

Sistema Controlador de Estação Híbrida de Hidrogênio e Energia Renovável por meio de células a combustível PEM

Clara do Nascimento Sousa¹ (claran@acad.ifma.edu.br); Ezanielle Reis de Cristo² (ezanielle.reis@acad.ifma.edu.br); João Vitor Diniz de Jesus³ (vitordiniz@acad.ifma.edu.br); Jonatas Guilherme Gonçalves dos Santos⁴ (gconcalves@acad.ifma.edu.br)

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA);
Departamento de Física - DEFIS.

Resumo:

Propõe-se um controlador baseado em ESP32 para uma estação de energia híbrida solar-hidrogênio. O sistema integra eletrólise PEM, painéis solares e células a combustível, com monitoramento em tempo real de parâmetros elétricos e térmicos. Através de multímetros, sensores e interface wireless, permite gestão remota e otimização energética. A implementação demonstra uma solução sustentável e acessível para geração limpa, unindo tecnologias renováveis a controle embarcado inteligente.

Palavras-chave:

Células a combustível 1. Painéis solares 2. Energia solar 3. Eletrolisadores 4. Sustentabilidade 5.

Introdução

O aumento da procura por eletricidade, juntamente com a urgência em mudar para fontes renováveis, apresenta um desafio global: assegurar o acesso universal à energia limpa, segura e sustentável. No cenário atual tem incentivado debates a respeito dos impactos no meio ambiente decorrentes do uso excessivo de combustíveis fósseis, grandes responsáveis pela emissão de gases do efeito estufa e pelo aumento das mudanças

¹ Estudante do Curso de Química do IFMA do Campus Monte Castelo; E-mail: claran@acad.ifma.edu.br

² Estudante do Curso de Eletrotécnica do IFMA do Campus Monte Castelo; E-mail: ezanielle.reis@acad.ifma.edu.br

³ Estudante do Curso de Sistemas Embarcados do IFMA do Campus Monte Castelo;
E-mail: vitordiniz@acad.ifma.edu.br

⁴ Egresso do curso de eletrotécnica do IFMA do Campus Monte Castelo; E-mail: gconcalves@acad.ifma.edu.br
Orientador: Prof. Fábio Henrique Sales Silva, Instituto Federal do Maranhão - Campus Monte Castelo (Física) - e-mail: fsales@ifma.edu.br

climáticas (IEA, 2019). Logo, torna-se crucial a busca por fontes de energia renováveis e limpas, que consigam suprir as necessidades atuais sem comprometer as gerações que virão.

Entre as alternativas mais promissoras, o hidrogênio verde, que é convertido em energia elétrica através de processos eletroquímicos opção limpa e silenciosa. Sendo o hidrogênio o elemento mais abundante da Terra e do universo podendo ser encontrado com frequência em moléculas de água H_2O . Se a energia provém de uma usina termelétrica, o procedimento libera gases que causam o efeito estufa. Essa é a distinção em relação ao hidrogênio verde, que é produzido utilizando fontes de energia renováveis, como eólica, solar e hidroelétrica.

Metodologia

Experimento 01: Associação em série de sistemas de geração de energia por hidrogênio. (Sistema de eletrolisadores alimentados pela fonte de bancada)

Detalhamento:

A respeito da montagem, utilizou-se cerca de 9 sistemas de geração de hidrogênio (PEMWE), compostos por 9 eletrolisadores, e dois reservatórios de gás por eletrolisador, sendo um para hidrogênio e outro para oxigênio, cada par de reservatórios ligados a uma célula a combustível PEM, totalizando 9 células a combustível PEM (PEMFC). Utilizou-se aproximadamente 50 cm^3 de água destilada, distribuídos em dois recipientes, um para hidrogênio e outro para oxigênio. O sistema de produção de hidrogênio foi ligado em paralelo a um voltímetro, ajustado na faixa de medição de até 20 V, para monitorar a tensão da fonte. Um amperímetro também foi adicionado em série com o circuito, para a medição de corrente, ajustado na faixa de medição de até 10 A. Isso ocorreu para se obter os valores de entrada e sua potência. Após colocar as 9 PEMFCs em série, adicionou-se um amperímetro, na escala de 200mA e eventualmente quando necessário na escala de 10A, e um voltímetro na escala de 20V. Após a montagem foi realizado o seguinte procedimento.

