



**Universidade Federal de Campina Grande**

**Centro de Ciências e Tecnologia**

**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química**

**Produção de energia elétrica a partir de um sistema integrado que utiliza  
hidrogênio como combustível**

**Jonas Santana Albuquerque**

**Campina Grande – PB**

**Outubro de 2019**

**Jonas Santana Albuquerque**

**Produção de energia elétrica a partir de um sistema integrado que utiliza  
hidrogênio como combustível**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito necessário para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

**Orientador:** Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos

**Campina Grande – PB**

**Outubro de 2019**

A345p

Albuquerque, Jonas Santana.

Produção de energia elétrica a partir de um sistema integrado que utiliza hidrogênio como combustível / Jonas Santana Albuquerque. – Campina Grande, 2019.

97 f.: il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2019.

"Orientação: Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos".

Referências.

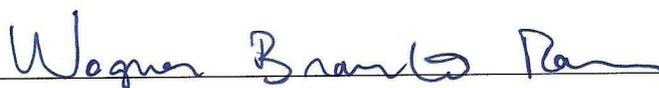
1. Energia Elétrica - Produção. 2. Hidrogênio. 3. Eletrólise. 4. Célula Combustível. I. Ramos, Wagner Brandão. II. Título.

CDU 621.311:661.96(043)

**Produção de energia elétrica a partir de um sistema integrado que utiliza hidrogênio  
como combustível**

**Dissertação aprovada em: 09 de outubro de 2019**

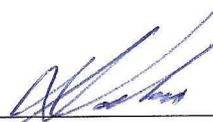
**Banca Examinadora:**



**Prof. Dr. Wagner Brandão Ramos (UAEQ/CCT/UFCG)**  
Orientador



**Prof. Dr. Luis Gonzaga Sales Vasconcelos (UAEQ/CCT/UFCG)**  
Examinador Interno



**Prof. Dr. Antônio Carlos Sales Vasconcelos (DE/IFMA)**  
Examinador Externo

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus pelo dom da existência, por sempre estar presente no meu dia a dia, amparando-me nos momentos de dificuldade e guiando toda a minha trajetória de vida.

Ao meu Pai, João Albuquerque, a quem sempre tive maior admiração pelo homem que é, por todos os ensinamentos e por sempre acreditar na minha capacidade.

À minha mãe, Francisca Santana, pelo seu amor incondicional, paciência nos momentos de maior dificuldade e esforço atribuído em buscar sempre o melhor para minha vida.

Aos amigos, Rodrigo, Josinadja e Lucas pela companhia e apoio no dia a dia.

Aos professores, Wagner (orientador) e Antônio Carlos, por todas as contribuições, direcionamento e confiança na minha capacidade para a realização desta Pesquisa.

Ao Laboratório de Fontes Renováveis (LABFREN) e coordenadores associados, onde executei minha Pesquisa durante o Mestrado.

Aos integrantes do LABFREN, Deyvisson, Ricardo, Mateus e Josué, que estiveram juntos nessa caminhada executando testes e discussões acerca da Pesquisa.

Aos professores, Antônio Carlos e Luis Gonzaga, pela disponibilidade de fazerem parte como avaliadores dessa etapa final, contribuindo com correções e um melhor aperfeiçoamento do trabalho.

Por fim, a todos aqueles que de alguma forma estiveram ou estão próximos a mim, fazendo com que cada momento seja uma aprendizagem.

*“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor,  
a eletricidade e a energia atômica: a vontade”.*

*Albert Einstein*

ALBUQUERQUE, J. S. **Produção de energia elétrica a partir de um sistema integrado que utiliza hidrogênio como combustível**. 2019. 97 p. Mestrado em Engenharia Química. Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.

## RESUMO

---

Atualmente, a eletricidade produzida mundialmente advém, em sua maior parte, de combustíveis fósseis que são processados e queimados, liberando grandes quantidades de poluentes ao meio ambiente. Neste cenário, o hidrogênio enquadra-se como uma alternativa autossustentável na matriz energética mundial. A produção de hidrogênio por meio da eletrólise da água utilizando a tecnologia PEM (*Proton Exchange Membrane*) tem sido explorada devido à operação flexível, geração de densidade de potenciais maiores quando comparada a outros tipos de eletrolisadores, hidrogênio com alta pureza e ausência de resíduos poluentes. Propõe-se, no presente trabalho, avaliar os parâmetros operacionais e econômicos de um sistema integrado de produção de energia elétrica utilizando hidrogênio eletrolítico. O sistema integrado é composto por dois blocos: um referente à produção de hidrogênio e outro referente à produção de energia elétrica. Como principais resultados obteve-se curvas características com perfil semelhante ao das curvas do manual do fabricante e identificação das perdas por ativação e das perdas ôhmicas na curva de polarização. A vazão real de produção de hidrogênio alcançou 59,5% de sua capacidade máxima, evidenciando que houve uma diminuição na eficiência do eletrolisador. A geração de 0,7 kW de potência nominal na célula combustível, durante 1 hora de funcionamento, consumiu em torno de 723 L de hidrogênio. Os custos de produção de hidrogênio utilizando energia elétrica da concessionária estão na faixa de 3,33 a 4,52 US\$/kWh. A operação diária de 21 h/dia é a mais vantajosa por possuir os menores custos de produção de hidrogênio dentre as demais. O período de amortização foi de aproximadamente 7 anos para o eletrolisador com tecnologia PEM. Os valores de consumo e produção de energia elétrica apresentam uma significativa diferença em valores monetários, mesmo considerando a geração de energia elétrica para consumo na faixa de horários de maior valor na tarifa da concessionária.

**Palavras-Chave:** hidrogênio, eletrólise, célula combustível, energia elétrica.

ALBUQUERQUE, J. S. **Electricity production from an integrated system that uses hydrogen as fuel.** 2019. 97 p. Master in Chemical Engineering. Federal University of Campina Grande, Campina Grande, PB.

## ABSTRACT

---

Currently, electricity produced worldwide comes mostly from fossil fuels that are processed and burned, releasing large amounts of pollutants. In this approach, hydrogen fits as a self-sustaining alternative in the world energy matrix. Hydrogen production by electrolysis of water using Proton Exchange Membrane (PEM) technology has been exploited due to the flexible operation, higher potential density generation compared to other types of electrolyzers, hydrogen with high purity and absence of pollutant residues. It is proposed, in this work, to evaluate the operational and economic parameters of an integrated system of electricity production using electrolytic hydrogen. The integrated system consists of two blocks: one related to hydrogen production and the other related to the production of electricity. The main results obtained show characteristic curves with a profile similar to the curves of the manufacturer's manual and identification of activation losses and ohmic losses in the polarization curve. Real hydrogen production reached 59.5% of its maximum capacity, showing that there was a decrease in the efficiency of the electrolyzer. Fuel cell power generation of 0.7 kW during 1 hour of operation consumed around 723 L of hydrogen. Hydrogen production costs using hydroelectric power are in the range of 3.33 to 4.52 US\$/kWh, showing a high cost. The daily operation of 21 h/day is the most advantageous because it has the lowest hydrogen production costs among the others. The amortization period was approximately 7 years for the electrolyzer with PEM technology. The consumption and production values of electricity present a significant difference in monetary values, even considering the electricity generation for consumption in the time range of higher value in the energy tariff.

**Keywords:** hydrogen, electrolysis, fuel cell, electricity.

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Propriedades de combustíveis convencionais e alternativos .....	27
<b>Tabela 2</b> - Tipos de células combustíveis e suas características .....	36
<b>Tabela 3</b> - Parâmetros para a curva de polarização .....	48
<b>Tabela 4</b> - Parâmetros econômicos .....	65
<b>Tabela 5</b> - Valores de investimento e potência elétrica dos equipamentos do sistema integrado de produção de energia elétrica .....	66
<b>Tabela 6</b> - Vazão real e ideal de hidrogênio consumido .....	73
<b>Tabela 7</b> - Parâmetros de operação da célula combustível com a inserção do inversor <i>grid-tie</i> durante 1 h de operação .....	77
<b>Tabela 8</b> - Consumo de energia elétrica .....	83
<b>Tabela 9</b> - Produção de energia elétrica .....	83

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro 1</b> - Classificação das fontes energéticas .....	20
<b>Quadro 2</b> - Principais vantagens e desvantagens do uso de fontes energéticas .....	23
<b>Quadro 3</b> - Vantagens e desvantagens dos processos de produção de hidrogênio .....	29
<b>Quadro 4</b> - Vantagens e desvantagens das células combustíveis .....	37

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Principais processos de produção de hidrogênio .....	28
<b>Figura 2</b> - Sistema básico para eletrólise da água .....	31
<b>Figura 3</b> - Esquema de um reator eletrolítico PEMEC .....	32
<b>Figura 4</b> - Princípio de funcionamento de uma célula combustível .....	35
<b>Figura 5</b> - Vista de uma célula PEMFC unitária .....	38
<b>Figura 6</b> - Estrutura do Nafion <sup>®</sup> .....	39
<b>Figura 7</b> - Esquema de uma célula combustível do tipo PEMFC .....	40
<b>Figura 8</b> - Perdas da célula combustível em função da densidade de corrente .....	45
<b>Figura 9</b> - Sistema de geração de energia elétrica utilizado na Pesquisa .....	55
<b>Figura 10</b> - Curva de tensão versus corrente da célula combustível FCS - c3000 .....	58
<b>Figura 11</b> - Curva de potência versus corrente da célula combustível FCS - c3000 .....	59
<b>Figura 12</b> - Curva de consumo de H <sub>2</sub> versus potência da célula combustível FCS - c3000 .....	59
<b>Figura 13</b> - Meta para a taxa SELIC .....	63
<b>Figura 14</b> - Curva característica tensão versus corrente .....	68
<b>Figura 15</b> - Curva característica potência versus corrente .....	69
<b>Figura 16</b> - Curva característica de consumo de hidrogênio versus potência .....	70
<b>Figura 17</b> - Curva característica de consumo de oxigênio versus potência .....	70
<b>Figura 18</b> - Perdas da célula combustível em função da corrente .....	71
<b>Figura 19</b> - Vazão de produção de hidrogênio .....	72
<b>Figura 20</b> - Consumo de hidrogênio .....	74
<b>Figura 21</b> - Produção e consumo de hidrogênio simultaneamente .....	75
<b>Figura 22</b> - Eficiência operacional versus tensão operacional .....	76
<b>Figura 23</b> - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise em função do custo de energia hidrelétrica para diferentes taxas de juros .....	78
<b>Figura 24</b> - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise em função da taxa anual de juros para diferentes tempos de operação .....	80
<b>Figura 25</b> - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise em função do período de amortização para diferentes valores de eletricidade.....	81
<b>Figura 26</b> - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise em função do período de amortização para diferentes tempos de operação.....	82

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- AFC** - Célula combustível alcalina (*Alkaline Fuel Cell*);
- CAGEPA** - Companhia de Água e Esgotos da Paraíba;
- DEE** - Departamento de Engenharia Elétrica;
- DEQ** - Departamento de Engenharia Química;
- DMFC** - Célula combustível de metanol direto (*Direct Metanol Fuel Cell*);
- EPE** - Empresa de Pesquisa Energética;
- GC** - Gás comprimido;
- GEE** - Gases do Efeito Estufa;
- GNC** - Gás natural comprimido;
- HHV** - *Higher heating value*;
- IEA** - *International Energy Agency*;
- LABFREN** - Laboratório de Fontes Renováveis de Energia;
- LHV** - *Lower heating value*;
- MCFC** - Célula combustível de carbonato fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell*);
- MEA** - *Membrane Electrode Assembly*;
- NREL** - *National Renewable Energy Laboratory*;
- PAFC** - Célula combustível de ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell*);
- PEM** - *Proton Exchange Membrane*;
- PEMEC** - *Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell*;
- PEMFC** - Célula combustível de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*);
- PEMFC** - *Proton Exchange Membrane Fuel Cell*;
- PTFE** - Politetrafluoretileno;
- SELIC** - Sistema Especial de Liquidação e de Custódia;
- SFV** - Sistemas Fotovoltaicos;
- SOFC** - Célula combustível de óxido sólido (*Solid Oxid Fuel Cell*);
- UFCG** - Universidade Federal de Campina Grande.

## SUMÁRIO

<b>1.INTRODUÇÃO</b>	13
1.1 Contextualização	13
1.2 Justificativa e Relevância da Pesquisa	15
1.3 Objetivos	16
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	17
2.1 Evolução energética ao longo da história	17
2.2 Fontes não renováveis versus fontes renováveis	19
2.3 Hidrogênio	26
2.3.1 Propriedades e teor energético	26
2.3.2 Processos de produção de hidrogênio	28
2.3.3 Eletrólise	31
2.4 Armazenamento de hidrogênio	33
2.5 Célula Combustível	33
2.5.1 Tipos de células combustíveis	35
2.5.2 Componentes e funcionamento de uma PEMFC	38
2.5.3 Fundamentos termodinâmicos da célula combustível	41
2.5.4 Curva de polarização de uma PEMFC e suas perdas	45
2.5.5 Consumo de combustível e eficiência da PEMFC	49
2.5.6 Trabalhos desenvolvidos acerca do tema	52
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	54
3.1 Equipamentos e acessórios	54
3.2 Metodologias	54
3.2.1 Análise operacional do sistema integrado	55
3.2.2 Parâmetros operacionais	58
3.2.3 Produção e consumo de hidrogênio	60
3.2.4 Inserção do inversor <i>grid-tie</i> no sistema integrado	60
3.2.5 Análise econômica da produção de hidrogênio	60
3.2.6 Custo de energia elétrica no sistema integrado	66
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	68
4.1 Curvas características	68
4.2 Vazão de produção e consumo de hidrogênio	72

4.2.1 Produção e consumo de hidrogênio simultaneamente .....	75
4.3 Eficiências .....	76
4.4 Análise da inserção do inversor no sistema integrado .....	77
4.5 Análise econômica da produção de hidrogênio .....	78
4.6 Análise de custo de energia elétrica no sistema integrado.....	83
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>85</b>
<b>6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>86</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>87</b>

## 1. INTRODUÇÃO

---

### 1.1 Contextualização

O planeta Terra em 2016 consumia 24.973 trilhões de watts ou 24.973 terawatts-hora equivalentes em uma taxa contínua. Associado ao aumento populacional, o crescimento econômico e o desenvolvimento tecnológico, projeta-se, para o ano de 2050 vinte por cento a mais de demanda energética (30 TW) e quase o dobro ao final do século (46 TW) (IEA, 2017).

Os combustíveis fósseis continuam sendo a principal fonte de geração de energia, no entanto, na última década vêm sofrendo um declínio acentuado. Isso por causa do efeito nocivo que têm sobre o ambiente, principalmente na destruição da camada de ozônio, o qual ocasiona as diversas mudanças climáticas e alterações ambientais em todo o planeta. Além disso, os preços dos combustíveis fósseis são instáveis e variam de tempos em tempos. Avaliando no meio político, regiões onde há grandes reservas de petróleo, ocorreram graves conflitos pelo seu domínio que ocasionaram à perda de vidas e propriedades. Todas estas questões são razões para que seja considerado a inserção das formas alternativas de geração de energia (TABBI WILBERFORCE *et al.*, 2016).

Neste cenário é crucial que ocorra uma transição dos sistemas energéticos a base de combustíveis fósseis para sistemas baseados em energias renováveis, pois assim é possível combater as mudanças climáticas causadas pelas emissões dos gases originados da queima desses combustíveis. A utilização de hidrogênio renovável é uma possível solução para esse problema (KLEIJN e VOET, 2010).

A produção de hidrogênio pela maioria das tecnologias existentes implica no uso substancial de combustíveis fósseis, o que se associa à emissão de CO<sub>2</sub> (ABBASI; ABBASI, 2010). Segundo Suleman *et al.* (2015), 48% do hidrogênio são obtidos pelo gás natural, 30% pela indústria do petróleo, 18% pela gaseificação do carvão, 3,9% pela eletrólise e 0,1% por outros processos. A produção por fontes não renováveis é mais viável economicamente, porém não elimina a dependência dos combustíveis fósseis e ainda há a emissão de gases de efeito estufa no decorrer do processo produtivo. Já a produção de hidrogênio por fontes renováveis pode reduzir significativamente os impactos ambientais (PALHARES, 2016).

Um dos métodos de obtenção do hidrogênio mais limpo é a eletrólise da água, que consiste na dissociação das moléculas da água em seus elementos constituintes, hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ), com a utilização da eletricidade (CEMIG, 2012). Este é um processo considerado interessante, principalmente para os países com grande potencial hídrico, como é o caso do Brasil (GODOY, 2008). A eletrólise da água combinada com fontes de energias renováveis, como a hidráulica, eólica e solar fotovoltaica, é considerada uma forma limpa e sustentável de produção de hidrogênio (ZENG e ZHANG, 2010).

Ngoh e Njomo (2012) consideram a energia solar a melhor alternativa para produção de hidrogênio como uma energia autossustentável, tendo em vista que ela é a fonte mais abundante de energia renovável. No entanto, um dos maiores problemas para a utilização de energia solar é seu armazenamento, sendo necessário a utilização de grandes baterias para o fornecimento de energia durante a noite, com o tempo, estas mesmas baterias precisam ser descartadas o que pode vir a ser outro meio de poluição. A utilização do hidrogênio para a produção de energia a noite torna a presença das baterias desnecessária diminuindo o espaço de processo e eliminando a poluição indireta, já que praticamente não há produção de resíduos com esse tipo de produção de energia.

A proposta de se estabelecer em larga escala sistemas energéticos baseados no hidrogênio requer a utilização de sistemas conversores, como as células combustíveis, que sejam capazes de promover a transformação da energia química armazenada nesse vetor em outras formas úteis de energia, com destaque especial na obtenção da energia elétrica (RIFKIN, 2003).

Nos últimos anos há uma tendência mundial na utilização do hidrogênio como alternativa aos combustíveis fósseis com o uso de células combustíveis associados a motores elétricos em veículos automotores. Contudo, o uso deste importante vetor energético não se restringe ao campo dos meios de transporte. O hidrogênio e as células combustíveis têm se mostrado muito aplicáveis na geração distribuída de energia elétrica, principalmente, em associação com outras fontes, solar e eólica (BERNARDI JUNIOR, 2009).

Os parâmetros operacionais e econômicos de um sistema integrado constituído por um bloco de produção de hidrogênio e um bloco de geração de eletricidade demonstram sua relevância a partir do momento em que fornecem bases e limites teóricos para o funcionamento e a compreensão do sistema. A eficiência, as curvas características e a vazão real de hidrogênio produzido e consumido nos dão ideia e embasamento de como o processo está caminhando. Por outro lado, os parâmetros econômicos mostram a viabilidade do projeto a partir do ganho de eletricidade gerada pela célula combustível e dos custos de produção de

hidrogênio pelo eletrolisador, considerando neste último caso, a análise de parâmetros de investimento, operação diária, período de amortização e *payback*.

## 1.2 Justificativa e Relevância da Pesquisa

No cenário energético atual, o petróleo ainda continua sendo a principal fonte não-renovável para a obtenção de produtos químicos e combustíveis líquidos, mas a sua utilização não é sustentável do ponto de vista ambiental, pois a queima desses combustíveis gera poluição que prejudica tanto a saúde humana quanto o meio ambiente e as diversas formas de vida existentes. Devido aos crescentes preços do petróleo, legislações ambientais cada vez mais rigorosas com a liberação de gases e resíduos ao meio ambiente, maior complexidade no processo de refino e o crescimento da demanda energética mundial, faz-se necessário a inserção de fontes energéticas que o substituam, entre as quais podem ser citadas: gás natural, biocombustíveis, combustíveis sintéticos e hidrogênio.

O hidrogênio é um combustível limpo, com alto poder calorífico superior e apresenta apenas água como produto de sua combustão. A eletrólise da água é um processo relativamente simples para produção de hidrogênio e, quando realizada por fontes de energia renováveis, como a hidrelétrica, a eólica e a solar fotovoltaica, é considerada um processo sustentável e vantajoso.

Associado a produção de hidrogênio está a geração de energia elétrica, logo, as células combustíveis inserem-se como uma alternativa promissora para a produção de eletricidade, pois estes dispositivos utilizam o hidrogênio e o oxigênio para gerar eletricidade e vapor d'água resultante do processo eletroquímico na célula combustível.

O sistema integrado proposto para esta Pesquisa conta com a ausência de baterias armazenadoras de energia elétrica, como as que são utilizadas em sistemas de painéis fotovoltaicos para suprimento em horários com baixa ou ausência de radiação solar. Neste caso, a energia química é armazenada na forma de hidrogênio eletrolítico, que posteriormente é convertido em energia elétrica nos horários noturnos de maior pico de consumo ou maior valor na tarifa da concessionária elétrica. Além disso, este sistema integrado de geração de energia é pouco explorado na literatura, principalmente quando se avalia sua viabilidade a partir de parâmetros operacionais e econômicos.

### 1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar os parâmetros operacionais e econômicos de um sistema integrado que utiliza hidrogênio eletrolítico para geração de energia elétrica.

Este trabalho tem como objetivos específicos:

- Análise da eficiência operacional, eficiência máxima e curvas características da célula combustível, as quais descrevem o seu correto funcionamento;
- Avaliação das perdas por polarização na célula combustível e suas respectivas regiões;
- Determinação da vazão de hidrogênio real produzido pelo eletrolisador e consumido pela célula combustível, a partir de medições utilizando fluxômetro, e comparando-os com valores ideais e teóricos;
- Análise de parâmetros econômicos na produção de hidrogênio em um reator eletrolítico PEMEC, avaliando o custo de produção de hidrogênio para diferentes taxas de juros, tempos de operação diário, preços de eletricidade para acionamento do eletrolisador e período de amortização;
- Avaliação da viabilidade do sistema integrado a partir da quantificação do custo de eletricidade consumida para produção de hidrogênio pelo eletrolisador e do ganho de eletricidade produzido pela célula combustível.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

---

### 2.1 Evolução energética ao longo da história

Avaliando a linha do tempo da criação da humanidade e suas necessidades, a aproximadamente um milhão de anos atrás, as necessidades do homem primitivo eram relativamente poucas e relacionavam-se intrinsecamente à sua sobrevivência. Há 7 mil anos o homem dominava a energia de animais de tração. Para o homem nômade primitivo, os recursos naturais eram aqueles que estavam diretamente ao seu alcance. Com o tempo, dominou o fogo e passou a cortar lenha para se aquecer e cozinhar. Com o aumento da população, aproximadamente a mais de 7 mil anos atrás, foi necessário aumentar a produtividade na obtenção dos recursos através da agricultura (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

O aparecimento de grandes civilizações no mundo antigo (cerca de 4000 a.C.) representou um grande marco no aproveitamento energético. Esses povos apropriaram-se de solos férteis no oeste e sudoeste da Ásia e em vales aluviais como o Indu, Tigre, Eufrates e Nilo e utilizaram a energia dos conversores vegetais, ao desenvolver a técnica da cultura irrigada de cereais. A civilização egípcia construiu bacias de retenção para estender as terras inundáveis, a mesopotâmica desenvolveu carros de combate, carroças agrícolas, diques e canais para a navegação. Destaca-se, também, o uso de um grande número de escravos como força motriz nas sociedades egípcia e romana. Outro exemplo do avanço do uso da energia na antiguidade é a utilização do vento como conversor energético, através da navegação com barcos à vela no antigo império (HÉMERY; BEBIER; DELÉAGE, 1993).

Grandes transformações no uso da energia aconteceram com as primeiras descobertas de cientistas a partir da Idade Média. O desenvolvimento de áreas como a matemática, a geometria e a engenharia catalisaram o domínio e a transformação das formas de energia disponíveis na natureza (FARIAS e SELLITTO, 2011).

