

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MONITORAMENTO APLICADO A UM MOTOGERADOR A DIESEL COM INJEÇÃO DE GÁS DE ELETRÓLISE

ROBSON L. FIGUEIREDO¹, ELISANGELA M. LEAL², ALAN K. R. SEGUNDO³, EUNÍRIO ZANETTI⁴, GEMÍRSON P. REIS¹

1. *Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto / Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto – MG, 35400-000*
2. *Departamento de Engenharia Mecânica, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, campus Morro do Cruzeiro, s/n, Bauxita, Ouro Preto – MG, 35400-000*
3. *Departamento de Engenharia de Controle e Automação, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, campus Morro do Cruzeiro, s/n, Bauxita, Ouro Preto – MG, 35400-000*
4. *Instituto Tecnológico Vale, Av. Juscelino Kubitschek, 31, Ouro Preto – MG, 35400-00*

E-mails: alankardek@ufop.edu.br, elisangelamleal.ufop@gmail.com, alankardek2@gmail.com, gepareis@gmail.com, eunirio.zanetti@itv.org

Abstract— This work presents the development of a monitoring system applied to a diesel generator with the injection of electrolysis gas, aiming at reducing the consumption of diesel oil in the generator. The diesel fuel is the main fuel and the hydrogen is the secondary fuel (additive), injected together with the intake air. The study is experimental in nature and consists initially on characterizing a hydrogen-generating device (dry cell) through the evaluation of the volumetric flow rate of gas produced as a function of the electric current applied to the system and of the electrolyte concentration. Monitoring is performed through an interface that allows information, alerts and commands to be made available to the user to interact with the automation system and equipment. The cell, engine and generator monitoring system is developed in Arduino platform, Platform IO and supervisory in C Sharp. The variables of the electrolytic cell (temperature, current and voltage), engine (consumption, and speed) and generator (power, current and voltage) are monitored. The main results showed the reduction between 2.4% and 3.25% in the main fuel consumption due to the injection of hydrogen in the diesel oil.

Keywords— Energy, Hydrogen, Electrolysis, Monitoring system, Arduino, C Sharp

Resumo— Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de monitoramento aplicado a um motogerador a diesel com a injeção de gás de eletrólise, visando a redução do consumo de óleo diesel no motogerador. O óleo diesel é o combustível principal e o hidrogênio é o combustível secundário (aditivo), injetado juntamente com o ar de admissão. O estudo é de caráter experimental e consiste, inicialmente, em caracterizar um dispositivo gerador de hidrogênio (célula seca) por meio da avaliação da vazão volumétrica de gás produzido em função da corrente elétrica aplicada ao sistema e da concentração de eletrólito. O monitoramento é realizado por meio de uma interface que permite disponibilizar informação, alertas e comandos para o usuário interagir com o sistema de automação e os equipamentos. O sistema de monitoramento da célula, do motor e do gerador foi desenvolvido utilizando as plataformas Arduino, Platform IO e Visual Studio. Desta forma, o sistema proposto permite monitorar as variáveis da célula eletrolítica (temperatura, corrente e tensão), do motor (consumo e rotação) e do gerador (potência, corrente e tensão). Os principais resultados encontrados comprovaram a redução entre 2,4% e 3,25% no consumo do combustível principal devido a injeção de hidrogênio no óleo diesel.

Palavras-chave – Energia, Hidrogênio, Eletrólise, Sistema de monitoramento, Arduino, C Sharp.

1 Introdução

Com o crescimento exponencial da população mundial, o alto consumo energético, principalmente dos países emergentes, e o uso excessivo de combustíveis fósseis, surge a necessidade de alternativas energéticas para suprir as gerações futuras. Contudo, a solução para esta crise energética deve estar em sintonia com a redução do impacto ambiental que acompanha a geração de energia (Momirlan; Veziroglu, 2005).

O hidrogênio, fonte alternativa de energia, pode ser produzido por diversos processos, sendo os

principais: eletrólise, decomposição térmica, reforma a vapor ou autotérmica e por ciclos termoquímicos e biológicos. A obtenção do hidrogênio por eletrólise da água gera apenas hidrogênio e oxigênio puros (hidrogênio em maior proporção) como produtos, sendo, portanto, o gás de eletrólise um gás rico em hidrogênio. Consequentemente, o impacto ambiental nesta forma de produção é indireto (LeRoy, Janjua, Renaud, 2012). Dentre os eletrólitos atualmente usados, o KOH (hidróxido de potássio) possui ampla aplicação em células eletrolíticas industriais como meio condutor (Onda et al., 2004).

Muitos estudos sugerem que a adição de pequenas quantidades de hidrogênio no processo de

combustão possa diminuir a emissão de gases de efeito estufa, além de melhorar o desempenho e reduzir o consumo do diesel em motores de ignição por compressão (Bari; Esmail, 2010). Uma abordagem desse tipo torna possível a adaptação de motores já existentes no mercado, de forma a aumentar sua eficiência e reduzir os impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis derivados do petróleo, porém sem a necessidade da substituição de tecnologia já amplamente utilizada (Zhou et al., 2016). Essa adaptação vem acompanhada de um sistema de aquisição de dados que permita coletar amplas quantidades de dados emitidas por sensores para obter valores médios em larga escala e melhor precisão (Cavalcante et al., 2011).

