

Comparação técnica e análise do desempenho eletroenergético de grupos geradores com motores a diesel e convertidos para etanol sob diferentes condições de carga

Silvio Henrique Crispim Oliveira

Eng. Elétrica

PUC Goiás

Goiânia, Brasil

sh_crispim@hotmail.com

Wanderson Rainer

Escola Politécnica

PUC Goiás

Goiânia, Brasil

rainer@pucgoias.edu.br

Welliton Borges Araújo

Eng. Elétrica

PUC Goiás

Goiânia, Brasil

wellitonborgesp@gmail.com

Abstract—This work presents a technical-economic comparison and an electroenergetic performance analysis of generator sets equipped with diesel engines and engines converted to operate with ethanol under different load conditions. The study was based on field data collected from both units during three operating tests: load reduction, load removal, and successive load steps. Electrical variables, including frequency, phase voltages, phase currents, active power, reactive power, and apparent power, were acquired at a sampling rate of 2 Hz. In addition, the specific fuel consumption of each generator set was considered in the assessment of operational viability. The results showed that both systems were able to operate satisfactorily under the imposed conditions, maintaining electrical energy supply, stable phase voltages, and low voltage unbalance. However, the ethanol-powered unit exhibited greater dynamic variability, with more noticeable oscillations in frequency, current, and active power, especially during severe transient events. In contrast, the diesel generator showed greater robustness and better transient damping. Despite this difference, the converted ethanol generator demonstrated technical feasibility from the electroenergetic point of view, indicating potential for stationary power generation applications, particularly in contexts where the use of renewable fuel and environmental requirements are relevant decision factors.

Index Terms—power generators; diesel engine; ethanol engine; electrical performance; fuel consumption; distributed generation.

I. INTRODUÇÃO

Os grupos geradores desempenham papel fundamental em sistemas elétricos que demandam continuidade de fornecimento, confiabilidade operacional e autonomia energética, sendo amplamente empregados em aplicações de emergência, horários de ponta e atendimento a cargas isoladas ou críticas. Em instalações industriais, comerciais e de serviços essenciais, esses equipamentos são frequentemente utilizados como fonte alternativa ou complementar de energia, o que torna relevante a avaliação de seu desempenho não apenas do ponto de vista mecânico, mas também sob a perspectiva elétrica, energética e econômica.

Tradicionalmente, os grupos geradores com motores a diesel ocupam posição de destaque nesse cenário em razão de sua robustez, ampla disponibilidade comercial e reconhecida confiabilidade em operação contínua. Entretanto, a crescente preocupação com aspectos ambientais, metas corporativas de sustentabilidade e exigências associadas à redução de impactos ambientais tem incentivado a busca por alternativas energéticas mais alinhadas com práticas de menor agressão ao meio ambiente. Nesse contexto, o uso do etanol como combustível em motores de combustão interna surge como uma possibilidade de interesse técnico, especialmente no Brasil, onde esse combustível possui ampla inserção na matriz energética e consolidada aplicação no setor automotivo.

Apesar desse potencial, a substituição do diesel por etanol em grupos geradores não pode ser avaliada apenas sob a ótica ambiental. É necessário investigar de forma objetiva como essa mudança afeta o comportamento eletroenergético do sistema, considerando grandezas como tensão, corrente, frequência, potência ativa, fator de potência, energia gerada e resposta do conjunto motor-gerador sob diferentes condições de carga. Além disso, a comparação entre as duas tecnologias deve contemplar o consumo de combustível e os custos associados à energia produzida, uma vez que o etanol, embora apresente vantagens em determinadas estratégias ambientais, pode implicar comportamento distinto quanto ao consumo específico e ao custo por quilowatt-hora gerado.

Dessa forma, a análise comparativa entre um grupo gerador com motor a diesel e outro com motor convertido para operação com etanol mostra-se relevante tanto do ponto de vista acadêmico quanto prático. Do ponto de vista da engenharia elétrica, tal comparação permite investigar a qualidade da energia fornecida, a estabilidade de operação e a capacidade de atendimento às cargas em diferentes regimes de funcionamento. Do ponto de vista técnico-econômico, possibilita verificar em que medida o sistema convertido para etanol pode se tornar uma alternativa viável para empresas sujeitas a políticas ambientais mais rigorosas, certificações sustentáveis

ou estratégias institucionais voltadas à redução de impactos ambientais.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo realizar a comparação técnico-econômica e a análise do desempenho eletroenergético de grupos geradores com motores a diesel e convertidos para etanol, submetidos a diferentes condições de carga. Para isso, serão conduzidos ensaios experimentais com ambos os sistemas, contemplando operação em vazio, regime permanente sob distintos níveis de carregamento, resposta a degraus de carga, rejeição súbita de carga e operação contínua. A partir das medições elétricas e do consumo de combustível, pretende-se avaliar parâmetros de desempenho, consumo específico, estabilidade operacional e custo da energia gerada, produzindo subsídios técnicos para a análise da viabilidade do uso do etanol em aplicações de geração elétrica.

II. REVISÃO DA LITERATURA

Considerando a relevância do tema, uma vez que os grupos geradores podem contribuir positivamente tanto com o setor elétrico quanto na questão ambiental, foi realizada uma revisão da literatura disponível na comunidade científica, cujas observações são apresentadas nos parágrafos seguintes.

No estudo apresentado em [1], foi analisada a conversão de um motor diesel acoplado a gerador para operar exclusivamente com etanol, combinando ensaios experimentais, modelagem computacional no GT-Power e avaliação econômica sob diferentes cargas. Os autores validaram o modelo com dados experimentais, mostrando boa aderência entre simulação e medições, e verificaram que o uso do etanol provocou aumento do consumo de combustível, mas também redução expressiva das emissões de NOx em comparação ao diesel. Por outro lado, houve incremento de HC e CO, atribuído às limitações da adaptação do motor e da vaporização do etanol. Na análise econômica, o etanol comprado no mercado não se mostrou vantajoso, mas a alternativa passou a ser atrativa quando se considerou a produção local de etanol, especialmente em pequenas usinas.

Na dissertação apresentada em [2], foi investigado o desempenho de um sistema residencial de microgeração com motor Stirling operando com diesel e etanol. O trabalho adotou uma metodologia bastante completa, incluindo balanço energético, medição de material particulado, hidrocarbonetos não queimados e diversas espécies gasosas por FTIR, além de estudos paramétricos envolvendo temperatura do fluido de arrefecimento e temperatura dos gases de escape. Os resultados mostraram que, quando alimentado com etanol, o sistema apresentou eficiência térmica ligeiramente maior, eficiência de potência ligeiramente menor e reduções consideráveis nas emissões em regime permanente, indicando o potencial do etanol como combustível alternativo em sistemas de geração distribuída de pequena escala.

O artigo apresentado em [3] descreve a conversão de um motor diesel turboalimentado Perkins 1104C-44TAG2 para operar exclusivamente com etanol hidratado, por meio da redução da taxa de compressão, substituição do sistema de injeção diesel por injeção eletrônica e adoção de ignição por centelha.

Os ensaios foram realizados a 1800 rpm, com variação do avanço de ignição, comparando o motor original e o convertido quanto à potência, consumo, custo e emissões. Os autores observaram que o motor convertido atingiu cerca de 45 kW, com consumo dependente do avanço de ignição, e verificaram redução de até 34% no custo da energia gerada com etanol nas condições econômicas consideradas. Em relação às emissões, foram reportadas faixas de NOx entre 50 e 1050 ppm, CO entre 1 e 3%, CO_2 entre 12 e 15% e HC entre 150 e 450 ppm, mostrando a viabilidade técnico-econômica da conversão em cenários favoráveis ao etanol.

No trabalho apresentado em [4], foi avaliado um grupo motogerador com motor de ignição por compressão adaptado para operar com injeção direta separada de diesel e etanol úmido, usando cargas entre 15 e 37,5 kW e substituição mássica de diesel por etanol entre 52% e 59%, com teor de água de 7% a 30% na mistura alcoólica. O estudo mostrou que as misturas contendo etanol úmido proporcionaram reduções significativas de NOx e da opacidade da fumaça em todas as condições testadas, além de um ganho de aproximadamente 5% na eficiência de conversão do combustível em cargas mais elevadas. Também foi observado que o atraso de ignição variou mais com a carga do que com o teor de água, e que maiores teores de água elevaram a pressão no cilindro em cargas altas, indicando potencial dessa estratégia para reduzir emissões sem comprometer o desempenho do motor.

No estudo apresentado em [5], foi investigado um gerador diesel operando em modo bicomcombustível, com diesel na injeção principal e etanol vaporizado via carburador na admissão. Os autores variaram o diâmetro do giclê principal do carburador de 0,8 a 1,0 mm, mantendo rotação constante de 3000 rpm e diferentes níveis de carga. Os resultados mostraram que o aumento da participação do etanol levou à queda do desempenho, porém a configuração com giclê de 0,8 mm apresentou o melhor compromisso técnico, permitindo economia de diesel de até 47% com redução de apenas 2% na eficiência térmica de freio. Além disso, houve redução de NO e da fumaça preta em até 12%, embora CO_2 e CO tenham aumentado levemente.

No artigo apresentado em [6], foi estudado o uso de diesel comercial misturado com aditivos oxigenados, incluindo etanol, n-butanol, acetato de etila e éster etílico de palma, em ensaios de desempenho, emissões e desgaste ao longo de 700 horas. A metodologia envolveu testes de desempenho e emissões por 200 horas e avaliação de desgaste mecânico por 500 horas em cinco motores-geradores equivalentes, cada um alimentado com uma mistura distinta. Os autores concluíram que as misturas com etanol e n-butanol apresentaram melhor desempenho e menores emissões do que o diesel puro e as demais formulações, enquanto as misturas com etanol e acetato de etila produziram maior desgaste mecânico. Mesmo assim, o desgaste permaneceu dentro dos limites aceitáveis do fabricante, embora a pressão de injeção tenha sofrido redução de 9% em relação ao valor de referência.

O trabalho apresentado em [7] avaliou os efeitos da adição de 0, 5, 10 e 15% de etanol ao biodiesel de óleo de palma em um motor diesel CRDI operando em marcha lenta a 750

rpm, sob cargas de 30, 40 e 50 Nm. O objetivo foi verificar como o etanol altera a combustão e as emissões de um combustível renovável em uma condição operacional crítica, de baixa temperatura e combustão incompleta. Os resultados indicaram que o etanol elevou os picos de pressão no cilindro e de taxa de liberação de calor, mas também aumentou o BSFC e reduziu a eficiência térmica. Em termos ambientais, o ganho mais importante foi a forte queda da opacidade da fumaça, que chegou a 71% de redução com 15% de etanol, embora o aumento do teor alcoólico também tenha favorecido o crescimento de HC e NOx.