O eletrolisador PEM foi alimentado por determinado tempo, para que gerasse cerca de 30 cm^3 de hidrogênio e 15 cm^3 de oxigênio, em um reservatório para cada fluido. Em seguida, a fonte de bancada foi desligada, e os reservatórios foram conectados à célula a combustível PEM. Em seguida, o hidrogênio e o oxigênio foram liberados na célula a combustível, onde foi medido valores a vazio (sem carga), logo após foi adicionado um motor 5V, fazendo com que o motor começasse a girar. Ao mesmo tempo, o cronômetro

registrou o tempo de geração de energia, assim como foram anotados os valores de tensão e corrente obtidos. Logo após testar o Motor 5V, testou-se a possibilidade de adicionar mais um motor de 5V. Após isso retirou-se os motores e adicionou-se uma lâmpada (4V/400mA). (Conforme figuras 01,02 e 03).

Figura 01: Sistema de geração de hidrogênio com a associação a série de PEMFCs e motor de 5V como carga.

Fonte: Autoria própria.



Figura 02: Sistema de geração de hidrogênio com a associação a série de PEMFCs e dois motores 5V como carga.

Fonte: Autoria própria.



Figura 03: Sistema de geração de hidrogênio com a associação a série de PEMFCs com lâmpada (4V/400mA) como carga.

Fonte: Autoria própria.



Experimento 02: Associação em série de sistemas de geração de energia por hidrogênio. (Sistema de eletrolisadores alimentados pela painéis solares)

Detalhamento: A respeito da montagem e experimento. Tendo em vista os materiais disponíveis sendo eles 10 painéis solares 2V/700mA, associados em série por meio de módulos de junção, o conjunto de painéis foram ligados em paralelo com um voltímetro na escala de 200V e com um amperímetro em série na escala de 10A, para o primeiro teste em campo registrou-se os valores medidos sem carga (a vazio) e após isso adicionou-se um potenciômetro para adquirir noção das capacidades do sistema com carga. (Figura 04). Após estes testes colocou-se este sistema de painéis em uma base de PVC, e o sistema testado no Experimento 01 em outra base de PVC, uniu-se os dois sistemas com fios e cordas a duas bases de madeira com borracha para evitar escorregamento durante o transporte. Tendo em vista a montagem e a união dos sistemas de energia solar (Como fonte primária) e os sistemas de geração de hidrogênio e energia elétrica (PEMWE e PEMFC), houve o experimento em campo, no padrão do Experimento 01 onde registrou-se valores de tensão, corrente, potência de entrada e saída, além do tempo de eletrólise. (Figura 05)

Figura 04: Painéis solares associados em série na base de PVC.

Fonte: Autoria própria.



Figura 05: Conjunto de painéis solares alimentando o sistema de geração de hidrogênio com a associação a série de PEMFCs.

Fonte: Autoria própria.

