84 m ³ /tonelada	Calculado	---
R	Cálculo da série histórica	Calculado	---
x	2034	Hipótese do modelo	---
T	1993-2034	---	Disposição até 2004
DOC _F	30,38%	Calculado	---
DOC _i	Por tipo de resíduo	Amostrado	Média ponderada
w_i	Por tipo de resíduo	Amostrado	Composição gravimétrica por tipo de resíduo
MCF	0,8	Painel Internacional sobre Mudanças Climáticas	Utilizado para local não gerenciado
F	43,53%	Média aritmética da medição	Amostragem em campo

Fonte: Prefeitura Municipal de Goiânia (2016).

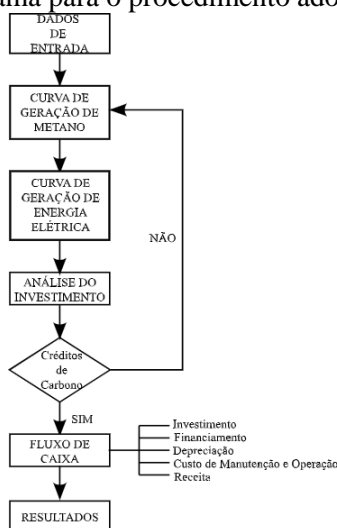
Para a determinação da potência e energia disponíveis, são usadas (10) e (11), respectivamente, sendo P_x a potência disponível em cada ano, em MW; Q_x a vazão de metano captado, em m^3 /ano; PCI o poder calorífico de metano, igual a $35,53 \cdot 10^6$ J/ m^3 ; η a eficiência do grupo gerador de 28%; Disp é 7.000 h/ano; e E a energia disponível, em MWh/ano.

$$P_x = \frac{Q_x \cdot PCI \cdot \eta}{Disp \cdot 3600 \cdot 10^6} \quad (10)$$

$$E = P_x \cdot Disp \quad (11)$$

O procedimento neste trabalho é o proposto em Vanzin (2006), o qual permite que seja analisada a viabilidade econômica de implantação de uma usina de geração de energia elétrica, usando o biogás de aterros sanitários. O fluxograma da Figura 1 detalha o passo a passo da simulação, sendo necessários:

Figura 1 - Fluxograma para o procedimento adotado neste trabalho.



Fonte: adaptado de Vanzin (2006).

Para a determinação do custo de operação, calculam-se os custos com mão-de-obra e combustível consumido, enquanto, para o custo de manutenção, avaliam-se os gastos com peças, materiais e ferramentas necessários para sua execução. Neste trabalho, adotou-se o valor calculado de custo de operação e de manutenção igual a 51,02 R\$/MWh. São consideradas duas possibilidades de receita do empreendimento com venda de energia elétrica e de créditos de carbono, permitindo a venda de certificados de redução de emissões para empresas interessadas ou, ainda, em bolsas de valor (Vanzin, 2006). A minigeração distribuída é conceituada como uma unidade geradora de energia elétrica renovável ou de cogeração qualificada, com uma potência instalada em corrente alternada superior a 75 kW e igual ou inferior a 5 MW para fontes despacháveis, bem como igual ou inferior a 3 MW para fontes não despacháveis (ANEEL, 2012). Nesta pesquisa, consideram-se a geração compartilhada (centrada em um único local, compensando a demanda elétrica de unidades consumidoras de diferentes titularidades) e os seguintes tributos incidentes: Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS), com alíquota de 17%, conforme Estado de Goiás (2023); Programa de Integração Social (PIS), com alíquota de 0,65% (regime cumulativo); e Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), com alíquota de 3% (regime cumulativo).

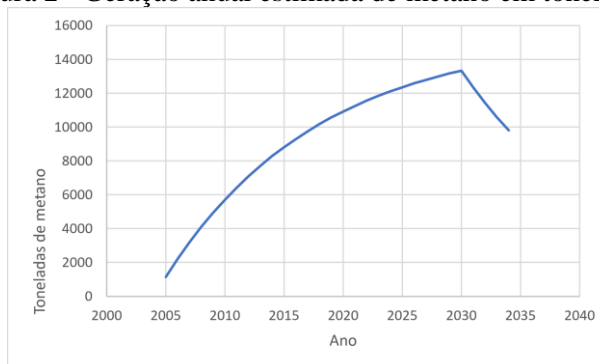
Além disso, leva-se em conta a TUSD (Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição), composta pela soma dos valores referentes ao custo de transmissão, denominado de Fio A, mais o custo de distribuição, chamado de Fio B, somado ao valor dos encargos e perdas do sistema. Para o estado de Goiás, a resolução homologatória nº 3.279 determina o valor de 1 kWh, em que a TUSD é R\$ 0,42829 e a TE (Tarifa de Energia) é de R\$ 0,4334. Assim, o valor da compensação de energia de 1 kWh é referente a soma entre a cobrança estabelecida pela Lei 14.300.