O presente trabalho apresenta um estudo sobre o desenvolvimento de um sistema de monitoramento aplicado a um motor gerador a diesel com injeção de gás de eletrólise. O estudo é de caráter experimental e consiste, inicialmente, em caracterizar um dispositivo gerador de hidrogênio, por meio da avaliação da vazão volumétrica de gás produzido em função da tensão e corrente elétrica aplicada ao sistema e da concentração de eletrólito. Após esse estudo, o gás rico em hidrogênio produzido foi utilizado em um motor gerador em ciclo diesel, e os seus parâmetros de desempenho, como consumo de diesel e rotação, foram monitorados e analisados.

2 Teoria

Estudos a respeito da utilização dos gases oriundos de eletrólise em motores de combustão interna vêm sendo realizados desde 1918, quando Charles H. Frazer recebeu a primeira patente para um hydro-oxygen generator (Frazer, 1918).

Essa tecnologia passou a ser mais conhecida na comunidade científica a partir de 1974, quando o artigo *On-Board Hydrogen Generator for a Partial Hydrogen Injection Internal Combustion Engine* publicado pela Sociedade de Engenheiros da Mobilidade (SAE) dos EUA afirmou que a adição de hidrogênio, proveniente do processo de eletrólise, com geração em demanda, em motores de combustão interna é eficaz com qualquer combustível fóssil (Houseman; Cerini, 1974).

Publicações apontam os benefícios possíveis do hidrogênio como aditivo à mistura combustível em motores de combustão interna, tanto veiculares quanto estacionários, para diversos tipos de combustíveis (Yilmaz; Uludamar; Aydin, 2012). A ideia de produção em demanda (*on board*) e sem separação dos produtos da eletrólise, elimina importantes barreiras de desenvolvimento recorrentes ao difícil armazenamento do hidrogênio e gastos energéticos da produção centralizada.

O processo particular que quebra a molécula da água por meio da aplicação de uma corrente elétrica em hidrogênio e oxigênio é denominado eletrólise da água definido como uma reação química

desencadeada a partir de uma fonte de energia externa ao sistema químico (Badwal; Giddey; Ciacchi, 2006). O fornecimento da tensão e da corrente contínua é efetuado pelos eletrodos do equipamento chamado eletrólizador, que são separados por um eletrólito com boa condutividade iônica (Vinayak V; Khalasi; Modi; Patel, 2014).

3 Materiais e Métodos

A metodologia baseia-se no estudo do sistema de monitoramento aplicado a uma célula eletrolítica e a um motor gerador a diesel. O projeto de pesquisa foi desenvolvido em duas etapas: (i) identificação das variáveis que influenciam a produção de gás proveniente do processo de eletrólise da água; e (ii) verificação da influência da adição do gás rico em hidrogênio no desempenho de um motor de combustão interna a diesel.

Inicialmente é realizada a caracterização do dispositivo gerador de hidrogênio, por meio da avaliação da vazão volumétrica de gás produzido em função da corrente elétrica, da concentração de eletrólito e da temperatura do sistema. Foram levantadas curvas de concentração do eletrólito, vazão do gás de eletrólise, potência e temperatura em função da corrente aplicada à célula. Após a caracterização, o gás rico em hidrogênio produzido foi utilizado em um motor gerador em ciclo diesel, e os seus parâmetros de desempenho, como consumo de diesel e rotação, foram monitorados.

As variáveis medidas pelos sensores de baixo custo da célula eletrolítica (temperatura, corrente e tensão contínuas), do motor (consumo, rotação) e do gerador (potência, corrente e tensão alternadas) são monitoradas por meio das plataformas Arduino, Platform IO e Visual Studio.

3.1. Características metrológicas dos sensores utilizados na célula eletrolítica

Para a medição de corrente provida pela fonte de alimentação foi utilizado o sensor de corrente ACS712 30A de entrada analógica e de efeito hall para detectar o campo magnético gerado pela passagem de corrente, gerando na saída do módulo (pino OUT), uma tensão proporcional de 66mV/A.

Já para medição da tensão, foi utilizado o sensor de tensão 0-25V DC. Ele é baseado no princípio de divisor de tensão, sendo possível realizar medições analógicas de uma tensão de entrada até 5 vezes maior, visto que a faixa de medição do conversor analógico-digital do Arduino é de 0-5V.

Para aferição da temperatura da célula eletrolítica, foi utilizado o sensor de temperatura DS18B20, com encapsulamento inox a prova d'água, que fornece leitura de 12 bits e apresenta precisão absoluta de $\pm 0,5$ °C entre 10,0 °C e 85,0 °C. A comunicação entre o sensor e o Arduino é realizada por meio de interface 1-Wire.

A produção do gás de eletrólise pela célula eletrolítica foi realizada utilizando o medidor de fluxo de gases. Para isso, foi construído um medidor de gás, que consiste em dois vasos comunicantes, um deles graduado, onde um dos vasos é aberto para a atmosfera e o outro é conectado à saída da célula eletrolítica, sendo totalmente fechado para a atmosfera, como ilustra a Figura 1. Assim, mediu-se o tempo para o deslocamento de 100 mL de líquido devido à produção de gás de eletrólise. Com isso, obtém-se a vazão volumétrica do gás de eletrólise produzido.