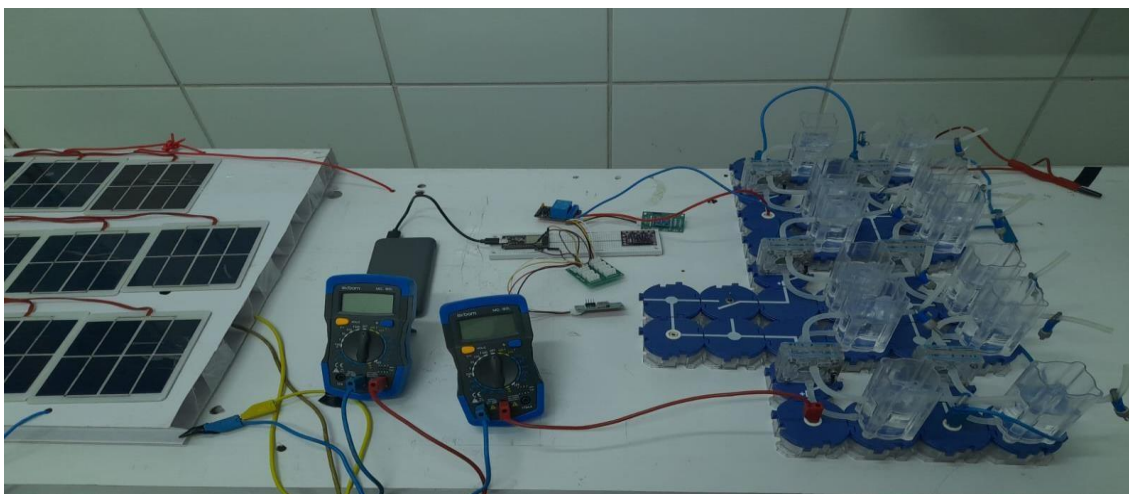


Experimento 03: Controlador baseado em ESP32 para uma estação de energia híbrida solar-hidrogênio.

O roteiro do experimento 02, foi reproduzido com sistema de controle utilizando relés acionados por meio do microcontrolador ESP32, com comunicação via Wi-Fi através de uma plataforma em HTML. O sistema foi configurado para monitorar e atuar conforme os parâmetros definidos, empregando sensores de temperatura e de irradiação solar para coleta de dados em tempo real. Esses sensores permitiram observar o comportamento térmico e energético do conjunto durante as condições experimentais, garantindo o funcionamento automatizado e o controle eficiente dos relés conforme as variações de temperatura e intensidade solar. (Conforme figura 06)

Figura 06: Conjunto de painéis solares alimentando o sistema de geração de hidrogênio com a associação a série de PEMFCs.

Fonte: A autoria própria.



Resultados e Discussão

Experimento 01: Associação em série de sistemas de geração de energia por hidrogênio. (Sistema de eletrolisadores alimentados pela fonte de bancada).

Na análise da primeira etapa do experimento, o destaque foi a tensão em circuito aberto de 7,52 V, resultado superior ao previsto no projeto inicial. Também foi possível acompanhar a variação da energia consumida por minuto ao longo do processo de eletrólise. Com exceção do eletrolisador E3, o conjunto demonstrou um gasto mais elevado de energia primária, o que gera uma produção acelerada de hidrogênio. Quando os eletrolisadores operam em uma faixa estável de 2 a 2,1 V, mesmo com maior tempo para atingir o mesmo volume de gás, o consumo por hora nas células a combustível continuou praticamente inalterado.

Tabela 01: Valores obtidos na eletrólise e sistema a vazio.

Fonte: A autoria Própria.

| RESULTADOS: ELETROLISADORES PEM | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| PEMWEs | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 |
| Tensão (V) | 2,16 | 2,37 | 2,30 | 2,30 | 2,30 | 2,90 | 2,90 | 2,90 | 2,90 |
| Corrente (A) | 1,00 | 0,74 | 0,30 | 0,55 | 0,90 | 1,15 | 1,30 | 1,60 | 0,72 |
| Potência (W) | 2,16 | 1,75 | 0,69 | 1,26 | 2,07 | 3,33 | 3,77 | 4,64 | 2,08 |
| Tempo (s) | 171 | 238 | 576 | 390 | 300 | 232 | 196 | 178 | 445 |

| | | | | | | | | | |
|--|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Energia (W x min) | 6,15 | 6,95 | 6,62 | 8,22 | 10,35 | 12,89 | 12,31 | 13,76 | 15,48 |
| RESULTADOS: TENSÃO POR CÉLULA A COMBUSTÍVEL PEM | | | | | | | | | |
| PEMFCs | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 |
| Tensão (V) | 0,89 | 0,88 | 0,87 | 0,87 | 0,88 | 0,8 | 0,78 | 0,77 | 0,78 |

Em vez de alimentar cada unidade de forma isolada, optou-se por organizar os eletrolisadores em dois blocos: grupo A (E1 a E5) e grupo B (E6 a E9). Contudo, não foi possível manter acesas mais de duas lâmpadas de 4V/40mA satisfatoriamente. De modo geral, os resultados sugerem que, com ajustes no arranjo e a aplicação de conversores DC-DC, o sistema pode atender cargas de maior potência. Vale ressaltar que a PEMFC 04 apresentou falha devido à entrada de água em sua membrana, o que reduziu o desempenho no teste com motor de 5 V.