Avançando mais no tempo, no começo da Idade Moderna (1400 d.C.), o homem passou a utilizar as quedas d'água e os ventos para moer trigo e realizar outras tarefas agrícolas. A energia de origem fóssil também era utilizada, mas com baixa intensidade: carvão mineral que aflorava da terra aquecia ambientes e fornecia calor para pequenas manufaturas, como a

siderurgia. O petróleo também aflorava, mas era praticamente desconhecido: era utilizado na iluminação quando o óleo de baleia se tornava escasso (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

A revolução industrial do século XIX estabeleceu uma matriz energética baseada nos combustíveis fósseis: o carvão mineral e, posteriormente, o petróleo (ROSSATO, 2013). Segundo Amaral (2010), o carvão mineral foi o primeiro desses combustíveis utilizado em grande escala, ao substituir a lenha e ser usado na combustão direta para a produção de vapor nas máquinas de Watt. O ano de 1859 é considerado o marco zero da industrialização do petróleo, quando Edwin Drake descobriu petróleo a uma profundidade de 21 metros em Titusville, nos EUA. Até então, o petróleo aproveitado era o que aflorava na superfície, o que era possível devido a sua característica de constante movimentação no subsolo, no caso de não encontrar formações rochosas. O petróleo é outro combustível fóssil, de provável origem de restos de vida aquática animal acumulados no fundo de oceanos primitivos e cobertos por sedimentos (*apud* FARIAS e SELLITTO, 2011).

Com a Revolução Industrial de 1875 o homem desenvolveu a máquina a vapor e multiplicou ainda mais suas capacidades na indústria e no transporte. A população cresceu e, em paralelo, o consumo de energia. No século XX, o homem tecnológico aprimorou a máquina a vapor e desenvolveu motores de combustão interna movidos a gasolina e diesel, que são derivados do petróleo. Vieram mais tarde os motores elétricos e a energia nuclear, e a partir daí, o mundo nunca mais rompeu sua relação de dependência com o petróleo (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

Juntamente com o petróleo, o domínio do fenômeno da eletricidade ampliou o número de usos finais de energia. A primeira aplicação da eletricidade se deu no campo das comunicações, com o telégrafo e o telefone elétrico. Em 1882, Thomas Edison construiu as primeiras usinas geradoras em corrente contínua, para o atendimento de sistemas de iluminação. Em 1886, foi feita a primeira transmissão de energia elétrica em corrente alternada por George Westinghouse; o uso da corrente alternada e dos sistemas polifásicos desenvolvidos por Nikola Tesla, em conjunto com o transformador eficiente de Willian Stanley, proporcionaram a transmissão a grandes distâncias e o uso doméstico da energia elétrica. Sua facilidade de transporte e de conversão direta, em qualquer outro tipo de energia, conferiram a energia elétrica o posto de principal insumo da presente Era. A produção de eletricidade é responsável por aproximadamente um terço do consumo de energia primária mundial (WALTER, 2010).

A energia elétrica é uma forma de energia secundária, obtida a partir de diferentes fontes de energia primárias (combustíveis fósseis e energias renováveis), capaz de entregar

aos usuários finais energia através de extensas redes de distribuição. Ao longo das últimas décadas, a matriz energética de produção de energia elétrica tem-se diversificado de forma intensiva, como resposta ao aumento dos níveis de consumo (WALTER, 2010).

A energia é um subsídio fundamental para as atividades humanas e utilizada em diferentes territórios e espacialidades geográficas. Cada país possui uma matriz energética específica que está diretamente associada com a disponibilidade dos recursos energéticos em seu território. Pode-se destacar que o potencial energético depende dos recursos naturais disponíveis bem como o conhecimento sobre eles, da mesma forma, um país deve ter conhecimento para o aproveitamento e a recuperação dos recursos (RAMPINELLI, 2012).

## **2.2 Fontes não renováveis versus fontes renováveis**

Dentre as fontes energéticas convencionais disponíveis, a dos combustíveis fósseis, a energia nuclear, o gás natural e o carvão mineral são consideradas não renováveis, pois os processos de sua utilização são irreversíveis e geram resíduos poluentes ao meio ambiente (GALDINO *et al.*, 2000).

O aumento da quantidade de gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera devido a queima contínua de combustíveis fósseis, representam uma séria ameaça para o ambiente global e consequente mudanças climáticas (HITES, 2006). Além disso, a crescente demanda de energia impôs o aumento dos preços dos combustíveis convencionais, expondo as economias nacionais que dependem de suas importações (LUND, 2007; BLOCK, 2005; LIOR, 2002; CONTE *et al.*, 2001). Na medida em que ocorre o aumento da exploração de petróleo, sua disponibilidade diminuirá acarretando em um aumento dos preços devido ao mercado internacional, fazendo com que futuramente sejam apresentados preços impraticáveis do valor do petróleo na obtenção de combustível (KNOB, 2013). São discutidas medidas mitigadoras, tais como a taxaço de emissões de carbono e a utilização de recursos energéticos renováveis em grande escala (GALDINO *et al.*, 2000).

Em contrapartida às fontes convencionais, a energia renovável é a energia que, diferente das energias provenientes dos combustíveis fósseis, tem um ciclo curto da produção à transformação, sendo esta originada direta ou indiretamente do sol (SANTOS, 2013). São consideradas fontes renováveis: potenciais hidráulicos (quedas d'água), eólicos (ventos), a energia das marés e das ondas, a radiação solar, o calor do centro da Terra (geotermal) e a

biomassa), pois não consomem combustíveis e não produzem resíduos prejudiciais, e, quando bem planejadas, não geram consequências para o meio ambiente (GOLDEMBERG e LUCON, 2007). Assim, as fontes de energia podem ser classificadas conforme o Quadro 1.

**Quadro 1** - Classificação das fontes energéticas.

Fontes		Energia primária	Energia Secundária	
Não renováveis	Fósseis	Carvão mineral	Termoeletricidade, calor, combustível para transporte	
		Petróleo e derivados		
		Gás natural		
	Nuclear	Materiais físséis	Termoeletricidade, calor	
Renováveis	Tradicionais	Biomassa primitiva: lenha de desmatamento	Calor	
	Convencionais	Potenciais hidráulicos de médio e grande porte	Hidroeletricidade	
	Novas	Outros	Biomassa moderna: lenha reflorestada, culturas energéticas (cana-de-açúcar, óleos vegetais)	Biocombustíveis (etanol, biodiesel), termoeletricidade, calor
			Energia solar	Calor, eletricidade fotovoltaica
			Geotérmica	Calor e eletricidade
Eólica			Eletricidade	
Maremotriz e das ondas				

Fonte: Adaptado de GOLDEMBERG e LUCON, 2007.

Algumas formas de conversão de energias renováveis podem ser classificadas como tradicionais, é o caso do fogão primitivo, movido a lenha. Já por sua vez, as fontes modernas subdividem-se em convencionais e novas. As convencionais são tecnologias dominadas e comercialmente disseminadas há muitas décadas, como é o caso das usinas hidrelétricas de grande e médio porte. As novas são aquelas que começam a competir comercialmente com as fontes tradicionais, renováveis ou não, é o caso dos painéis solares fotovoltaicos, dos aquecedores solares, das usinas de geração de eletricidade a partir das ondas e marés, das turbinas eólicas, das usinas geotermiais e da biomassa (GOLDEMBERG e LUCON, 2007).

De maneira geral, as fontes de energia renovável fornecem apenas uma fração da energia se comparado com as grandes centrais. Essa característica permite duas categorias de fornecimento de energia para as cargas. A primeira é que esses sistemas podem estar conectados diretamente à rede pública de distribuição de energia (*grid-tie*), e toda a energia gerada é enviada para a rede. A outra refere-se aos sistemas autônomos, ou isolados, na qual o sistema de geração fornece a energia necessária para as cargas. Havendo energia excedente, o sistema entra em um modo de limitação de potência, visto que a carga drena menos energia do que é possível de ser produzido. Do contrário, caso a demanda da carga seja maior que a oferta, cargas de menor prioridade podem ser desligadas a fim de manter as cargas críticas em operação pelo maior tempo possível (ROGGIA *et al.*, 2011).

A energia hidrelétrica é a maior fonte de eletricidade renovável do mundo, produzindo cerca de 16% da eletricidade mundial, a partir de 1200 GW de capacidade instalada. Até o ano de 2050, a energia hidrelétrica deve aproximadamente dobrar sua contribuição, alcançando 2000 GW de capacidade global e mais de 7000 TWh. Essa conquista, impulsionada principalmente pela busca por eletricidade limpa, poderia evitar emissões anuais de até 3 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> de usinas movidas a combustíveis de origem fóssil. A maior parte desse crescimento viria de grandes usinas com economias emergentes e países em desenvolvimento. Espera-se que a energia hidrelétrica permaneça como a maior fonte mundial de geração de eletricidade renovável até 2023, desempenhando um papel fundamental na descarbonização do sistema de energia e na melhoria da flexibilidade do sistema energético (IEA, 2018).

A matriz elétrica brasileira é predominantemente renovável, representando, aproximadamente, 82,0% da oferta interna de eletricidade no Brasil, com destaque para a geração hidráulica que corresponde a 68,1% (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA [EPE], 2017a).

A energia dos ventos pode ser explicada como sendo de origem cinética formada nas massas de ar em movimento. Seu aproveitamento é feito por meio de conversão de energia cinética de translação para energia cinética de rotação. É gerada por meio de aerogeradores. Neles, a força do vento é captada por hélices ligadas a uma turbina que aciona um gerador elétrico. É uma energia abundante, renovável e limpa. No Brasil, a primeira turbina de energia eólica foi instalada em Fernando de Noronha, Pernambuco, em 1992. Na época, a geração de energia elétrica correspondia a 10% da energia gerada e consumida na ilha. Isso economizava 70 mil litros de óleo diesel por ano (NASCIMENTO *et al.*, 2016).

A energia solar, que é obtida diretamente do sol, pode ser utilizada na forma passiva, uso mais comum na arquitetura bioclimática, e também na forma ativa, meio em que se utilizam dispositivos capazes de convertê-la diretamente em energia elétrica, a exemplo dos painéis fotovoltaicos, ou em energia térmica, através de coletores planos e concentradores (TOLMASQUIM, 2003).

Em 2017, a capacidade solar fotovoltaica acumulada atingiu quase 398 GW e gerou mais de 460 TWh, representando cerca de 2% da produção global de energia. Os projetos em escala de utilidade pública representam pouco mais de 60% da capacidade instalada total de energia fotovoltaica, sendo o restante em aplicações distribuídas (residencial, comercial e *off-grid*). Nos próximos cinco anos, a energia solar fotovoltaica deverá liderar o crescimento da capacidade de eletricidade renovável, expandindo em quase 580 GW (IEA, 2018).

De acordo com dados da IEA (2018), a energia solar poderá responder por cerca de 11% da oferta mundial de energia elétrica em 2050. A área coberta por painéis fotovoltaicos capaz de gerar essa energia é de 8000 km<sup>2</sup>, o equivalente a um quadrado de 90 km de lado, ou seja, quase uma vez e meia a área do Distrito Federal.

Como abordado no site Portal Solar (2018), o Brasil possui um grande potencial para gerar eletricidade a partir do sol, por exemplo, na região menos ensolarado no Brasil é possível gerar mais eletricidade solar do que na região mais ensolarada da Alemanha, que é um dos líderes no uso da energia fotovoltaica. Segundo o livro Atlas Brasileiro de Energia Solar, diariamente o sol incide entre 4444 Wh.m<sup>-2</sup> a 5483 Wh.m<sup>-2</sup> no País.

Por fim, resíduos de biomassa formam um enorme e inexplorado potencial de recurso energético, e apresentam muitas oportunidades de melhor utilização e estão prontamente disponíveis a custos relativamente baixos. Entre os resíduos de grande escala estão aqueles de origem agrícola, animal e resíduos sólidos urbanos (RICARDO *et al.*, 2004).

O Quadro 2 mostra as principais vantagens e desvantagens do uso de fontes renováveis e não renováveis como fontes energéticas.

**Quadro 2** - Principais vantagens e desvantagens do uso de fontes energéticas.

(continua)

<b>Fonte</b>	<b>Tipo</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>Petróleo</b>	Não renovável	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Domínio da tecnologia para sua exploração e refino;</li> <li>2. Facilidade de transporte e distribuição;</li> <li>3. Possibilidade de produzir diversos derivados;</li> <li>4. Elevado poder energético.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Polui a atmosfera com a liberação de CO<sub>2</sub>, colaborando para o efeito estufa;</li> <li>2. Devido a sua lenta renovação, ocorrerá o seu esgotamento a médio prazo;</li> <li>3. Riscos de acidentes no seu transporte;</li> <li>4. Elevada dependência mundial com desigual distribuição de fontes produtoras.</li> </ol>
<b>Nuclear</b>	Não renovável	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Não emite poluentes que contribuam para o efeito estufa;</li> <li>2. Produz elevada quantidade de energia;</li> <li>3. O custo de energia produzido é mais barato que de termelétricas, solares e eólica;</li> <li>4. É independente de condições climáticas e ambientais.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gera resíduos radioativos perigosos, com altos custos de tecnologias para tratamento;</li> <li>2. Existe risco de contaminação nuclear;</li> <li>3. A construção de usinas nucleares é cara e demorada;</li> <li>4. Necessidade de controle médico constante.</li> </ol>
<b>Carvão mineral</b>	Não renovável	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Preço relativamente baixo de extração;</li> <li>2. Alto rendimento no aquecimento de caldeiras;</li> <li>3. Alta eficiência energética;</li> <li>4. Fácil manipulação na produção de energia térmica.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. A queima do carvão libera gases como CO<sub>2</sub> e óxidos de enxofre que contribuem para o efeito estufa e formação de chuvas ácidas;</li> <li>2. Produz fuligem preta;</li> <li>3. Alto custo de transporte;</li> </ol>
<b>Gás Natural</b>	Não renovável	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ininterrupto;</li> <li>2. Pouco poluente;</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alto risco de incêndios e explosões;</li> </ol>

(continua)

		<p>3. Geralmente distribuído por gasodutos, o que diminui a dificuldade de transporte e manuseio;</p> <p>4. É um combustível relativamente barato.</p>	<p>2. Em caso de incêndio, há liberação de monóxido de carbono altamente tóxico;</p> <p>3. Por ser mais leve que o ar, o gás natural tende a se acumular nas partes mais elevadas em ambientes fechados.</p>
<b>Hidrelétrica</b>	Renovável	<p>1. A lagoa proporciona água para irrigação, navegação ou outros meios;</p> <p>2. Energia produzida de custo relativamente baixo;</p> <p>3. Não emite poluentes.</p>	<p>1. Destruição da vegetação ciliar e cultura local com a barragem;</p> <p>2. Assoreamento dos rios;</p> <p>3. Deslocamento da população ribeirinha;</p> <p>4. Depende de regiões com bastante recursos hídricos.</p>
<b>Eólica</b>	Renovável	<p>1. Inesgotável;</p> <p>2. Não emite gases poluentes;</p> <p>3. Baixo custo de manutenção.</p>	<p>1. Considerável impacto visual;</p> <p>2. Causa impacto sonoro;</p> <p>3. Pode causar morte da avifauna;</p> <p>4. É uma fonte intermitente.</p>
<b>Solar</b>	Renovável	<p>1. Inesgotável;</p> <p>2. Não emite gases poluentes;</p> <p>3. Baixo custo de manutenção;</p> <p>4. Não há custo com combustível para manter o sistema de produção de energia.</p>	<p>1. Geração de energia que oscila durante o dia;</p> <p>2. Depende da estação do ano, da quantidade de dias nublados ou chuvosos, ou mesmo de fumaça de queimadas;</p> <p>3. Baixa eficiência de armazenamento;</p> <p>4. No caso do uso de baterias, terá a manipulação de materiais tóxicos como arsênico e cádmio e a produção de lixo altamente tóxico;</p> <p>5. Os equipamentos para montagem dos sistemas são quase todos importados e seus custos ainda são muito altos.</p>

(conclui)

<b>Geotérmica</b>	Renovável	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ocupa pouco espaço geográfico;</li> <li>2. Alta eficiência energética;</li> <li>3. Pode ser utilizada em zonas de risco para habitação, devido a atividade vulcânica.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Manutenção cara;</li> <li>2. Poluição sonora;</li> <li>3. Depende de um lugar geográfico específico;</li> <li>4. Liberação de gases, odores e riscos à saúde;</li> <li>5. Desmoronamento, causado por desequilíbrio no interior da terra e acomodação de rochas.</li> </ol>
<b>Biomassa</b>	Renovável	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eliminação de resíduos diversos, diminuindo a necessidade de sua deposição em aterros;</li> <li>2. Diminuição de emissão de GEE (gás de efeito estufa);</li> <li>3. Baixo custo de aquisição.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Manejo errado dos produtos ou risco de proliferação de grandes monoculturas;</li> <li>2. Custos de investimento ou implementação altos e a produção de energia relativamente baixa;</li> <li>3. A produção pode parar, na entressafra, se não existir um estoque de combustível ou se adquirir material de outras culturas agrícolas;</li> <li>4. Emite CO<sub>2</sub>.</li> </ol>
<b>Maremotriz</b>	Renovável	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Inesgotável;</li> <li>2. Não requer material sofisticado;</li> <li>3. Independe, parcialmente, das condições climáticas.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alto custo de manutenção e instalação;</li> <li>2. Viabilidade apenas em locais com grande amplitude de maré (pelo menos 5 m) e topografia adequada (profundidade), basicamente, próxima a linha do equador;</li> <li>3. Pode gerar impactos à fauna marinha.</li> </ol>

Fonte: Adaptado do Portal Energias Renováveis (<https://www.portal-energia.com/>).

## 2.3 Hidrogênio

O hidrogênio foi inicialmente identificado pelo cientista britânico Henry Cavendish que mostrou à Sociedade Real de Londres em 1766 que havia diferentes tipos de ar: o “ar estável”, ou gás carbônico e o “ar inflamável”. Ele também demonstrou que o hidrogênio era muito mais leve do que o ar e foi o primeiro a produzir água a partir de hidrogênio e oxigênio por meio de uma faísca elétrica. O químico francês Antoine Laurent Lavoisier repetiu os experimentos de Cavendish, e depois de várias tentativas conseguiu combinar hidrogênio e oxigênio para formar água. Os seus experimentos de 1785 foram considerados definitivos em provar que o hidrogênio e o oxigênio eram os elementos básicos da água. Lavoisier foi o primeiro a consignar estes nomes para os dois elementos (PEREIRA, 2015).

### 2.3.1 Propriedades e teor energético do hidrogênio

O hidrogênio é o elemento químico mais leve, possuindo uma massa atômica de  $1,00797 \text{ g.mol}^{-1}$  e densidade de  $0,084 \text{ kg.m}^{-3}$  a 1 bar e a  $25 \text{ }^\circ\text{C}$  (MARQUES, AUGUSTO e MONTEIRO, 2004). É um dos mais abundantes do universo, correspondendo a aproximadamente 75% dos átomos presentes.

No meio terrestre o hidrogênio participa na formação de inúmeras moléculas que compõem substâncias abundantes como a água, outros compostos inorgânicos (ácidos e bases) e orgânicos (hidrocarbonetos, álcoois, hidratos, etc.) (GOMES, 2011).

Em temperatura e pressão ambiente, o hidrogênio apresenta-se na forma de um gás incolor, inodoro, insípido e muito mais leve que o ar. Em seu estado líquido, seu volume é 700 vezes menor que no seu estado gasoso, porém precisa ser armazenado sob a temperatura de  $-253 \text{ }^\circ\text{C}$ . Outra forma de diminuir seu volume é comprimindo-o quando está na forma de gás (BEZERRA FILHO, 2008).

Do ponto de vista do teor energético o hidrogênio é o melhor combustível, pois ele tem o maior conteúdo de energia por unidade de massa do que qualquer outro, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais leve da Tabela Periódica de Elementos e não possui átomos de carbono em sua estrutura. Segundo Gupta (2009) ao ser comparado com a gasolina o

hidrogênio apresenta aproximadamente o triplo de conteúdo energético por unidade de massa ( $141,6 \text{ MJ.kg}^{-1}$  versus  $47,3 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ). Na Tabela 1 encontra-se as principais propriedades do hidrogênio e dos combustíveis convencionais.

**Tabela 1** - Propriedades de combustíveis convencionais e alternativos.

<b>Propriedade</b>	<b>Gasolina</b>	<b>Diesel</b>	<b>Metanol</b>	<b>Etanol</b>	<b>GNC</b>	<b>Hidrogênio</b>
<b>Formula Química</b>	$C_5 - C_{12}$	$C_{12} - C_{20}$	$CH_3OH$	$C_2H_5OH$	$CH_4$	$H_2$
<b>Estado Físico</b>	Líquido	Líquido	Líquido	GC	GC	GC/Líquido
<b>Peso Molecular</b>	100 - 105	200 - 300	32	46	16	2
<b>Temperatura de ebulição (°C)</b>	27 - 225	190 - 345	68	78	-161	-253
<b>Temperatura de congelamento (°C)</b>	-40	-34	-97,5	-114	-183	-259
<b>LHV (<math>\text{MJ.kg}^{-1}</math>)</b>	44,5	42,5	20,1	27,0	50,0	119,9
<b>HHV (<math>\text{MJ.kg}^{-1}</math>)</b>	47,3	44,8	22,9	29,8	55,5	141,6
<b>Composição (% em massa)</b>						
<b>Carbono</b>	85 - 88	84 - 87	37,5	52,2	75	0
<b>Hidrogênio</b>	12 - 15	13 - 16	12,5	13,1	25	100
<b>Oxigênio</b>	0	0	50	34,7	0	0

Fonte: Adaptado de GUPTA, 2009.

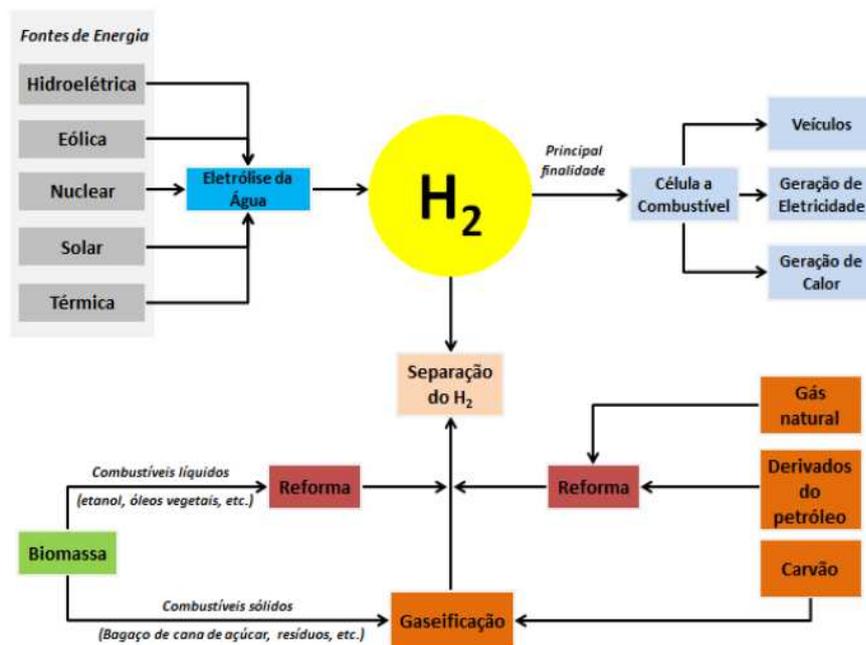
Devido a seu alto potencial energético, pureza e leveza, o hidrogênio é comumente utilizado como combustível nos programas espaciais onde o peso é um fator preponderante. O hidrogênio é o combustível ideal para uso em células combustíveis. Entretanto as infraestruturas necessárias ainda são pouco desenvolvidas, e o hidrogênio ainda é basicamente produzido a partir de fontes energéticas primárias, que em sua maioria são poluentes (SANTOS, 2013).