No estudo apresentado em [8], foram realizados ensaios detalhados com misturas etanol-diesel contendo 3, 5 e 10% de etanol em volume em um motor diesel common-rail de quatro cilindros, operando em baixa rotação de marcha lenta (750 rpm) e carga de 40 Nm. Os resultados mostraram que a adição de etanol elevou a pressão máxima de combustão em até 4,1% e a taxa máxima de liberação de calor em 13,5%, mas também aumentou o BSFC em até 5,9%, mantendo a BTE em torno de 23,8%. Do ponto de vista das emissões, a mistura com etanol reduziu NOx, diminuiu a opacidade da fumaça de 5,3% para 3%, aumentou o CO em 27,4% na maior proporção testada e reduziu o tamanho médio das partículas de fuligem em 26,7%, evidenciando benefícios importantes na redução de material particulado, ainda que com penalização no consumo específico.

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os grupos geradores acionados por motores de combustão interna constituem uma das principais soluções para suprimento de energia elétrica em aplicações de emergência, operação contínua, atendimento a cargas isoladas e geração distribuída. Entre as tecnologias mais consolidadas, destacam-se os motores a diesel, amplamente empregados em função de sua robustez mecânica, confiabilidade operacional e capacidade de operação em regime severo. Entretanto, a crescente busca por alternativas energéticas renováveis tem incentivado o desenvolvimento de soluções baseadas em combustíveis de origem renovável, como o etanol, especialmente em aplicações nas quais a sustentabilidade e a redução da dependência de derivados fósseis se tornam fatores estratégicos.

A. Motores de combustão interna aplicados à geração de energia

Motores de combustão interna convertem a energia química do combustível em energia mecânica no eixo, a qual é posteriormente transformada em energia elétrica pelo gerador síncrono ou alternador acoplado. No contexto da geração elétrica, o desempenho global do sistema depende não apenas das características do alternador, mas também do comportamento termodinâmico do motor, do sistema de alimentação, da estratégia de controle e do combustível empregado. Assim, a comparação entre grupos geradores a diesel e a etanol exige compreender como o ciclo termodinâmico, o modo de formação da mistura e o método de ignição influenciam

parâmetros como consumo específico, resposta dinâmica, estabilidade de rotação e emissões.

B. Ciclo Diesel

O motor diesel opera segundo o princípio da ignição por compressão. Nesse tipo de motor, apenas o ar é admitido inicialmente no cilindro e sofre forte compressão, provocando elevação significativa de temperatura. Em seguida, o combustível é injetado diretamente na câmara de combustão em condições nas quais a temperatura do ar comprimido é suficiente para promover sua autoignição. Dessa forma, a combustão ocorre sem a necessidade de velas de ignição. No caso do motor **Volvo TAE 1345GE** em sua configuração original, trata-se de um sistema baseado nesse princípio, com injeção direta e arquitetura elétrica de fábrica em 24 V.

A Fig. 1 ilustra o diagrama pressão-volume ($p - v$) idealizado do ciclo diesel, utilizado para representar o funcionamento termodinâmico de motores de ignição por compressão.

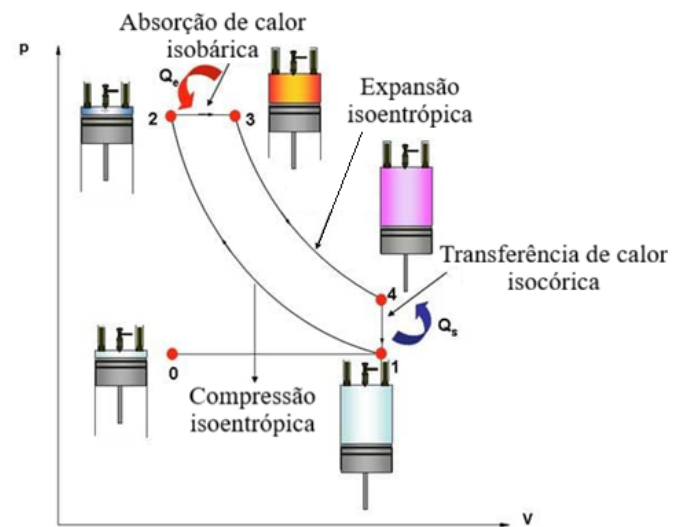


Fig. 1. Diagrama $p - v$ ideal do ciclo diesel, destacando as etapas de compressão isentrópica, adição de calor isobárica, expansão isentrópica e rejeição de calor isocórica.

Nesse ciclo, o ar admitido no cilindro é inicialmente submetido à compressão isentrópica, elevando sua pressão e temperatura. Em seguida, ocorre a adição de calor a pressão aproximadamente constante, etapa que representa a combustão do combustível injetado no interior da câmara. Após a combustão, os gases se expandem realizando trabalho sobre o pistão em uma expansão isentrópica, convertendo energia térmica em energia mecânica. Por fim, ocorre a rejeição de calor em volume constante, fechando o ciclo termodinâmico ideal. A figura também relaciona cada transformação com a posição do pistão ao longo do processo, o que facilita a compreensão do comportamento do fluido de trabalho no interior do cilindro.

Do ponto de vista operacional, o motor diesel apresenta como características relevantes o elevado torque em baixas rotações, a boa eficiência térmica e a ampla utilização em

grupos geradores estacionários. Em contrapartida, a literatura destaca que sistemas diesel de geração costumam estar associados a emissões significativas de óxidos de nitrogênio e material particulado, o que motiva o interesse por combustíveis alternativos.

C. Ciclo Otto e operação com etanol

Diferentemente do motor diesel, o motor operando no ciclo Otto trabalha com mistura ar-combustível previamente formada e ignição por centelha. Nesse caso, a combustão não é iniciada pela autoignição decorrente da compressão, mas por uma descarga elétrica produzida por vela de ignição no interior da câmara. Na conversão do motor **Volvo TAE 1345GE** para etanol, o ciclo de operação passa de Diesel para Otto, exigindo a instalação de velas e de todo o sistema de ignição correspondente. Também ocorre a mudança do sistema de alimentação: a injeção deixa de ser direta na câmara e passa a ser indireta, com a mistura sendo preparada no sistema de admissão.

A Fig. 2 apresenta o diagrama pressão-volume ($p - v$) ideal do ciclo Otto, que representa o funcionamento termodinâmico de motores de ignição por centelha, como ocorre na configuração convertida para etanol.

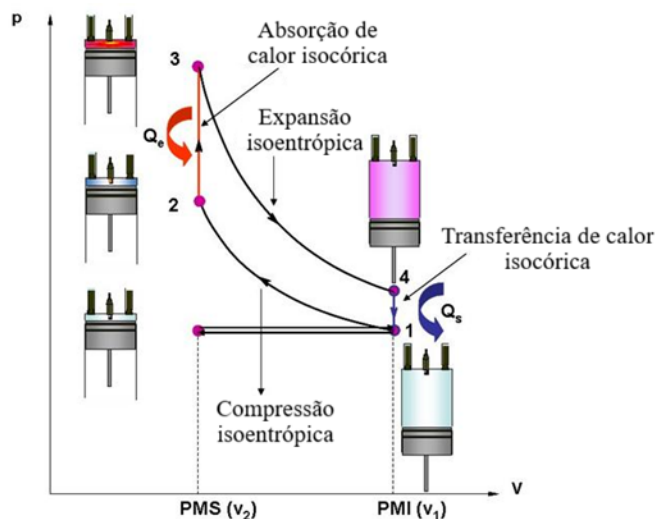


Fig. 2. Diagrama $p - v$ ideal do ciclo Otto, destacando as etapas de compressão isentrópica, adição de calor isocórica, expansão isentrópica e rejeição de calor isocórica.

Nesse ciclo, a mistura ar-combustível é inicialmente submetida a uma compressão isentrópica, elevando sua pressão e temperatura no interior do cilindro. Em seguida, ocorre a adição de calor a volume constante, correspondente à combustão iniciada pela centelha da vela de ignição próxima ao ponto morto superior. Após a combustão, os gases em alta pressão promovem a expansão isentrópica, realizando trabalho útil sobre o pistão. Por fim, ocorre a rejeição de calor em volume constante, completando o ciclo termodinâmico ideal. A figura também associa cada transformação ao deslocamento do pistão entre o ponto morto inferior (PMI) e o ponto morto

superior (PMS), facilitando a interpretação física das etapas do processo.

No funcionamento com etanol, o controle da mistura ar-combustível assume papel central, pois a estabilidade da combustão passa a depender diretamente da homogeneidade da mistura admitida e da precisão da ignição. Além disso, o etanol apresenta comportamento distinto em relação ao diesel quanto ao consumo específico. A literatura consultada indica que motores operando com etanol tendem a demandar maior consumo de combustível para a mesma potência útil, sendo citado valor em torno de 55% superior em comparação à operação com diesel, ainda que isso possa variar conforme o projeto do motor e as condições de operação.

D. Conversão do motor diesel para operação com etanol: modificações mecânicas

A conversão de um motor originalmente projetado para ignição por compressão em um sistema operando com etanol exige modificações estruturais importantes. Em termos gerais, a literatura aponta que essa mudança implica substituição da injeção de diesel por um sistema compatível com etanol, além da incorporação de velas e mecanismos adequados de ignição, justamente porque o ciclo de operação deixa de ser Diesel e passa a ser Otto.

No caso específico do projeto em estudo, uma das alterações mecânicas mais relevantes foi a fabricação de um novo coletor de admissão. Essa modificação decorre da necessidade de garantir adequada homogeneização da mistura ar-combustível no motor a etanol, uma vez que a mistura passa a ser formada no próprio coletor. Para evitar interferência entre cilindros e assegurar distribuição mais uniforme do combustível, foi adotada uma configuração com dutos individuais para cada um dos seis cilindros. Também foi redesenhada a flange de fixação do corpo de borboleta, na qual foi instalado o sensor TMAP.

Outra modificação importante consistiu na instalação da flauta de combustível sobre o coletor de admissão. A peça recebeu anodização para ampliar sua resistência ao contato com o etanol, o que evidencia que a adaptação não se restringe à lógica de funcionamento do motor, mas também à compatibilidade físico-química dos componentes com o novo combustível. Adicionalmente, os furos da flauta foram dimensionados de forma simétrica, com utilização de roscas padrão 3/8" NPT, de modo a favorecer distribuição uniforme do combustível aos injetores.

Também foram incorporados componentes ligados ao sistema de sobrealimentação e monitoramento térmico, como a solenoide de controle da wastegate e o sensor de temperatura instalado próximo à carcaça do turbocompressor. Essas alterações contribuem para o controle da carga do turbocompressor e para o acompanhamento mais preciso das condições térmicas do conjunto motriz.