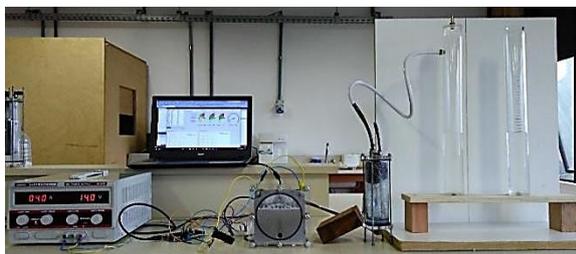


Figura 1. Bancada de testes com a célula eletrolítica a seco.

Foram utilizadas as concentrações de 10,0 g, 12,5 g, 15,0 g, 17,5 g e 20,0 g de KOH para 1000 mL de água para a solução eletrolítica. A corrente aplicada à célula eletrolítica foi elevada gradativamente de 1 A até 10 A, com passo de 1 A, a fim de medir a vazão do gás de eletrólise, temperatura e potência consumida.

Para analisar a composição das amostras do gás de eletrólise, foi utilizado um cromatógrafo gasoso, da marca Shimadzu, modelo GC, série 2014. As análises foram realizadas por meio de um detector de ionização de chama (Flame Ionization Detector - FID) e uma coluna capilar de 30 m (GC - GASPRO), com diâmetro interno de 0,32 mm. As injeções de GC foram realizadas com uma válvula de amostragem (Valco E60), com loop de 250 μ L.

As amostras gasosas foram coletadas diretamente da célula eletrolítica, sendo que cada amostra contém 250 μ L do gás de eletrólise.

Foram utilizadas as concentrações de 15,0 g/L e 17,5 g/L de KOH para a solução eletrolítica. A corrente aplicada à célula eletrolítica foi elevada gradativamente de 1 A até 10 A, com passo de 2 em 2 A, a fim de medir concentração do gás de eletrólise.

3.2. Características metrológicas dos sensores utilizados no motor a diesel

Para medir o fluxo instantâneo do combustível no motor de combustão interna, utilizou-se o sensor YF-S402 do tipo turbina e de efeito Hall. Ele é constituído basicamente por uma pequena turbina cujo sinal de saída é formado por uma série de pulsos digitais. A frequência dos pulsos é proporcional ao líquido que passa através do sensor. Esse sinal digital pode ser lido diretamente por meio de um dos pinos de entrada/saída digitais do Arduino.

A calibração do sensor de fluxo YF-S402 foi realizada em função dos números de pulsos para diferentes quantidades do combustível. Assim, os pulsos são contados habilitando uma interrupção externa no Arduino. Durante o procedimento, a quantidade do combustível diesel foi elevada gradativamente de 50 mL até 1000 mL, com passo de 50 mL. Por meio de regressão linear, obteve-se a curva de calibração apresentado na Figura 2.

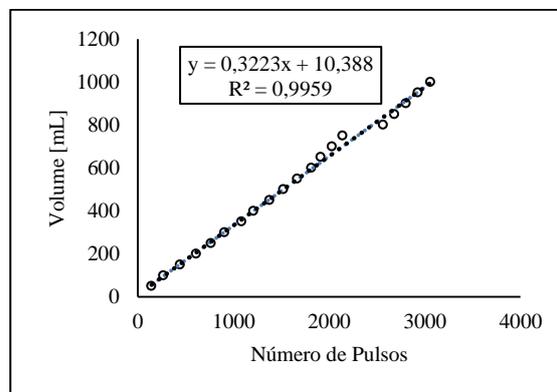


Figura 2. Calibração Sensor YF-S402.

O cálculo da vazão volumétrica do fluido de trabalho pode ser obtido por meio de

$$Q = \frac{V}{t} \quad (1)$$

em que: Q é a vazão volumétrica do fluido [m^3/s], V é o volume do líquido gerado [m^3] e t é o tempo [s].

Logo, o volume de combustível pode ser calculado como

$$V = (0,3223 \cdot n) + 10,388 \quad (2)$$

em que: n é o número de pulsos emitidos pelo sensor.

Para medir a rotação do motor, foi necessário construir um tacômetro utilizando um sensor óptico reflexivo TCRT5000, que possui acoplado um LED infravermelho (emissor) e um fototransistor (receptor). Além disso, foi utilizado um circuito integrado comparador, para realizar comparações entre a tensão de alimentação (5V) e a tensão gerada pela abertura da passagem de luz para o fototransistor, gerando um sinal de onda quadrada na saída que oscila de zero a cinco volts.

Uma fita de alumínio foi colada no volante do motor, conforme mostra a Figura 3, para refletir a luz fornecida pelo LED ao fototransistor, gerando, assim, um trem de pulsos ópticos que é convertido em um sinal elétrico pelo circuito optoeletrônico. Utilizou-se quatro marcações com as fitas de alumínio para melhorar a resolução da leitura da frequência de rotação. O cálculo da rotação do motor foi implementado no firmware do Arduino, por meio de interrupção externa, sendo quatro interrupções iguais a uma rotação do motor.