### 2.3.2 Processos de produção de hidrogênio

A inserção de hidrogênio no setor de energia está ocorrendo gradualmente, principalmente devido ao custo de geração de combustível. A participação de políticas públicas está facilitando a produção de hidrogênio e impactando globalmente na geração de energia renovável (McLELLAN *et al.*, 2005).

Atualmente, a produção de hidrogênio baseia-se em tecnologias que utilizam combustíveis fósseis ao longo do processo, sendo os principais métodos de produção a reforma a vapor do gás natural, a oxidação de hidrocarbonetos e a gaseificação do carvão. Além dessas tecnologias, outros métodos são propostos para produção de hidrogênio, como é o caso da eletrólise da água (BRAGA, 2015). As principais formas de produção e utilidade do hidrogênio são mostradas na Figura 1.

**Figura 1** - Principais processos de produção de hidrogênio.



Fonte: Adaptado de SILVA e CAMARGO, 2002.

A escolha do melhor método de produção do hidrogênio depende da quantidade que se quer produzir e do seu grau de pureza. As tecnologias de produção de hidrogênio necessitam

de energia de alguma forma para que se inicie o processo, por exemplo: calor, luz ou eletricidade. A energia elétrica poderá vir de fontes renováveis, tornando o processo de produção limpo (SANTOS e SANTOS, 2011). Em geral, o hidrogênio pode ser obtido por 4 diferentes tipos de processos: térmico, eletrolítico, fotolítico e bioprocessos (U.S – DE, 2015).

O Quadro 3 apresenta as principais vantagens e desvantagens do uso dos principais processos de produção de hidrogênio.

**Quadro 3** - Vantagens e desvantagens dos processos de produção de hidrogênio.

<b>Processo</b>	<b>Exemplos</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Termoquímico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Gaseificação de biomassa;</li> <li>2. Pirólise;</li> <li>3. Reforma a vapor;</li> <li>4. Oxidação parcial;</li> <li>5. Reforma autotérmica;</li> <li>6. Reforma oxidativa.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Custo relativamente baixo;</li> <li>2. Eficiente;</li> <li>3. Permite reaproveitamento energético.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Temperatura elevadas;</li> <li>2. Uso de fontes combustíveis;</li> <li>3. Recursos limitados.</li> </ol>
Eletrolítico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eletrólise;</li> <li>2. Termólise.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Elevado potencial para sinergismo com energias renováveis;</li> <li>2. Emissão zero de poluentes.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixa eficiência;</li> <li>2. Custo elevado.</li> </ol>
Fotolítico	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Processos Fotobiológicos;</li> <li>2. Processos Fotoeletroquímicos.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sistema simples;</li> <li>2. Radiação solar como fonte energética;</li> <li>3. Pode alcançar emissão zero de poluentes.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Aplicação ainda inviável em escala industrial.</li> </ol>
Bioprocessos	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Processos fotossintéticos;</li> <li>2. Processos fermentativos;</li> <li>3. Processos híbridos.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixo custo;</li> <li>2. Requer pouca energia;</li> <li>3. Versátil.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Baixo rendimento;</li> <li>2. Tempo de biorreação longo.</li> </ol>

Fonte: Adaptado de SANTOS e SANTOS, 2011.

Os processos eletrolíticos para produção de hidrogênio envolvem a utilização de energia elétrica ou térmica para promover a reação química de decomposição da molécula de água em hidrogênio e oxigênio. Os principais exemplos de processos eletrolíticos são a eletrólise da água (processo convencional) e a termólise (eletrólise a vapor). Os processos fotolíticos envolvem tecnologias que utilizam a energia da luz e seus principais exemplos são os sistemas fotobiológicos e fotoeletroquímicos. A produção de hidrogênio através de processos termoquímicos envolve basicamente a matéria-prima, de origem fóssil ou renovável, calor e catalisadores para promover as reações químicas de transformação da matéria-prima (por exemplo, etanol, gás natural, metanol, gasolina, etc.) em hidrogênio. Os principais processos termoquímicos para produção de hidrogênio são: gaseificação de biomassa e pirólise, reforma a vapor, oxidação parcial, reforma autotérmica e reforma oxidativa (BRAGA, 2010; SILVA, 2010).

Pesquisas científicas buscam encontrar maneiras de aproveitar os processos biológicos naturais que convertem e armazenam a energia da luz solar, de forma renovável, em hidrogênio. Os caminhos para a geração metabólica de hidrogênio são encontrados em microrganismos unicelulares, tais como algas verdes, cianobactérias, bactérias fotossintéticas e em algumas formas de bactérias fermentativas escuras (KNOB, 2013).

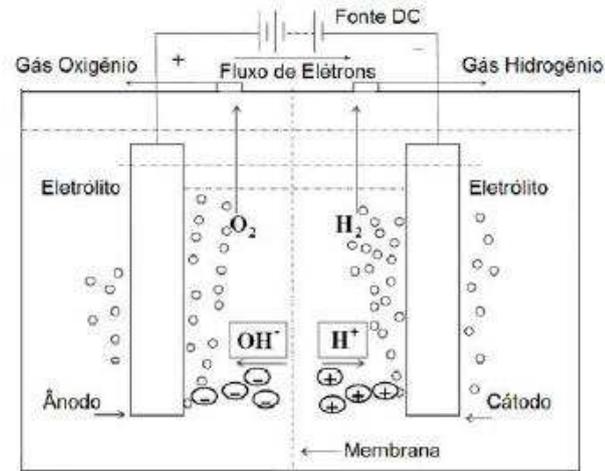
### 2.3.3 Eletrólise

A maior fonte de hidrogênio presente no planeta é a água. De todos os métodos de produção de hidrogênio a eletrólise da água possui grande destaque. É um processo eletroquímico onde ocorre a dissociação da água em hidrogênio e oxigênio moleculares (SANTOS, 2013). Com isso, a obtenção de hidrogênio e oxigênio é possível por meio da aplicação de uma corrente elétrica na água deionizada.

A corrente elétrica que flui em um sistema eletroquímico promove reações de oxidação e redução das espécies envolvidas. Um sistema eletroquímico possui, no mínimo, dois condutores eletrônicos (chamados de eletrodos) imersos em um condutor eletrolítico (eletrólito). Os eletrodos e os eletrólitos são componentes básicos nos quais ocorrem os fenômenos eletroquímicos, podendo participar ou não das reações químicas (TICIANELLI; GONZALEZ, 2005).

A Figura 2 apresenta um esquema que ilustra um sistema básico para eletrólise da água.

**Figura 2** - Sistema básico para eletrólise da água.



Fonte: Adaptado de ZENG e ZHANG, 2010.

Uma corrente elétrica é mantida por uma fonte DC que passa do eletrodo negativo para o eletrodo positivo. Essa corrente mantém um fluxo de elétrons para o cátodo, onde os mesmos são consumidos pelos íons de hidrogênio formando gás hidrogênio. Os elétrons utilizados no cátodo têm origem dos íons hidroxila que são formados no ânodo (ZENG; ZHANG, 2010).

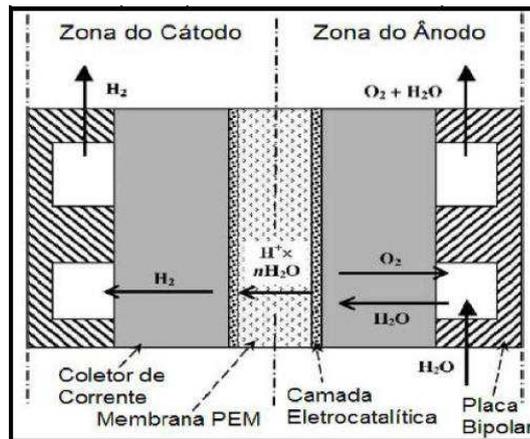
As reações químicas 1, 2 e 3 são definidas para cada eletrólito (ânodo e cátodo) e para a reação global, respectivamente.



A produção de hidrogênio por eletrólise da água pode ser de três tipos: alcalinos, SOE (*Solid Oxide Electrolysers*) e PEM (*Proton Exchange Membrane*) (GAMBETTA, 2010; URSÚA, GANDÍA e SANCHIS, 2012).

O reator de produção de hidrogênio ou eletrolisador que será utilizado para esta Pesquisa é o PEMEC (*Proton Exchange Membrane Electrolysis Cell*). A Figura 3 mostra de forma esquemática um eletrolisador do tipo PEMEC.

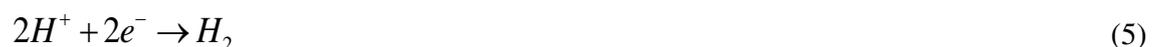
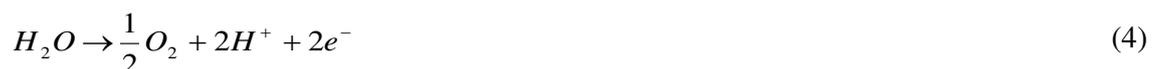
**Figura 3** - Esquema de um reator eletrolítico PEMEC.



Fonte: Adaptado de GRIGORIEV *et al.*, 2006.

Nessa tecnologia, a alimentação é feita no ânodo, onde ela é decomposta em oxigênio, prótons e elétrons. Os prótons são transportados por meio de uma membrana seletiva (PEM) que permite a passagem dos mesmos até o cátodo, onde eles são recombinados com os elétrons e tem-se a formação do gás hidrogênio (BRAGA, 2015).

As reações 4 e 5 são apresentadas por Marshall *et al.* (2007) para o ânodo e cátodo, respectivamente:



A reação global para eletrolisadores do tipo PEM pode ser escrita da seguinte maneira (reação 6):



Os eletrolisadores PEM possuem como vantagens maiores eficiências energéticas e maiores taxas de produção, além de serem mais compactos. Contudo possui custos altos de investimento, principalmente no que se refere aos tipos de membrana e de eletrodos. (URSÚA *et al.*, 2012; ZENG e ZHANG, 2010).

## 2.4 Armazenamento de hidrogênio

Aspetos como a segurança, o espaço, materiais, conexões e um bom sistema de abastecimento devem ser tomados em consideração no projeto de armazenamento de hidrogênio.

Os reservatórios de hidrogênio são essenciais para a mobilidade no caso dos veículos movimentados a células combustíveis, de forma a garantir a autonomia do sistema. O armazenamento é principalmente realizado por via de processos físicos, nomeadamente compressão e liquefação, e por via de processos químicos, nomeadamente hidretos metálicos e químicos (NUNES, 2010).

O hidrogênio líquido tem a desvantagem de ter que ser mantido a temperaturas muito baixas, pois liquefaz-se apenas a  $-253\text{ °C}$ , de forma que quando está sob pressão, precisa de muita energia para se liquefazer e manter-se frio, o que torna o processo bastante caro e menos eficiente energeticamente. O armazenamento por absorção num metal ou por formação de um hidreto de metal é muito caro, e para ser utilizado é preciso aquecer a temperaturas perto de  $300\text{ °C}$  antes do hidrogênio ser libertado (SANTOS e SANTOS, 2011).

O hidrogênio comprimido é o processo de armazenamento mais utilizada pela indústria. Comprimir o gás requer gastos energéticos que dependem de estágios termodinâmicos de arrefecimento e compressão utilizados. A energia aplicada ao processo requer pelo menos  $154,35\text{ MJ}$  por  $\text{kg}$  de  $\text{H}_2$  para alcançar o poder calorífico de combustão do hidrogênio ( $141,6\text{ MJ.kg}^{-1}$ ). As pressões médias usadas são de  $170\text{ bar}$ , podendo chegar aos  $710\text{ bar}$ , o que representa muito menos volume e permite melhor mobilidade. Apesar de ser a técnica mais avançada da indústria, o processo de abastecimento de tanques de alta compressão é lento (MARTINS *et al.*, 2009; DUBNO e GEVING, 2006).

## 2.5 Célula Combustível

Paralelamente, à produção de hidrogênio eletrolítico, está associada uma célula combustível, na qual se realiza a transformação de energia química contida no hidrogênio em energia elétrica. Uma vez que esse processo não segue o ciclo termodinâmico, as temperaturas elevadas não são necessárias para uma boa eficiência (SMITH, VAN NESS e ABBOTT,

2007). A eficiência de conversão das células combustíveis é significativamente melhor do que as eficiências de conversão dos motores térmicos, já que é um dispositivo isotérmico não restringido pelo limite de Carnot (HODGE, 2011).

Na célula combustível o reagente principal (hidrogênio) é alimentado continuamente a partir de um armazenamento externo, ao contrário de outras fontes de energia eletroquímicas tais como as baterias que armazenam seus reagentes dentro do próprio compartimento. Além disso, os eletrodos em uma célula combustível não são consumidos como em uma bateria. Células combustíveis são identificadas como uma das tecnologias mais promissoras e estão significativamente relacionados com o desenvolvimento de energias renováveis (SPIEGEL, 2007; UMBERTO, 2014).

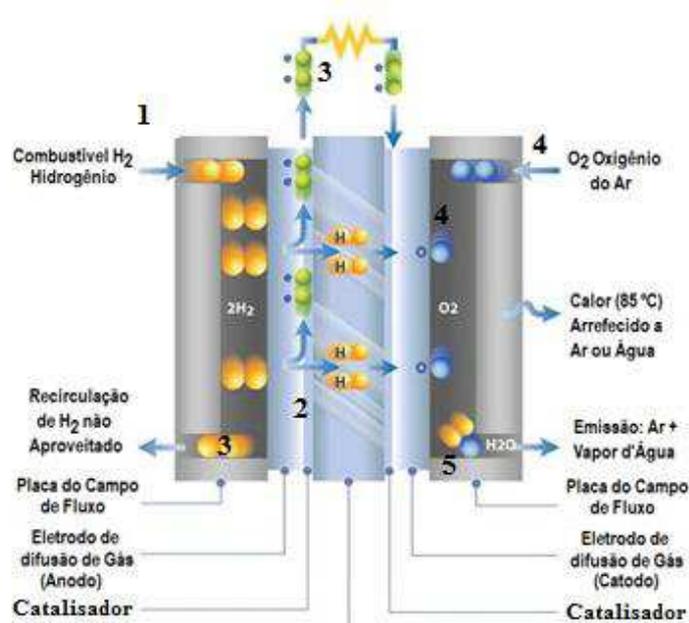
Células combustíveis já são usadas comercialmente para gerar eletricidade em espaçonaves e em alguns usos estacionários, como geradores de energia de emergência. Elas atingiram um nível de desenvolvimento promissor para os mercados nos quais a eletricidade deve ser produzida com alta eficiência e baixo impacto ambiental. Além disso, inúmeras usinas de energia baseadas em células combustíveis foram construídas e operadas com sucesso, em diferentes designs escaláveis de dezenas de megawatt para alguns miliwatts (BAGOTSKY, 2009).

Segundo Gomes Neto (2005), o funcionamento básico de uma célula combustível pode ser descrito conforme as cinco etapas a seguir:

1. Através do ânodo entra o hidrogênio pressurizado percorrendo os canais de fluxo até alcançar o catalisador;
2. Ao atingir o catalisador, o hidrogênio se divide em dois íons de hidrogênio ( $H^+$ ), mais dois elétrons ( $2e^-$ );
3. Os elétrons percorrem o eletrodo negativo até alcançarem o circuito externo onde haverá corrente elétrica. Está corrente segue na direção do cátodo, podendo ser utilizada para alimentar uma resistência útil. As moléculas de  $H_2$  que não foram quebradas no primeiro contato com o catalisador, são realimentadas até serem reagidas, pois apenas os íons de hidrogênio atravessam o eletrólito;
4. Através do cátodo entra o gás oxigênio pressurizado. O gás percorre os canais de fluxo até chegar o catalisador, onde se divide em dois íons de oxigênio;
5. Nesta última etapa, as moléculas de hidrogênio combinam-se com os íons  $H^+$  e com os elétrons que percorreram o circuito externo, formando a molécula d'água. Nesta reação, é liberada uma quantidade de ar e vapor d'água.

As etapas de funcionamento de uma célula combustível estão ilustradas na Figura 4.

**Figura 4** - Princípio de funcionamento de uma célula combustível.



Fonte: Adaptado de [automoveiseletricos.blogspot.com](http://automoveiseletricos.blogspot.com).

Os parâmetros operacionais da célula combustível demonstram sua relevância a partir do momento em que fornecem bases e limites teóricos para o funcionamento e a compreensão do sistema de produção de energia. A eficiência e as curvas características do sistema nos dão ideia e embasamento de como o processo está caminhando (BOLTON, 1996).

São vários os fatores que influenciam a eficiência da célula entre eles podem ser citados: qualidade da alimentação, hidratação das membranas, tempo de atividade de produção, oxidação natural dos componentes internos, entre outros.

A célula combustível representa uma rota de conversão energética que pode se aliar às fontes renováveis de energia e, assim; atender aos requisitos técnicos e econômicos que são necessários para o desenvolvimento técnico e sustentável (GOMES, 2011).

### 2.5.1 Tipos de células combustíveis

As células combustíveis são geralmente classificadas pelo tipo de eletrólito utilizado, visto que o eletrólito estabelece o princípio de operação e características da célula, pelo tipo

de íon transferido e pelo intervalo de temperaturas de funcionamento da célula (REVANKAR e MAJUMDAR, 2014). As principais tecnologias utilizadas atualmente são:

- AFC – Célula combustível alcalina (*Alkaline Fuel Cell*);
- MCFC – Célula combustível de carbonato fundido (*Molten Carbonate Fuel Cell*);
- PAFC – Célula combustível de ácido fosfórico (*Phosphoric Acid Fuel Cell*);
- PEMFC – Célula combustível de membrana de troca de prótons (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell*);
- SOFC – Célula combustível de óxido sólido (*Solid Oxid Fuel Cell*);
- DMFC – Célula combustível de metanol direto (*Direct Metanol Fuel Cell*).

As características, as vantagens e as desvantagens das principais tecnologias de célula combustível estão apresentadas na Tabela 2 e no Quadro 4.

**Tabela 2** - Tipos de células combustíveis e suas características.

<b>Tipo de célula combustível</b>	<b>Combustível</b>	<b>Catalisador</b>	<b>Temperatura de operação (°C)</b>	<b>Eletrólito</b>
<b>PEMFC</b>	$H_2$	Platina suportado em carbono	60 - 80	Polímero: Nafion® ( $H_3O^+$ )
<b>AFC</b>	$H_2$	Níquel/prata suportado em carbono	60 - 80	$KOH(OH^-)$
<b>PAFC</b>	$H_2$	Platina suportado em carbono	160 - 220	$H_3PO_4(H_3O^+)$
<b>SOFC</b>	$CH_4$	Compósito de níquel-YSZ/Manganite do estrôncio do lantânio (LSM)	800 - 1000	$ZrO_2(O^{2-})$
<b>MCFC</b>	$CH_4$	Liga de níquel-cromo (NiCr)/Óxido de níquel litiado (NiO)	600 - 700	Carbonatos Fundidos ( $CO_3^{2-}$ )

Fonte: Adaptado de TABBI WILBERFORCE *et al.*, 2016.

**Quadro 4** - Vantagens e desvantagens das células combustíveis.

<b>Tipo de célula combustível</b>	<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
<b>PEMFC</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta densidade de potência;</li> <li>2. Operação flexível;</li> <li>3. Acionamento rápido;</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Custo da membrana e do catalisador;</li> <li>2. Contaminação do catalisados com CO.</li> </ol>
<b>AFC</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta eficiência.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Sensível a CO<sub>2</sub>;</li> <li>2. Gases ultrapuros, sem reforma do combustível.</li> </ol>
<b>PAFC</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Maior desenvolvimento tecnológico.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Controle de porosidade do eletrodo;</li> <li>2. Eficiência limitada pela corrosão;</li> <li>3. Sensibilidade a CO.</li> </ol>
<b>SOFC</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Alta eficiência (cinética favorável);</li> <li>2. A reforma do combustível pode ser feita na célula.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Problemas de materiais;</li> <li>2. Expansão térmica;</li> <li>3. Necessidade de pré-reforma.</li> </ol>
<b>MCFC</b>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Tolerância a CO/CO<sub>2</sub>;</li> <li>2. Eletrodos a base de Ni.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Problema de matérias;</li> <li>2. Necessidade da reciclagem de CO<sub>2</sub>;</li> <li>3. Interface trifásica de difícil controle.</li> </ol>

Fonte: Adaptado de GOMES NETO, 2005.

A célula combustível com tecnologia PEM é considerada uma interessante alternativa devido à ausência de CO<sub>2</sub> como produto, alta eficiência e quase inexistência de poluição sonora. Oferece todas estas possibilidades usando hidrogênio como combustível para gerar energia elétrica por meio de uma reação química que também pode ser usada com outras fontes de energia limpa como a energia solar (WILSON *et al.*, 2013).

### 2.5.2 Componentes e funcionamento de uma PEMFC

Estruturalmente, uma célula PEMFC é fornada por 2 eletrodos, o ânodo e o cátodo, separados por um eletrólito de tipo membrana de polímero sólido. A Figura 5 mostra os componentes principais de uma PEMFC, onde (1) é o arranjo eletrodo-membrana-eletrodo (chamado MEA, *Membrane Electrode Assembly*), no qual, em cada lado do eletrodo, é impregnada uma camada muito fina de catalisador a base de platina; (2) é a camada porosa de transporte; (3) é uma junta de vedação; (4) é a placa de alimentação de gás; (5) são os eletrodos; (6) são os isoladores elétricos; (7) são as placas finais que dão conformidade à célula (MIKKOLA, 2012).

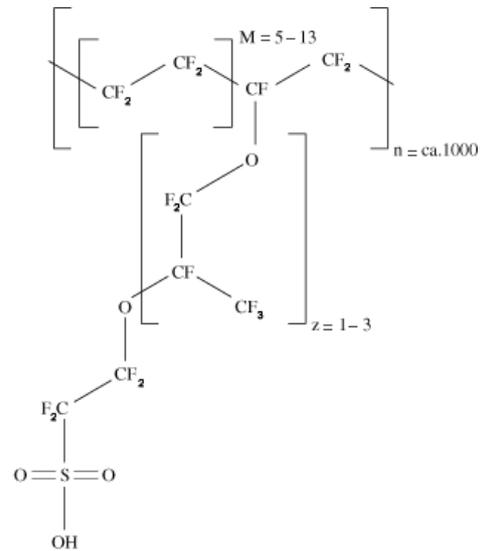
**Figura 5 - Vista de uma célula PEMFC unitária.**



Fonte: MIKKOLA, 2012.

O polímero sólido mais utilizado na PEMFC é o Nafion<sup>®</sup>, produzido pela DuPont, cuja estrutura pode ser observada na Figura 6. Sua cadeia principal é semelhante ao politetrafluoretileno (PTFE ou Teflon<sup>®</sup>), de caráter hidrofóbico e responsável pela estabilidade morfológica do polímero. Ligadas a essa estrutura estão cadeias laterais de perfluoroéter terminadas com um grupo ácido sulfônico, responsáveis pela característica hidrofílica, causando a formação de micelas de água líquida no interior da membrana (MAURITZ e MOORE, 2004).

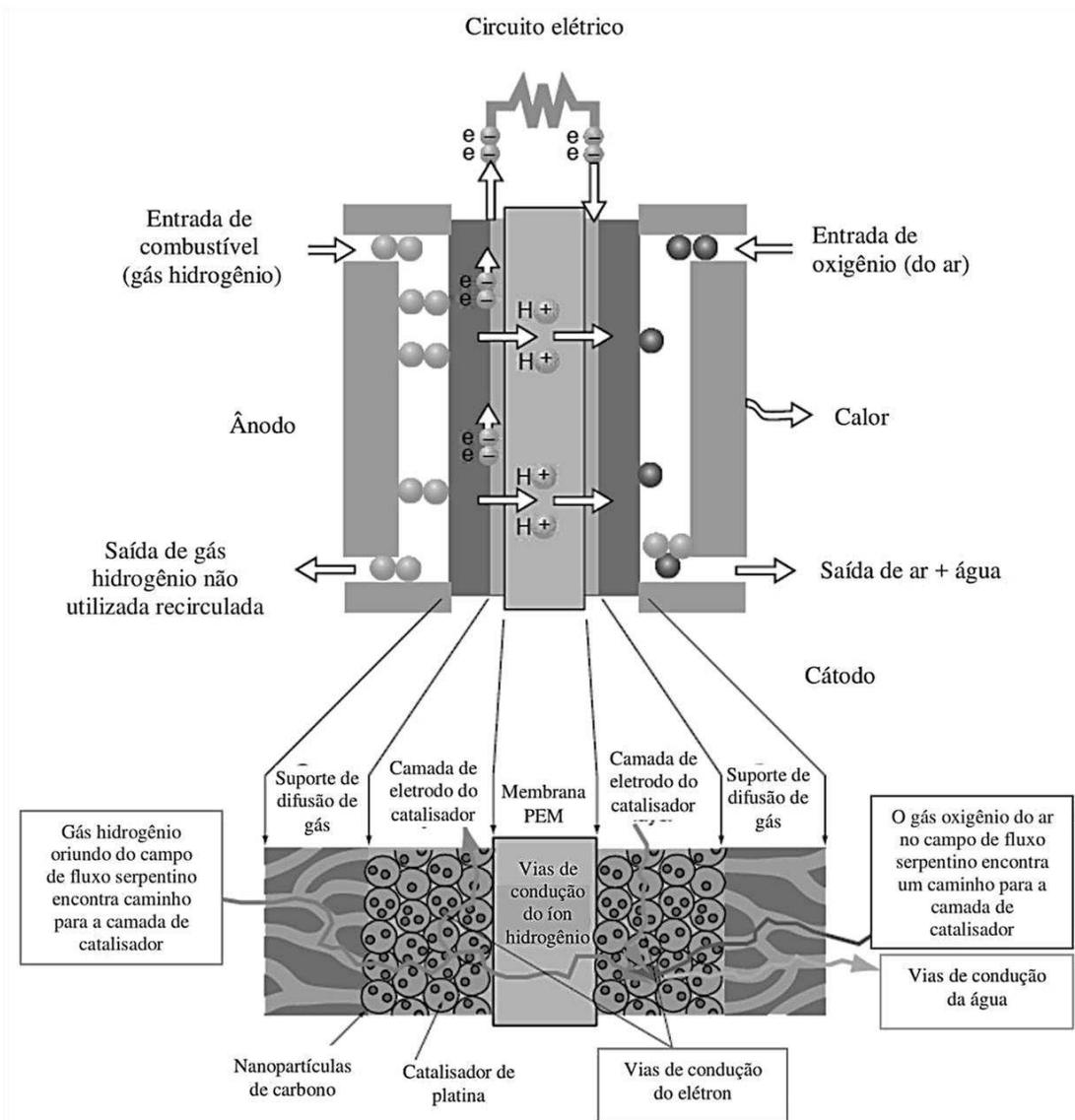
**Figura 6 - Estrutura do Nafion®.**



Fonte: PERLES, 2008.

No lado anódico do MEA ocorre a reação de oxidação do combustível, originando os íons  $H^+$  que percorrem o eletrólito em direção ao lado catódico onde ocorre a reação de redução do oxigênio, originando água e calor. Os elétrons produzidos no lado anódico circulam por um circuito externo produzindo eletricidade (PAGANIN, 1997). A Figura 7 esquematiza esse processo.

**Figura 7** - Esquema de uma célula combustível do tipo PEMFC.



Fonte: Adaptado de Gupta, 2009.

As reações eletroquímicas 7 e 8 ocorrem no ânodo e no cátodo da célula combustível, respectivamente:



A reação global para uma PEMFC pode ser escrita da seguinte maneira (reação 9):



A membrana deve estar saturada em água para que seja garantida uma boa condutividade iônica da mesma. Diretamente ligado a isso é fácil observar em seu funcionamento que, ao partirmos uma célula que esteve parada, e por consequência apresenta sua membrana desumidificada, esta funcionará melhor após certo tempo de utilização graças à água produzida na região do cátodo que promove a hidratação da membrana (GOMES, 2013).

As placas bipolares, também chamadas de placas separadoras ou placas de campo de fluxo, separam os reagentes das células adjacentes, atuam como coletoras de corrente e formam a estrutura de suporte nos módulos. As placas podem ser fabricadas em grafite, metal ou compósito, uma mistura de grafite e resinas termoplásticas (HERMANN *et al.*, 2005).

### 2.5.3 Fundamentos termodinâmicos da célula combustível

Nos sistemas em que há reação química, o balanço de energia irá depender das entalpias dos reagentes e dos produtos. Se o somatório das entalpias dos reagentes for maior que o somatório da entalpia dos produtos então haverá liberação de energia durante a reação química (reação exotérmica). Caso o somatório das entalpias dos reagentes for menor que o somatório da entalpia dos produtos então haverá absorção de energia durante a reação química (reação endotérmica). Esta diferença de entalpia entre os produtos e reagentes é conhecido como calor de reação (FERNANDES, PIZZO e MORAES Jr, 2006), definida pela equação 10:

$$\Delta H = \sum \Delta H_{\text{produtos}} - \sum \Delta H_{\text{reagentes}} \quad (10)$$

Se toda energia na reação química fosse convertida em energia elétrica:

$$W_e = \Delta H \quad (11)$$

Em que  $W_e$  é a geração elétrica por mol de combustível e  $\Delta H$  é a variação de entalpia do sistema (energia térmica disponível). No entanto, sabe-se que uma parte da energia química é convertida em energia térmica interna. Logo, a quantidade mínima de energia térmica interna para processos que regem um processo reversível é igual a:

$$Q_{te} = \int TdS \quad (12)$$

Em que  $dS$  é a variação de entropia no sistema e  $T$  é a temperatura.  $T\Delta S$  representa a quantidade de calor produzida por uma célula combustível de funcionamento reversível. Sendo a célula combustível um dispositivo isotérmico:

$$Q_{te} = \int TdS = T \int dS = T\Delta S \quad (13)$$

A quantidade máxima de energia elétrica produzida por uma célula combustível isotérmica é dada pela equação 14:

$$W_e \leq \Delta H - T\Delta S \quad (14)$$

Em que o sinal de igual é para reação reversível e o sinal menor que para uma célula combustível com irreversibilidades. A energia livre de Gibbs é definida como:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (15)$$

Para um processo isotérmico:  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$  e para uma célula combustível:  $W_e \leq \Delta G$ . Para uma determinada reação:  $\Delta G = \sum \Delta G_{produtos} - \sum \Delta G_{reagentes}$ .

Uma das relações derivadas da Primeira Lei da Termodinâmica pode ser expressa como:

$$VdP = dH - TdS \quad (16)$$

Logo:  $VdP = dG$  (17)

A equação do estado térmico, em mol, pode ser expressa como:  $V = \frac{dG}{P} = \frac{RT}{P}$  (18)

Em que:  $R$  é a constante universal dos gases.

Integrando a equação 18 entre um estado de referência e 1 atm de pressão a um estado geral em  $P$  produz:

$$\int_{G^0}^G dG = RT \int_{P^0}^P \frac{dP}{P}$$

$$G - G^0 = RT \ln\left(\frac{P}{P^0}\right)$$
 (19)

Para  $P^0 = 1 \text{ atm}$ :  $G = G^0 + RT \ln(P)$  (20)

Segundo EG&G Services Parsons (2004), o máximo trabalho elétrico ( $W_e$ ) obtido em uma célula combustível funcionando em temperatura e pressão constantes é dado pela variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) da reação eletroquímica:

$$W_e = -nF_c E_c \approx \Delta G$$
 (21)

Isolando a tensão  $E_c$  na equação 21 obtém-se o valor da tensão termodinâmica de uma célula combustível (GOMES, 2013). Isso explica o fato de que a potencial elétrico da célula varia de acordo com a energia livre de Gibbs.

$$E_c = -\frac{\Delta G}{nF_c}$$
 (22)

Em que  $n$  é o número de elétrons que participam na reação,  $F$  é a constante de Faraday (96487 Coulombs.gmol<sup>-1</sup> de elétrons), e  $E_c$  é o potencial ideal da célula.

Logo, substituindo a equação 22 na equação 20 e rearranjando:

$$E_g = E_g^0 - \frac{RT}{nF_c} \ln(P)$$
 (23)

que é uma versão (para gases ideais) da equação de Nernst, a qual fornece o potencial reversível de circuito aberto através de uma célula combustível. A tensão máxima para um par de eletrodos (EG&G Services Parsons, 2004) é dado por:



$$E = E^0 - \frac{RT}{2F_c} \ln \left[ \frac{P_{H_2O}}{(P_{H_2})(P_{O_2})^{(1/2)}} \right] \quad (25)$$

A determinação da tensão máxima, tensão ideal, produzida por uma célula combustível envolve a avaliação da variação de energia entre o estado inicial dos reagentes no processo  $\left( H_2 + \frac{1}{2}O_2 \right)$  e o estado final  $(H_2O)$ . Essa avaliação se baseia em funções termodinâmicas de estado em um processo químico, principalmente a energia livre de Gibbs (Equação 15). Para uma pressão constante de 1 atm, e temperatura de 298 K, ou seja, em condição padrão, a variação da energia livre de Gibbs neste processo é calculada, com  $\Delta H^0 = -285,83 \text{ kJ.mol}^{-1}$  e  $\Delta S^0 = -163,28 \text{ J.mol}^{-1}\text{K}^{-1}$  (THOMAS e ZALBOWITZ, 2012).

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

$$\Delta G^0 = -237,2 \text{ kJ / mol}$$

A tensão máxima de células ( $E_c$ ), para a reação de uma célula combustível tipo PEMFC para valores padrões de temperatura e pressão é calculada a partir da equação 22.

$$E_c = -\frac{\Delta G}{2F_c} = -\frac{-237,2}{2.96487} = 1,23V$$

Ao se considerar a temperatura de operação da célula combustível (353 K), os valores de  $\Delta H$  e  $\Delta S$  não são afetados consideravelmente e, portanto, podem ser considerados os mesmos que foram utilizados para 298 K:

$$\Delta G^0 = \Delta H^0 - T\Delta S^0$$

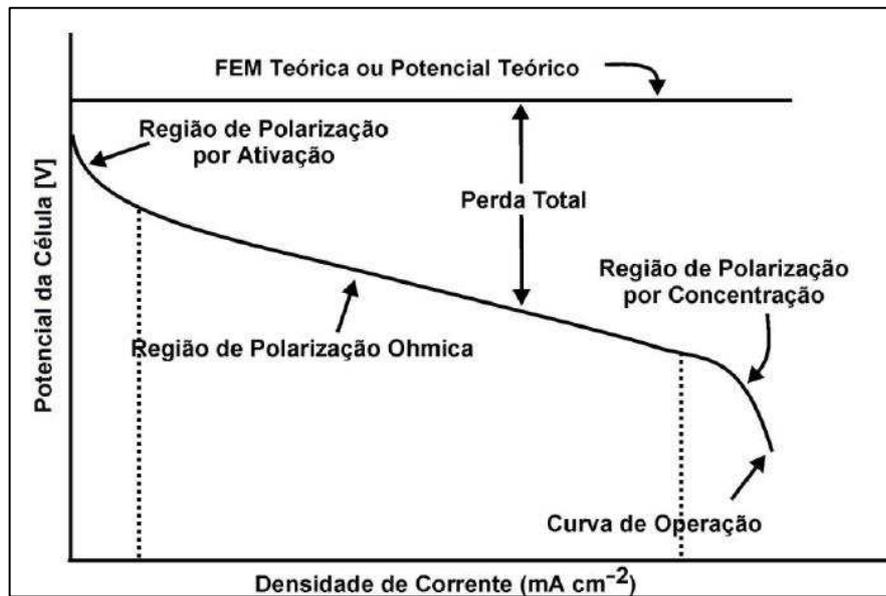
$$\Delta G^0 = -228,2 \text{ kJ / mol}$$

$$E_c = -\frac{\Delta G}{2F_c} = -\frac{-228,2}{2.96487} = 1,18 \text{ V}$$

### 2.5.4 Curva de polarização de uma PEMFC e suas perdas

A caracterização de uma célula combustível é feita pelo levantamento da sua curva de polarização. Ela relaciona o potencial da célula e a densidade de corrente fornecida, possibilitando a visualização dos efeitos que causam perdas. Em uma curva de polarização típica, como a apresentada na Figura 8, observa-se que cada mecanismo de perda é dominante em um intervalo de potenciais e densidades de corrente. (KIRUBAKARAN *et al.*, 2009).

**Figura 8** - Perdas da célula combustível em função da densidade de corrente.



Fonte: *Handbook of Fuel Cell*, 2003.

Quando o potencial da célula está próximo do potencial de circuito aberto, a polarização por ativação é a responsável pela maior parte das perdas. Quando a corrente aumenta, a

polarização por perda ôhmica, causada pela resistência interna do dispositivo, passa a ser dominante. Em altas densidades de corrente, aumentam as perdas ocasionadas pelo esgotamento dos reagentes nos sítios ativos do eletrodo, e elas passam a responder por grande parte da polarização, a chamada polarização por concentração, ou por transporte de massa (KIRUBAKARAN *et al.*, 2009).

O comportamento elétrico de uma PEMFC (equação 26), é determinado pela tensão máxima que pode ser produzida por uma célula (tensão de circuito aberto ou tensão ideal) ( $E_c$ ) e pelas perdas energéticas existentes durante sua operação (EG&G SERVICES PARSONS, 2004).

$$V_{op} = E_c - V_{perdas} \quad (26)$$

As perdas por ativação são um fenômeno que ocorre na superfície do eletrodo. Conforme as reações ocorrem na interface eletrodo/eletrólito, há a formação de íons na superfície do eletrodo, e caso esses íons não sejam removidos, haverá uma queda no desempenho da célula devido essa barreira energética que dificulta a transferência de elétrons (CUNHA, 2009). Estas perdas dependem das reações de eletrocatalise, microestrutura e das atividades dos reagentes. Estas perdas são dominantes no início da reação química quando a densidade de corrente é baixa. A perda por ativação pode ser definida através da equação de Tafel (equação 27) (EG&G SERVICES PARSONS, 2004).

$$V_{av.} = \frac{RT_{op}}{\alpha nF} \ln \left( \frac{j_{op}}{j_o} \right) \quad (27)$$

Em que:  $R$  é a constante universal dos gases ( $8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$ );  $T_{op}$  a temperatura de operação;  $F$ , a constante de Faraday ( $96485 \text{ C}$ );  $n$  o número de mol;  $j_{op}$  a densidade de corrente de operação da célula;  $j_o$  a densidade de corrente de troca no eletrodo; e  $\alpha$  é o coeficiente de transferência de elétrons da reação no eletrodo. (EG&G SERVICES PARSONS, 2004).

A densidade de corrente de troca nos eletrodos da célula ( $j_o$ ) é função da pressão parcial dos gases de alimentação e temperatura de operação. Como a densidade de corrente é diretamente proporcional ao valor da corrente, e sendo a área da célula constante, pode-se então, definir que as perdas variam com a corrente, portanto pode-se obter a equação 28.

$$V_{av.} = \frac{RT_{op}}{\alpha nF} \ln \left( \frac{i_{op}}{i_o} \right) \quad (28)$$

A região de perdas ôhmicas é definida pela prevalência da limitação imposta pelos fenômenos de transporte de cargas elétricas (condução eletrônica nos eletrodos e condução iônica no eletrólito). Estas limitações são explicadas pelas resistividades elétricas do eletrólito (fator preponderante), dos eletrodos e interconectores (placas bipolares, placas terminais e contatos) (GOMES, 2011).

Considerando-se  $r_m$  a resistência do eletrólito,  $r_{cj}$  a resistência do conjunto eletrodos, difusores e placas separadoras, e pela aplicação direta da lei de Ohm pode-se obter equação para a queda de tensão devido às perdas ôhmicas ( $V_{ohm}$ ) na célula (equação 29).

$$V_{ohm.} = (r_m + r_{cj}) i_{op} \quad (29)$$

As perdas por concentração são relacionadas ao transporte de massa devido ao estabelecimento de um gradiente de concentração do reagente que é consumido no eletrodo através da reação química e dependem fortemente da densidade de corrente, a atividade do reagente, e a estrutura dos elétrodos. Na prática, estas perdas são devidas a lentidão do transporte iônico no eletrólito quando submetida a uma alta densidade de corrente, tornando-a preponderante nos limites de operação de carga e seu valor pode ser calculado pela equação 30 (EG&G Services Parsons, 2004).

$$V_{conc.} = \frac{RT_{op}}{nF} \ln \left( 1 - \frac{J_{op}}{J_o} \right) \quad (30)$$

Larminie e Dicks (2003) apresentam a equação 31 desenvolvida empiricamente para uma aproximação da equação 30, desde que as constantes  $m$  e  $n$  sejam escolhidos adequadamente.

$$V_{conc.} = m e^{ni} \quad (31)$$

Substituindo-se as equações 28, 29 e 31 na equação 26, obtém-se a tensão de operação da célula e como a densidade de corrente é diretamente proporcional ao valor da corrente, e sendo a área da célula constante, pode-se definir que as perdas variam analogamente com a densidade de corrente e com a corrente, portanto, obtendo-se a equação 32.

$$V_{op} = E_c - (V_{atv.} + V_{ohm.} + V_{conc.})$$

$$V_{op} = E^0 - \left[ \left( \frac{RT_{op}}{\alpha n F} \ln \left( \frac{i_{op}}{i_o} \right) \right) + (r_m + r_{c_j}) i_{op} + (m e^{ni}) \right] \quad (32)$$

Fazendo:  $A = \frac{RT_{op}}{\alpha n F}$  e  $r = r_m + r_{c_j}$ , logo:

$$V_{op} = E^0 - A \ln(i_{op}) - r i_{op} - m e^{ni} \quad (33)$$

A equação 33 apresenta um excelente resultado para modelagem computacional de células combustível (LARMINIE e DICKS, 2003). A Tabela 3 apresenta os parâmetros utilizados para obtenção das curvas de polarização em diferentes temperaturas.

**Tabela 3** - Parâmetros para a curva de polarização.

Temperatura (°C)	$E^0$ (V)	$r$ (k $\Omega$ .cm <sup>-2</sup> )	A (V)	m (V)	n (cm <sup>2</sup> .mA <sup>-1</sup> )
24	1,059	3,14.10 <sup>-4</sup>	0,0479	1,29.10 <sup>-3</sup>	8.10 <sup>-3</sup>
31	1,038	3,86.10 <sup>-4</sup>	0,0348	6,98.10 <sup>-4</sup>	8.10 <sup>-3</sup>
39	1,039	3,46.10 <sup>-4</sup>	0,0354	6,03.10 <sup>-5</sup>	8.10 <sup>-3</sup>
48	1,035	3,16.10 <sup>-4</sup>	0,0333	4,64.10 <sup>-5</sup>	8.10 <sup>-3</sup>
56	1,033	2,93.10 <sup>-4</sup>	0,0315	3,94.10 <sup>-5</sup>	8.10 <sup>-3</sup>
65	1,031	2,65.10 <sup>-4</sup>	0,0302	2,46.10 <sup>-5</sup>	8.10 <sup>-3</sup>
68	1,031	2,64.10 <sup>-4</sup>	0,0300	1,74.10 <sup>-5</sup>	8.10 <sup>-3</sup>
70	1,031	2,45.10 <sup>-4</sup>	0,0300	2,11.10 <sup>-5</sup>	8.10 <sup>-3</sup>
72	1,034	2,25.10 <sup>-4</sup>	0,0320	2,74.10 <sup>-5</sup>	8.10 <sup>-3</sup>

Fonte: LAURENCELLE *et al.*, 2001.

### 2.5.5 Consumo de combustível e eficiência da PEMFC

Na operação, as PEMFC consomem hidrogênio e oxigênio, produzindo vapor de água, calor e energia elétrica. A quantidade de hidrogênio e oxigênio consumidos e a quantidade produzida de água (vapor) são características da reação de oxirredução e, portanto, depende diretamente do ponto de operação da célula, ou seja, o consumo de combustível depende da potência. A energia térmica (calor) e energia elétrica dependerão da eficiência da célula, no ponto de operação.

Na reação química de oxirredução ocorrida na célula, cada mol de  $H_2$  em conjunto com meio mol de  $O_2$  produzem um mol de  $H_2O$  e dois mols de elétrons ( $2n$ ). Com isto tem-se uma carga elétrica transferida pelos elétrons ( $Q_{el,total}$ ) de:



$$Q_{el,total} = ne$$

$$Q_{el,total} = 2ne \quad (37)$$

A constante de Faraday ( $F$ ) indica a carga de um mol de elétrons, a carga transferida por um mol de  $H_2$  pode ser obtida de:

$$Q_{H_2,total} = -2F_c \quad (38)$$

Como a corrente elétrica é a variação da carga no tempo, tem-se para uma célula unitária:

$$\text{Total de } H_2 \text{ consumido} = \frac{i_{op}}{2F_c} \quad (39)$$

Considerando que uma PEMFC é formada por um arranjo de  $N_{cel}$  unitária, aplicando a massa molar do hidrogênio,  $MM_{H_2} = 2,02.10^{-3} kg / mol$  e o volume molar do hidrogênio, admitindo ser um gás ideal, volume molar (298 K)  $V_{H_2} = \frac{RT}{P} = 24,465 L / mol$  tem-se então:

$$Total\ de\ H_2\ consumido = \frac{N_{cel} i_{op}}{2F_c} V_{H_2}$$

$$Total\ de\ H_2\ consumido = \frac{N_{cel} i_{op}}{2.96487} 24,465$$

$$Total\ de\ H_2\ consumido = 1,268.10^{-4} N_{cel} i_{op} \left( L.s^{-1} \right) \quad (40)$$

Aplicando a massa molar:

$$Total\ de\ H_2\ consumido = \frac{N_{cel} i_{op}}{2F_c} MM_{H_2}$$

$$Total\ de\ H_2\ consumido = \frac{N_{cel} i_{op}}{2.96487} 2,02.10^{-3}$$

$$Total\ de\ H_2\ consumido = 1,046.10^{-8} N_{cel} i_{op} \left( kg.s^{-1} \right) \quad (41)$$

Analisando a reação do cátodo e considerando que a relação entre o número de mols de  $H_2$  e  $O_2$  utilizados na reação é de 2:1, a carga transferida por mol de  $O_2$  ( $Q_{O_2,total}$ ), será de:

$$Q_{O_2,total} = -4F_C \quad (42)$$

Analogamente, o total de oxigênio consumido considerando que a massa molar do ar,  $MM_{ar} = 28,97 . 10^{-3} kg / mol$  e o volume molar do oxigênio, admitindo ser um gás ideal, volume molar (298 K)  $V_{O_2} = \frac{RT}{P} = 24,465 L / mol$  e que a célula é alimentada pelo ar tem-se:

$$\text{Total de ar consumido} = \frac{N_{cel} i_{op}}{4F_c} MM_{ar}$$

$$\text{Total de ar consumido} = \frac{N_{cel} i_{op}}{4.96487} 28,97.10^{-3}$$

$$\text{Total de ar consumido} = 7,5.10^{-8} N_{cel} i_{op} \text{ (kg.s}^{-1}\text{)} \quad (43)$$

Aplicando a proporção de 21% de oxigênio:

$$\text{Total de } O_2 \text{ consumido} = N_{cel} i_{op} .0,21.7,5.10^{-8}$$

$$\text{Total de } O_2 \text{ consumido} = 1,576.10^{-8} N_{cel} i_{op} \text{ (kg.s}^{-1}\text{)} \quad (44)$$

Aplicando o volume molar:

$$\text{Total de } O_2 \text{ consumido} = \frac{N_{cel} i_{op}}{4F_c} V_{O_2}$$

$$\text{Total de } O_2 \text{ consumido} = \frac{N_{cel} i_{op}}{4.96487} 24,465$$

$$\text{Total de } O_2 \text{ consumido} = 6,322.10^{-5} N_{cel} i_{op} \text{ (L.s}^{-1}\text{)} \quad (45)$$

Segundo Gomes (2013), a determinação da eficiência máxima ( $\eta_{max}$ ) da PEMFC está sujeita às leis da termodinâmica que determina que em qualquer reação reversível a eficiência máxima é dada pela relação entre energia livre de Gibbs (energia livre disponível), e a energia total (variação da entalpia na reação).

A eficiência termodinâmica mostra que nem toda capacidade energética disponível na reação pode ser convertida em energia elétrica, pois um percentual dessa energia é utilizado para possibilitar a própria reação (LARMINIE e DICKS, 2003). Dessa forma, a equação 46 mostra que a eficiência máxima pode ser calculada através da razão da energia livre de Gibbs pela variação da entalpia.

$$\eta_{máx} = \frac{W_e}{\Delta H^0} = \frac{\Delta G}{\Delta H^0} \quad (46)$$

Em uma PEMFC, operando em CNTP, a eficiência máxima ou termodinâmica da célula pode ser calculada pela razão entre a variação da entropia e a variação da entalpia:

$$\eta_{máx} = \frac{\Delta G}{\Delta H^0} = \frac{237,2}{285,8} \cdot 100\% = 83\%$$

Considerando que a eficiência termodinâmica não sofre alterações devidas ao ponto operação da célula, então se pode definir como eficiência operacional ( $\eta_{op}$ ) a relação existente entre a potência elétrica fornecida ( $P_{Util}$ ) dividida pela potência máxima disponível ( $P_{max}$ ), ou seja:

$$\eta_{op} = \frac{P_{útil}}{P_{máxima}} = \frac{V_{op} i_{op}}{E^0 i_{op}} = \frac{V_{op}}{1,48} = 0,6757 V_{op} \quad (47)$$

A partir da análise da equação 47, a eficiência operacional de uma PEMFC é diretamente proporcional ao valor da tensão produzida pela célula. Caso haja um acréscimo de carga haverá um aumento da corrente e respectivamente uma diminuição da tensão operacional e conseqüentemente a eficiência operacional sofrerá uma diminuição.

### 2.5.6 Trabalhos desenvolvidos acerca do tema

Alguns trabalhos da literatura que abordam o projeto de um sistema integrado, assim como a avaliação de seus parâmetros operacionais, econômicos e ambientais são mostrados a seguir.

Yunez-Cano *et al.*, (2016) apresentou em seu trabalho um modelo analítico para dimensionar, analisar e avaliar a viabilidade de um sistema híbrido de conversão de energia fotovoltaica/hidrogênio (PV/H<sub>2</sub>) usando dados climáticos reais. A análise considerou um balanço energético e variáveis elétricas dos componentes do sistema. Foi proposto melhorias

para aumentar a eficiência do sistema, utilizando energia excedente produzida pelo sistema híbrido. As medições de radiação solar foram obtidas de uma estação de monitoramento meteorológico, que foi colocada no telhado de uma casa sustentável, localizada na Cidade do México. O sistema PV/H<sub>2</sub> forneceu energia elétrica de uma fonte primária (PV) para alimentar as resistências elétricas e a energia excedente foi fornecida ao eletrolisador para gerar hidrogênio. Portanto, a eficácia do sistema híbrido foi calculada pelo nível de energia armazenada e pela carga elétrica necessária.

Braga (2015) avaliou a produção de hidrogênio a partir da eletrólise e os principais aspectos técnicos, econômicos e ambientais que influenciam na implantação de uma central de produção de hidrogênio. Para a análise econômica, utilizou a metodologia proposta por Braga (2014) e desenvolvida por Silveira e Gomes (1999), com a finalidade de ilustrar e analisar o custo de produção do hidrogênio em função do preço da eletricidade proveniente das fontes hidrelétrica, eólica e solar. Os seus resultados mostraram que as tecnologias empregadas são significativamente mais atrativas quanto aos aspectos econômicos, entretanto, conforme os aspectos ambientais são ponderados, as alternativas renováveis possuem um maior destaque.

Santos (2013) analisou a produção de energia elétrica utilizando fontes renováveis para a produção de hidrogênio eletrolítico. Utilizou uma célula combustível de 1 kW de potência nominal com tecnologia PEM para a conversão da energia química contida no hidrogênio em energia elétrica. O projeto incluiu também o desenvolvimento de um sistema de automação e controle baseado em controladores lógicos programáveis para monitoramento e supervisão de toda a planta. A caracterização da célula combustível foi feita por meio da utilização de uma carga resistiva configurável. Os resultados mostraram uma potência máxima de saída de 943,1 W (47,25 V e 19,96 A), densidade de corrente de 288,3 mA.cm<sup>-2</sup> e rendimento operacional de 48,05% quando a unidade de curto-circuito (SCU) foi ligado e apenas de 770,4 W (42,84 V e 18,06 A) densidade de corrente de 268,7 mA.cm<sup>-2</sup> e rendimento operacional de 47,15% quando o SCU foi desligado.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

---

As etapas necessárias para o desenvolvimento desta Pesquisa foram realizadas no Laboratório de Fontes Renováveis de Energia (LABFREN), uma estrutura compartilhada entre o Departamento de Engenharia Química (DEQ) e o Departamento de Engenharia Elétrica (DEE), ambos pertencentes à Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus de Campina Grande.

#### 3.1 Equipamentos e acessórios

Os equipamentos e acessórios utilizados nesta Pesquisa foram:

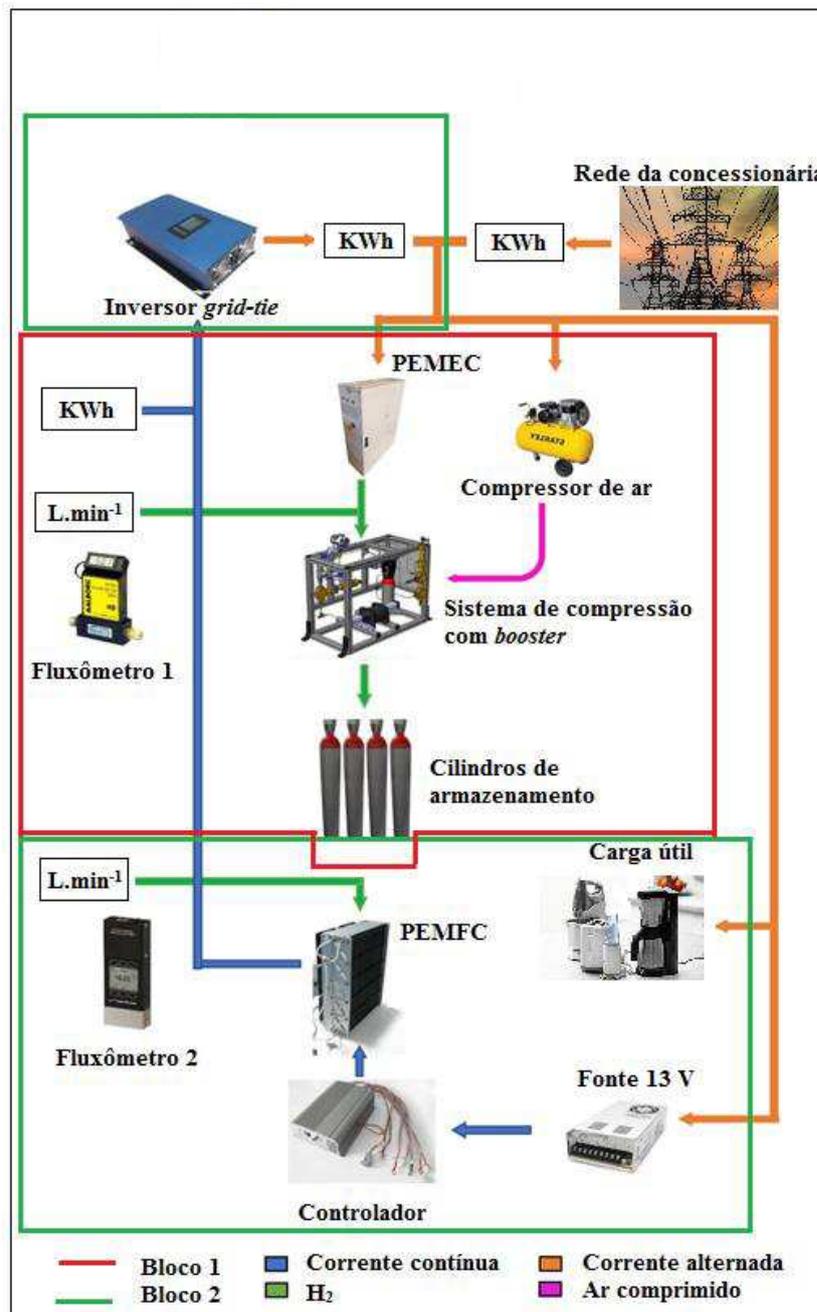
- Reator eletrolítico ou eletrolisador (Hy-PEM XP 024);
- Sistema de compressão com *booster* (Hy-COMP XT – HP version);
- Painel de controle Hy-REFILL BOX;
- Compressor STANLEY B 255/10/50;
- Célula combustível (FCS – c3000);
- Inversor de 1000 W modelo SUN-1000GTI2-LCD;
- Fonte Chaveada de 13 Volts, 20 A;
- Voltímetro digital DT-9205A;
- Voltímetro digital DT-832;
- Amperímetro ELETRONOR (RE NZ);
- 4 cilindros de armazenamento com capacidade máxima de 240 bar cada;
- Medidor de vazão GFM 37 (L.min<sup>-1</sup>);
- Medidor de vazão Cole-Parmer, Modelo:32908-73 (L.min<sup>-1</sup>);
- Sistema de tratamento de água para produção de água deionizada.

#### 3.2 Metodologias

### 3.2.1 Análise operacional do sistema integrado

A Figura 9 apresenta o sistema integrado de produção de energia elétrica com seus respectivos equipamentos e correntes.

**Figura 9** - Sistema de geração de energia elétrica utilizado na Pesquisa.



Fonte: Autoria própria.

O sistema de geração de energia elétrica proposto para esta Pesquisa foi dividido em dois blocos: o primeiro referente a produção de hidrogênio pelo eletrolisador, o segundo referente a produção de energia elétrica utilizando o hidrogênio eletrolítico proveniente dos cilindros de armazenamento. Além dos dois blocos, há ainda um sistema acessório de tratamento de água por osmose reversa para produção de água deionizada.

O primeiro bloco é composto pelo eletrolisador, sistema de compressão (*booster* e compressor de ar), fluxômetro, painel de controle e cilindros de armazenamento.

O eletrolisador com tecnologia PEM produz hidrogênio de alta pureza (99,999%) e oxigênio como subproduto por meio da hidrólise da água. O elemento chave deste equipamento é um conjunto de quatro células eletroquímicas que podem operar em paralelo (3 células *slaves* controladas por 1 *master*) ou outras configurações de arranjos. A unidade *master* possui interatividade com o operador e controla as demais unidades. O primeiro arranjo permite um melhor desempenho e uma máxima produção em menores tempos. Pressões de até 11 bar pode ser utilizada no eletrolisador.

O único líquido que entra em contato com estas células é água deionizada com condutividade elétrica máxima de 4  $\mu\text{s}$ . A água deve possuir uma condutividade máxima de 33  $\mu\text{s}$  quando estiver dentro do equipamento, sendo necessária sua troca próxima a esse limite. A carga e recarga da água deionizada é feita manualmente em terminais do eletrolisador.

O sistema de tratamento de água é alimentado com água da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA) e é composto por filtro PVC, resina de troca catiônica e aniônica e membrana de osmose reversa. O sistema produz água com condutividade próximo a zero.

O sistema de compressão tem como objetivo multiplicar a pressão de saída do hidrogênio produzido pelo reator eletrolítico e armazenar adequadamente. O funcionamento do sistema de compressão é iniciado quando o hidrogênio proveniente do eletrolisador atinge uma pressão entre 9 - 11 bar. O hidrogênio comprimido é transportado para cilindros de armazenamento quando o *booster* é acionado pelo ar comprimido proveniente do compressor, o qual trabalha com uma pressão de operação de 9 bar. Após injeções consecutivas de hidrogênio pelo *booster*, a pressão do compressor cai, fazendo com que o mesmo seja acionado para o reestabelecimento da pressão.

O painel de controle do sistema possui o botão Liga/Desliga e controladores de limites de pressão superior e inferior para ajustar os níveis ideais de operação e assim, manter o

acionamento automático de recargas de hidrogênio nos cilindros. Este painel de controle é manuseado através de um painel de LED localizado na parte frontal da Hy-REFILL BOX.

Os 4 cilindros de aço utilizados para armazenar o hidrogênio produzido ficam localizados em uma área externa do laboratório. Os mesmos apresentam caráter industrial e estáticos com capacidade de armazenamento de até 240 bar por cilindro.

O segundo bloco é constituído pela célula combustível, inversor *grid-tie*, controlador, fonte elétrica, fluxômetro e resistências elétricas de testes.

A célula combustível é composta por 72 células, alimentada a hidrogênio com um grau de pureza de 99,999% e ar atmosférico captado por 4 ventiladores próprios localizados na parte traseira da célula. A célula é capaz de fornecer uma potência máxima de 3000 W quando operada a uma tensão de 43,2 V e 70 A, a uma pressão de entrada de hidrogênio na faixa de 0,45 - 0,55 bar.

A célula combustível necessita de um controlador que é alimentada por uma fonte de 13 V. O sistema de consumo de cargas (resistências elétricas) para caracterização da célula combustível é composto por quatro ferros de passar que foram desmontados e isoladas as resistências, quatro placas de níquel e um jogo de trinta lâmpadas de 220 V com filamentos de tungstênio. As cargas resistivas experimentais foram projetadas para voltagem de 220 V e estão sendo alimentadas por 48 volts DC, não atingindo sua potência máxima.

As medições da vazão de produção de hidrogênio foram feitas a partir de um fluxômetro modelo GFM 37. Fez-se uso do método integrativo dos trapézios para a determinação da vazão real. A vazão de hidrogênio que alimenta a célula combustível foi medida a partir do fluxômetro Cole-Parmer Modelo: 32908-73 utilizando o mesmo método integrativo anterior.

O sistema integrado foi desenvolvido para funcionar com energia elétrica gerada a partir de painéis fotovoltaicos ou da concessionária hidrelétrica (ENERGISA). Devido a limitação na quantidade de painéis fotovoltaicos que suprisse a necessidade para o funcionamento do primeiro bloco, adotou-se o uso de energia proveniente da concessionária.

O inversor *grid-tie* de 1000 W foi inserido no Projeto para que se pudesse avaliar o uso do hidrogênio como fonte alternativa em um sistema híbrido com energia solar e rede elétrica da concessionária. O inversor foi conectado na saída da célula combustível, enviando energia elétrica produzida à rede da concessionária ou para o funcionamento de alguma resistência útil.

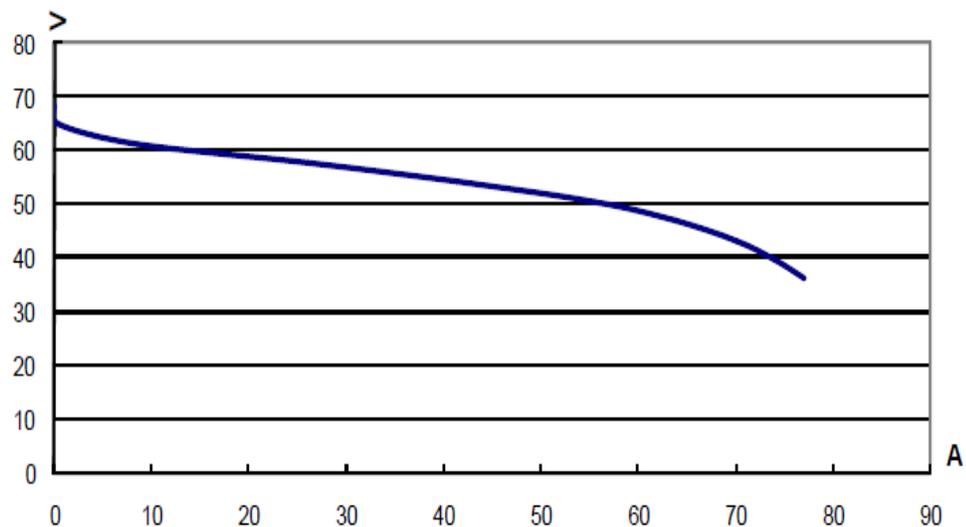
### 3.2.2 Parâmetros operacionais

Os parâmetros operacionais descrevem o correto funcionamento da célula combustível, mostrando características importantes de desempenho e prováveis melhorias que podem ser impostas no sistema integrado. Estes parâmetros são coletados diretamente com o auxílio de medidores de corrente e tensão. Posteriormente, calcula-se a potência e o consumo de hidrogênio teórico (equação 40) e plota-se as curvas características da célula combustível (tensão versus corrente, potência versus corrente e consumo de hidrogênio versus potência), a curva de polarização e suas respectivas regiões de perdas e o gráfico de eficiência operacional. Nesta etapa, os testes foram realizados em triplicata para melhor comparação dos resultados.

Inicialmente, mediu-se a tensão em circuito aberto da célula, ou seja, a tensão máxima que a célula fornece sem a presença de nenhuma carga resistiva acionada. Em seguida, os testes foram realizados com o acionamento gradativo das resistências elétricas disponíveis, coletando-se os valores de corrente e tensão com o auxílio de um amperímetro e um voltímetro, respectivamente.

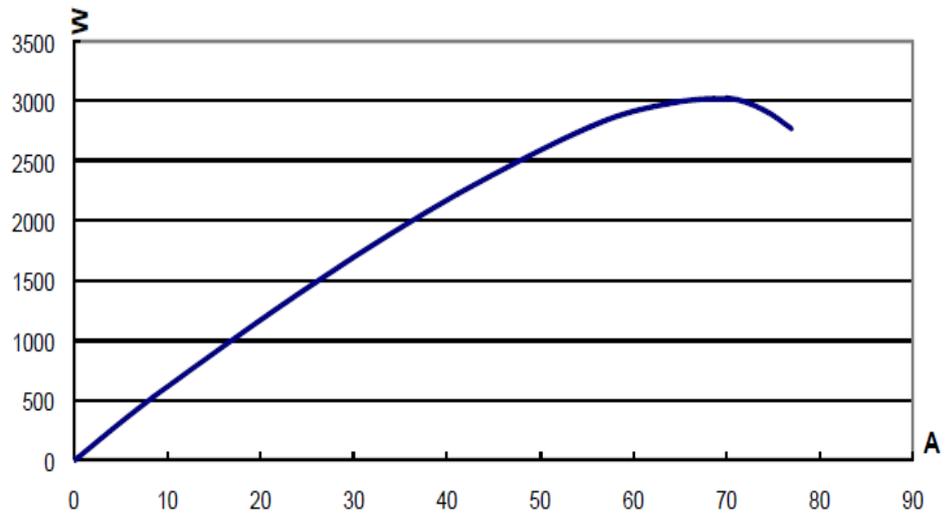
O manual do fabricante apresenta (Figuras 10, 11 e 12) as curvas características da célula FCS – c3000 e, a partir delas, podem ser comparados com às curvas dos testes experimentais.

**Figura 10** - Curva de tensão versus corrente da célula combustível FCS - c3000.



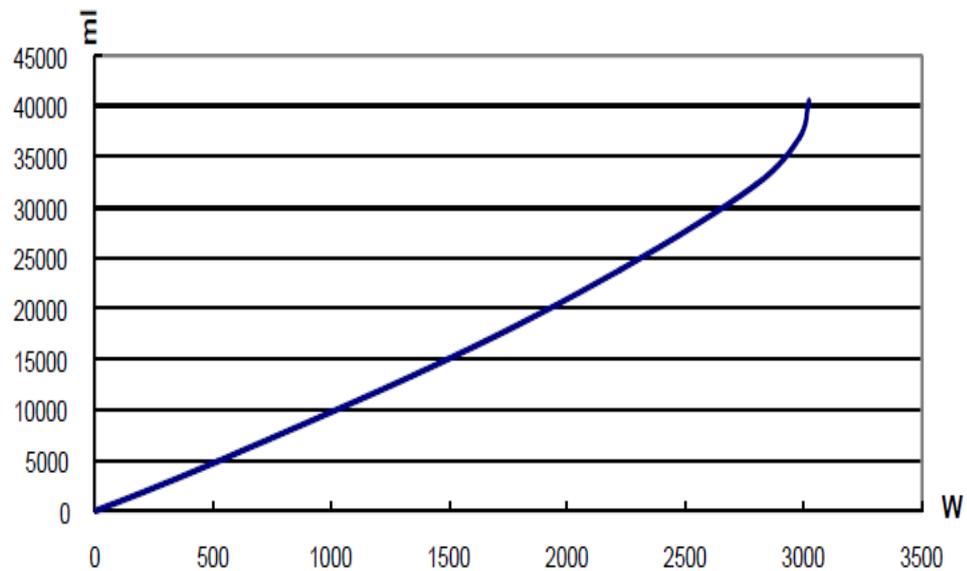
Fonte: Manual do usuário da FCS – c3000.

**Figura 11** - Curva de potência versus corrente da célula combustível FCS - c3000.



Fonte: Manual do usuário da FCS – c3000.

**Figura 12** - Curva de consumo de  $H_2$  versus potência da célula combustível FCS - c3000.



Fonte: Manual do usuário da FCS – c3000.

Estas curvas apresentam o funcionamento ideal da célula combustível, até sua máxima eficiência. Valores discrepantes de curvas experimentais quando comparados com as curvas do fabricante sugerem problemas de funcionamento e/ou operação.

### 3.2.3 Produção e consumo de hidrogênio

Foram realizados três testes para avaliação das vazões de produção e consumo de hidrogênio. No primeiro teste avaliou-se a quantidade de hidrogênio produzido, a corrente elétrica necessária da concessionária e o acionamento do compressor para que ocorresse o armazenamento acima de 10 bar. O eletrolisador foi configurado para produzir 10 bar de hidrogênio por ciclo com as 4 unidades eletrolíticas em funcionamento contínuo. O hidrogênio foi enviado por injeções consecutivas, a cada ciclo, aos cilindros de armazenamento.

O segundo teste remeteu-se ao hidrogênio consumido pela célula combustível, com enfoque na máxima potência e consumo de hidrogênio, assim como a comparação entre a vazão teórica (calculado pela equação 40) e real de hidrogênio. Os testes foram realizados continuamente, utilizando hidrogênio armazenado, com uma pressão de entrada na célula combustível de 0,5 bar. Foram acionadas diferentes resistências a fim de determinar a máxima potência gerada, assim como a vazão de hidrogênio consumido.

Por fim, no terceiro teste foi feita uma avaliação da vazão produzida e consumida simultaneamente, sem a necessidade de armazenamento do hidrogênio, e assim, identificando qual o ponto ideal de operação das duas máquinas juntas. O eletrolisador e a célula combustível permaneceram em funcionamento como nos testes anteriores, sendo que, a célula combustível encontrava-se, inicialmente, em circuito aberto. Foram utilizadas as lâmpadas de 220 V como resistências de consumo, buscando a quantidade ideal de lâmpadas em funcionamento simultâneo com a produção de hidrogênio.

### 3.2.4 Inserção do inversor *grid-tie* no sistema integrado

Nesta etapa, os testes consistiram em analisar o volume de hidrogênio consumido pela célula combustível em uma hora de funcionamento com geração fixa de aproximadamente 0,7 kW, assim como avaliar a corrente elétrica enviada à rede. Os testes foram realizados em triplicata.

Os testes foram executados durante 1 hora com a célula combustível ativa, sem interrupções. Os dados de corrente, vazão e potência de geração foram coletados *on-line* e os

dados de pressão inicial e final foram coletados em um manômetro digital presente no sistema de compressão. Toda a energia produzida foi inserida na rede elétrica da concessionária.

### 3.2.5 Análise econômica da produção de hidrogênio

A metodologia utilizada para a análise econômica da produção de hidrogênio foi aplicada por Braga (2014) e baseada na metodologia desenvolvida por Silveira e Gomes (1999). Este estudo de viabilidade econômica permite avaliar a atratividade de um projeto e envolve uma relação entre o investimento (eletrolisador PEMEC), o custo de operação e o custo de manutenção do equipamento, desconsiderando o investimento em acessórios, tais como bombas, válvulas, tubulações, entre outros.

A equação 48 descreve o cálculo do custo de produção de hidrogênio.

$$C_{H_2} = \frac{Inv.f}{H.E_{H_2}} + C_{op} + C_{man} \quad (48)$$

Em que:  $C_{H_2}$ : custo de produção de hidrogênio [US\$/kWh];  $Inv$ : valor do investimento no sistema de produção de hidrogênio [US\$];  $H$ : tempo de operação [h/ano];  $f$ : fator de anuidade [1/ano];  $E_{H_2}$ : quantidade de energia contida no hidrogênio produzido;  $C_{op}$ : custo de operação [US\$/kWh];  $C_{man}$ : custo de manutenção [US\$/kWh].

O valor de investimento ( $Inv$ ) depende exclusivamente da tecnologia do eletrolisador utilizada. Braga (2014) utiliza a equação 49 desenvolvida por Saur (2008), e que, segundo a NREL (*National Renewable Energy Laboratory*), estima o custo de investimento para eletrolisadores alcalinos e PEM em milhares de dólares, com precisão para uma faixa entre 0,1 kg.h<sup>-1</sup> e 100 kg.h<sup>-1</sup>.

$$Inv = 224,49 \cdot \left( m_{H_2} \right)^{0,6156} \quad (49)$$

O valor do investimento do eletrolisador obtido pela equação 49 pode ser substituída pelo valor real de investimento do equipamento no ato da compra, caso o valor de vazão mássica não esteja dentro da faixa aplicável. Este trabalho considera a produção de hidrogênio

a partir de um eletrolisador de modelo Hy-PEM XP 024, fabricado pela H<sub>2</sub>Planet, com capacidade de produção de 240 NL.h<sup>-1</sup> (0,24 Nm<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup> ou 6,67·10<sup>-5</sup> Nm<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>). A vazão mássica de hidrogênio, estabelecida pelo fabricante, é de 0,02016 kg.h<sup>-1</sup>.

Durante a operação do reator eletrolítico, o valor obtido para a vazão volumétrica real de hidrogênio foi de 0,144 Nm<sup>3</sup>/h ou 4,0·10<sup>-5</sup> Nm<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, ou em vazão mássica, de 0,012096 kg.h<sup>-1</sup>. Deste modo, como o eletrolisador não estava operando em sua capacidade máxima de projeto, foi feito também um estudo de custo comparativo entre o valor encontrado experimentalmente (valor real) e aquele especificado pelo fabricante (valor ideal).

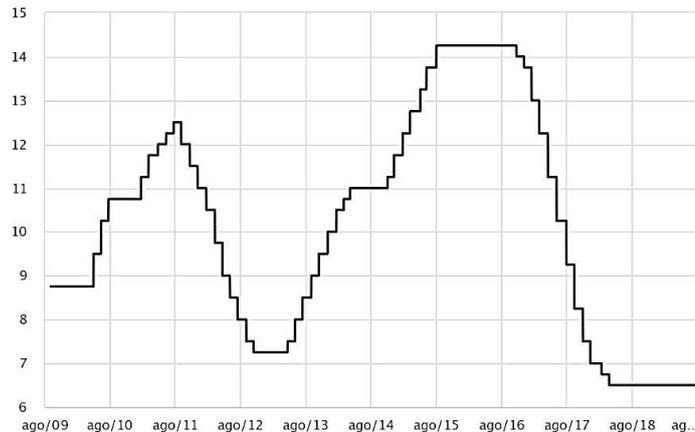
Braga (2014) define o fator de anuidade ( $f$ ) pelas equações (50) e (51):

$$f = \frac{q^k (q-1)}{q^k - 1} \quad (50)$$

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (51)$$

Em que:  $k$ : período de amortização [ano(s)];  $r$ : taxa de juros anual [%].

A taxa de juros anual é suscetível a flutuações do mercado financeiro e conforme a projeção do Banco Central do Brasil (Figura 13), no período de outubro de 2016 a fevereiro de 2018 a taxa de juros anual variou de 14,25% até 6,75%. A meta de março de 2018 estabelecida pela SELIC (Sistema Especial de Liquidação e de Custódia) foi de 6,50%, permanecendo até agosto de 2019 nesse valor. Portanto, para minimizar possíveis variações, serão consideradas taxas de juros de 5%, 10% e 15%.

**Figura 13 - Meta para a taxa SELIC.**

Fonte: Banco do Brasil, 2019.

Segundo Bhandari *et al.* (2013), o tempo de vida de um eletrolisador PEM é de até 20 anos. Devido à reação endotérmica e à circulação da água de alimentação, o gerenciamento térmico pode ser bem controlado e o risco de superaquecimento local é baixo, desde que ocorra uma distribuição uniforme da corrente nos eletrodos. Como a membrana polimérica é o componente crítico nestas tecnologias, a vida útil da PEM é limitada em comparação com os eletrólitos alcalinos (SMOLINKA *et al.*, 2011). Conforme Braga (2015), neste trabalho considera-se também o maior período de amortização aceito para estimativas como um terço da vida total do equipamento, neste caso, aproximadamente 7 anos.

O tempo de operação ( $H$ ), pode variar basicamente de acordo com o número de horas por turno e de turnos por dia. Admitindo-se uma operação contínua de 3 turnos de 7 horas ou 21 h/dia em 365 dia/ano, o maior tempo de operação anual será de 7665 horas.

Segundo Braga (2015), a quantidade de energia contida no hidrogênio ( $E_{H_2}$ ) pode ser calculada pelo produto da vazão mássica de hidrogênio e o seu poder calorífico inferior (PCI), conforme apresentado pela Equação 52.

$$E_{H_2} = \dot{m}_{H_2} . PCI \quad (52)$$

Em que:  $\dot{m}_{H_2}$ : vazão mássica de hidrogênio [kg/s];  $PCI$ : poder calorífico inferior [kJ/kg].

Sørensen (2012) propõe a densidade do hidrogênio nas condições ambientais (1,0 bar e 298 K) como sendo aproximadamente 0,084 kg.Nm<sup>-3</sup>. Segundo Braga (2014), o PCI do hidrogênio pode ser estimado como 119950 kJ.kg<sup>-1</sup>.

O custo de operação ( $C_{op}$ ) depende essencialmente da fonte de energia a ser utilizada. No caso dos processos eletrolíticos, considera-se o custo da eletricidade utilizada (hidrelétrica), de acordo com a equação (53).

$$C_{op} = \frac{P_E C_E + \dot{m}_{H_2O} C_{H_2O}}{E_{H_2}} \quad (53)$$

Em que:  $P_E$ : energia elétrica consumida [kW];  $C_E$ : custo da eletricidade [US\$/kWh];  $\dot{m}_{H_2O}$ : quantidade de água requerida pelo eletrolisador [m<sup>3</sup>/h];  $C_{H_2O}$ : custo da água [US\$/(m<sup>3</sup>/h)].

$P_E$  e  $\dot{m}_{H_2O}$  são definidos conforme o eletrolisador selecionado. O reator eletrolítico utilizado demanda um total de 2,3 kW de energia elétrica consumida.

O custo da energia elétrica é uma das principais variáveis na análise econômica da produção de hidrogênio, uma vez que este parâmetro estará relacionado ao custo variável de funcionamento do eletrolisador. Neste trabalho, será assumido a fonte de energia proveniente de hidrelétrica estabelecidos pela rede da concessionária ENERGISA em Campina Grande na Paraíba. Para a modalidade tarifária convencional de baixa tensão, o valor é fixado, atualmente, em 0,50 R\$/kWh (0,13 US\$/kWh) para a classe industrial – Tarifa B3. (ENERGISA, 2019).

O custo da água é determinado por uma empresa governamental responsável pelo seu fornecimento, que no caso do estado da Paraíba é estabelecido pela empresa CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba). Para atividades industriais a atual tarifa por metro cúbico de água consumida, considerando a utilização de até 10 m<sup>3</sup>/mês, está no valor de R\$ 81,94 (US\$ 21,45) (CAGEPA, 2019).

Constatou-se, experimentalmente, que o eletrolisador consome por volta de 7,7 L de água deionizada com condutividade inicial igual a zero em 2 dias (operação diária de 21 h), sendo necessário a troca da água. Encontrou-se que a vazão volumétrica de água é 0,183 L.h<sup>-1</sup> ou 1,83·10<sup>-4</sup> m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. Com estes valores, e conhecendo-se o custo da água, determinou-se que o consumo mensal de água para 21 h de operação por dia, ou seja, 630 h/mês. Verificou-se,

então, que a vazão volumétrica a ser alimentada ao reator é de 0,11529 m<sup>3</sup>/mês. Logo, a tarifa é fixada em US\$ 21,45.

A água utilizada no eletrolisador deve ser deionizada, logo um custo de deionização deveria ser creditado a mais no custo final da água. No entanto, devido ao pouco volume de água utilizado no equipamento durante os testes, o custo referente ao processo de deionização constará dentro do limite especificado pela Tarifa.

Kothari, Buddhi e Sawhney (2008) propuseram o custo de manutenção do sistema ( $C_{man}$ ) como sendo 3% do custo de investimento, conforme a equação 54. Braga (2014) utilizou esta metodologia para a comparação com os processos eletrolíticos.

$$C_{man} = 0,03 \cdot \frac{Inv.f}{H \cdot E_{H_2}} \quad (54)$$

Na Tabela 4 são apresentados resumidamente os valores de cada parâmetro operacional utilizados para a determinação do custo de produção do hidrogênio. Os valores monetários foram considerados em dólares americanos, e segundo a taxa cambial, vigente em 11 de julho de 2019, corresponde a R\$ 1,00 = US\$ 0,27 ou 1 US\$ = R\$ 3,76 (MELHORCAMBIO, 2019).

**Tabela 4 - Parâmetros econômicos.**

<b>r [%]</b>	<b>k [anos]</b>	<b>H [h/ano]</b>	<b>PCI H<sub>2</sub> [kJ.kg<sup>-1</sup>]</b>
5, 10 e 15	Até 7 anos	7665	119950
<b><math>\dot{m}_{H_2O}</math> [m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>]</b>	<b>C<sub>H<sub>2O</sub></sub> [US\$/(m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>)]</b>	<b>P<sub>Electric</sub> [kW]</b>	<b>C<sub>Electric</sub> [US\$/kWh]</b>
1,83·10 <sup>-4</sup>	21,45	2,3	0,13 – 0,17

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 mostra os valores de investimento de cada equipamento do sistema estudado. Os valores foram fornecidos pela empresa H<sub>2</sub>planet, segundo uma cotação aproximada de varejo e avaliados em euros (€). Os custos de investimento foram convertidos para dólares americanos segundo a taxa cambial vigente em 11 de julho de 2019 correspondente a € 1,00 = US\$ 1,09675 (MELHORCAMBIO, 2019).

**Tabela 5** - Valores de investimento e potência elétrica dos equipamentos do sistema integrado de produção de energia elétrica.

	<b>Eletrolisador Hy PEM XP 024</b>	<b>Hy-COMP XT + Hy-Refill Box + Compressor</b>	<b>Célula combustível H – 3000</b>
Preço (€)	38000,00	17000,00	10500,00
Preço (US\$)	41676,50	18644,75	11515,87
Potência (kW)	2,3	1,6	3,0

Fonte: Orçamento da H<sub>2</sub>Planet.

Um dos parâmetros mais importantes quando se analisa investimento em equipamentos e retorno de capital investido é o período de amortização.

Regulamenta a Lei nº 6.404/76, das sociedades por ações, que a amortização acontece, quando corresponder à perda do valor do capital aplicado na aquisição de direitos da propriedade industrial ou comercial e quaisquer outros com existência ou exercício de duração limitada, ou cujo objeto sejam bens de utilização por prazo legal ou contratualmente limitado. No caso da amortização, somente se amortizam os imobilizados cujos valores se reduzem ao longo do tempo.

A amortização não cessa quando o ativo se torna obsoleto ou é retirado temporariamente de operação, somente quando esgotada seu uso (BERNARDES e COLOSSI, 2014).

O período de amortização é um parâmetro importante para definição de oportunidades de investimentos, sendo que, um elevado período de amortização não é algo atrativo. O fator preponderante nesta análise é o tempo de amortização, ou seja, o tempo necessário para a extinção de uma dívida por meio de pagamentos feitos periodicamente, ou seja, quitando-a paulatinamente.

### 3.2.6 Custo de energia elétrica no sistema integrado

O custo da energia elétrica é um dos principais pontos a ser analisado no Projeto, pois é o que torna o processo viável a ser implantado em diferentes meios. A energia elétrica no sistema integrado está inserida em duas categorias. No primeiro bloco a energia elétrica da

concessionária é distribuída pelo painel de controle e consumida pelo eletrolisador e pelo compressor. No segundo bloco é produzida energia elétrica pela célula combustível e enviada à rede da concessionária ou utilizada para o funcionamento de alguma carga útil.

Neste apartado, será calculado o custo de energia elétrica consumida pelo primeiro bloco com uma operação diária de 7 h/dia do eletrolisador com capacidade máxima real de produção. Também será feita uma estimativa para o custo mensal. Em seguida, será analisado o ganho referente à produção de energia elétrica pela célula combustível ao consumir todo o hidrogênio produzido diariamente e mensalmente. Será adotado nos cálculos a modalidade tarifária convencional de baixa tensão em horário de ponta (17:30 às 20:29), ou seja, quando o preço da eletricidade possui o maior valor, fixado atualmente em 1,10402 R\$/kWh (0,27 US\$/kWh) para a classe industrial – Tarifa B3 (ENERGISA, 2019).

O teste de produção de hidrogênio foi executado similarmente ao primeiro teste do tópico 3.2.3.

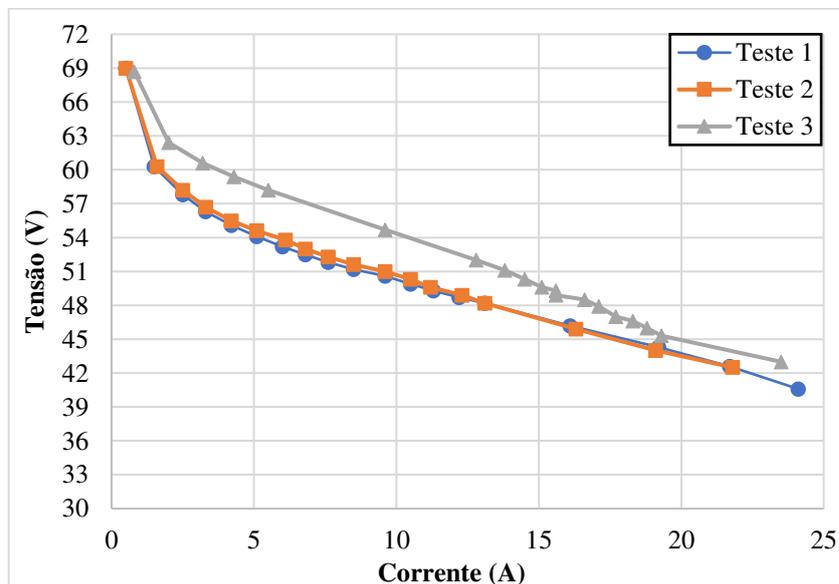
O teste de consumo de hidrogênio foi executado similarmente ao teste do tópico 3.2.4, com todo o hidrogênio produzido da etapa anterior sendo consumido.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Curvas características

As Figuras 14, 15 e 16 representam as curvas características da célula combustível FCS – c3000 obtidas em três testes distintos.

**Figura 14** - Curva característica tensão versus corrente.

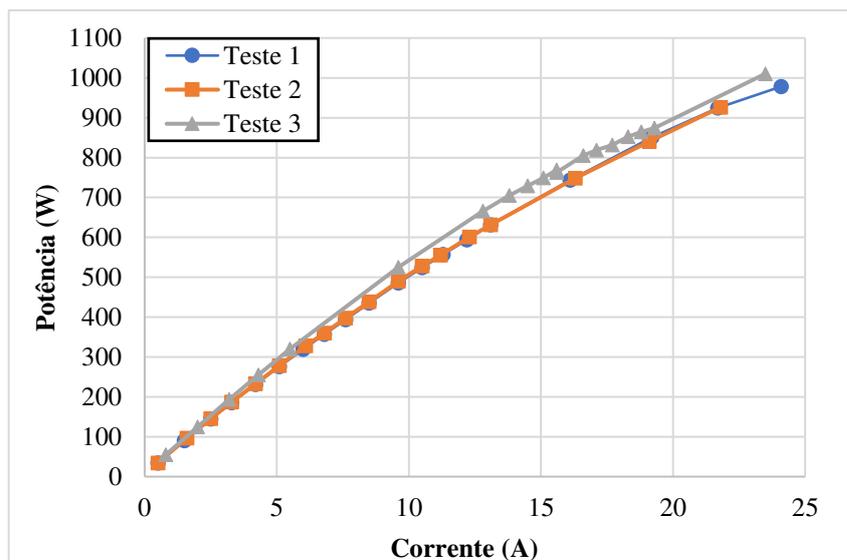


Fonte: Autoria própria.

A curva apresentada na Figura 14 apresenta em circuito aberto, uma tensão máxima de aproximadamente 69,0 V para os três testes. Quando comparada esta curva com a fornecida pelo manual do fabricante (Figura 10), notou-se que a tensão máxima encontrada experimentalmente apresenta um valor aproximado ao do fornecedor, cujo valor está em torno de 68,0 V. Nota-se que o aumento da corrente a cada chave de resistência acionada advém uma considerada queda da tensão de saída da célula, comportamento diferente das curvas do manual, onde uma determinada tensão é capaz de manter uma densidade de corrente muito maior. Este fato está associado a uma maior perda por concentração no início (passando de 69,0 V para aproximadamente 61,0 V) e por perdas ôhmicas devido ao acionamento de diferentes resistências elétricas ao longo dos testes. O comportamento da curva do teste 3

difere um pouco do teste 1 e 2 devido a ordem de acionamento das resistências. No teste 1 e 2 o painel de lâmpadas foi acionado primeiramente, com uma pequena variação no intervalo de valores de corrente de um acionamento para outro, enquanto que, no teste 3 as resistências dos ferros de passar foram inicialmente acionadas, com um maior intervalo de valores de corrente.

**Figura 15** - Curva característica potência versus corrente.

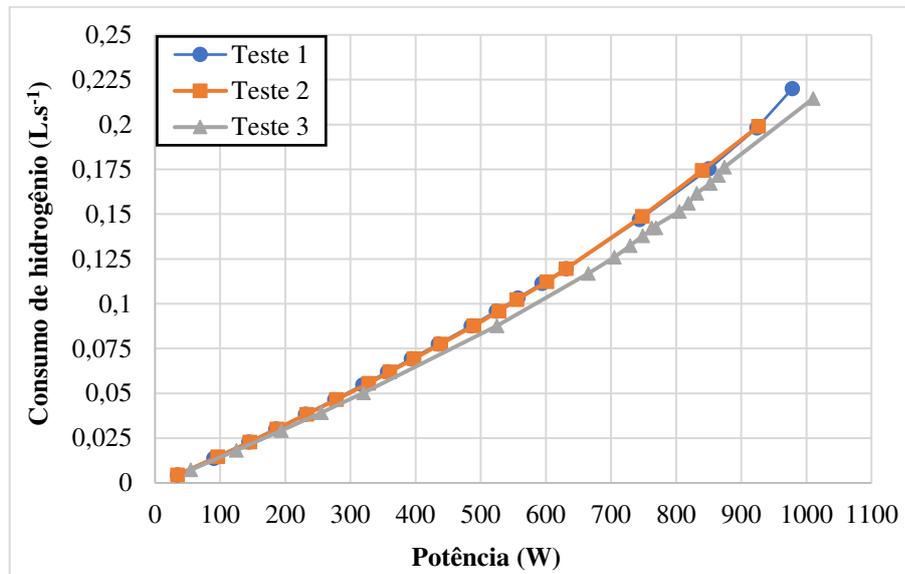


Fonte: Autoria própria.

Avaliando-se a Figura 15 é possível observar que momentaneamente a célula combustível é capaz de fornecer uma potência máxima de aproximadamente 1010,5 W (23,5 A e 43,0 V) como mostrado no teste 3, ou seja, 33,7% da sua capacidade máxima. Isto está associado ao fato de que é necessário a inserção de novas cargas elétricas na etapa de caracterização para quantificar o teor energético máximo que a célula combustível desempenhará. O aumento da potência de saída da célula combustível vai depender da quantidade de resistências elétricas que consumam esta eletricidade produzida.

Apesar da corrente e da tensão de operação serem diretamente proporcionais a potência da célula combustível, a corrente tem maior influência no valor da potência. O aumento da corrente devido à adição de resistências faz com que a célula produza mais potência para suprir a necessidade de energia do sistema.

**Figura 16** - Curva característica do consumo de hidrogênio versus potência.

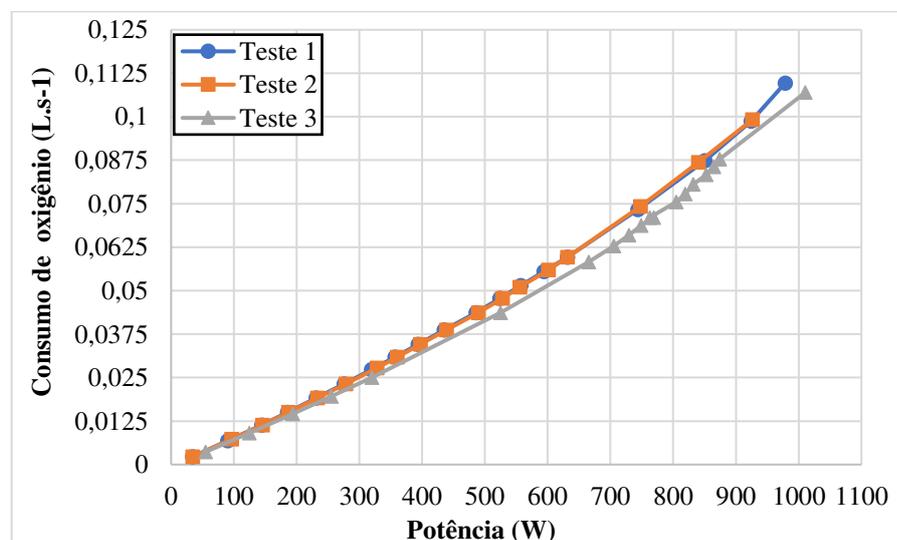


Fonte: Autoria própria.

De acordo com a Figura 16, para uma potência máxima obtida de 1010,5 W, é necessária uma vazão de 0,21 L.s<sup>-1</sup> de hidrogênio. Logo, pode-se afirmar que quanto maior a potência de saída da célula combustível, conseqüentemente maior será o consumo de hidrogênio na reação.

A Figura 17 corresponde a curva característica do consumo de oxigênio versus potência.

**Figura 17** - Curva característica do consumo de oxigênio versus potência.

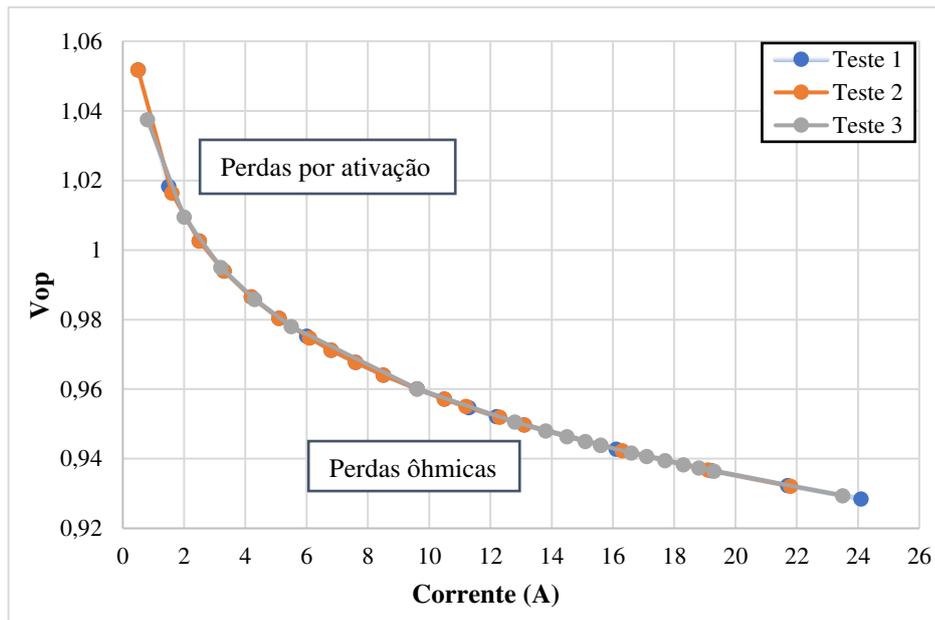


Fonte: Autoria própria.

O consumo de oxigênio segue o mesmo perfil do consumo de hidrogênio, sendo que, na proporção de 2 hidrogênio:1 oxigênio. Avaliando o valor amostral de maior potência (1010,5 W), é necessária uma vazão de  $0,11 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  de oxigênio e  $0,21 \text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$  de hidrogênio.

Na Figura 18 é possível identificar as perdas por ativação e as perdas ôhmicas da curva de polarização.

**Figura 18** - Curva de polarização da célula combustível.



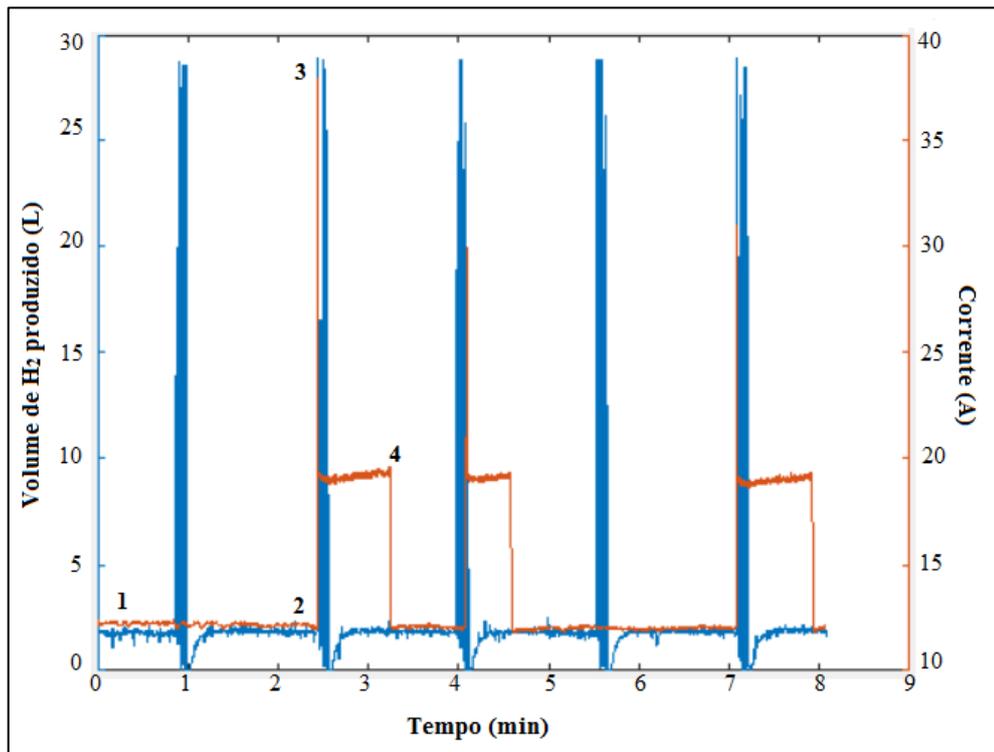
Fonte: Autoria própria.

A primeira região da Figura 18 (entre 0 e aproximadamente 10 A), aparece uma curva com maior inclinação que está associada às perdas por ativação, em que ocorre a formação de íons na superfície do eletrodo, e caso estes íons não sejam removidos, haverá uma queda no desempenho da célula. A segunda região (entre 10 e 24 A), ocorre uma curva menos acentuada e mais linear que é caracterizada pelas perdas ôhmicas, sucedidas principalmente devido à resistência do fluxo de íons no eletrólito. As perdas ôhmicas são predominantes na curva de polarização e se estende até altas densidades de corrente. Nos testes não foi possível a visualização das perdas por concentração na terceira região da curva de polarização devido a limitação de cargas elétrica utilizadas. Poder-se-ia avaliar na terceira região a máxima eficiência da célula combustível.

## 4.2 Produção e consumo de hidrogênio

Na Figura 19 é mostrada a vazão real de produção de hidrogênio ao longo de 8 min de teste com as 4 unidades eletrolíticas funcionando, assim como a corrente elétrica necessária para seu funcionamento.

**Figura 19 - Produção de hidrogênio.**



Fonte: Autoria própria.

A vazão real de hidrogênio é comprimida e enviada aos cilindros por pulsos, como pode ser observado na Figura 19, cada pico da curva azul representa uma batelada produzida e enviada. A quantidade de gás produzido foi medida utilizando o somatório das áreas sob a curva dos pulsos gerados e integrados utilizando o método numérico dos trapézios. Obteve-se uma vazão de produção de  $2,38 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , ou seja, 59,5% da capacidade máxima determinada pelo fabricante. Em relação à corrente elétrica necessária, observa-se que entre o início de partida do eletrolisador (ponto 1) até o ponto 2 não houve o acionamento do compressor, permanecendo apenas o eletrolisador em funcionamento com uma corrente de 12 A. No momento que a segunda injeção inicia (ponto 3) o compressor é ativado para suprir a queda

de pressão do sistema de compressão, indo até o ponto 4, com uma corrente de 19 A. Esse maior patamar de corrente está associado ao consumo de energia conjunto (eletrolisador + compressor). No momento em que o compressor é acionado ocorre um pico de alta intensidade de corrente, característico da ativação de máquinas elétricas. Os demais patamares seguem o mesmo perfil explanado anteriormente.

Na Tabela 6 encontram-se os valores de corrente e das vazões reais e teóricas de hidrogênio consumido para diferentes testes.

**Tabela 6 - vazão real e ideal de hidrogênio consumido.**

<b>Teste</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Vazão real de H<sub>2</sub> (L.min<sup>-1</sup>)</b>	<b>Vazão teórica de H<sub>2</sub> (L.min<sup>-1</sup>)</b>	<b>Erro relativo (%)</b>	<b>O<sub>2</sub> consumido (L.min<sup>-1</sup>)</b>
<b>1</b>	5,1	2,03	2,79	37,62	1,39
<b>2</b>	8,8	4,06	4,82	18,73	2,40
<b>3</b>	12,3	6,00	6,74	12,29	3,36
<b>4</b>	15,8	7,95	8,65	8,87	4,32
<b>5</b>	17,6	8,84	9,64	9,06	4,81
<b>6</b>	18,2	9,32	9,97	6,97	4,97
<b>7</b>	20,0	10,46	10,97	4,89	5,47
<b>8</b>	23,3	12,05	12,76	5,92	6,36
<b>9</b>	28,5	14,71	15,61	6,13	7,78
<b>10</b>	44,1	24,54	24,16	1,56	12,04
<b>11</b>	45,3	25,4	24,81	2,31	12,37

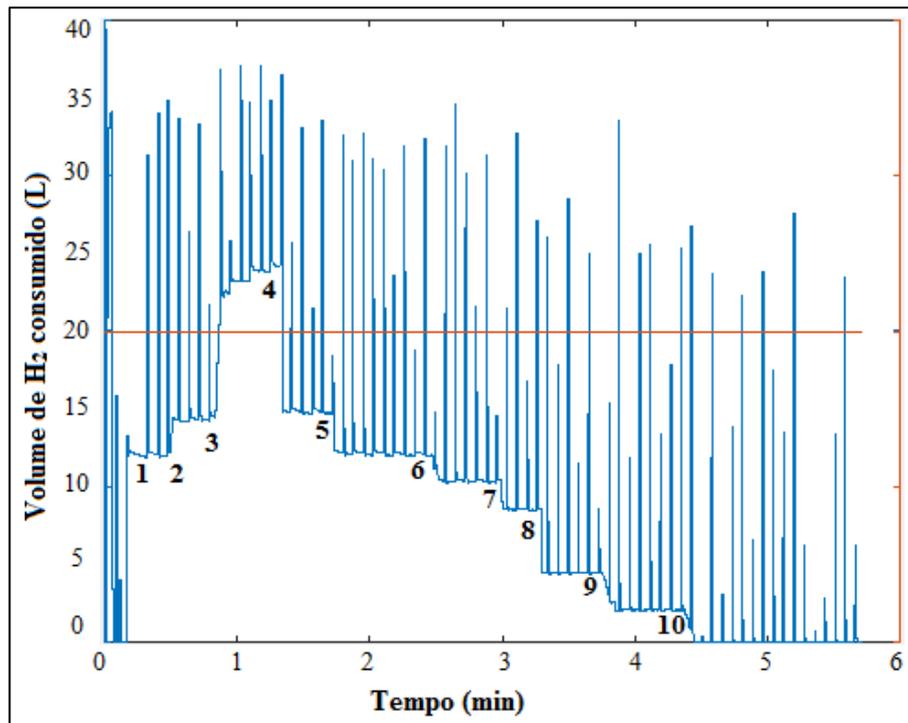
Fonte: Autoria própria

A vazão teórica calculada por meio da equação 40 se aproxima da vazão real quantificada em um fluxômetro de gás à medida que se aumenta a potência da célula combustível, diminuindo o erro relativo para um valor de 1,56% (teste 10) do valor real. A provável causa para que isso ocorra é que com o aumento da corrente a tensão operacional não varia tanto, pois as perdas ôhmicas prevalecem nesta etapa. O teste 11 apresenta a

máxima corrente elétrica produzida (45,3 A) até o presente momento na célula combustível, no qual foi necessário  $25,4 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  de hidrogênio e  $12,37 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  de oxigênio.

A vazão real de consumo de hidrogênio pela PEMFC é mostrada na Figura 20.

**Figura 20 - Consumo de hidrogênio.**



Fonte: Autoria própria.

A partir da Figura 20 pode-se destacar as seguintes regiões relativas ao teste executado:

- 1 - 2: todas as resistências de consumo funcionando (fio de níquel, resistências dos ferros de passar e painel de lâmpadas ligado);
- 2 - 3: acionamento de uma resistência de aquecimento helicoidal;
- 3 - 4: maior consumo de hidrogênio devido ao aquecimento de uma barra de ferro no centro da resistência de aquecimento;
- 4 - 5: retirada da barra de ferro e permanência da resistência de aquecimento ligada;
- 5 - 6: desligada da resistência de aquecimento e permanência das demais resistências ligadas (fio de níquel, ferros de passar e painel de lâmpadas ligado);
- 6 - 7: desligado todas as resistências dos ferros de passar;
- 7 - 8: desligado dois fios de cobre;

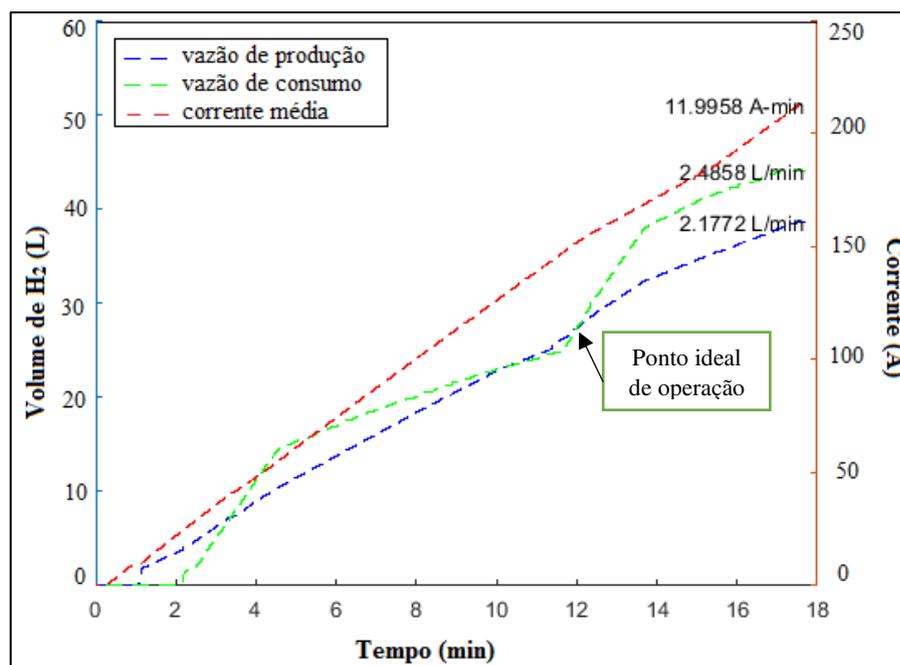
- 8 - 9: desligado mais dois fios de cobre restantes;
- 9 - 10: desligado 5 malhas de lâmpadas;
- 10 em diante: desligados as outras 5 malhas de lâmpadas restantes.

Quando ocorre o acionamento de cada resistência elétrica, a célula combustível aumenta o consumo de hidrogênio. O máximo consumo de hidrogênio ocorre na etapa 3 - 4 quando ocorre o aquecimento de uma barra de ferro no centro da resistência helicoidal, atingindo uma máxima corrente elétrica de 45,3 A e uma vazão de consumo real de hidrogênio de 25,4 L.min<sup>-1</sup>, mostrando que a célula combustível gerou aproximadamente 2084 W de potência, ou seja, aproximadamente 70% de sua potência máxima.

#### 4.2.1 Produção e consumo de hidrogênio simultaneamente

A Figura 21 apresenta a produção real de hidrogênio pelo eletrolisador e o consumo real de hidrogênio pela célula combustível, ambos ocorrendo simultaneamente, sem a necessidade da ativação do sistema de compressão e armazenamento nos cilindros.

**Figura 21** - Produção e consumo de hidrogênio simultaneamente.



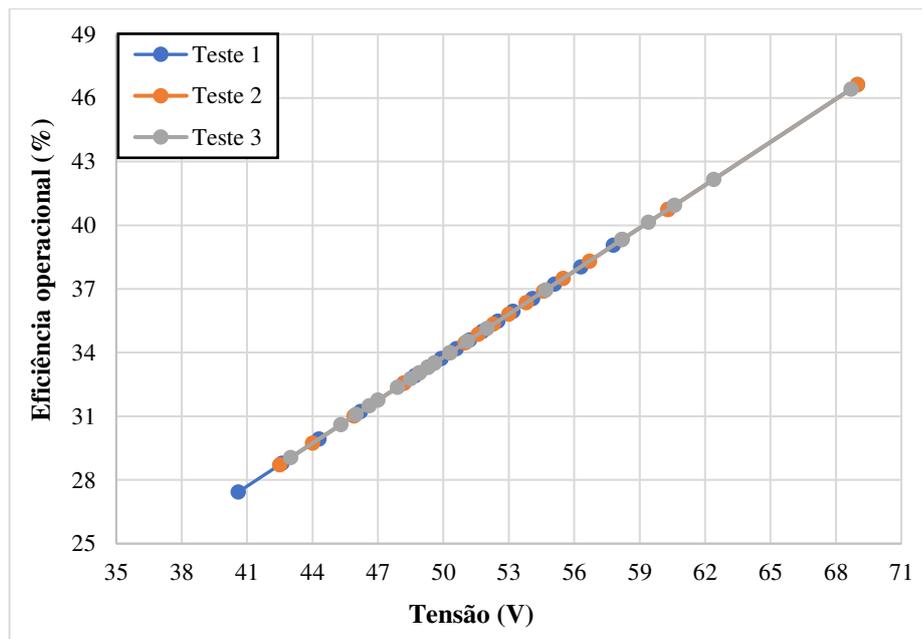
Fonte: Autoria própria.

Ao final de 18 min de teste foram produzidos 38 L de hidrogênio e consumido 44 L com adição e retiradas de resistências para o consumo da eletricidade gerada, enquanto que o consumo de energia elétrica da concessionária para o funcionamento do eletrolisador durante os 18 min foi de 212 A. A corrente média obtida foi de  $12 \text{ A}\cdot\text{min}^{-1}$ . A curva de produção manteve-se constante ao longo do tempo, sem interrupções na produção. Obteve-se uma vazão de hidrogênio produzido de  $2,17 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$  e uma vazão de hidrogênio consumido de  $2,49 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ . Além disso, observa-se na curva de integração que em 12 min a produção de hidrogênio superou o consumo quando as resistências elétricas foram desligadas. Ao colocar-se em funcionamento 3 lâmpadas de 60 W e 127 V ligadas em 48 volts DC manteve-se o consumo com a produção quase sincronizada, sendo este, o ponto de operação ideal de produção e consumo simultâneo.

### 4.3 Eficiências

A Figura 22 apresenta uma análise da eficiência operacional em relação a tensão operacional.

**Figura 22** - Eficiência operacional versus tensão operacional.



Fonte: Autoria própria.

A máxima eficiência operacional (46%) ocorre quando a célula combustível está em circuito aberto, ou seja, não há carga elétrica acionada para o consumo de energia produzida. A eficiência operacional é diretamente proporcional à tensão de operação da célula, ou seja, acréscimos na carga alimentada da PEMFC provocam um aumento na corrente e uma diminuição na tensão ocasionando uma diminuição no rendimento da máquina.

De acordo com Hodge (2011), a eficiência termodinâmica pode ser considerada constante para baixas temperaturas (em torno de 83%), já que não há grandes diferenças no valor da variação da energia livre de Gibbs ( $\Delta G$ ) e na variação na entalpia ( $\Delta H$ ) em faixas abaixo de 500 K.

#### 4.4 Análise da inserção do inversor no sistema integrado

Os dados coletados em triplicata durante 1 h de operação da célula combustível encontram-se na Tabela 7.

**Tabela 7** - Parâmetros de operação da célula combustível com a inserção do inversor *grid-tie* durante 1 h de operação.

Teste	1	2	3
Pressão inicial de H <sub>2</sub> no cilindro (bar)	34,14	17,97	16,80
Pressão final de H <sub>2</sub> no cilindro (bar)	19,20	3,12	1,85
Variação de pressão (bar)	14,94	14,85	14,95
Corrente alternada (A)	2,70	2,80	2,70
Volume total de H <sub>2</sub> (L)	721,76	690,17	723,61
Vazão de H <sub>2</sub> (L.min <sup>-1</sup> )	11,42	10,50	12,06

Fonte: Autoria própria.

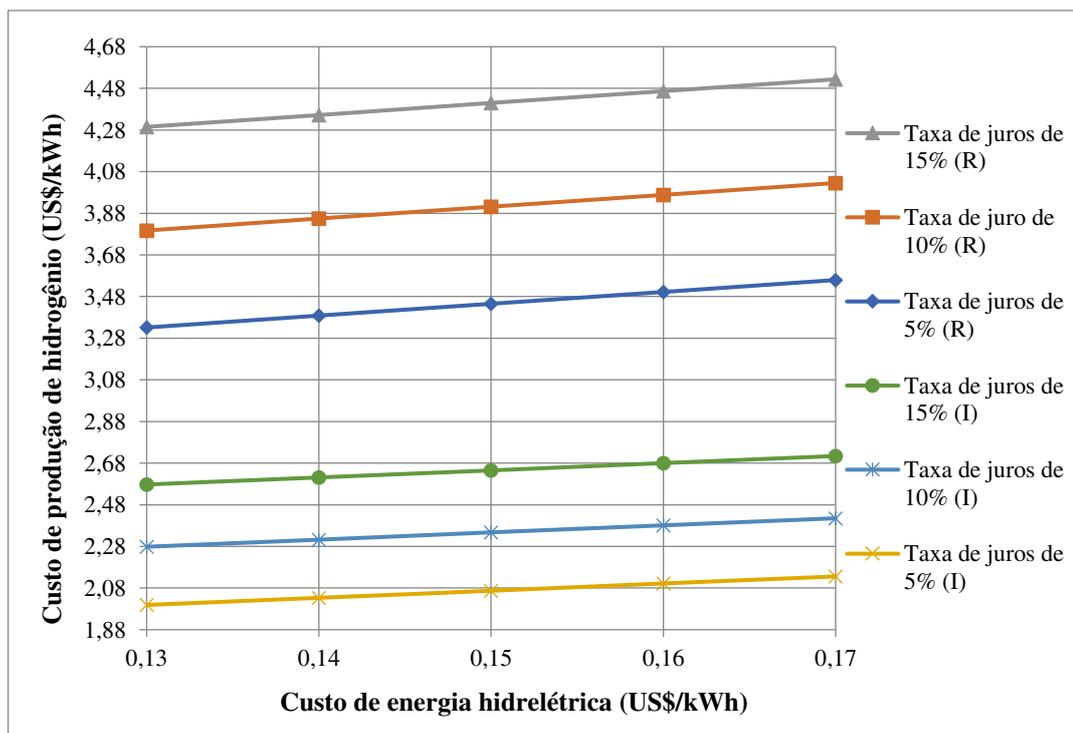
Nos três testes observa-se que foi utilizado aproximadamente 15 bar de hidrogênio armazenado para geração de 0,7 kW durante 1 hora de operação da célula combustível. O valor de corrente alternada está intrinsecamente ligado à corrente que passa pelo inversor e que é enviada à rede da concessionária, estando em torno de 2,75 A. Os testes 1 e 3 apresentam valores significativamente próximos um do outro, com valores médios de volume

total de hidrogênio consumido (723 L), corrente alternada (2,70 A) e pressão de hidrogênio (14,945 bar), mostrando que a célula combustível está operando corretamente como programada. O teste 2 teve um menor consumo de hidrogênio, quando comparado com os demais testes, no entanto, quando comparada a sua variação de pressão com as demais, observa-se também uma redução em aproximadamente 0,1 bar, que pode ter sido ocasionado por alguma interrupção da célula combustível ou queda de potência do inversor durante o tempo do teste.

#### 4.5 Análise econômica da produção de hidrogênio

A Figura 23 ilustra o comportamento do custo de produção de hidrogênio a partir da vazão mássica real (R) e ideal (I) de hidrogênio, como função da taxa de juros e do custo da energia utilizada para acionar o eletrolisador.

**Figura 23** - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise em função do custo de energia hidrelétrica para diferentes taxas de juros.



Fonte: Autoria própria.

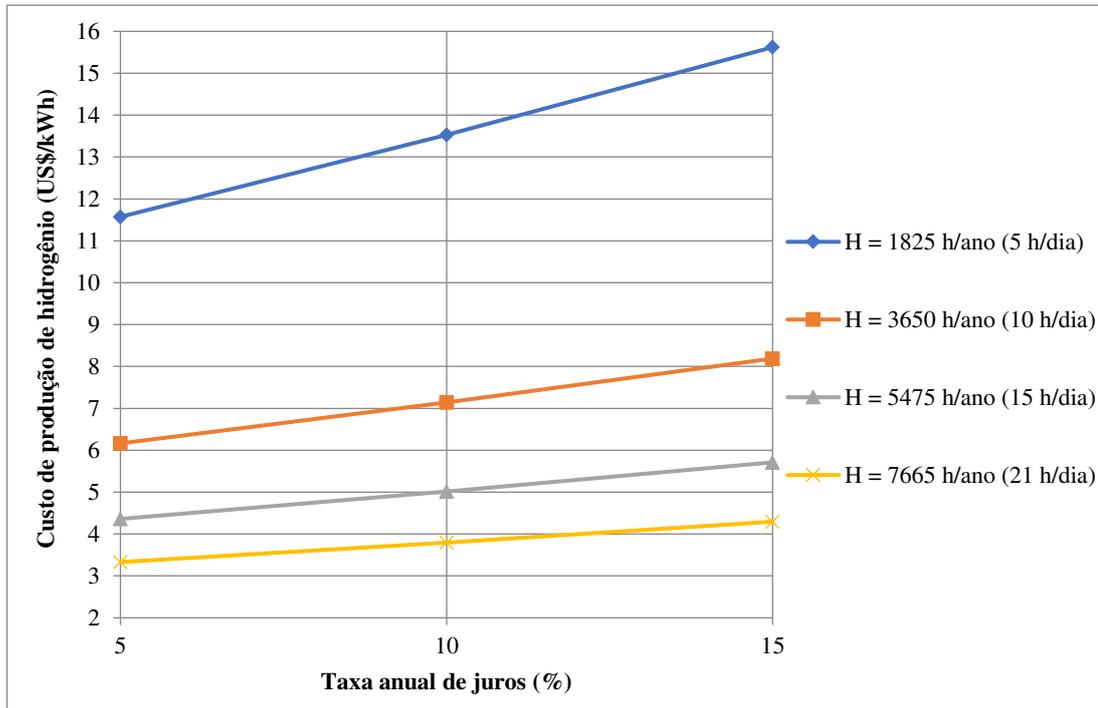
O custo de produção de hidrogênio aumenta linearmente com o custo de energia hidrelétrica utilizada para o funcionamento do eletrolisador, já que uma maior quantidade de energia elétrica da concessionária é necessária para a reação eletrolítica. No entanto, as retas apresentam uma menor amplitude entre os valores devido ao maior desenvolvimento da tecnologia associada, as usinas hidrelétricas. Ademais, quanto maior for a taxa de juros em vigor, maior será o preço do hidrogênio produzido, já que o custo final é diretamente proporcional aos juros impostos.

A Figura 23 apresenta custos de energia elétrica da concessionária variando entre 0,13 e 0,17 US\$/kWh, de produção real de hidrogênio de 3,33 a 4,52 US\$/kWh e de produção ideal de hidrogênio de 2,00 a 2,71 US\$/kWh. Quando comparados os dois casos, observa-se que o custo do hidrogênio produzido para o caso ideal é mais vantajoso, com a menor faixa de valores, já que há uma maior produção de hidrogênio com a mesma tecnologia e equipamento.

Braga (2015) verificou em seu trabalho o custo de produção de hidrogênio por um eletrolisador com vazão mássica de hidrogênio produzido de 2,697 kg/h para uma faixa de custos de energia elétrica gerada por hidrelétricas entre 0,03 e 0,07 US\$/kWh, obtendo custos de produção de hidrogênio entre 0,11 e 0,18 US\$/kWh. Quando comparado com a faixa de custos obtido nesta Pesquisa observa-se uma significativa diferença que está relacionada principalmente ao alto investimento do equipamento.

A Figura 24 compara os custos de produção de hidrogênio, a partir da vazão mássica real de hidrogênio, em função da taxa anual de juros e dos diferentes tempos de operação do eletrolisador, fixando-se o custo da eletricidade em 0,13 US\$/kWh.

**Figura 24** - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise em função da taxa anual de juros para diferentes tempos de operação.



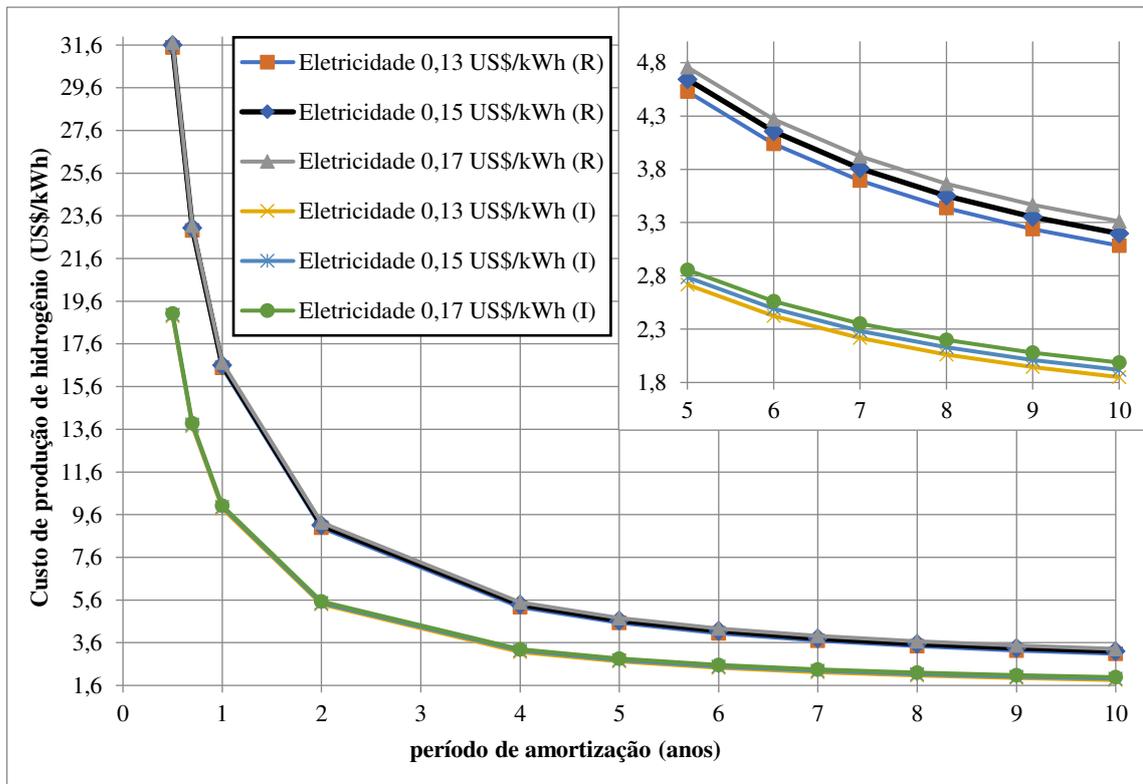
Fonte: Autoria própria.

Como observado na Figura 24 a operação diária com menor custo e mais aplicável é a que apresenta maior carga horária de funcionamento do eletrolisador, 21 h/dia, com custos de produção de hidrogênio entre 3,33 e 4,30 US\$/kWh. Quando comparado estes valores com a menor operação diária, 5 h/dia, o custo de produção tem um aumento de aproximadamente 3,5 vezes, ficando o valor do hidrogênio entre 11,57 e 15,62 US\$/kWh. Os tempos de operação diário de 10 e 15 h/dia aproximam-se mais do tempo de operação de 5 h/dia, mostrando que podem ser operações diárias viáveis, dependendo da demanda de energia necessária.

Para as próximas análises será adotado um valor de juros de 10% para o estudo do período de amortização, com a finalidade de minimizar as flutuações entre os valores.

A Figura 25 apresenta o comportamento gráfico entre o custo de produção de hidrogênio a partir da vazão mássica real (R) e ideal (I) de hidrogênio, e o período de amortização para custos de eletricidade de 0,13; 0,15 e 0,17 US\$/kWh.

**Figura 25** - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise em função do período de amortização para diferentes valores de eletricidade.



Fonte: Autoria própria.

Para um custo de produção real de hidrogênio de aproximadamente 3,70 US\$/kWh e custo da eletricidade de 0,13 US\$/kWh o tempo de amortização foi aproximadamente 7 anos. Após esse tempo inicia-se o *payback*, ou retorno do que foi investido. O primeiro e o segundo ano de amortização possuem um alto valor de custo de hidrogênio e nos anos seguintes o valor decai tendendo a uma estabilidade. Isto ocorre porque nos primeiros anos são incluídos os maiores valores das parcelas do capital investido no equipamento.

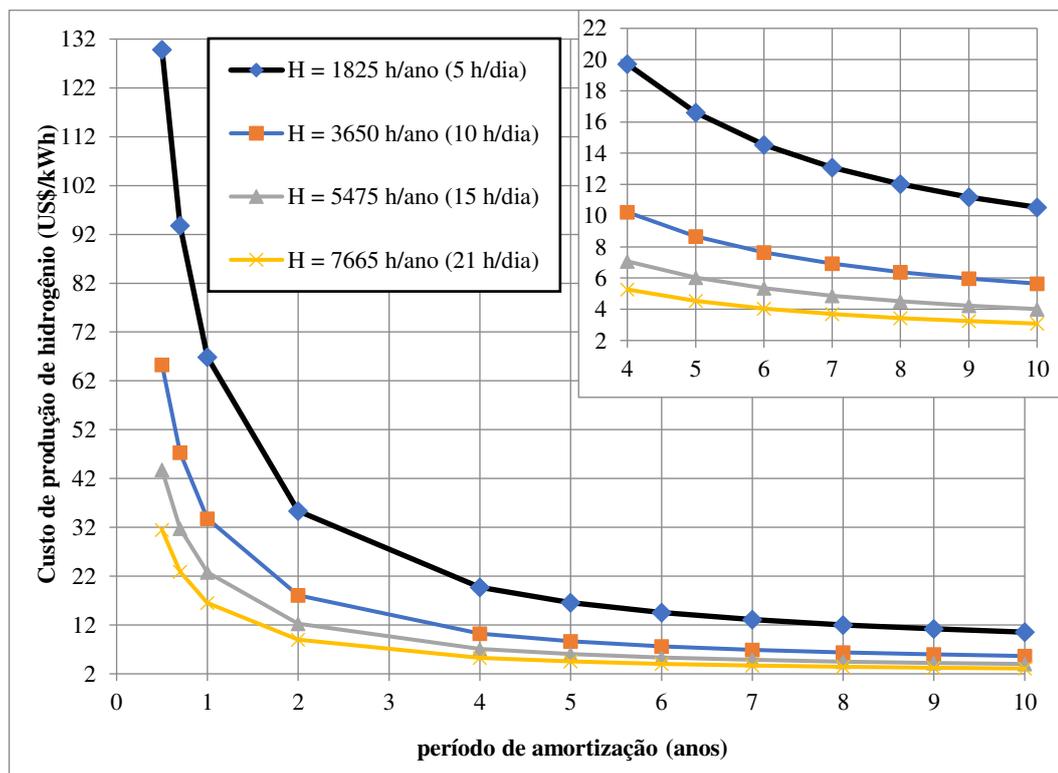
Em relação ao custo de produção ideal do hidrogênio, para um custo de 2,22 US\$/kWh e custo da eletricidade de 0,13 US\$/kWh o período de amortização foi de aproximadamente 7 anos. Os demais períodos de amortização (considerando a eletricidade de 0,15 e 0,17 US\$/kWh) não sofreram variação significativa, mostrando que para valores menores de investimento o tempo de amortização não sofre influência com o aumento do preço da eletricidade. Além disso, houve um decréscimo de 40% no valor imposto à produção de hidrogênio quando comparado com o valor real, corroborando a necessidade de estudos de novas tecnologias, em especial as nacionais, que aumentem a vazão de hidrogênio produzido

e ao mesmo tempo, ocasione o decréscimo do valor de capital de investimento do equipamento.

Inicialmente, o período de amortização foi assumido como sendo de 10 anos, todavia pela análise da Figura 25 é possível a consideração de uma amortização em um prazo mais curto, aproximadamente 7 anos, sem que haja uma alteração significativa no custo de produção do hidrogênio.

A Figura 26 ilustra um comparativo entre o custo de produção de hidrogênio, a partir da vazão mássica real de hidrogênio, e o período de amortização para diferentes tempos de operação.

**Figura 26** - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise em função do período de amortização para diferentes tempos de operação.



Fonte: Autoria própria.

Como observado na Figura 26, em 7 anos de amortização o preço de hidrogênio em US\$/kWh foi 3,69 (21 h/dia), 4,87 (15 h/dia), 6,93 (10 h/dia) e 13,10 (5 h/dia), mostrando que a operação diária tem influência direta no custo final. A operação diária de 5 h/dia do eletrolisador acarreta um alto custo de produção em seus primeiros anos e um lento *payback*, confirmando que não é vantajosa para aplicações práticas.

#### 4.6 Análise de custo de energia elétrica no sistema integrado

Os custos diário e mensal de consumo (eletrolisador e compressor) e ganho de produção de energia elétrica (célula combustível) são mostrados nas Tabelas 8 e 9, respectivamente.

**Tabela 8** - Consumo de energia elétrica.

<b>Pressão H<sub>2</sub> (bar)</b>	<b>Operação diária (h)</b>	<b>Eletrolisador (kWh/dia)</b>	<b>Compressor (kWh/dia)</b>	<b>Total (kWh/dia)</b>	<b>Custo diário (US\$/dia)</b>	<b>Custo mensal* (US\$/mês)</b>
45	7	17	3	20	2,60	80,60

\*Estimativa mensal

Fonte: Autoria própria.

**Tabela 9** - Produção de energia elétrica.

<b>Pressão H<sub>2</sub> (bar)</b>	<b>Operação diária (h)</b>	<b>Geração (kWh/dia)</b>	<b>Ganho diário (US\$/dia)</b>	<b>Ganho mensal* (US\$/mês)</b>
15	1	0,7	0,19	5,86
45	3	2,1	0,57	17,58

\*Estimativa mensal

Fonte: Autoria própria.

Na Tabela 8 pode-se observar que o eletrolisador consome cerca de 85% da eletricidade do bloco 1, fator este, referente ao processo de eletrólise ser uma tecnologia que demanda grande quantidade de energia para a quebra da molécula da água.

O custo diário resultante foi de 2,60 US\$/dia e a estimativa mensal em torno de 80,60 US\$/mês, mostrando o alto custo de eletricidade da concessionária para produção do hidrogênio.

Em relação à produção de energia elétrica pela célula combustível (Tabela 9) observa-se que para a produção nominal de 0,7 kWh são utilizados 15 bar de hidrogênio armazenado (em torno de 723 L) durante a operação de 1 hora, gerando um ganho de 0,19 US\$/dia e uma estimativa mensal de 5,86 US\$/dia. Quando se reage todo o hidrogênio armazenado produzido durante 7 horas, o ganho diário aumenta para 0,57 US\$/dia e 17,58 US\$/mês,

considerando uma operação de 3 horas (faixa de horário em que a energia elétrica possui o maior valor de tarifa).

Quando comparados os valores de consumo e produção de energia elétrica, observa-se uma grande diferença em valores, evidenciando a necessidade de maior produção de energia pela célula combustível e a inserção de outro inversor. Uma fonte renovável de energia seria primordial para diminuição do custo de produção de hidrogênio, já que essa etapa delimita o maior gasto de energia do sistema integrado.

## 5 CONCLUSÕES

---

As conclusões finais para a avaliação dos parâmetros operacionais e econômicos do sistema integrado de produção de energia elétrica são:

- As curvas características da célula combustível descrevem corretamente o seu funcionamento, apresentando um perfil semelhante ao das curvas do manual do fabricante;
- Em relação à curva de polarização só foi possível a identificação das perdas por ativação e das perdas ôhmicas. A perda por concentração não foi possível visualizar devido a limitações de resistências elétricas para consumo da eletricidade gerada;
- A vazão real de produção de hidrogênio pelo eletrolisador foi de  $2,38 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ , ou seja, 59,5% de sua capacidade máxima, evidenciando que houve uma diminuição na eficiência do eletrolisador. A vazão teórica de hidrogênio consumido se aproxima da vazão real à medida que se aumenta a potência da célula combustível. No teste de produção e consumo simultâneo, o ponto ideal de operação foi com as cargas de 3 lâmpadas de 60 W e 127 V ligadas em 48 volts DC;
- Os custos de produção real de hidrogênio estão na faixa de 3,33 a 4,52 US\$/kWh, evidenciando um alto custo, principalmente devido ao elevado investimento inicial do equipamento e a utilização de energia elétrica proveniente de hidrelétricas. A operação diária de 21 h/dia é a mais vantajosa por possuir os menores custos de produção de hidrogênio e quando comparado com a menor operação diária, 5 h/dia, o custo de produção tem um decréscimo de aproximadamente 3,5 vezes. O período de amortização foi de aproximadamente 7 anos.
- Em 1 h de geração de 0,7 kW de potência na célula combustível foi utilizado aproximadamente 15 bar de hidrogênio (em torno de 723 L). A corrente enviada para a rede da concessionária está em torno de 2,75 A. Os valores de consumo e produção de energia elétrica apresentam uma significativa diferença em valores monetários, evidenciando a necessidade do aumento de produção de energia pela célula combustível e a utilização de uma fonte renovável de energia para alimentação do bloco 1, já que este bloco delimita o maior gasto de energia do sistema integrado.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

---

Recomenda-se para trabalhos futuros:

- Criação de um protótipo de uma célula eletrolítica com tecnologia PEM nacional. Adaptações de estrutura para que se possa realizar manutenções com menor grau de dificuldade, redução de custos de materiais e maior vazão de hidrogênio produzido. Realizar análise de parâmetros operacionais e econômicos;
- Simulação da célula eletrolítica e da célula combustível com tecnologia PEM nos softwares Simulink do MATLAB e no ASPEN e fazer validação com dados experimentais;
- Inserção de painéis fotovoltaicos no sistema integrado como fonte de energia elétrica para o funcionamento do eletrolisador e do sistema de compressão;
- Acréscimo de outros inversores para aumentar a capacidade de produção de energia elétrica da célula combustível até sua máxima eficiência;
- Avaliação de um Projeto de um sistema integrado para uma residência (eletrolisador + sistema de armazenamento + célula combustível + inversor + painéis fotovoltaicos). Realizar análise de parâmetros operacionais e econômicos.

## REFERÊNCIAS

---

ABBASI, T.; ABBASI, S. A. 'Renewable' hydrogen: Prospects and challenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 6, p. 3034-3040, 2010;

AMARAL, D. **História da Mecânica - O motor a vapor**. 2010. Disponível em: [http://www.demec.ufmg.br/port/d\\_online/diario/Ema078/historia%20do%20motor%20a%20vapor.pdf](http://www.demec.ufmg.br/port/d_online/diario/Ema078/historia%20do%20motor%20a%20vapor.pdf). Acesso em: 25 de fev. 2011;

BAGOTSKY, V. S. **Fuel cells: problems and solutions**. 1. ed. Moscow, Rússia: John Wiley & Sons Editora, 2009;

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Histórico das taxas de juros fixadas pelo Copom e evolução da taxa Selic**. 2019. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicotaxasjuros>. Acesso em: 04 de ago. de 2019;

BERNARDES, J. F.; COLOSSI, N. **Controle dos recursos materiais nas universidades: o caso da depreciação, amortização e da reavaliação dos bens móveis e imóveis**. XIV Colóquio Internacional de Gestão Universitária, Santa Catarina, 2014;

BERNARDI JUNIOR, P. **Alternativas para a produção de hidrogênio nas regiões brasileiras visando à geração de energia elétrica distribuída**. 2009. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009;

BEZERRA FILHO, J. G. **Células a combustível a hidrogênio: estudo de caso comparativo com um motor a combustão**. 2008. 70 p. Trabalho de final de curso em Mecatrônica Industrial. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará, 2008;

BHANDARI, R.; TRUDEWIND, C. A.; ZAPP, P. Life cycle assessment of hydrogen production via electrolysis – a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 85, p. 151-163, 2013;

BLOK, K. Enhanced policies for the improvement of electricity efficiencies. **Energy Policy**, v. 33, n. 13, p. 1635–1641, 2005;

BOLTON, J. R. **Solar photoproduction of hydrogen**. Hydrogen Program of the International Energy Agency. Department of Chemistry the University of Western Ontario London, Ontario, Canada, 1996;

BRAGA, G. G. A. **Aspectos técnicos, econômicos e de sustentabilidade da produção de hidrogênio renovável**. 2015, 80 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015;

BRAGA, L. B. **Aspectos técnicos, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio**. 2014. 140 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014;

BRAGA, L. B. **Análise econômica do uso de célula a combustível para acionamento de ônibus urbano**. 2010. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, UNESP, Guaratinguetá, 2010;

BRASIL. **Lei n. 6.404, de 15 de dez. de 1976**. Dispõe sobre as Sociedades por Ações. Capítulo XII Conselho de Administração e Diretoria, Brasília, DF. Acesso em: 15 de set. de 2019;

BROUWER, J. **Fuel Cells**, 1. ed. The Power Paradigm for the New Millennium. Boca Raton, FL: CRC Press, 2002;

CAGEPA. **Estrutura Tarifária**, 2018. Disponível em: [http://www.cagepa.pb.gov.br/wp-content/uploads/2015/01/ESTRUTURA-TARIF%C3%81RIA-2018\\_PUBLICADA.pdf](http://www.cagepa.pb.gov.br/wp-content/uploads/2015/01/ESTRUTURA-TARIF%C3%81RIA-2018_PUBLICADA.pdf).

Acesso em: 04 de set. de 2019;

CEMIG. **Alternativas Energéticas: Uma Visão Cemig**. Companhia Energética de Minas Gerais, Belo horizonte, p. 164-170, 2012;

CONTE, M.; LACOBAZZI, A.; RONCHETTI, M.; VELLONE R. Hydrogen economy for a sustainable development: state-of-the-art and technological perspectives. **Journal of Power Sources**, v. 100, n; 1–2, p. 171–87, 2001;

CUNHA, E. F. **Avaliação e Aplicação de Tecnologias de Células a Combustível tipo PEMFC Desenvolvidas no IPEN em um Módulo de 500We de Potência Nominal**. 2009. 135 p. Tese (Doutorado em Ciências – Tecnologia Nuclear), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN/USP, São Paulo;

DUBNO, W.; GEVING, B. **Low Cost, High Efficiency, High Pressure Hydrogen Storage**. DOE 2006 annual Progress Report Part IV, p. 521-524, 2006;

EG&G Services Parsons, Inc. Science Applications International Corporation, **Fuel Cell Handbook**, 7. ed. Department of Energy, Office of Fossil Energy, West Virginia, 2004;

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA - EPE. **Balanco Energético Nacional. