

CONSTRUÇÃO DE UMA BANCADA PARA AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE CONVERSÃO DE COMBUSTÍVEL EM UMA MÁQUINA TERMELÉTRICA A COMBUSTÃO INTERNA

¹Eduarda Terra Marciano, eduardaterra2016@aluno.ufsj.edu.br

¹Wálif Marcos Vieira Duarte, walifmarcos@aluno.ufsj.edu.br

²Leonardo Guimarães Fonseca, leofonseca@ufsj.edu.br

¹Curso de Graduação em Engenharia Mecatrônica, Universidade Federal de São João del-Rei, rodovia MG 443, KM7, Fazenda do Cadete, Ouro Branco – MG, 36497-899

²Departamento das Engenharias de Telecomunicações e Mecatrônica, Universidade Federal de São João del-Rei, rodovia MG 443, KM7, Fazenda do Cadete, Ouro Branco – MG, 36497-899

Resumo. Este projeto tem por objetivo desenvolver uma bancada para medição da eficiência de conversão de combustível, em uma máquina termelétrica a combustão interna operando com óleo diesel comercial. O equipamento cuja eficiência se pretende mensurar é um motor estacionário com potência nominal de 7,0 kVA, que foi adquirido como parte deste projeto. Serão desenvolvidos aparatos e procedimentos para a medição do combustível consumido e da energia dissipada em cargas elétricas resistivas. A medição do combustível consumido, a bancada de cargas e a medição da potência nas cargas são produtos deste projeto.

Palavras chave: Motores de combustão interna. Máquina termelétrica a combustão interna. Bancada de medição de eficiência termelétrica.

Abstract. The objective of this project is to develop a test bench for measuring the efficiency of a thermal electric combustion machine operating with commercial diesel oil. The equipment whose efficiency is to be measured is a stationary engine with a nominal power of 7,0 kVA, which has been purchased as part of this project. Apparatus and procedures will be developed for measuring the fuel consumed and the energy dissipated in electrical loads. The measurement of the consumed fuel, the load bench and the measurement of the power in the loads are products of this project.

Keywords: Internal combustion engines. Internal combustion heat engine. Thermal electric efficiency measurement bench.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de motores de combustão interna para as mais diversas aplicações deve permanecer uma realidade no futuro próximo. A confiabilidade e a disponibilidade do fornecimento de potência, o custo de operação e manutenção, a versatilidade e a autonomia, entre outras questões, conferem a estes sistemas a condição de boa opção ou melhor opção para muitas aplicações (MUSTAYEN et al., 2022; SHANMUGAM et al., 2021; SERA, c et al., 2020).

As tecnologias para geração de potência elétrica em áreas isoladas têm avançado de forma considerável nos últimos anos. Sistemas de geração de potência solar e eólica de pequeno porte têm avançado neste segmento, devido à ausência da necessidade de consumo de combustível. O custo de aquisição e a disponibilidade das fontes de energia para conversão em potência elétrica são os principais fatores limitantes. Como consequência, muitas comunidades isoladas dependem principalmente de geração de potência a diesel (MUSTAYEN et al., 2022; SHANMUGAM et al., 2021; HAMILTON et al., 2017).

Máquinas termoelétricas a combustão interna são utilizadas na grande maioria destas aplicações, nas quais um combustível é consumido para geração de potência bem próximo do local de consumo. Alguns exemplos de aplicações para estas máquinas são: eletrificação de áreas rurais; obras de construção viária; dispositivos de emergência em hospitais; locomotivas e transporte ferroviário; entre outros. Em muitos casos, motores a combustão interna alternativos operando com óleo diesel comercial (NAYAK et al., 2022; MUSTAYEN et al., 2022) são usados para acionar geradores e fornecer

potência. O custo e a disponibilidade do óleo diesel comercial, além do impacto ambiental causado pelas emissões de poluentes, são os principais fatores contrários a esta operação.