Na saída do gerador utiliza-se o sensor de corrente alternada 100 A SCT-013. O sensor é composto por material ferrite e tem capacidade de

medição de até 100 A, e apresenta a vantagem de não ser invasivo



Figura 3. Instalação do sensor TCRT 5000 no volante do motor a diesel

Para medir a tensão alternada na saída do gerador, utilizou-se um sensor de tensão AC 127/220 V. O sensor é capaz de detectar a passagem de tensão alternada em um circuito entre 127 V a 220 V e suporta tensão máxima de 311 V. Ele é composto por um optoacoplador, que assegura o isolamento da tensão alternada na entrada. Além disso, possui um resistor de *pull down* e um capacitor para estabilizar a saída. Logo, pode-se calcular a potência gerada pelo gerador como

$$P = V \cdot I \quad (3)$$

em que: P é a potência [W], V a tensão [V] e I a corrente [A].

3.3. Bancada de Teste

A segunda fase do projeto compreende a adição do gás de eletrólise a um sistema de produção de energia elétrica, composto por um motogerador a diesel modelo Nagano ND 3200. Utilizaram-se sensores para monitorar a vazão do diesel e a rotação do motor, conforme explicado na seção anterior. Assim como a célula eletrolítica, essas informações serão tratadas no Arduino Mega e apresentadas em uma interface por meio de um menu em display LCD e também armazenadas em tempo real um arquivo do software Excel. Após a realização das leituras, o Arduino envia os resultados de medição, via porta USB, para o programa supervisor, desenvolvido no Visual Studio 2013, em linguagem de programação C Sharp (C#).

Na Figura 4 apresenta-se a bancada de testes composta por uma célula eletrolítica, utilizando como eletrólito hidróxido de potássio (KOH), uma fonte de corrente DC 20 A e 30 V FA-2030 Instrutherm, um medidor de gás de eletrólise, filtros, válvula de segurança, sensores de corrente efeito hall, vazão, rotação, temperatura, Arduino Mega e o display LDC.

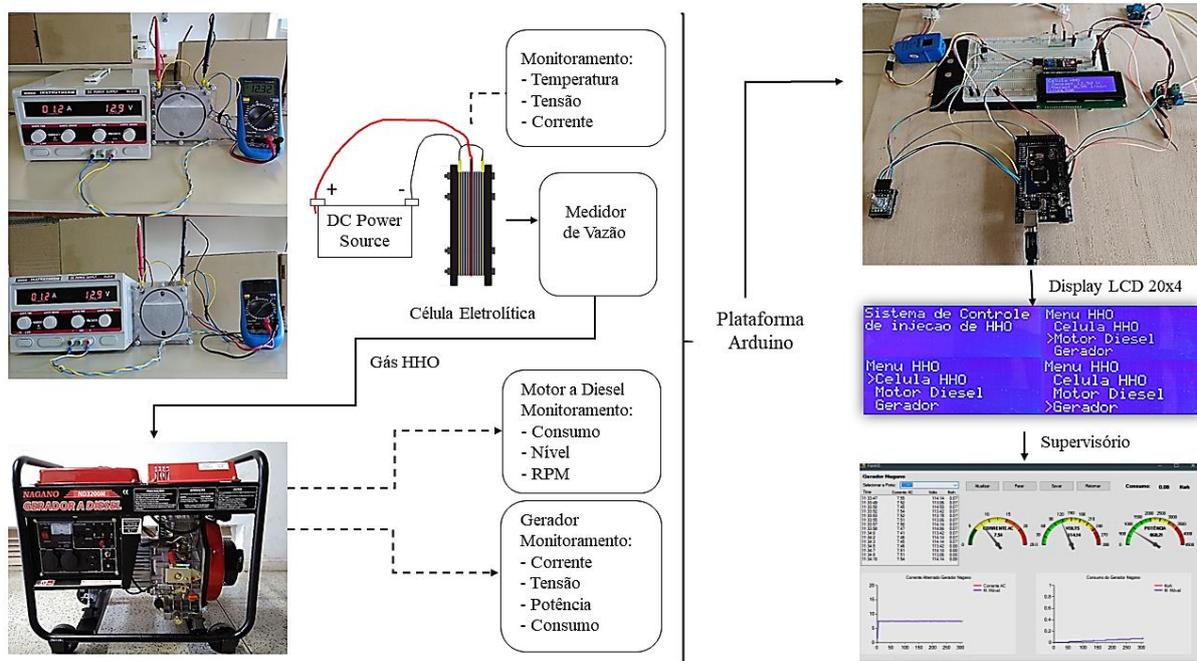


Figura 4. Bancada de testes mostrando o sistema de monitoramento.

Na Figura 5 ilustra-se o diagrama de blocos da concepção geral do projeto de pesquisa, detalhando o circuito de monitoramento. Cabe salientar que os blocos no retângulo traçado são os sensores utilizados no sistema.

O sistema embarcado proposto para a aquisição das variáveis é composto por um Arduino Mega, sensores de corrente e tensão contínuas; vazão, rotação; corrente e tensão alternada. Além disso, as leituras dos sensores são exibidas no display LCD e são enviadas, via USB, para o programa supervisorio.