A Fig. 3 apresenta o novo coletor de admissão desenvolvido para a operação do motor com etanol, evidenciando a adoção de dutos individuais, a flauta de combustível e a flange para fixação do corpo de borboleta. Essa modificação foi necessária

porque, no sistema convertido, a mistura ar-combustível passa a ser formada no coletor de admissão, diferentemente do motor diesel original, em que a injeção ocorre diretamente na câmara de combustão. Assim, o novo coletor foi projetado para promover melhor homogeneização da mistura e distribuição mais uniforme do combustível entre os cilindros, contribuindo para maior estabilidade de funcionamento do motor em ciclo Otto

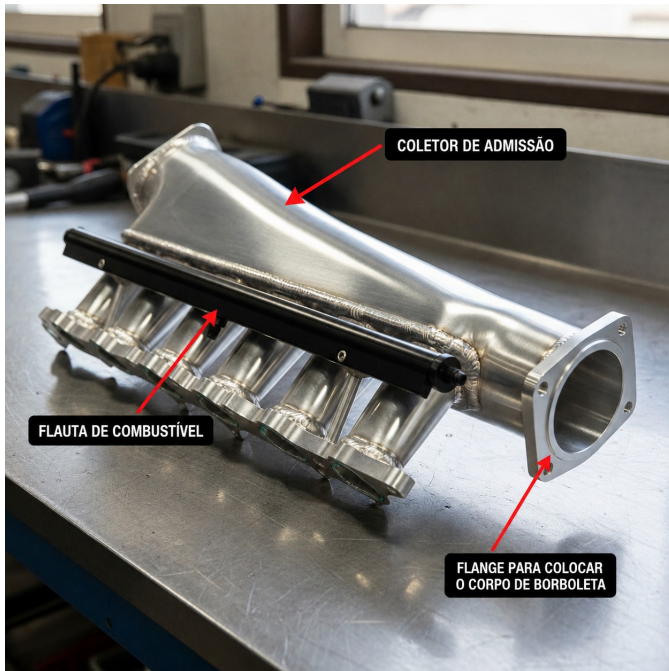


Fig. 3. Novo coletor de admissão com dutos individuais.

A Fig. 4 mostra o corpo de borboleta Bosch 0280750473 empregado no motor convertido, componente essencial para o controle da massa de ar admitida. No motor diesel original, a potência é regulada predominantemente pela quantidade de combustível injetado; já no motor operando em ciclo Otto, torna-se necessário controlar diretamente o fluxo de ar para a formação adequada da mistura estequiométrica. Nesse contexto, o corpo de borboleta passa a desempenhar função central no gerenciamento da admissão, sendo acionado eletronicamente pela ECU em modo *drive-by-wire*, o que permite maior precisão no ajuste dinâmico do motor convertido para etanol.

A Fig. 5 apresenta o esquema de instalação da sonda lambda e do sensor de pressão de combustível, dois elementos fundamentais para o monitoramento e controle do motor convertido para etanol.

A sonda lambda é responsável por medir a concentração de oxigênio nos gases de escape, permitindo que a ECU ajuste em tempo real o tempo de injeção e mantenha a combustão em malha fechada dentro da faixa desejada. Já o sensor de pressão de combustível deve ser instalado próximo à flauta, garantindo leitura precisa da pressão na linha de alimentação e contribuindo para o correto funcionamento dos injetores.

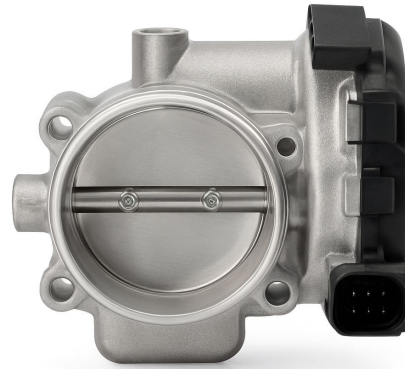


Fig. 4. Foto do corpo de borboleta Bosch 0280750473.

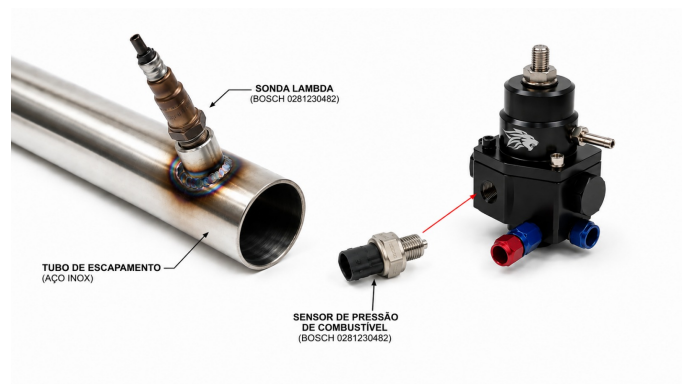


Fig. 5. Esquema de instalação da sonda lambda e do sensor de pressão de combustível.

Em conjunto, esses dispositivos ampliam a confiabilidade, a segurança e a precisão do sistema de gerenciamento eletrônico do motor convertido.

E. Modificações elétricas, eletrônicas e de instrumentação

Além das adaptações mecânicas, a conversão para etanol exigiu uma profunda reconfiguração do sistema elétrico e eletrônico do motor. Enquanto a motorização original Volvo opera com arquitetura de 24 V para acionamento do sistema de partida, sensores e atuadores, o sistema de gerenciamento eletrônico adotado para a operação em ciclo Otto trabalha integralmente em 12 V, devido aos requisitos técnicos da plataforma FuelTech FT450/FT550, cuja tensão máxima admissível é inferior ao padrão original do motor. Por essa razão, todo o sistema de gerenciamento do motor convertido passou a operar em 12 V, com alimentação dedicada e nova padronização dos componentes.

Essa mudança de arquitetura elétrica impossibilitou o reaproveitamento integral dos atuadores eletromecânicos originais. Componentes como o corpo de borboleta e a solenoide de controle de pressão do turbo precisaram ser substituídos por equivalentes compatíveis com a nova eletrônica. O controlador

DEIF AGC 150, embora seja capaz de operar em ampla faixa de tensão, foi integrado à rede de 12 V para manter a uniformidade do sistema. Em contrapartida, alguns sensores originais puderam ser preservados, como os sensores de rotação, fase, TMAP, temperatura do motor e pressão de cárter, desde que compatíveis com o novo gerenciamento eletrônico.

No ciclo Otto, o corpo de borboleta assume função essencial, pois o controle de potência deixa de ocorrer prioritariamente pela dosagem de combustível, como no diesel, e passa a depender do controle da massa de ar admitida. No projeto em questão, foi adotado o corpo de borboleta Bosch 0280750473, controlado eletronicamente em modo drive-by-wire pela ECU, possibilitando o ajuste preciso da admissão de ar para a formação da mistura estequiométrica.

Outro elemento fundamental é a sonda lambda, indispensável para o controle em malha fechada da combustão no motor a etanol. Por meio do monitoramento da concentração de oxigênio nos gases de escape, esse sensor permite que a ECU ajuste em tempo real o tempo de injeção e mantenha a mistura dentro da faixa desejada de operação. No sistema adotado, a sonda lambda Bosch LSU 4.2 opera associada ao módulo FuelTech NanoPRO, responsável pelo condicionamento do sinal e comunicação com a FT550 via rede CAN. Essa instrumentação é particularmente importante tanto para o desempenho quanto para a redução de emissões e segurança operacional do motor convertido.

Também fazem parte da instrumentação adicional o sensor de pressão de combustível, instalado próximo à flauta para maior precisão na leitura, e sensores específicos associados à segurança e ao monitoramento da mistura, como sensor flex fuel e sensor de pressão de cárter. Em conjunto, esses elementos permitem que o motor convertido opere com estabilidade compatível com aplicações de geração de energia.

A Fig. 6 ilustra de forma esquemática a reconfiguração da arquitetura elétrica do motor durante o processo de conversão, destacando a transição do sistema original em 24 V para uma nova arquitetura em 12 V.

Essa mudança foi necessária em razão da adoção de uma central eletrônica de gerenciamento compatível com a plataforma FuelTech, utilizada para o controle do motor operando em ciclo Otto. A figura também evidencia que a conversão não se limita à substituição de componentes isolados, mas envolve uma reorganização completa do sistema elétrico, incluindo alimentação, atuadores e sensores, de modo a assegurar compatibilidade eletrônica, confiabilidade operacional e precisão no controle da combustão com etanol.

F. Aspectos comerciais da utilização do etanol em grupos geradores

Do ponto de vista comercial, a utilização do etanol em grupos geradores apresenta maior atratividade em contextos específicos. Um dos cenários mais promissores é o setor sucroenergético, no qual o combustível pode ser obtido a partir da própria atividade produtiva da unidade industrial. Nessa condição, o etanol deixa de ser apenas um produto comercializável e passa a ser um insumo energético interno, possi-

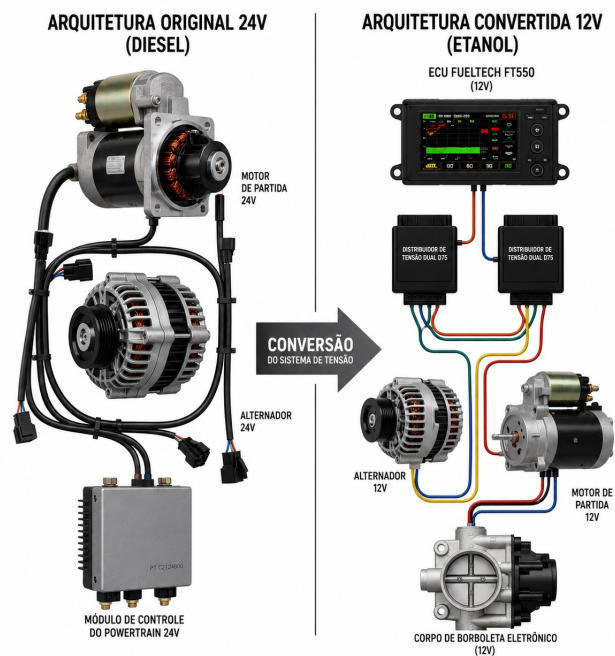


Fig. 6. Diagrama simplificado da arquitetura elétrica original 24 V versus arquitetura convertida 12 V.

bilitando geração distribuída, operação híbrida com caldeiras a biomassa e até comercialização de excedentes de energia elétrica. Os documentos anexados destacam que essa estratégia pode agregar valor à produção e tornar a geração elétrica mais vantajosa do que a venda direta do combustível.

Outro campo de aplicação importante refere-se a eventos e operações de curta duração. Nessas situações, embora o etanol apresente consumo específico superior ao diesel, o impacto econômico associado ao combustível tende a ser menos crítico, uma vez que o tempo de operação é limitado. Nesses casos, o principal diferencial competitivo do grupo gerador a etanol reside no apelo sustentável e na possibilidade de associar a operação energética a uma imagem corporativa ambientalmente responsável. Os materiais anexados destacam que essa característica pode favorecer parcerias, patrocínios e valorização institucional.

Há ainda forte potencial de uso em sistemas de emergência ou standby. Nessas aplicações, o equipamento permanece longos períodos sem operar e entra em funcionamento apenas em situações eventuais. Por isso, o maior consumo específico do etanol torna-se menos relevante no custo total de operação. Em contrapartida, o etanol apresenta vantagens de armazenamento, com menor propensão à formação de resíduos que possam comprometer bicos injetores e sistemas de alimentação, problema que pode ocorrer com o diesel comercial em longos períodos de estocagem. Isso reforça a viabilidade técnica do etanol em aplicações nas quais a confiabilidade de partida é mais importante que o custo por hora de operação contínua.