Nos últimos anos, diversas pesquisas apontam inovações na geração de potência usando motores de combustão interna de ignição por compressão. Utilização de biodiesel diretamente ou em misturas com diesel fóssil (NAYAK et al., 2022; SERA, C et al., 2020; PERUMAL; ILANGKUMARAN, 2017), misturas entre diesel, biodiesel e etanol (PRANTE; SANTOS; MARTINS, 2023; SHANMUGAM et al., 2021; KRISHNA et al., 2019), utilização de biogás (NAYAK et al., 2022; NAYAK; SAHOO, 2020), são alguns exemplos de tecnologias que podem, em um futuro próximo, melhorar a operação da geração termoeletrica de energia. Utilização de combustíveis que consomem CO₂ (etanol, biodiesel), utilização de combustíveis que podem reduzir impacto ambiental (biodiesel, biogás), atuação junto a comunidades isoladas para benefícios sociais, são alguns exemplos.

Os desenvolvimentos em geração de potência usando biocombustíveis foram obtidos através de ensaios experimentais em motores de combustão interna. Estes ensaios possibilitam compreender melhor o processo de conversão de energia termoquímica do combustível em potência mecânica de eixo, e, assim, melhorar o desempenho e emissões do equipamento usando biocombustíveis. Entretanto, a infraestrutura e os sistemas de medição, para este tipo de teste, têm custo elevado de aquisição e manutenção. É necessário buscar apoio financeiro para construção de infraestrutura e aquisição de sistemas de medição. O início deste processo através da realização de ensaios de médio custo possibilita a criação de uma cultura de pesquisa voltada para obtenção de resultados, sempre operando com orçamento reduzido, e buscando produzir o máximo de informação a partir da infraestrutura disponível.

1.1. Avaliação da eficiência termelétrica de conversão de combustível

A eficiência de conversão termoeletrica de energia é a razão entre a energia total dissipada em uma bancada de cargas e a energia total consumida durante o teste associada ao consumo de combustível. A medição do consumo de combustível, que representa a entrada de energia, assim como a medição da energia dissipada na carga, que representa a saída de energia, devem ser realizadas sempre em conjunto com a determinação da incerteza de medição.

A medição da eficiência para diferentes condições de carga tem por objetivo fornecer informações para elaborar o diagrama de eficiência do equipamento em função da carga aplicada. É fundamental registrar a saída avaliada e o fator de potência da carga em cada experimento, uma vez que estas questões podem influenciar o rendimento do dispositivo.

2. METODOLOGIA

Nesta seção a metodologia usada para este projeto é descrita, com destaque para as etapas já concluídas, entretanto com a inclusão de algumas informações sobre as etapas em desenvolvimento. Algumas informações sobre a máquina termelétrica são apresentadas, em seguida é feita uma descrição do cálculo da eficiência de conversão de combustível. Por último, é descrito cada parte da bancada de testes e sistemas de medição.

2.1. Máquina Termelétrica

Foi adquirida uma máquina termelétrica a combustão interna cuja eficiência de conversão de combustível será mensurada neste projeto. Trata-se de um motogerador diesel da marca Toyama, modelo TDG8500SLE3DXP, com potência nominal de 7,0 kVA. Este motor estacionário tem como objetivo transformar a energia termoquímica disponível no combustível em potência elétrica através dos terminais de saída.

Este motogerador é composto por um motor de combustão interna acoplado a um gerador trifásico. O motor é do tipo monocilindro com 4 válvulas, operando um ciclo de ignição por compressão 4 tempos, utilizando óleo diesel comercial como combustível. A potência nominal do motor é de 11,0 HP (cerca de 8,2 kW), conforme manual do fabricante. Por sua vez, o gerador é trifásico com tensão nominal de 220 V, potência nominal de 7,0 kVA, operando em frequência nominal de 60 Hz.

A função deste motor estacionário é transformar a energia termoquímica disponível no combustível em potência elétrica disponível nas saídas do gerador. A potência elétrica fornecida pelo motogerador deve ser compatível com os equipamentos conectados às saídas de energia do gerador, em termos de tensão e frequência nominais. A potência demandada pelos equipamentos conectados à saída de energia do gerador não pode exceder a potência máxima disponível.