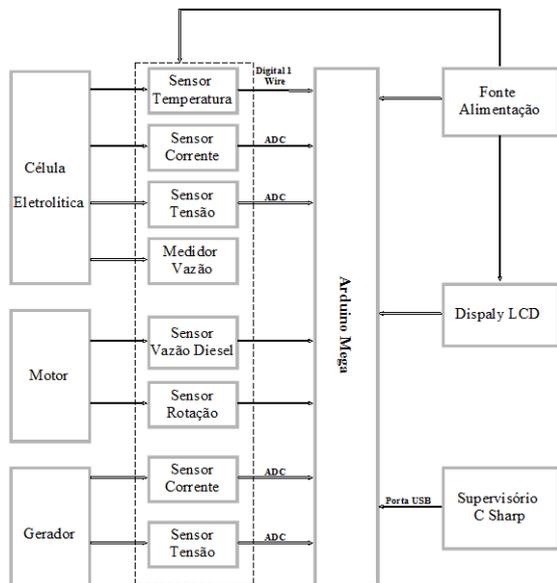


Figura 5. Diagrama de bloco do circuito de monitoramento.

3.4 Interface

Uma interface permite disponibilizar informação, alertas e comandos para o usuário interagir com o sistema de automação e os equipamentos. Para o desenvolvimento da interface, utilizou-se um display LCD 20x4. Ele contém uma tela inicial ao usuário, onde está disposto o menu principal com as opções “Célula HHO”, “Motor a diesel” e “Gerador”, conforme ilustra a Figura 6.



Figura 6. Interface em display LCD contendo o menu do sistema de monitoramento do gás de eletrólise.

O menu principal apresenta os equipamentos, e o submenu da Figura 7 exibe as informações das variáveis de cada sensor da célula eletrolítica, motor a diesel e do gerador, monitoradas em tempo real. Implementou-se também a opção “Voltar” que retorna ao menu principal.

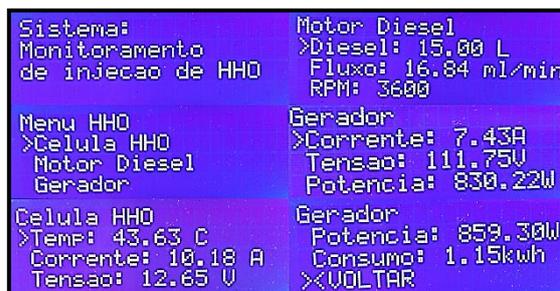


Figura 7. Submenu encontrado em cada equipamento do experimento.

3.5 Supervisorio

Para o monitoramento do sistema, foi desenvolvido no Visual Studio 2013 um programa supervisorio na linguagem C#, para receber os dados do Arduino, pela porta USB.

Na Figura 8 apresenta-se a interface do programa supervisorio para monitoramento de temperatura, corrente, tensão e potência da célula eletrolítica.

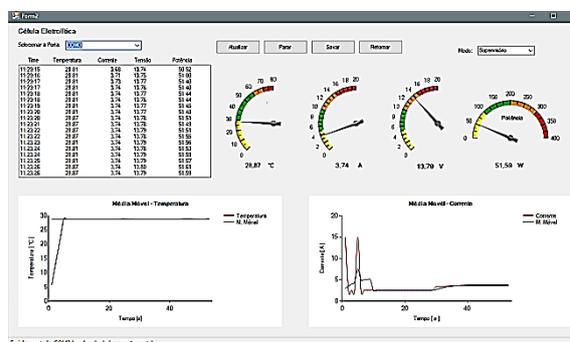


Figura 8. Supervisorio – Interface Célula Eletrolítica.

Na Figura 9 ilustra-se a interface para monitoramento do consumo e da rotação do motor a diesel.

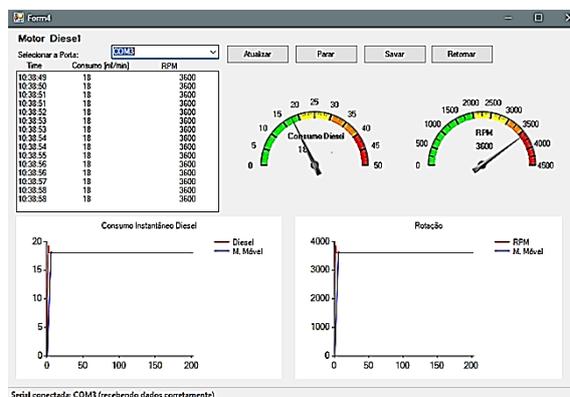


Figura 9: Supervisorio – Interface do Motor a diesel.

Na Figura 10 apresenta-se a interface de monitoramento dos parâmetros do gerador, onde os dados das leituras dos sensores de corrente e tensão na saída do gerador, assim com os cálculos da

potência e do consumo de energia são disponibilizados. Pode-se verificar o valor instantâneo e a média móvel da corrente do gerador, por meio do gráfico da esquerda. Já o gráfico da direita mostra o valor instantâneo e a média móvel do consumo de energia do gerador.

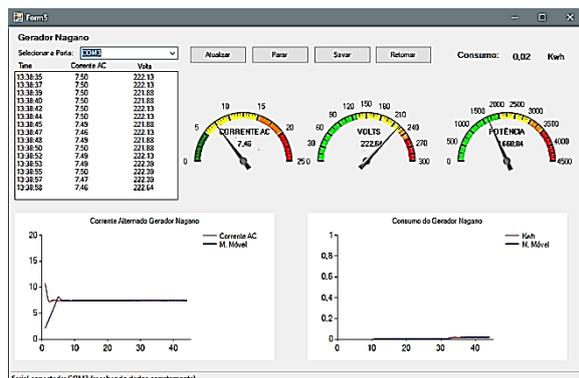


Figura 10. Supervisório – Interface Gerador Elétrico.

4 Resultados e Discussões

Nesta seção serão apresentados os resultados do sistema de monitoramento na medição da vazão volumétrica do gás de eletrólise. Além disso, foram monitorados os seguintes parâmetros do conjunto motogerador: consumo de diesel, rotação, corrente e tensão.

4.1 Análise do Gás de Eletrólise

O gráfico da Figura 11 apresenta os valores de concentrações de hidrogênio resultantes da análise cromatográfica das amostras de gás de eletrólise.

Pode-se observar que a variação da concentração do eletrólito e da corrente que passa na célula induz o aumento na concentração de hidrogênio produzido. De acordo com o gráfico da Figura 10, o ponto de maior produção de hidrogênio (aproximadamente 40%) ocorre quando a concentração é da ordem de 17,5 g/L de KOH, e a corrente é de aproximadamente 4 A.

Outro ponto a ser observado é o comportamento da curva de 17,5 g/L de KOH, que apresenta ponto máximo de inflexão em baixa corrente. Já na curva de 15,0 g/L de KOH, a máxima concentração de hidrogênio gerado (40%) apresenta consumo de 10 A, o que pode penalizar o sistema, pois esse comportamento se traduz em perdas de energia, uma vez que a energia direcionada para a geração de gás de eletrólise é utilizada para o aumento da temperatura na célula eletrolítica.

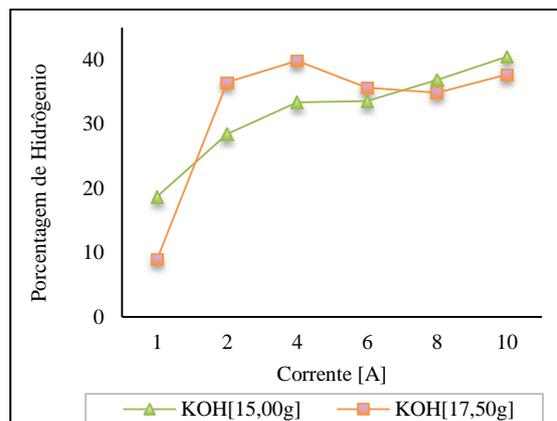


Figura 11. Resultados de concentração de hidrogênio produzido com a variação da corrente e da concentração do eletrólito.

4.2 Célula Eletrolítica

O gráfico da Figura 12 apresenta os resultados de geração de gás de eletrólise em função da corrente aplicada para as concentrações informadas de KOH. Pode-se observar que, com o aumento da corrente e da concentração do eletrólito, a produção do gás de eletrólise também aumenta. A concentração de 10,0 g/L mostra a menor produção de gás de eletrólise, assim como a concentração de 20,0 g/L mostra a maior, considerando o intervalo de corrente informado. A diferença média percentual entre essas duas concentrações foi de 33,2%. Vale destacar que a máxima geração de gás de eletrólise ocorreu para a concentração de 20,00 g/L de KOH, aplicando uma corrente de 10 A no sistema, resultando em uma produção de gás em torno de 633,17 mL/min.

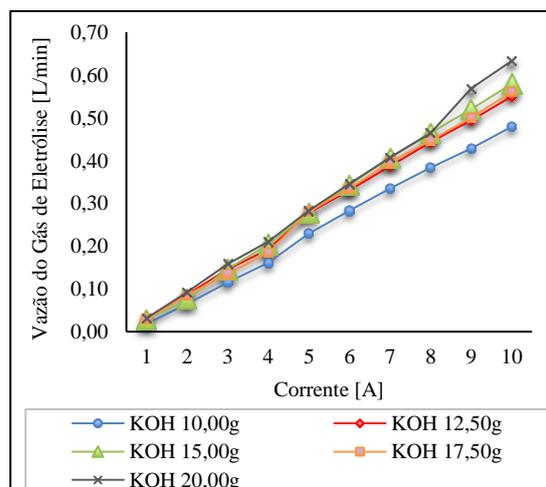


Figura 12. Resultados de produção de gás de eletrólise em função da corrente aplicada à célula e da concentração do eletrólito.

O gráfico da Figura 13 apresenta os resultados da potência em função da variação da corrente aplicada na célula e da concentração do eletrólito (10,0 g, 12,5 g, 15,0 g, 17,5 g e 20,0 g de KOH para 1000 mL de água destilada). Pode-se observar que com o aumento da corrente, a potência dissipada pela célula eletrolítica também aumenta. A concentração de 10,00 g/L mostra a maior potência dissipada na

célula eletrolítica, no intervalo de corrente 1 A a 10 A. A diferença média percentual entre a concentração de 10,00 g/L e as concentrações, de 12,50 g/L, 15,00 g/L e 17,50 g/L foi de 12%. Já para a concentração de 20,0 g/L ficou em torno de 10%.