Como o sistema de geração base deste projeto tem 230 kW de potência, ele se enquadra em GD II. Isso significa que será cobrado, apenas, o Fio B, em porcentagens que variam de acordo com o ano. O valor da compensação em cada ano é: em 2024, 0,11 R\$/kWh; em 2025, 0,13 R\$/kWh; em 2026, 0,15 R\$/kWh; em 2027, 0,17 R\$/kWh; e em 2028, 0,19 R\$/kWh.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considera-se a possibilidade pessimista de fechamento do aterro sanitário de Goiânia em 2030. O gráfico da geração anual de metano, em toneladas, é exibido na Figura 2.

Figura 2 - Geração anual estimada de metano em toneladas.



Fonte: próprios autores (2024).

Observa-se que a massa de metano gerado deve aumentar até 2030, decrescendo a partir do fim do recebimento de resíduos no local. Conclui-se que o aterro sanitário de Goiânia possui uma longa vida útil e tem gerado quantidades grandiosas de metano por ano. Além disso, o conjunto motorgerador de energia elétrica proposto é o LANDSET da Brasmetan. Ele é composto por um motor Mercedes modelo 447-LA, convertido para ciclo Otto, com potência nominal de 230 kW, capaz de gerar energia a partir do biogás de aterros sanitários (Figueiredo, 2011).

O valor do investimento inicial contempla todos os custos dos equipamentos que compõem o sistema, incluindo impostos, além dos serviços de instalação, montagem, transporte, frete e seguro, totalizando R\$ 1.527.888,56. O cálculo da energia elétrica líquida disponível deve considerar a potência elétrica disponível de 230 kW (instalado), 7000 horas de funcionamento ao ano e autoconsumo de 5%. Para a avaliação da viabilidade econômica do negócio, a Taxa de Mínima Atratividade (TMA) é 11% ao ano; o tempo de projeto é de dez anos; a depreciação do equipamento é linear ao longo do projeto, igual a 10% ao ano; a taxa de juros no financiamento é de 12,00% ao ano, com pagamento em dez anos, utilizando o Sistema de Amortização Constante (SAC); o valor pago com pessoal é de 180.000,00 reais, em $n = 0$, com crescimento de 4,5% a cada ano; e as demais hipóteses metodológicas explicitadas são consideradas válidas.

Os indicadores de retorno e risco calculados para essa configuração são: VPB de R\$ 4.481.732,75, representando a soma dos benefícios futuros trazidos ao valor presente; VPL

de R\$ 2.661.120,89, indicando a diferença entre os fluxos de caixa futuros descontados e o investimento inicial (projeto é lucrativo); VPLa de R\$ 451.862,12, considerando uma série uniforme; IBC de 2,93, provando que os benefícios do projeto são quase três vezes maiores que os custos; ROIA de 11,36%, calculando o retorno incremental gerado pelo investimento adicional; ROI de 23,61%, apontando o retorno total em relação ao investimento inicial; TIR de 46,17%, que é a taxa de desconto que torna o VPL igual a zero e indica a rentabilidade do projeto; e *payback* entre 2 e 3 anos, sendo o tempo necessário para recuperar o investimento inicial.

Por fim, para a análise de sensibilidade do projeto, variam-se os parâmetros de entrada um de cada vez para avaliar o impacto de diferentes condições econômicas e operacionais. Conclui-se que a viabilidade e a atratividade econômica do projeto estão relacionadas à obtenção dos valores relativos aos Créditos de Redução de Emissões (CERs). No entanto, a ausência dessa receita não inviabiliza o projeto, pois o VPL ainda seria positivo sem ela. Isso pode ser atribuído à alta eficiência do sistema de geração desenvolvido, mesmo com a potência máxima de pico limitada, e às resoluções normativas recentes.

IV. CONCLUSÃO

O histórico da disposição de resíduos no aterro sanitário de Goiânia revela uma quantidade elevada de deposição ao longo dos anos, com a geração anual de metano aumentando significativamente até 2030 e declinando após o encerramento das atividades. Esse cenário oferece uma oportunidade substancial para a conversão do metano em energia elétrica.

A proposta de transformar metano em energia elétrica foi minuciosamente analisada quanto à viabilidade econômica. Os resultados financeiros, baseados em premissas cuidadosamente estabelecidas, mostram um VPL positivo, TIR, ROI e *payback* favoráveis, indicando alta atratividade econômica. A análise de sensibilidade destacou a importância do custo de investimento inicial e dos Créditos de Redução de Emissão (CERs) na viabilidade do projeto, apontando áreas-chave para uma gestão eficaz.

Em resumo, este estudo propõe uma solução economicamente viável para a produção de energia a partir do metano gerado em aterros, contribuindo significativamente para a gestão eficiente de resíduos e o desenvolvimento econômico local, cumprindo os objetivos propostos. Para trabalhos futuros, sugere-se uma simulação probabilística para avaliar cenários com uma abordagem não determinística, aprofundando a análise das incertezas.

V. REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012 – Dicionário de Dados Abertos**. Diário Oficial da União, 2012.

ATALLA, C. et al. Análise da viabilidade técnica e ambiental da adição de diferentes taxas de resíduos de areia verde de fundição a composto maturado obtido de um processo automatizado. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales**, p. 306–325, 6 abr. 2024.

BARROS, Dominique Rodrigues; SILVA, Monique Nogueira da. A conscientização do homem para uma exploração sustentável do meio ambiente. **Revista Educação, Psicologia e Interfaces**, v. 3, n. 2, p. 121-135, 26 ago. 2019.

ESTADO DE GOIÁS. **Código Tributário do Estado de Goiás - CTE, lei 22.460, DE 12-12-2023**. Diário Oficial de União, 2023.

FIGUEIREDO, Natalie Jimenez Verdi de. **Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - estudo de caso**. 2011. 146 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

HIRSCHFELD, Henrique. **Engenharia Econômica e Análise de Custos**. São Paulo: Atlas, 2009.

ONU. **Convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima (EB Meetings)**. 2023. Disponível em: <https://cdm.unfccc.int/EB/index.html>. Acesso em: 02 jan. 2024.

LAMENZA, Ademir *et al.* Comercialização e gestão de projetos de créditos de carbono no Brasil. **Revista de Administração da UNIMEP**, v. 15, n. 2, p. 100-127, jan. 2017.

LIMA, Jessica Aline Menezes et al. Quantification and spatial distribution of the bioenergetic potential from slaughterhouses effluents biogas generation across Brazil. **Journal Of Cleaner Production**, p. 143000, jun. 2024. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143000>.

MUCELIN, Carlos Alberto; BELLINI, Marta. Lixo e impactos ambientais perceptíveis no ecossistema urbano. **Revista Sociedade & Natureza**, Uberlândia, v. 20, n. 1, p. 111-124, jun. 2008.

NARCISO, Mateus de Oliveira *et al.* Estudo da viabilidade econômica da utilização do biogás gerado no aterro sanitário de Guarulhos. In: Exposição anual de tecnologia, educação, cultura, ciências e artes do Instituto Federal de São Paulo, 3., 2023, Guarulhos. **Anais [...]**. Guarulhos: Exatecca, 2023. p. 1-5.

PEPE, T.; JUNIOR, D. Aerofotografia por drone no aterro sanitário de Avaré-SP: monitoramento preciso e eficiente para gestão ambiental. **Anais Congresso Sul-Americano de Resíduos Sólidos e Sustentabilidade**, 14 maio 2024.

PEREIRA, Suellen Silva; CURI, Rosires Catão. Meio Ambiente, Impacto Ambiental e Desenvolvimento Sustentável: Conceituações Teóricas sobre o Despertar da Consciência Ambiental. **Reunir Revista de Administração, Contabilidade e Sustentabilidade**, v. 2, n. 4, dez. 2012.

PREFEITURA MUNICIPAL DE GOIÂNIA. **Estudo de viabilidade técnica e financeira do aproveitamento do biogás e geração de energia no aterro sanitário do município de Goiânia**. Goiânia: Programa de Gestão de Emissões de Goiânia, 2016.

REZENDE, Vanessa Leite. A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. **Soc. Nat.**, v. 28, n. 3, p. 375-384, dez. 2016.

VANZIN, Emerson. **Procedimento para análise da viabilidade econômica do uso do biogás de aterros sanitários para geração de energia elétrica**: aplicação no aterro de santa tecla. 2006. 91 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

WERNCKE, Ivan. **Desempenho energético de um motor gerador de 5 kVA operando no modo dual com diesel, biodiesel de Crambe e biogás**. 2014. 50 f. Tese (Doutorado) - Curso de Energia na Agricultura, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2014.

VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás pelas contribuições prestadas.

VII. COPYRIGHT

Direitos autorais: Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído no artigo.