A literatura também mostra que a viabilidade econômica da conversão depende fortemente do custo do combustível. Em

estudo já citado na revisão, verificou-se que o etanol adquirido nas condições usuais de mercado não se mostrou competitivo frente ao diesel, mas passou a se tornar economicamente atrativo quando considerada a produção local em pequenas usinas, especialmente para cana-de-açúcar.

G. Aspectos ambientais

Sob a ótica ambiental, o etanol apresenta vantagens relevantes por ser um combustível renovável, o que permite associar sua utilização a estratégias de redução de impactos ambientais e fortalecimento de políticas corporativas de sustentabilidade. Os materiais anexados destacam explicitamente que o uso do etanol em grupos geradores pode contribuir para a obtenção do chamado “selo verde”, fator valorizado em empreendimentos comerciais, industriais e institucionais.

A literatura já incorporada ao trabalho também aponta benefícios ambientais da conversão. No estudo de Roso et al., os resultados indicaram menor emissão de NO_x ao longo da faixa de operação com etanol, embora tenham sido observados aumentos de HC e CO, associados ao modo de formação da mistura e à vaporização do combustível. Além disso, os autores destacam que a substituição parcial ou total do diesel por etanol tende a favorecer a redução de material particulado, sobretudo em cargas mais elevadas.

Portanto, a análise ambiental do uso do etanol em grupos geradores deve ser tratada de forma equilibrada: embora não elimine todos os impactos da combustão interna, essa solução pode reduzir emissões específicas de poluentes relevantes e, ao mesmo tempo, inserir a geração elétrica em um contexto de transição para combustíveis renováveis. Tal característica é especialmente importante quando associada a exigências ambientais mais rígidas, metas de descarbonização e diferenciação mercadológica por sustentabilidade.

A Tab. I sintetiza os principais parâmetros de comparação entre o motor original a diesel e o motor convertido para etanol, reunindo, de forma resumida, os aspectos termodinâmicos, construtivos, elétricos, operacionais, econômicos e ambientais discutidos ao longo da fundamentação teórica.

Observa-se que a conversão implica mudança do ciclo Diesel para o ciclo Otto, substituição da injeção direta por injeção indireta no coletor, alteração da arquitetura elétrica de 24 V para 12 V e aumento do consumo específico. Em contrapartida, a tabela também evidencia vantagens potenciais do sistema convertido, como redução do custo energético em cenários favoráveis, maior atratividade no setor sucroenergético, benefícios em aplicações de emergência e menor emissão de poluentes, o que justifica o interesse técnico e econômico na adoção de grupos geradores movidos a etanol.

IV. METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseou-se na comparação experimental entre dois grupos geradores de mesma aplicação, sendo um equipado com motor a diesel e outro com motor convertido para operação com etanol. A análise foi conduzida a partir de dados coletados em campo

durante diferentes condições de carregamento, com o objetivo de avaliar o comportamento eletroenergético dos sistemas diante de variações de carga.

A Fig. 7 apresenta a fotografia do grupo gerador utilizado como base para a conversão do motor para operação com etanol, permitindo visualizar o conjunto físico empregado no desenvolvimento experimental do trabalho.



Fig. 7. Fotografia do gerador utilizado para conversão a etanol.

A. Ensaios realizados

Foram considerados três tipos de ensaio, executados tanto para o grupo gerador a diesel quanto para o grupo gerador a etanol:

- **Ensaio 1 – redução de carga:** variação da potência ativa de aproximadamente 200 kW para 50 kW;
- **Ensaio 2 – remoção de carga:** variação da potência ativa de 50 kW para 0 kW;
- **Ensaio 3 – degraus de carga:** sequência de carregamento 150 kW → 200 kW → 250 kW → 200 kW.

Esses ensaios foram escolhidos por representarem situações típicas de operação transitória de grupos geradores, permitindo analisar a resposta do sistema frente a reduções bruscas de carga, retirada total de carga e aplicação sucessiva de degraus de potência.

B. Aquisição de dados

Os sinais elétricos foram adquiridos com taxa de amostragem de 2 Hz, ou seja, dois pontos por segundo. Para cada ensaio, foram registradas as seguintes grandezas elétricas:

- frequência;
- corrente nas fases A, B e C;
- tensão nas fases A, B e C;
- potência ativa;
- potência reativa;
- potência aparente.

TABLE I
TABELA COMPARATIVA: DESEMPENHO E VIABILIDADE (DIESEL VS. ETANOL)

Parâmetro de Comparação	Motor Original (Diesel)	Motor Convertido (Etanol)
Ciclo Termodinâmico	Ciclo Diesel: ignição por compressão e autoignição.	Ciclo Otto: ignição por centelha (velas e bobinas).
Alimentação de Ar	Entrada de ar livre sem borboleta de controle de potência.	Drive-By-Wire com controle da massa de ar via corpo de borboleta.
Sistema de Injeção	Injeção direta na câmara de combustão.	Injeção indireta no coletor de admissão com dutos individuais.
Arquitetura Elétrica	Sistema original em 24 V para sensores e atuadores.	Sistema adaptado para 12 V compatível com FuelTech FT450/FT550.
Consumo Específico	Menor consumo em massa (referência base).	Consumo aproximadamente 55% superior para mesma potência útil.
Custo da Energia (\$/kWh)	Dependente da volatilidade do mercado de combustíveis fósseis.	Redução de até 34% no custo energético em cenários favoráveis.
Setor Sucroenergético	Combustível externo adquirido comercialmente.	Produção interna com elevada atratividade econômica.
Sistemas de Emergência	Maior risco de formação de resíduos durante longos períodos de estocagem.	Menor propensão à formação de resíduos no armazenamento.
Eventos/Curta Duração	Ênfase em robustez e disponibilidade operacional.	Ênfase em sustentabilidade e valorização institucional.
Emissões de Poluentes	Elevadas emissões de NOx e material particulado (fuligem).	Redução expressiva de NOx e eliminação de material particulado.

Além das grandezas elétricas, também foi considerado o **consumo específico de combustível**, expresso em L/kWh, para cada grupo gerador, possibilitando posterior análise técnico-econômica.

Os dados de cada ensaio foram armazenados em arquivos no formato .csv e posteriormente importados para o ambiente computacional *Scilab*, no qual foi realizado o processamento numérico e a geração dos gráficos comparativos.

C. Tratamento e organização dos dados

Após a importação dos arquivos, os dados foram separados conforme o tipo de ensaio e o combustível utilizado. Para garantir a comparação entre eventos equivalentes, foram selecionados os trechos de interesse correspondentes a cada manobra de carga, preservando-se as regiões pré-transitória, transitória e pós-transitória.

A análise foi conduzida inicialmente para o **Ensaio 1**, envolvendo a redução de carga de 200 kW para 50 kW, sendo posteriormente replicada com a mesma metodologia para os Ensaio 2 e 3.

D. Análises realizadas

A comparação entre os grupos geradores foi estruturada em diferentes níveis de análise, contemplando frequência, potência, tensões, correntes e equilíbrio entre fases.

1) *Análise da frequência*: A frequência foi analisada ao longo do tempo para verificar a estabilidade operacional de cada grupo gerador durante os transitórios de carga. Para cada ensaio, foram observados os perfis temporais da frequência e identificados os valores mínimos e máximos registrados no intervalo avaliado, permitindo verificar desvios transitórios e a capacidade de recuperação do sistema.

2) *Análise da potência ativa*: A potência ativa foi utilizada como variável principal para caracterizar o comportamento do ensaio, uma vez que a mudança de carga define diretamente a condição operacional do grupo gerador. Foram construídos gráficos comparativos de potência ativa em função da amostra para os geradores a diesel e a etanol, permitindo observar:

- o nível de potência antes da mudança de carga;
- a resposta durante o transitório;
- o valor de estabilização após a mudança;
- a existência de oscilações ou acomodação gradual da potência.

3) *Análise das tensões por fase*: As tensões de fase A, B e C foram analisadas individualmente para verificar a estabilidade do sistema elétrico e identificar possíveis assimetrias entre fases. Para cada ensaio, foram gerados gráficos das tensões trifásicas para os dois combustíveis, possibilitando comparar o comportamento de cada gerador em termos de regulação de tensão durante os eventos de carga.

4) *Análise das correntes por fase*: De forma análoga às tensões, as correntes nas fases A, B e C foram avaliadas individualmente. Essa análise permitiu observar a redistribuição de corrente após as mudanças de carga e verificar se a resposta entre fases ocorreu de maneira equilibrada ou com presença de assimetrias relevantes.

5) *Análise do desequilíbrio de tensão*: Com o objetivo de avaliar a simetria trifásica dos geradores, foi calculado o desequilíbrio percentual de tensão ponto a ponto ao longo de cada ensaio. Inicialmente, para cada instante t_i , foi calculada a tensão média trifásica:

$$V_{medio}(t_i) = \frac{V_a(t_i) + V_b(t_i) + V_c(t_i)}{3} \quad (1)$$

Em seguida, foram determinados os desvios absolutos de cada fase em relação à média:

$$d_a(t_i) = |V_a(t_i) - V_{medio}(t_i)| \quad (2)$$

$$d_b(t_i) = |V_b(t_i) - V_{medio}(t_i)| \quad (3)$$

$$d_c(t_i) = |V_c(t_i) - V_{medio}(t_i)| \quad (4)$$

O desequilíbrio percentual de tensão foi então definido como:

$$D_v(t_i) = \frac{\max[d_a(t_i), d_b(t_i), d_c(t_i)]}{V_{medio}(t_i)} \cdot 100 \quad (5)$$

Esse procedimento gera uma curva temporal de desequilíbrio, permitindo avaliar tanto o comportamento em regime permanente quanto o aumento temporário de assimetria durante os transitórios. A mesma abordagem pode ser estendida à análise do desequilíbrio de corrente, substituindo-se as tensões pelas correntes de fase.

E. Implementação computacional

O processamento dos dados foi realizado no software *Scilab*. Os arquivos *.csv* correspondentes a cada ensaio foram lidos por meio de rotinas de importação, e as grandezas de interesse foram convertidas para formato numérico. Em seguida, foram implementados algoritmos para:

- extração das variáveis elétricas de cada arquivo;
- seleção dos intervalos correspondentes aos ensaios;
- cálculo de valores extremos de frequência;
- geração de gráficos comparativos de potência ativa, frequência, tensão e corrente;
- cálculo do desequilíbrio percentual de tensão.

Os gráficos foram construídos de forma comparativa, sempre sobrepondo os resultados dos grupos geradores a diesel e a etanol para um mesmo tipo de ensaio, o que permitiu identificar visualmente diferenças de desempenho dinâmico e estabilidade elétrica.

F. Apresentação dos resultados

Para cada ensaio, os resultados foram organizados por meio de figuras e análises comparativas. No caso do Ensaio 1, foram gerados:

- gráfico da potência ativa em função da amostra;
- gráfico da frequência em função da amostra;
- gráficos das tensões trifásicas;
- gráficos das correntes trifásicas;
- gráfico do desequilíbrio percentual de tensão.

A mesma estrutura de análise será aplicada aos Ensaios 2 e 3, de modo a permitir comparação padronizada entre os dois grupos geradores em diferentes condições de variação de carga.