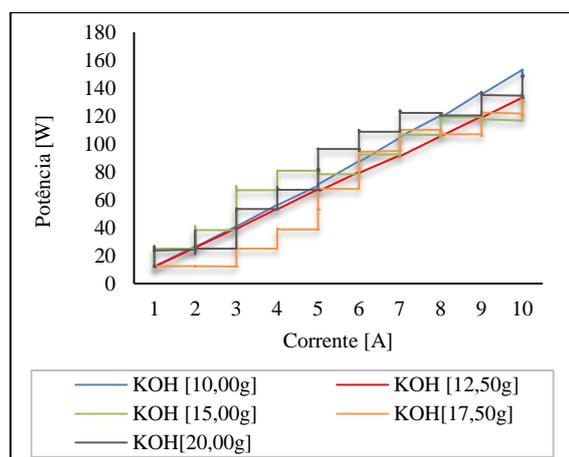


Figura 13. Potência Consumida em função da corrente.

O gráfico da Figura 14 apresenta a variação da temperatura da célula eletrolítica com a corrente aplicada. A partir do gráfico da Figura 14, observa-se que, com o aumento da corrente, a temperatura aumenta. Para a concentração de 10,0 g/L, a temperatura não ultrapassou 35 °C. Já para a concentração de 12,50 g/L, houve um aumento na temperatura de 14%; e para a concentração de 15,0 g/L, ocorreu um aumento de 19%. Para as concentrações de 17,50 g / L e 20,00 g/L houve um aumento na temperatura de 12,5% e 24,5%, respectivamente, (principalmente quando a corrente atinge valores acima de 10 A), comparadas com a concentração de 10 g/L. Isso se traduz em perdas de energia, uma vez que a energia direcionada para a geração de gás de eletrólise está também sendo direcionada para o aquecimento da célula eletrolítica, o que pode danificar os materiais constituintes da célula e diminuir a vazão do gás de eletrólise.

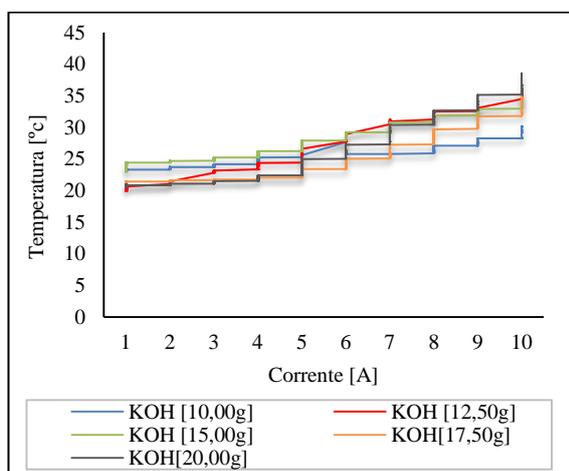


Figura 14. Resultados da temperatura na célula eletrolítica em função da corrente aplicada.

4.3 Motogerador a Diesel

Foi realizado um ensaio com uma carga resistiva de 1kW na saída do motogerador para o monitoramento do consumo de diesel e da rotação, utilizando as concentrações de 17,5 g/L e 20,0 g/L de KOH como aditivo, com duração de, aproximadamente, uma hora. O gráfico da Figura 15 apresenta os resultados do consumo de diesel. De acordo com a Figura 15, pode-se observar que a redução média percentual entre o consumo de diesel com a adição do gás de eletrólise, para uma concentração de 17,5 g/L, foi em torno 2,40%. Já para a concentração de 20,0 g/L, a redução do consumo foi de 3,25%.

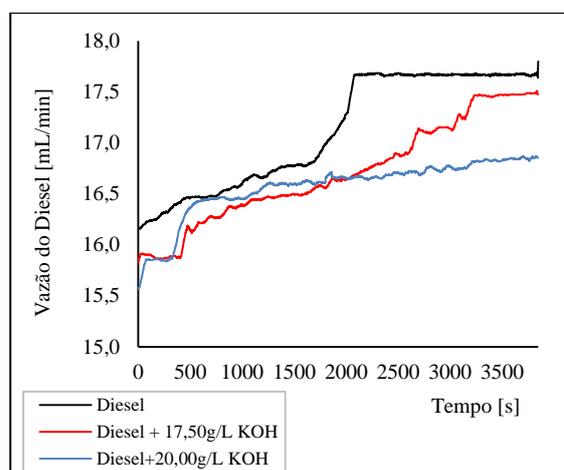


Figura 15. Consumo de diesel do motogerador ao longo do tempo.

O gráfico da Figura 16 apresenta a medição da rotação do motogerador. A partir do gráfico da Figura 16, observa-se que a velocidade de rotação do motogerador durante os ensaios permanece constante em 3600 e 3660 rpm, com o sistema sem e com a carga de 1kW, respectivamente.

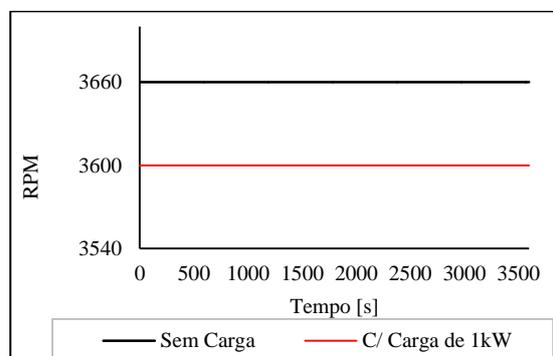


Figura 16. Rotação do motogerador.