Tabela 02: Valores obtidos na eletrólise e nos testes com diferentes cargas

Fonte: Autoria Própria.

| Procedimento: Eletrólise | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------|------|-------|-------------------------|------|-------|-------------------------------------|-------|-------|--|
| PEMWEs | E1 | E2 | E3 | E4 | E5 | E6 | E7 | E8 | E9 | |
| Tensão (V) | 2,16 | 2,37 | 2,85 | 2,03 | 1,95 | 2,48 | 2,36 | 2,27 | 2,54 | |
| Corrente (A) | 0,88 | | | | | 1,35 | | | | |
| Potência (W) | 1,90 | 2,08 | 2,50 | 1,78 | 1,71 | 3,34 | 3,18 | 3,06 | 3,42 | |
| Tempo de eletrólise (s) | 281 | | | 215 | | | | 208 | 195 | |
| Energia (W x min) | 8,90 | 9,76 | 11,74 | 8,36 | 8,03 | 11,99 | 11,41 | 10,62 | 11,14 | |
| Procedimento: Um motor 5V como carga | | | | | | | | | | |
| PEMFCs | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | |
| Tensão (V) | 0,66 | 0,62 | 0,71 | 0,27 | 0,74 | 0,61 | 0,63 | 0,71 | 0,63 | |
| VALORES TOTAIS: | Tensão total: 5,58V - 5,61V | | | Corrente total: 30mA | | | Potência total das PEMFCs: 0,16W | | | |
| Procedimento: Dois motores 5V como carga | | | | | | | | | | |
| PEMFCs | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 | C6 | C7 | C8 | C9 | |
| Tensão (V) | 0,71 | 0,72 | 0,74 | 0,45 | 0,75 | 0,69 | 0,69 | 0,74 | 0,7 | |

| | | | |
|---|-------------------------|----------------------------|-------------------------------------|
| VALORES TOTAIS: | Tensão total: 6,21 V | Corrente total: 18,8 mA | Potência total das PEMFCs: 0,11W |
| Procedimento: Lâmpada de 4V/40mA como carga | | | |
| VALORES TOTAIS: | Tensão total: 5,98 V | Corrente total: 46,6 mA | Potência total das PEMFCs: 0,27W |

Experimento 02: Associação em série de sistemas de geração de energia por hidrogênio. (Sistema de eletrolisadores alimentados pela painéis solares)

Durante o período de maior incidência solar, por volta do meio-dia, o conjunto de painéis foi colocado em funcionamento e apresentou desempenho acima do esperado, alcançando valores superiores a 20 V, variando em torno de 22 V e chegando a picos de 24 V. Ao incluir o potenciômetro no circuito, a tensão permaneceu estável, entre 17 V e 23 V, sem quedas significativas em relação ao previsto. Posteriormente, o potenciômetro foi substituído pelo arranjo em série de nove eletrolisadores. Ainda com forte irradiação, os painéis solares foram capazes de fornecer a tensão adequada para que cada eletrolisador operasse de forma satisfatória, recebendo valores médios entre 1,73 V e 2,5 V. Nesse cenário, a entrada do sistema foi registrada em aproximadamente 18 V, 600 mA e 10,8 W, parâmetros que se mantiveram dentro do estimado. Com essas condições, a produção de hidrogênio ocorreu de maneira estável e eficiente. O tempo necessário para o preenchimento dos reservatórios foi de cerca de 8 a 9 minutos e meio para atingir 30 cm³, com exceção dos dias e horários em que havia nuvens cobrindo o Sol. Após a eletrólise, o hidrogênio e o oxigênio produzidos foram liberados às células a combustível, onde foram realizadas as medições subsequentes. Os resultados se mostraram semelhantes aos obtidos anteriormente, tanto em circuito aberto quanto nos testes com motores e uma lâmpada de 4 V/40 mA.