2.2. Eficiência de conversão de combustível

A eficiência de conversão termoeletrica de combustível η_{CT} deve ser calculada com base nos resultados experimentais obtidos para: massa de combustível consumida, tensão elétrica, corrente elétrica e tempo de duração da prova. O sistema para medição da massa de combustível está em desenvolvimento. O sistema de aquisição da corrente e tensão elétrica também está em desenvolvimento. As medições de consumo de combustível, corrente e tensão aplicadas sobre uma bancada de cargas, serão registradas em função da potência demandada pela bancada de cargas.

A eficiência η_{CT} será calculada com base na Eq. (1):

$$\eta_{CT} = \frac{\int I(t) \cdot V(t) \cdot dt}{m_f \cdot (PCI)} \quad (1)$$

Onde $I(t)$ é o valor instantâneo de corrente, $V(t)$ é o valor instantâneo de tensão elétrica, m_f é a massa de combustível consumida e (PCI) é o poder calorífico inferior do combustível.

2.3. Bancada de testes e sistemas de medição

A bancada de testes é composta por um cabo de força, um barramento de segurança, um sistema de dissipação de potência, um osciloscópio e um módulo de medição de massa. O barramento foi desenvolvido para suportar sistemas de energia elétrica monofásico, bifásico e trifásico, porém, na atualidade estamos trabalhando somente com o sistema monofásico.

Toda a estrutura da bancada está explícita de maneira didática no diagrama da Fig. 1.



Figura 1. Diagrama referente à ordem dos elementos da bancada (Imagem do autor)

2.3.1. Cabo de força

O cabo de força consiste em uma montagem com três filamentos de 2,5 mm de diâmetro e aproximadamente 5 metros de comprimento. Em uma das extremidades, um plugue para gerador com três pinos é conectado, que deve ser ligado à saída do gerador. Na outra extremidade, um plugue macho industrial com três pinos, para até 32 A e 220 V, para conexão direta à entrada do barramento.

2.3.2. Barramento

O barramento de segurança consiste em uma pequena estrutura de madeira no formato de um paralelepípedo retângulo, na qual de um lado são instaladas três tomadas para conexão com o cabo de força, permitindo um sistema monofásico, com uma tomada industrial com três entradas, que suporta até 32A e 220V; um sistema bifásico com a mesma tomada do sistema monofásico; e um sistema trifásico, com uma tomada industrial com cinco entradas, que suporta até 32A e 440V. O barramento deve ser reforçado na região onde as tomadas são alocadas, a fim de garantir estabilidade mecânica durante os testes e durante os instantes de conexão e retirada do cabo de força. Do outro lado do barramento são instalados cinco conectores elétricos fêmea de 4mm do tipo banana, para ligação com os módulos de cargas, sendo três contatos para as fases do gerador, um para o neutro e o outro para o aterramento; e um disjuntor de quatro polos que suporta até 80A e 400V. O disjuntor recebe as três fases e o neutro, e contém um mecanismo de desarme no caso em que exista fuga de corrente, o que garante segurança ao realizar os testes. O aterramento não passa pelo disjuntor, ele é conectado diretamente ao contato elétrico final do barramento.

2.3.3. Sistema de dissipação de potência

O sistema de dissipação de potência é composto por um conjunto de módulos de carga conectados eletricamente entre si e à saída do barramento. Cada módulo de carga consiste em uma resistência elétrica imersa em um recipiente de plástico contendo água. A resistência elétrica é fixada em três conectores fêmea 4 mm tipo banana localizados na tampa superior do módulo de carga. Cada recipiente contém dois litros de água, com capacidade para suportar a potência da maior parte

dos testes que serão aplicados. As resistências elétricas devem estar completamente submersas na coluna de líquido, para que não ocorra ruptura por superaquecimento.