5 Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo experimental sobre o desenvolvimento de um sistema de baixo custo para monitorar uma célula de eletrólise e de um motogerador a diesel, com o objetivo de verificar a influência da adição de

hidrogênio sobre os parâmetros de desempenho do motor.

O trabalho foi desenvolvido em duas fases: (i) levantamento de parâmetros que mais influenciam na produção de gás de eletrólise por meio de um eletrolisador a seco; e (ii) avaliação dos parâmetros de desempenho de um motogerador a diesel utilizando o gás proveniente do processo de eletrólise como aditivo ao combustível principal (óleo diesel).

O desenvolvimento do sistema de monitoramento de baixo custo possibilitou avaliar que os parâmetros de concentrações de KOH, produção do gás de eletrólise e temperatura são os que mais influenciam no processo de geração de um gás rico em hidrogênio. Houve um maior volume de gás rico em hidrogênio para a concentração de 17,5 g/L de KOH, o que representa um aumento de 40% em relação a concentração de 15,0 g/L de KOH.

Concluiu-se que, com o aumento da corrente, a temperatura aumenta. Para a concentração de KOH de 10,0 g/L, a temperatura não ultrapassou de 35°C. Já para as concentrações de 12,50 g/L e 15,0 g/L, houve um aumento na temperatura de 13,95% e 18,64%, respectivamente, comparados à concentração de 10,0 g/L. Esse comportamento se traduz em perdas de energia, uma vez que a energia direcionada para a geração de gás de eletrólise foi utilizada para o aumento da temperatura na célula eletrolítica.

Observou-se uma redução do consumo de diesel, utilizando o gás proveniente do processo de eletrólise como aditivo, de 2,40% e 3,25 % para as concentrações de 17,5 e 20,0 g/L de KOH, respectivamente.

Por fim, obteve-se a máxima geração de gás de eletrólise para a concentração de 20,00 g/L de KOH, ao se aplicar a corrente de 10 A no sistema, o que resulta na produção de aproximadamente 633,17 mL/min de gás e na redução de 3,25% do combustível principal, óleo diesel.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da UFOP, do Instituto Tecnológico Vale, da CAPES e da FAPEMIG para a realização deste trabalho.

Referências Bibliográficas

- Badwal, S. P. S., Giddey, S., & Ciacchi, F. T. (2006). Hydrogen and oxygen generation with polymer electrolyte membrane (PEM)-based electrolytic technology. *Ionics*, 12(1), 7–14. <http://doi.org/10.1007/s11581-006-0002-x>. Acesso em: 17 dez. 2017.
- Bari, S., & Esmail, M. M. (2010). Effect of H₂ / O₂ addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine. *Fuel*, 89(2), 378–383. <http://doi.org/10.1016/j.fuel.2009.08.030>.
- Cavalcante, M. A., Tavoraro, C. R. C., & Molisani, E. (2011). Física com Arduino para iniciantes.

Revista Brasileira de Ensino de Física, 33(4), 4503–4503. <http://doi.org/10.1590/S1806-11172011000400018>.

- Frazer, C. H. Oxy-hydrogen Generator (1918). <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>.
- Houseman, J. and CERINI, D. . On Board Hydrogen Generator for a Partial Hydrogen Injection Internal Combustion Engine, *Jet. Propulsion Lab* 208 (1974).
- Ji, C., Liu, X., Wang, S., Gao, B., & Yang, J. Development and validation of a laminar flame speed correlation for the CFD simulation of hydrogen-enriched gasoline engines, *38International Journal of Hydrogen Energy* 1997–2006 (2013). Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.11.139>
- LeRoy RL, Janjua MBI, Renaud R, L. U. (2012). Analysis of time-variation effects in water electrolyzers. *J Electrochem Soc*, 2(1), 126–674.
- Momirlan, M., & Veziroglu, T. N. (2005). The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet, *30*, 795–802. <http://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2004.10.011>.
- Onda, K., Kyakuno, T., Hattori, K., & Ito, K. (2004). Prediction of production power for high-pressure hydrogen by high-pressure water electrolysis. *Journal of Power Sources*, 132(1–2), 64–70. <http://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2004.01.046>
- Vinayak V. Khalasi, Kalpesh V. Modi, Dr. Vikas J. Patel, D. R. C. I. (2014). Hydrogen as an Energy Carrier. *International Journal of Science, Technology & Management*, 3(April), 1–40. Retrieved from www.ijstm.com.
- Yilmaz, A. C., Uludamar, E. and AYDIN, K. 2012. (2012). Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines. *Journal OF Hydrogen Energy*, 35, 11366–11372.
- Zhou, J. H., Cheung, C. S., Zhao, W. Z., & Leung, C. W. (2016). diesel–hydrogen dual-fuel combustion and its impact on unregulated gaseous emissions and particulate emissions under different engine loads and engine speeds. *Energy*, 94, 110–123. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2015.10.105>.