G. Critério de comparação entre os geradores

A comparação entre os grupos geradores foi baseada nos seguintes aspectos:

- estabilidade da frequência durante e após o transitório;
- comportamento da potência ativa frente às mudanças de carga;
- regulação das tensões por fase;
- distribuição das correntes por fase;
- nível de desequilíbrio de tensão;
- consumo específico de combustível.

Com base nesses critérios, torna-se possível comparar o desempenho eletroenergético do grupo gerador a diesel e do grupo gerador convertido para etanol, avaliando tanto a resposta dinâmica às variações de carga quanto os aspectos de simetria trifásica e eficiência operacional.

V. RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados obtidos da coleta realizada em campo em abril de 2026. A unidade geradora diesel teve os dados coletados no pátio da empresa BRG Geradores, em Anápolis-GO, conforme ilustra a Fig. 8, enquanto a unidade geradora etanol teve seus dados coletados na usina Jalles Machado, no município de Goianésia-GO. Todos os ensaios foram conduzidos utilizando taxa de amostragem de 2 Hz.

A. Ensaio 1 - Redução de Carga

Neste ensaio, ambas as unidades geradoras foram submetidas a um degrau negativo de carga, tendo sua potência ativa reduzida de 200 kW para 50 kW.

A Fig. 9 referente ao Ensaio 1 mostra que, antes da transição de carga, ambos os grupos geradores operam com frequência próxima do valor nominal de 60 Hz, indicando regime permanente estável. Na amostra 172, instante em que ocorre a redução de potência de 250 kW para 50 kW, observa-se a resposta transitória dos sistemas, sendo mais acentuada no gerador a diesel, que apresenta uma elevação momentânea da frequência, atingindo aproximadamente 60,6 Hz.

Esse comportamento é compatível com a retirada brusca de carga, que provoca redução instantânea do torque resistente e tendência de aceleração do conjunto motriz até a atuação do sistema de controle. Já o gerador a etanol apresenta variação significativamente menor, permanecendo mais próximo da frequência nominal durante o transitório. Após a mudança de carga, ambos os sistemas retornam à faixa de estabilização em torno de 60 Hz, porém o gerador a diesel ainda exibe uma oscilação negativa posterior, com queda para aproximadamente 59,6 Hz, enquanto o sistema a etanol apresenta resposta mais suave e menor amplitude de desvio. De modo geral, esse resultado sugere que, para a condição ensaiada, o gerador a etanol apresentou maior suavidade na resposta dinâmica de frequência, ao passo que o grupo diesel apresentou transitórios mais intensos durante a mudança brusca de carga.

Os gráficos da Fig. 10, referentes aos resultados de tensão gerada pelas unidades, indicam que ambos os grupos geradores mantiveram operação próxima de seus níveis nominais ao



Fig. 8. Fotografia da etapa de coleta de dados na unidade geradora diesel.

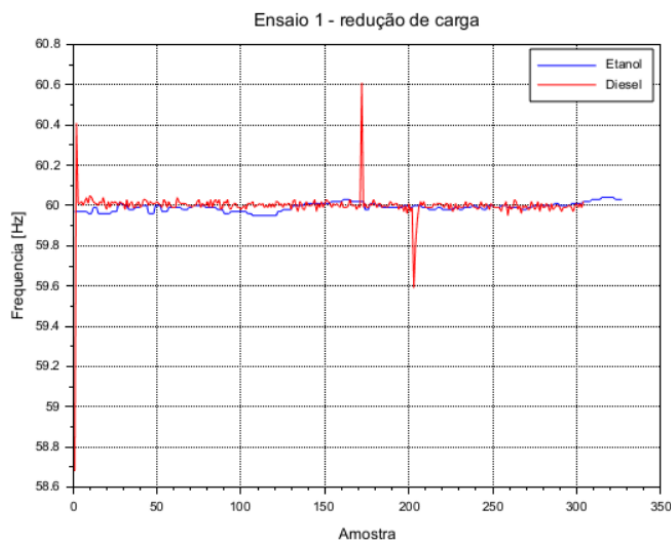


Fig. 9. Comportamento da frequência para o Ensaio 1.

longo do ensaio, porém o sistema a etanol apresentou maior variação entre amostras e maior sensibilidade durante o transitório de redução de carga.

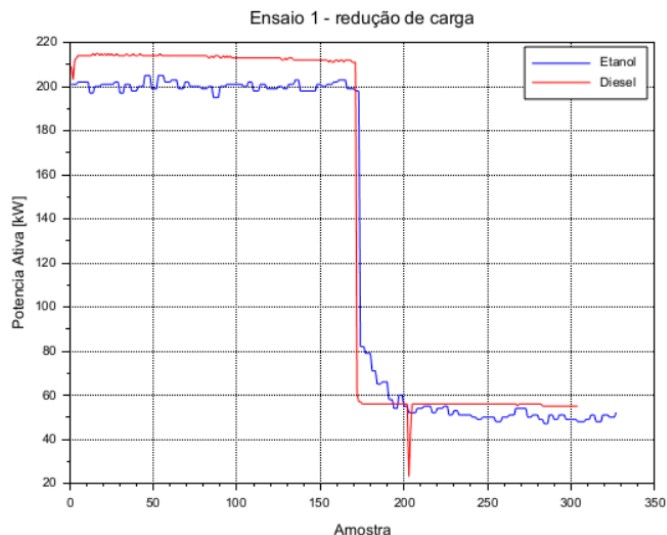


Fig. 10. Comportamento da potência ativa para o Ensaio 1.

Já o gerador a diesel exibiu comportamento mais estável, com menores oscilações e retorno mais rápido ao regime de acomodação. Uma possível explicação para a maior variabilidade observada no gerador a etanol está associada ao fato de esse sistema possuir regulação eletrônica da injeção de combustível, o que torna a resposta do motor mais dependente dos ajustes dinâmicos do controle de mistura e combustão. Assim, pequenas correções no processo de injeção podem se refletir em flutuações mais perceptíveis na tensão terminal do gerador, especialmente durante mudanças bruscas de carga.

As tensões trifásicas permaneceram estáveis ao longo do ensaio para ambos os grupos geradores, sem indícios de desequilíbrio expressivo entre as fases, conforme ilustrado na Fig. 11.

Observa-se que o gerador a etanol operou em um patamar de tensão superior ao do gerador a diesel, porém com pequenas oscilações ao longo do tempo, especialmente após a transição de carga. Já o gerador a diesel apresentou comportamento mais uniforme, com um transitório curto e bem definido no instante da redução de carga, seguido de rápida acomodação. De modo geral, os resultados indicam que ambos os sistemas mantiveram regulação satisfatória de tensão, embora o grupo a etanol tenha apresentado maior variabilidade durante a operação.

As correntes trifásicas acompanharam de forma coerente a redução de carga no Ensaio 1, apresentando queda acentuada no instante do transitório para ambos os grupos geradores. Esse comportamento é apresentado na Fig. 12.

Antes da mudança de carga, o gerador a diesel operou com correntes mais elevadas que o gerador a etanol, o que é compatível com o maior nível de potência observado nesse intervalo. Após a transição, ambos os sistemas passaram a

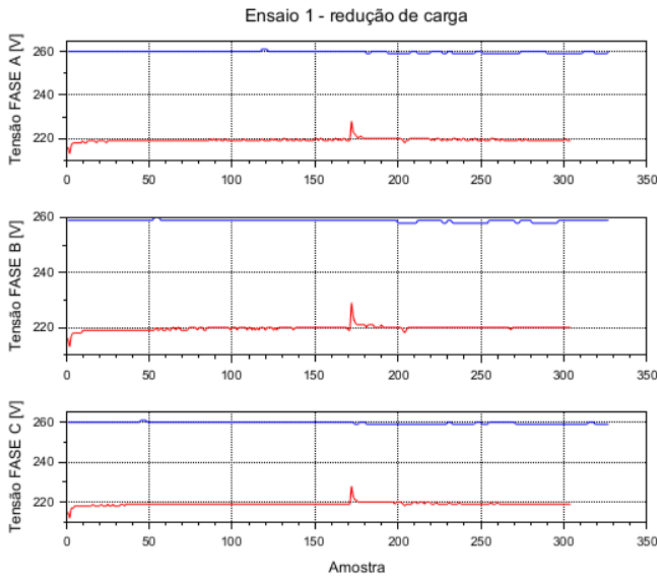


Fig. 11. Comportamento das tensões trifásicas para o Ensaio 1.

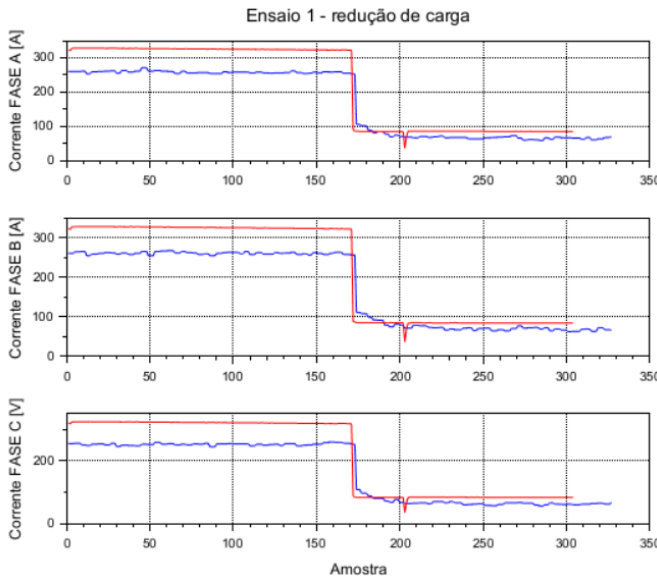


Fig. 12. Comportamento das correntes trifásicas para o Ensaio 1.

operar em patamares reduzidos de corrente, com comportamento relativamente equilibrado entre as três fases. Observa-se, contudo, que o grupo diesel apresentou um transitório mais brusco, incluindo uma oscilação mais pronunciada por volta da amostra 200, enquanto o gerador a etanol exibiu acomodação mais suave, embora com pequenas flutuações após a estabilização. De forma geral, os resultados indicam boa coerência entre corrente e potência nos dois sistemas, com resposta trifásica semelhante e sem evidências de desequilíbrio severo entre fases.

Os resultados do desvio de tensão indicam que ambos os grupos geradores operaram com baixo nível de desequilíbrio entre fases no Ensaio 1, uma vez que os valores permaneceram

abaixo de aproximadamente 0,5% para o etanol e 0,3% para o diesel, conforme indicado na Fig. 13.

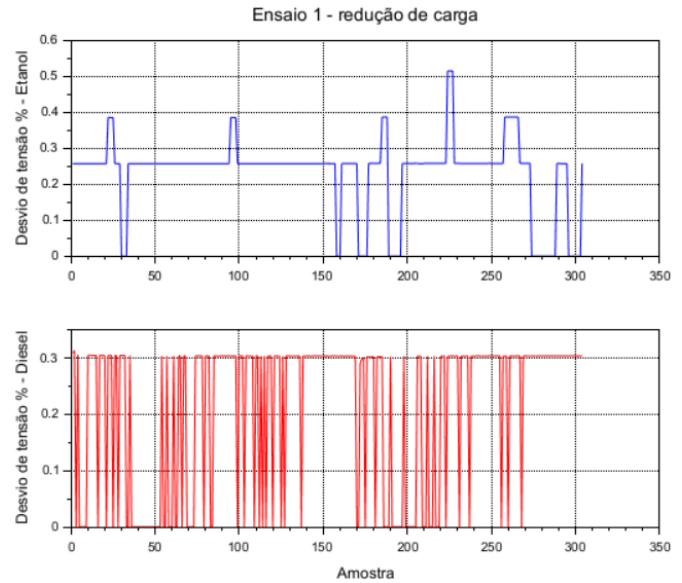


Fig. 13. Comportamento dos desvios de tensão das unidades geradoras para o Ensaio 1.

No gerador a etanol, observa-se um comportamento mais contínuo, com patamar próximo de 0,25% e alguns picos localizados ao longo do ensaio, sugerindo pequenas variações temporárias na simetria trifásica. Já no gerador a diesel, o desvio calculado alterna com frequência entre valores próximos de 0 e 0,3%, o que pode estar associado à maior repetitividade das leituras entre fases, possivelmente influenciada pela resolução do sistema de medição. De modo geral, os resultados mostram que, apesar das diferenças de comportamento entre as curvas, não houve desequilíbrio expressivo de tensão em nenhum dos sistemas, indicando operação trifásica satisfatória mesmo durante a redução brusca de carga.

B. Ensaio 2 - Remoção de Carga

Neste ensaio, ambas as unidades geradoras foram submetidas a um *deload*, de forma que a potência gerada fosse reduzida bruscamente até que o gerador permanecesse a vazio.

Para este ensaio, observa-se que ambos os grupos geradores operavam inicialmente com frequência próxima do valor nominal de 60 Hz. Após o *deload*, o comportamento do gerador a etanol tornou-se mais sensível, apresentando uma elevação acentuada da frequência, com pico próximo de 61,9 Hz, seguida de redução gradual até a faixa nominal. Esse resultado, apresentado na Fig. 14, indica que, na transição para operação a vazio, o conjunto a etanol sofreu uma sobrevelocidade mais pronunciada, evidenciando maior dificuldade de amortecimento imediato do transitório.

Em contrapartida, o gerador a diesel manteve a frequência muito mais próxima de 60 Hz durante praticamente todo o ensaio, com pequenas oscilações e menor desvio máximo, embora se observe uma queda pontual anterior ao *deload*.

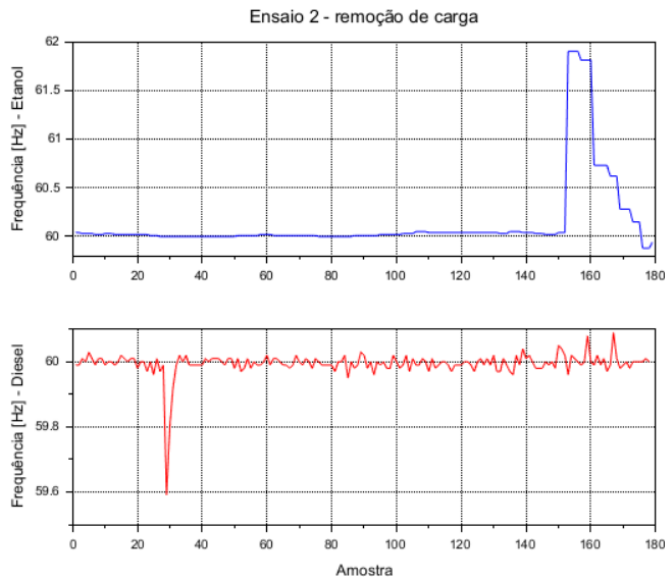


Fig. 14. Comportamento da frequência para o Ensaio 2.

De forma geral, os resultados sugerem que, na condição de retirada total de carga, o grupo diesel apresentou maior robustez dinâmica na regulação de frequência, enquanto o grupo a etanol exibiu resposta transitória mais intensa.

Os resultados de potência ativa no Ensaio 2 evidenciam o processo de retirada total de carga até a operação a vazio nos dois grupos geradores. No sistema a diesel, observa-se um comportamento em degraus mais bem definido, com redução progressiva da potência até atingir 0 kW, embora haja uma queda abrupta pontual em uma amostra anterior ao *deload*, conforme ilustra a Fig. 15.

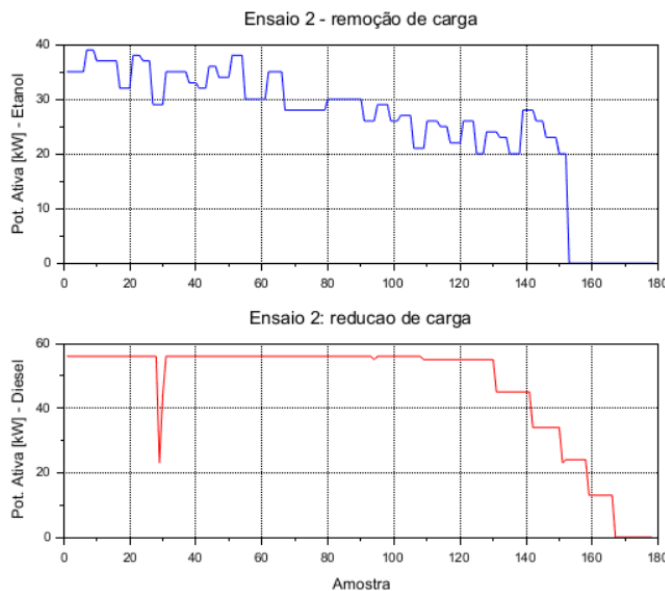


Fig. 15. Comportamento da potência ativa para o Ensaio 2.

Já o gerador a etanol apresenta maior flutuação ao longo

do ensaio, com oscilações mais perceptíveis antes da retirada final de carga, indicando menor uniformidade na sustentação do patamar de potência. Em ambos os casos, a transição para 0 kW ocorre de forma brusca no trecho final do ensaio, caracterizando a entrada em operação a vazio. De modo geral, o grupo diesel apresentou resposta mais regular durante a redução de potência, enquanto o gerador a etanol exibiu maior variabilidade ao longo do processo de descarregamento.

As tensões trifásicas no Ensaio 2 permaneceram globalmente estáveis para ambos os grupos geradores, mesmo durante a transição para operação a vazio, conforme apresenta a Fig. 16.

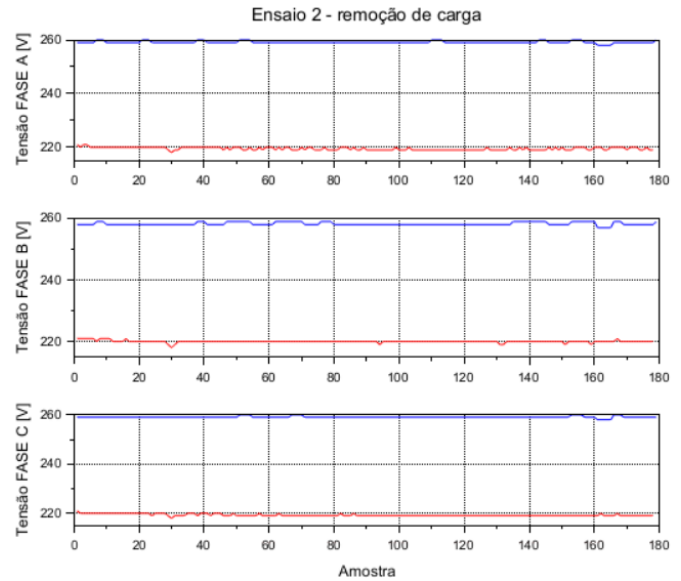


Fig. 16. Comportamento das tensões trifásicas para o Ensaio 2.

O gerador a etanol manteve patamares de tensão superiores aos do gerador a diesel em todas as fases, porém com pequenas oscilações discretas ao longo do ensaio, mais perceptíveis no trecho final após a remoção de carga. Já o gerador a diesel apresentou tensões mais uniformes e com menor variação temporal, mantendo comportamento bastante regular nas três fases. De modo geral, os resultados indicam que a retirada total de carga não provocou perturbações relevantes de tensão, e que ambos os sistemas preservaram boa estabilidade trifásica, embora o grupo a etanol tenha mostrado maior variabilidade de amplitude.

As correntes trifásicas no Ensaio 2, apresentadas na Fig. 17, acompanharam a retirada progressiva de carga até a condição de vazio, apresentando redução consistente em todas as fases para ambos os grupos geradores. No sistema a diesel, observa-se comportamento mais regular e em patamares bem definidos, coerente com a redução escalonada da potência ativa, embora exista uma queda transitória mais acentuada em torno da amostra 30.

Já o gerador a etanol apresentou correntes menores ao longo de praticamente todo o ensaio e maior variabilidade entre amostras, com pequenas oscilações persistentes antes da

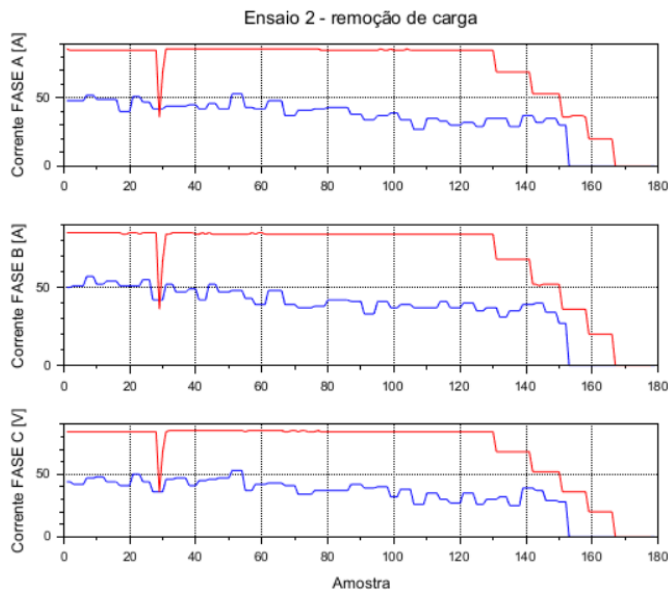


Fig. 17. Comportamento das correntes trifásicas para o Ensaio 2.

remoção total da carga. No trecho final, ambos convergem para correntes próximas de zero, como esperado para operação a vazio. De forma geral, os resultados mostram resposta trifásica coerente com o *deload*, com maior uniformidade no grupo diesel e maior flutuação no grupo a etanol.

No Ensaio 2, os desvios de tensão permaneceram baixos para ambos os grupos geradores, assim como observado no Ensaio 1, o que indica manutenção de boa simetria trifásica mesmo durante a remoção total de carga. No gerador a etanol, o desvio manteve-se em torno de 0,25% a 0,40%, com alguns trechos pontuais de redução para valores próximos de zero e picos isolados, caracterizando comportamento semelhante ao do Ensaio 1, porém com variação um pouco mais concentrada em determinados intervalos do *deload*, conforme indica a Fig. 18.

Já no gerador a diesel, o desvio voltou a alternar frequentemente entre valores próximos de 0 e 0,3%, repetindo o padrão já observado no primeiro ensaio, o que sugere forte influência da resolução das leituras ou da pequena diferença instantânea entre fases. Em comparação com o Ensaio 1, não se observa agravamento relevante do desequilíbrio de tensão no Ensaio 2; ao contrário, os resultados mostram que, mesmo na transição para operação a vazio, ambos os sistemas preservaram baixo desequilíbrio entre fases, com o grupo a etanol apresentando curva mais contínua e o grupo diesel comportamento mais intermitente.

C. Ensaio 3 - Degraus de Carga

Neste ensaio, ambas as unidades geradoras foram submetidas a degraus de carga de forma a possibilitar a avaliação do comportamento de algumas grandezas elétricas. Inicialmente, as unidades foram submetidas a uma geração de 150 *kW*, de forma que a potência foi elevada para 200 *kW*, depois para 250 *kW* e, por fim, retornando a 200 *kW*.

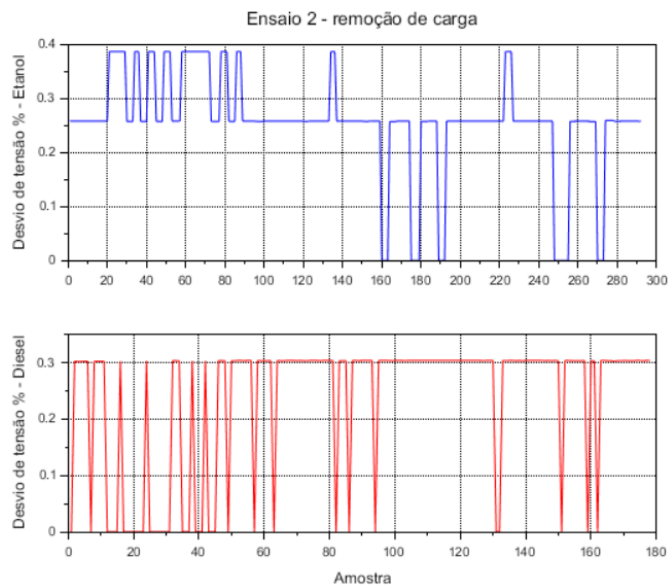


Fig. 18. Comportamento dos desvios de tensão das unidades geradoras para o Ensaio 2.

Os resultados de frequência no Ensaio 3 indicam comportamentos distintos entre os dois grupos geradores durante a aplicação dos degraus de carga de 150 *kW* para 200 *kW*, em seguida para 250 *kW* e, por fim, retorno para 200 *kW*. O gerador a diesel apresentou frequência bastante estável ao longo de praticamente todo o ensaio, mantendo-se muito próxima do valor nominal de 60 *Hz*, com apenas pequenas oscilações pontuais e picos transitórios de curta duração, conforme ilustra a Fig. 19.



Fig. 19. Comportamento da frequência para o Ensaio 3.

Em contraste, o gerador a etanol exibiu maior variação da frequência ao longo do tempo, com flutuações mais perceptíveis em torno de 60 *Hz* durante toda a sequência de

carregamento. Ainda assim, observa-se que essas variações permaneceram relativamente pequenas, sem afastamentos expressivos do valor nominal. De modo geral, os resultados mostram que ambos os sistemas mantiveram operação em faixa adequada de frequência, porém o grupo diesel apresentou resposta mais rígida e estável, enquanto o gerador a etanol revelou maior sensibilidade dinâmica às mudanças sucessivas de carga.

Os resultados de potência ativa no Ensaio 3 mostram que ambos os grupos geradores acompanharam a sequência de degraus de carga proposta, passando dos patamares iniciais próximos de 150 kW para cerca de 200 kW , depois para aproximadamente 250 kW e, por fim, retornando à faixa de 200 kW . Esses resultados são apresentados na Fig. 20.

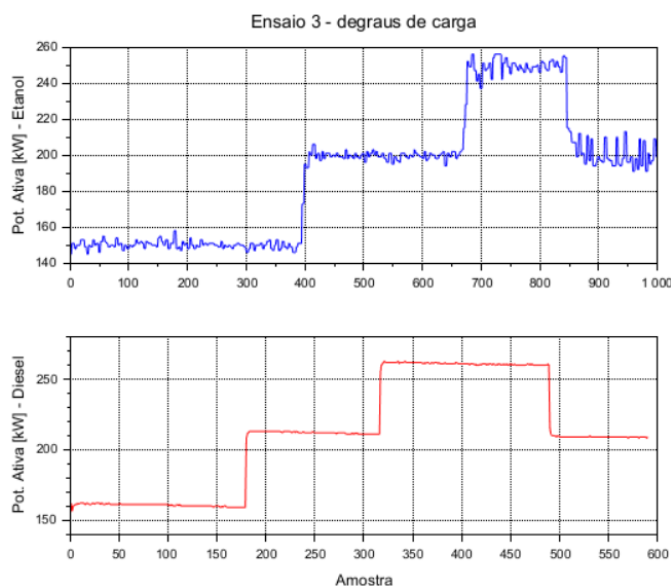


Fig. 20. Comportamento da potência ativa para o Ensaio 3.

O gerador a diesel apresentou resposta mais regular e com patamares bem definidos, evidenciando maior estabilidade durante toda a sequência de carregamento. Já o gerador a etanol também acompanhou corretamente as mudanças de carga, porém com maior dispersão entre amostras e oscilações mais perceptíveis em torno de cada novo nível de potência, especialmente nos patamares mais elevados e após o retorno para 200 kW . De modo geral, os resultados indicam que ambos os sistemas foram capazes de seguir os degraus de potência impostos, mas o grupo diesel apresentou comportamento mais estável, enquanto o gerador a etanol revelou maior variabilidade dinâmica ao longo do ensaio.

As tensões trifásicas no Ensaio 3 permaneceram globalmente estáveis para ambos os grupos geradores ao longo da aplicação dos degraus de carga, sem evidências de desequilíbrio significativo entre as fases, conforme indicado na Fig. 21. O gerador a etanol operou em patamar de tensão superior ao do gerador a diesel, mantendo pequenas oscilações ao longo do ensaio, porém sem perturbações abruptas associadas às mudanças de carga. Já o grupo diesel apresentou tensões

mais uniformes e com baixa dispersão temporal, indicando boa regulação elétrica durante toda a sequência de carregamento.

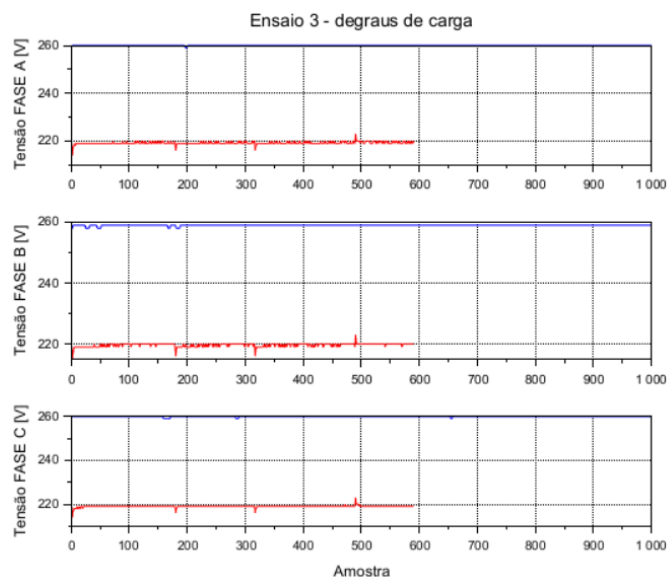


Fig. 21. Comportamento das tensões trifásicas para o Ensaio 3.

Cabe destacar que a quantidade de pontos coletados foi diferente para cada unidade geradora, de modo que, neste ensaio, o conjunto a etanol possui aproximadamente 1000 amostras, enquanto o sistema a diesel apresenta cerca de 600. Essa diferença decorre do procedimento de aquisição em campo e não compromete a análise qualitativa comparativa, desde que se considere que os gráficos possuem janelas temporais distintas para cada unidade.

As correntes trifásicas no Ensaio 3 acompanharam de forma consistente a sequência de degraus de carga aplicada aos grupos geradores, com elevação dos níveis de corrente a cada aumento de potência e redução após o retorno ao patamar final de 200 kW . No gerador a diesel, observa-se resposta mais regular e em patamares bem definidos, coerente com o comportamento da potência ativa, com aumentos nítidos de corrente nas transições, seguidos de redução no último degrau. Esse comportamento é ilustrado na Fig. 22.

Já o gerador a etanol também apresentou variação coerente com os degraus de carga, porém com maior dispersão entre amostras e maior oscilação em torno dos novos níveis de corrente, especialmente nos patamares mais elevados e após o retorno para 200 kW . Em ambas as unidades, as três fases mantiveram comportamento semelhante, sem indícios de desequilíbrio severo entre correntes, embora o conjunto diesel tenha demonstrado maior uniformidade e estabilidade ao longo de todo o ensaio.

Os resultados do desvio de tensão no Ensaio 3 indicam que ambos os grupos geradores mantiveram baixo desequilíbrio entre fases ao longo da aplicação dos degraus de carga. No gerador a etanol, observa-se uma curva mais contínua, com valor predominante próximo de 0,25% e alguns picos isolados

VI. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos permitiram comparar o comportamento eletroenergético dos grupos geradores com motor a diesel e com motor convertido para etanol sob diferentes condições de variação de carga. De modo geral, verificou-se que ambos os sistemas foram capazes de operar nas condições impostas, mantendo fornecimento de energia elétrica e comportamento trifásico satisfatório. Entretanto, observou-se diferença clara entre os grupos quanto à estabilidade dinâmica, especialmente nas variáveis frequência, potência ativa e corrente.

No **Ensaio 1**, correspondente à redução brusca de carga, ambos os grupos geradores apresentaram resposta compatível com a mudança de potência imposta. Em termos de frequência, o gerador a diesel apresentou transitórios mais intensos, com sobre-elevação e posterior queda momentânea, enquanto o grupo a etanol apresentou resposta mais suave e menor amplitude de desvio. Na análise da potência ativa, observou-se que ambos os sistemas acompanharam a redução de carga, porém o gerador a etanol exibiu maior oscilação e acomodação mais gradual após o transitório. As tensões trifásicas permaneceram estáveis em ambos os casos, sem evidência de desequilíbrio expressivo entre fases, embora o grupo a etanol tenha apresentado maior variabilidade entre amostras. As correntes acompanharam a redução de potência de forma coerente, com resposta trifásica compatível com o evento. Já os desvios de tensão permaneceram baixos em ambos os sistemas, indicando boa simetria trifásica mesmo durante a mudança brusca de carga.

No **Ensaio 2**, referente à remoção de carga até operação a vazio, verificou-se comportamento distinto entre os grupos principalmente na frequência. O gerador a etanol apresentou sobre-elevação mais acentuada após a retirada da carga, revelando maior sensibilidade dinâmica na transição para vazio. Em contrapartida, o grupo diesel manteve a frequência muito mais próxima do valor nominal, com menores desvios máximos. Em relação à potência ativa, ambos os sistemas convergiram para 0 kW, caracterizando corretamente a condição de vazio, porém o grupo a etanol apresentou maior variabilidade ao longo do processo de descarregamento. As tensões continuaram estáveis e com baixo desequilíbrio entre fases, enquanto as correntes acompanharam a retirada de carga até valores próximos de zero. A análise dos desvios de tensão confirmou novamente baixos níveis de assimetria trifásica, sem agravamento relevante em relação ao Ensaio 1.

No **Ensaio 3**, no qual foram aplicados degraus sucessivos de carga, os dois grupos geradores responderam de forma coerente à sequência de 150 kW para 200 kW, em seguida para 250 kW e, por fim, retorno a 200 kW. O gerador a diesel apresentou maior rigidez dinâmica, com frequência praticamente constante em torno de 60 Hz e potência ativa em patamares bem definidos. Já o gerador a etanol acompanhou corretamente os degraus, porém com maior dispersão nas medidas de potência e maior flutuação da frequência ao longo do ensaio. As tensões trifásicas mantiveram estabilidade global

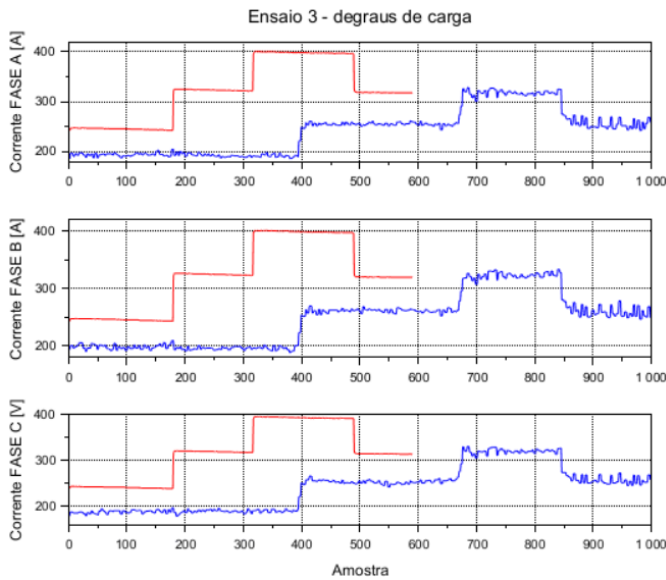


Fig. 22. Comportamento das correntes trifásicas para o Ensaio 3.

que atingem cerca de 0,5%, concentrados principalmente no início do ensaio, conforme indica a Fig. 23.

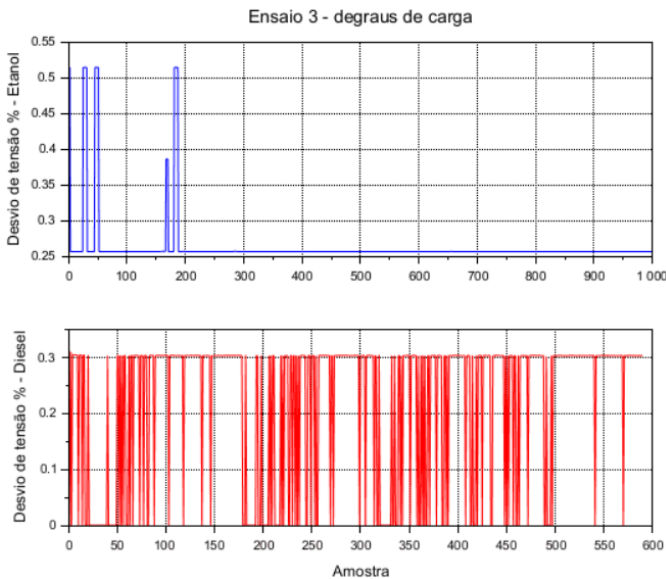


Fig. 23. Comportamento dos desvios de tensão das unidades geradoras para o Ensaio 3.

Já o gerador a diesel volta a apresentar o comportamento intermitente observado nos ensaios anteriores, alternando frequentemente entre valores próximos de 0 e 0,3%, o que sugere pequena diferença instantânea entre fases e possível influência da resolução do sistema de medição. De modo geral, assim como nos Ensaios 1 e 2, não foram observados desequilíbrios expressivos de tensão no Ensaio 3, indicando que ambos os sistemas preservaram boa simetria trifásica mesmo sob variações sucessivas de carga, com o grupo a etanol apresentando curva mais suave e o diesel comportamento mais alternado.

em ambos os sistemas, apesar da diferença no número de amostras coletadas para cada unidade geradora. As correntes seguiram a variação da potência de forma coerente, com aumentos e reduções compatíveis com os degraus impostos, embora o grupo a etanol tenha apresentado maior oscilação em torno dos níveis de operação. Novamente, os desvios de tensão permaneceram baixos, indicando boa simetria entre fases mesmo sob mudanças sucessivas de carga.

Considerando os três ensaios em conjunto, os resultados mostram que o grupo gerador com motor convertido para etanol apresentou funcionamento tecnicamente satisfatório sob todas as condições avaliadas. O sistema foi capaz de acompanhar reduções bruscas de carga, remoção total de carga e aplicação de degraus sucessivos, mantendo frequência próxima da nominal, tensões estáveis e baixo desequilíbrio trifásico. Contudo, quando comparado ao grupo a diesel, o sistema a etanol demonstrou maior variabilidade dinâmica, com oscilações mais perceptíveis em potência, corrente e frequência, sobretudo em situações transitórias mais severas.

Do ponto de vista da qualidade elétrica, os resultados são favoráveis à utilização do motor convertido para etanol, uma vez que não foram observados problemas relevantes de regulação de tensão ou desequilíbrio expressivo entre fases. Por outro lado, os dados indicam que o sistema a diesel ainda apresenta maior robustez e melhor amortecimento de transitórios, o que sugere que o grupo a etanol depende mais fortemente do ajuste fino de sua estratégia de controle e da calibração da injeção de combustível para alcançar comportamento dinâmico mais próximo ao do sistema convencional.

VII. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais obtidos, conclui-se que o uso de grupos geradores com motor convertido para etanol é **tecnicamente viável** sob o ponto de vista do desempenho eletroenergético. Em todos os ensaios realizados, o sistema convertido foi capaz de operar adequadamente, acompanhando as variações de carga impostas e mantendo níveis satisfatórios de tensão, corrente e frequência, além de baixo desequilíbrio trifásico.

Entretanto, a comparação com o grupo gerador a diesel mostrou que o sistema a etanol apresenta **maior sensibilidade dinâmica**, especialmente em transitórios envolvendo retirada brusca de carga ou múltiplos degraus de potência. Nesses casos, foram observadas maiores oscilações de frequência, maior dispersão nos níveis de potência ativa e correntes menos uniformes ao longo do tempo. Assim, embora o grupo a etanol tenha apresentado operação estável, o sistema a diesel demonstrou maior rigidez e melhor capacidade de amortecimento frente às perturbações analisadas.

Dessa forma, pode-se afirmar que os geradores com motor convertido para etanol constituem uma alternativa promissora para aplicações em geração elétrica, principalmente em contextos nos quais a sustentabilidade, o uso de combustível renovável e as exigências ambientais sejam fatores relevantes de decisão. Sua adoção tende a ser especialmente atrativa em aplicações estacionárias, sistemas de emergência, operações de

curta duração ou cenários em que haja disponibilidade local de etanol.

Por fim, os resultados também indicam que a ampliação da viabilidade prática dessa tecnologia depende do aprimoramento do sistema de controle do motor convertido, particularmente da calibração da injeção e da resposta dinâmica em regime transitório. Como trabalhos futuros, recomenda-se aprofundar a análise do consumo específico, do custo da energia gerada e da resposta do sistema sob diferentes perfis de carga, de modo a consolidar a avaliação técnico-econômica da conversão para etanol.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à BRG Geradores e à Usina Jalles Machado pela disponibilidade, apoio e confiança depositados na realização deste trabalho. Em especial, agradecem por possibilitarem o acesso às unidades geradoras e pela autorização para a coleta dos dados experimentais utilizados nesta pesquisa. Essa colaboração foi fundamental para o desenvolvimento do estudo, permitindo a análise prática do desempenho eletroenergético dos sistemas em condições reais de operação.

REFERÊNCIAS

- [1] Roso, V. R., Dalla Nora, M., Santos Martins, M. E., & Moreira Machado, P. R. (2016). Fuel consumption and pollutant emissions of a Diesel engine converted to run on ethanol for electric thermal energy generation. *Semina: Ciências Exatas E Tecnológicas*, 37(1), 131–142. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2016v37n1p131>
- [2] Farra, Nicolas. (2010). Efficiency and Emissions Study of a Residential Micro-cogeneration System Based on a Stirling Engine and Fuelled by Diesel and Ethanol. *University of Toronto Medical Journal*.
- [3] Queiroga, B. & Jaguaribe, Emerson & Gonçalves, M. & Oliveira, B. & Rumão, A.. (2018). Conversion of turbocharged diesel engine to operate solely with hydrous ethanol. *Revista de Engenharia Térmica*. 12. 41. 10.5380/reterm.v12i1.62028.
- [4] Souza, Ivair & Hanriot, Sérgio & Moreira, Vinicius & Amorim, Rogério & Silveira, Hairton. (2025). Performance and emissions of an engine operating with the direct injection of diesel, biodiesel, and wet ethanol blends. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 47. 10.1007/s40430-025-05698-4.
- [5] E. Sutheerasak, W. Pirompuad and S. Chuepeng, "Study of Diesel Combining with Vaporizing Ethanol via a Carburetor for a Diesel-engine Generator," 2022 12th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE), Shiga, Japan, 2022, pp. 54-58, doi: 10.1109/CPEEE54404.2022.9738713.
- [6] E. Sutheerasak, W. Pirompuad and S. Chuepeng, "Performance, Emission, and Wear of a Diesel-engine Generator Operating with Regular Diesel Mixed with Oxygenated Additives," 2021 11th International Conference on Power, Energy and Electrical Engineering (CPEEE), Shiga, Japan, 2021, pp. 153-157, doi: 10.1109/CPEEE51686.2021.9383241.
- [7] Wu, G., Ge, J. C., & Choi, N. J. (2021). Effect of Ethanol Additives on Combustion and Emissions of a Diesel Engine Fueled by Palm Oil Biodiesel at Idling Speed. *Energies*, 14(5), 1428. <https://doi.org/10.3390/en14051428>
- [8] Kim, H. Y., Ge, J. C., & Choi, N. J. (2020). Effects of Ethanol-Diesel on the Combustion and Emissions from a Diesel Engine at a Low Idle Speed. *Applied Sciences*, 10(12), 4153. <https://doi.org/10.3390/app10124153>