A conexão entre os diferentes módulos de carga, formando conjuntos de resistências em série e em paralelo, deve ser usada para produzir diferentes condições de carregamento impostas ao motogerador. Após a elaboração de uma montagem dos módulos de carga, deve ser feita a conexão com a saída do barramento nos terminais fase, neutro e terra, protegidos pelo disjuntor.

2.3.4. Osciloscópio

Para registro da tensão, corrente, e consumo de combustível será usado um osciloscópio da marca Instrutherm, modelo OD-4100, conectado a um computador. A corrente será mensurada através de uma pinça amperimétrica para osciloscópio da marca Hantek, modelo CC-65, permitindo duas escalas: 10mV/A e 100mV/A. A tensão será mensurada por uma ponta de prova convencional. O osciloscópio é construído com aterramento comum para todos os canais, e a ponta de prova permite atenuação de tensão de 1x e 10x. A ponta de prova, a pinça amperimétrica e o módulo de medição de massa estão conectados diretamente ao osciloscópio.

2.3.5. Módulo de medição de massa

O sistema de medição de consumo de combustível consiste tanque de combustível de 12 litros apoiado em uma célula de carga através de uma alça. A célula de carga está conectada a um sistema eletrônico que possui saída para conexão direto para o osciloscópio. O tanque de combustível possui uma tubulação de saída de aproximadamente 6,3 milímetros de diâmetro interno, para fornecer combustível ao motor, e outra para retorno de combustível, com diâmetro interno de aproximadamente 4 milímetros.

2.4. Ensaio preliminar

Foi realizado um ensaio preliminar para verificar a operação em conjunto do motogerador, cabo de força, barramento e bancada de cargas, com a medição da tensão e da corrente através do osciloscópio. Para este ensaio preliminar, a bancada de cargas foi organizada com seis módulos de cargas resistivas em série, com uma resistência total de aproximadamente 30 ohms. O valor eficaz da tensão para esta prova é de aproximadamente 127 volts e o valor eficaz da corrente esperada para esta configuração é de aproximadamente 4 ampéres. Com isso, a potência aplicada a todos os módulos de cargas é de aproximadamente 500 watts. Considerando que foram utilizados 6 módulos de cargas, com aproximadamente 2 litros de água por módulo, o total de 12 litros de água foram utilizados para dissipação de potência.

O objetivo deste ensaio é determinar qual é a melhor duração do tempo de prova do ponto de vista da energia dissipada pela bancada de cargas, conforme o numerador da Eq. 1. $\int I(t).V(t).dt$. Para tanto, serão realizados ensaios com diferentes tempos de duração, e para cada ensaio serão registradas a tensão e a corrente através do osciloscópio. A partir das medições de tensão e de corrente em função do tempo, será calculada a energia total dissipada pela carga, conforme o numerador da Eq. 1. A potência média da prova será calculada dividindo a energia dissipada na carga pelo tempo total de operação do gerador, desde a partida até a parada completa.

Os resultados para corrente e tensão em função do tempo também são utilizados para calcular a potência de regime permanente de cada prova. A corrente efetiva e a tensão efetiva são calculadas com seus valores médios para operação em regime permanente. O produto entre corrente e tensão efetiva é a potência de regime permanente.

Espera-se que a comparação entre a potência média da prova e a potência de regime permanente para diferentes intervalos de duração da prova seja usada como embasamento para decisão de qual é o melhor tempo de duração de prova. Esta decisão implica na melhor duração de prova para o cálculo de energia total dissipada na carga, considerando que a potência média esteja com a melhor diferença possível em relação à potência de regime permanente.

3. RESULTADOS

Os resultados obtidos até o momento são a compra dos equipamentos que estão disponíveis, a montagem do barramento, a realização de testes operacionais para verificação da operação do gerador e os testes de registro da potência dissipada. A operação no momento atual está focada na saída monofásica do gerador, o que limita a potência máxima disponível a um terço da potência nominal. A bancada de cargas já foi utilizada para operar com valores de carregamento próximos a 20% (4 A), 30% (6 A), 50% (9 A) e até 70% (15 A) da carga nominal (aproximadamente 18 A). Desta forma, foi comprovado que a montagem disponível permite testar o motogerador em pelos menos 10 pontos de operação, desde cargas pequenas até a carga nominal.

Os testes de medição de potência dissipada foram feitos, até o momento, combinando as resistências elétricas para dissipar 500W e 800W em valor eficaz. Conseguimos tratar os dados através do software Excel e visualizamos o valor da tensão e da corrente em cada instante de tempo, tanto no regime transiente quanto no regime permanente.

Em relação aos resultados esperados, vale a pena citar os testes necessários para procedimento de registro da massa de combustível. Por fim, espera-se conseguir realizar a medição da eficiência de conversão de combustível.

3.1. RESULTADOS PRELIMINARES

A seguir estão alguns resultados preliminares de medição da potência aplicada à bancada de cargas. A Fig. 2 mostra um gráfico da tensão em função do tempo, de uma prova com o tempo de regime permanente de aproximadamente 10 segundos. Neste mesmo gráfico observa-se que o tempo de duração total da prova é de 25 segundos, entretanto, o regime permanente ocorre entre 7 e 17 segundos, aproximadamente

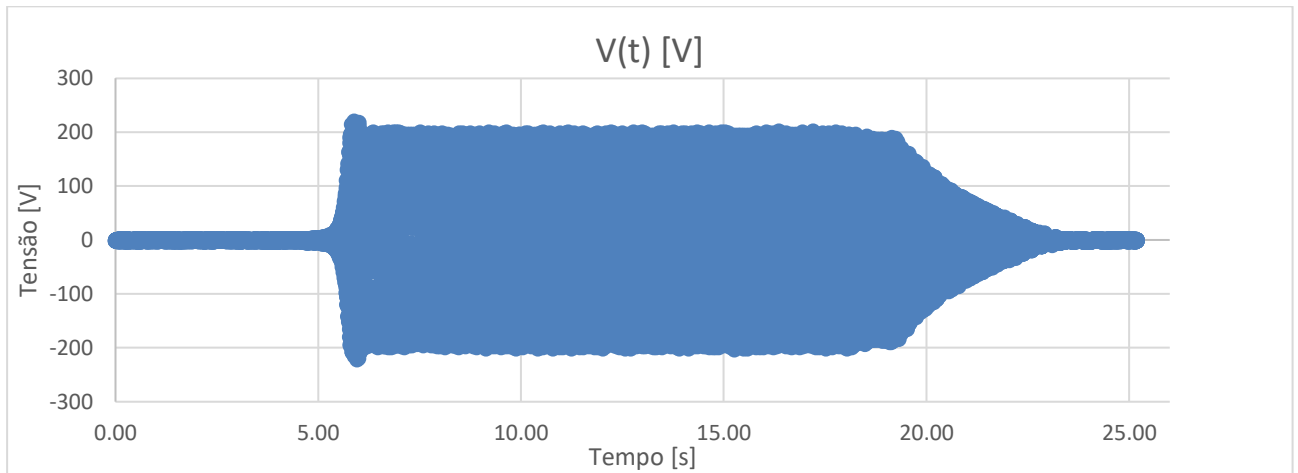


Figura 2. Gráfico da tensão em função do tempo da prova de 10 segundos (Imagem do autor)

A Fig. 3 mostra o gráfico da corrente em função do tempo, da mesma prova com o tempo de regime permanente de 10 segundos. O mesmo período de regime permanente entre 7 e 17 segundos é observado de forma similar à Fig 2.

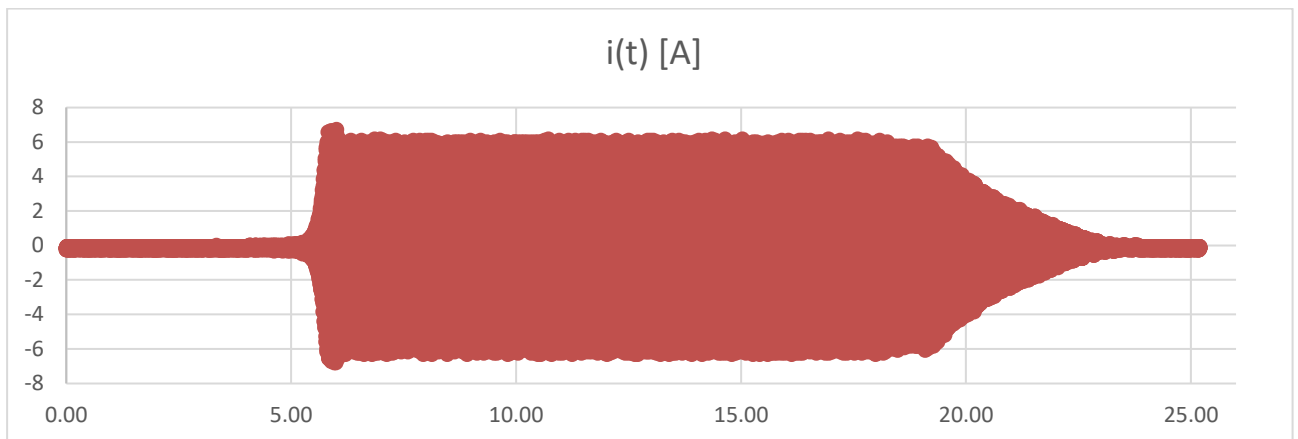


Figura 3. Gráfico da corrente em função do tempo da prova de 10 segundos (Imagem do autor)

Medições similares aos das figuras 2 e 3 foram realizadas para diferentes intervalos de tempo de regime permanente, desde 10 até 300 segundos. Os resultados obtidos em todos os testes para potência média de regime permanente e potência média total da prova são apresentados na Fig. 4.

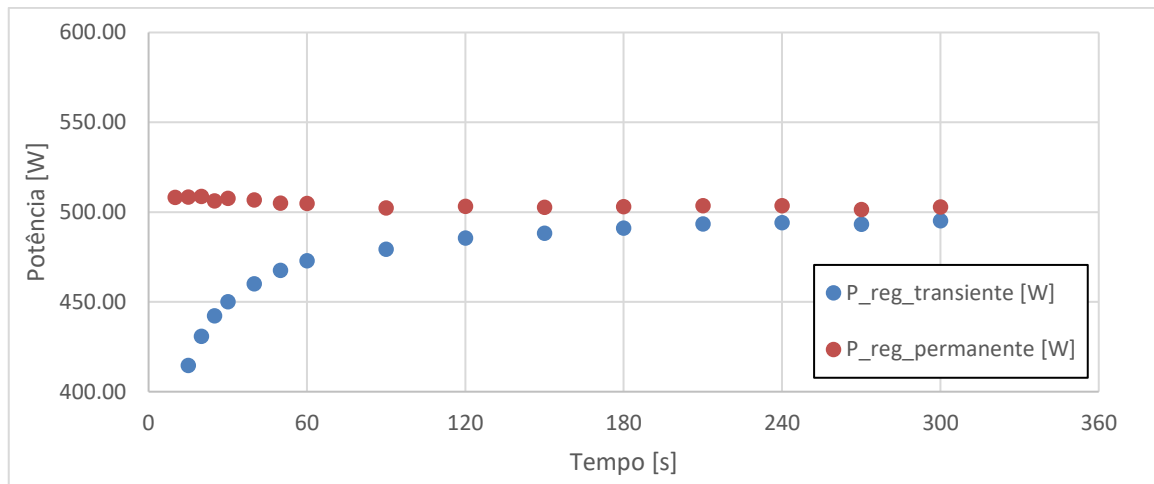


Figura 4. Gráfico da potência dissipada em função do tempo total de prova (Imagem do autor)

O tempo de operação do motogerador é dividido entre o tempo de regime transiente e o tempo de regime permanente. O tempo de regime transiente é quase constante e independente do tempo total de prova, já o tempo de regime permanente depende do tempo total de prova. A Fig. 4 mostra um gráfico da potência pelo tempo de prova. Pode-se observar que quanto maior é o tempo de prova, a potência total dissipada na prova contando com o regime transiente fica maior e mais perto da potência total dissipada na prova contando apenas com o regime permanente. Além disso, o gráfico da Fig. 4 mostra que a curva de potência considerando o regime transiente tem um comportamento assintótico.

4. CONCLUSÃO

O projeto se encontra em fase de desenvolvimento, desta forma seria precipitado elaborar conclusões acerca da medição da eficiência de conversão de combustível. Em relação às etapas já encerradas, é possível concluir que a construção de uma bancada experimental de baixo custo é possível, e que muitos componentes podem ser adquiridos e montados sem a necessidade de grandes investimentos. Entretanto, os sistemas de medição são um fator importante para o aumento do custo de aquisição do aparato experimental. Quanto menor o valor investido, maior a faixa de incerteza do resultado de medição.

O tempo de prova avaliado no ensaio preliminar teve seu melhor resultado obtido na prova de aproximadamente 300 segundos de regime permanente. O comportamento assintótico da potência média indica que quanto maior a duração de prova, mais próximo a potência média estará da potência de regime permanente. O tempo de duração de prova deve ser limitado por parâmetros como a diferença percentual entre a potência média e potência de regime permanente, e a limitação da bancada de cargas em dissipar potência aplicada.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa do qual este artigo é um produto.

REFERÊNCIAS

- HAMILTON, J.; NEVGEVITSKY, M.; WANG, X.; TAVAKOLI, A.; MUELLERSTOFFELS, M. Utilization and optimization of diesel generation for maximum renewable energy integration. In: Smart Energy Grid Design for Island Countries. [S.l.]: Elsevier, 2017.
- KRISHNA, S. M.; SALAM, P. A.; TONGROON, M.; CHOLLACOO, N. Performance and emission assessment of optimally blended biodiesel diesel ethanol in diesel engine generator. Applied Thermal Engineering, Elsevier, v. 155, 2019.
- MUSTAYEN, A.; RASUL, M.; WANG, X.; NEVGEVITSKY, M.; HAMILTON, J. Remote areas and islands power generation: A review on diesel engine performance and emission improvement techniques. Energy Conversion and Management, Elsevier, v. 260, 2022.
- NAYAK, C.; SAHOO, B. Comparative assessment of biogas and producer gas with diesel in a twin cylinder dual fuel diesel engine. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, Springer, v. 45, 2020.
- NAYAK, S. K.; HOANG, A. T.; NIZETIC, S.; NGUYEN, X. P.; LE, T. H. Effects of advanced injection timing and inducted gaseous fuel on performance, combustion and emission characteristics of a diesel engine operated in dual fuel mode. Fuel, Elsevier, v. 310, 2022.

- PERUMAL, V.; ILANKUMARAN, M. Experimental analysis of engine performance, combustion and emission using pongamia biodiesel as fuel in ci engine. *Energy*, Elsevier, v. 129, 2017.
- PRANTE, G. A. F.; SANTOS, N. D. S. A.; MARTINS, M. E. S. Feasibility of replacing diesel with ethanol blended with biodiesel and diethyl ether blends in a compression ignition engine. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, Springer, v. 60, 2023.
- SERAÇ, M. R.; AYDIN, S.; YILMAZ, A.; SEVIK, S. Evaluation of comparative combustion, performance, and emission of soybean based alternative biodiesel fuel blends in a ci engine. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 148, 2020.
- SHANMUGAM, R.; MURUGESAN, P.; GUYE, G. G.; DURAISAMY, B. Effect of additives on the stability of ethanol diesel blends for ic engine application. *Environmental Science and Pollution Research*, Springer, v. 28, 2021.