Experimento 03: Controlador baseado em ESP32 para uma estação de energia híbrida solar-hidrogênio.

Com base nos dados de temperatura e irradiância apresentados, é possível observar que a produção de hidrogênio via eletrolisadores alimentados por painéis solares é fortemente dependente da disponibilidade de radiação solar. Os períodos de maior irradiância, entre 08:34 e 12:34, coincidem com temperaturas mais elevadas, indicando condições ideais para o fornecimento de energia elétrica contínua aos eletrolisadores. Durante esses intervalos, a geração de hidrogênio tende a ser mais eficiente, pois a potência elétrica fornecida pelos painéis solares é suficiente para manter a eletrólise em níveis estáveis.

Nota-se uma queda razoável na irradiação solar próximo de 13:04 por causa de nuvens que estavam cobrindo o céu. (Conforme gráficos 01 e 02).

Já os relés controlados por Wifi foram uma aplicação para controle remoto do sistema onde garantiu a possibilidade de ligar os painéis ao sistema quando for mais adequado.

Gráfico 01: Valores obtidos na eletrólise e nos testes com diferentes cargas

Fonte: Autoria Própria.

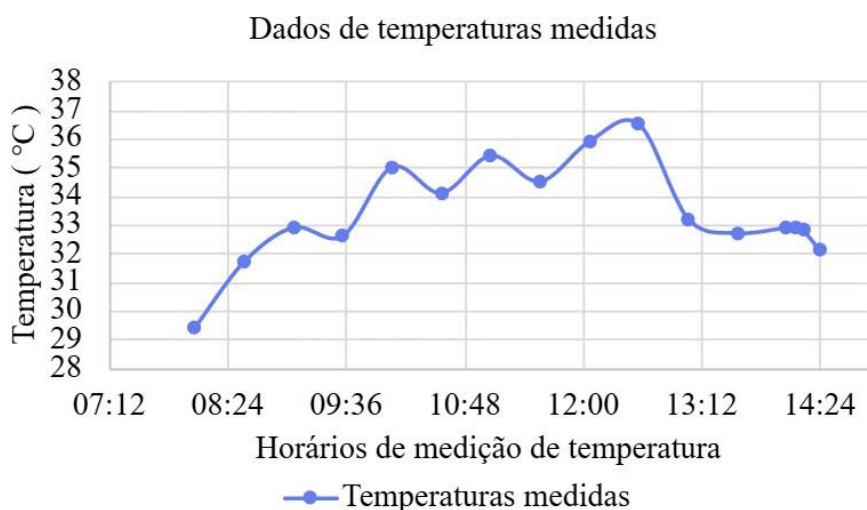


Gráfico 02: Valores obtidos na eletrólise e nos testes com diferentes cargas

Fonte: Autoria Própria.



Conclusão

A partir dos experimentos realizados, foi possível comprovar a viabilidade da associação em série de eletrolisadores para produção de hidrogênio, tanto com alimentação em

bancada quanto com energia solar. Durante os processos experimentais, em que se aplicaram os 30 cm³ de hidrogênio gerados pelos eletrolisadores PEM (PEMWEs) nas células a combustível PEM (PEMFCs) submetidas às mesmas cargas, o desempenho elétrico apresentou-se equivalente, mantendo a mesma potência de saída. Esses resultados evidenciam que a integração entre a produção de hidrogênio por eletrolisadores e sua conversão direta em eletricidade por células a combustível pode ser realizada de forma eficiente, independentemente da fonte de energia utilizada para a eletrólise. Além disso, a integração de sensores e relés no sistema foi fundamental para o monitoramento e controle das condições operacionais, garantindo estabilidade na maior parte dos experimentos.

Agradecimentos

Ao IFMA e FAPEMA pelo apoio institucional e financeiro. Ao professor orientador Fábio Henrique Sales pela valiosa orientação. Aos voluntários bolsistas João Vitor D. de Jesus e Jonatas Guilherme G. dos Santos pela indispensável assistência técnica. A todos, nosso profundo reconhecimento pelo suporte neste projeto.

Referências

IEA – International Energy Agency. *The Future of Hydrogen*. Paris: IEA, 2019.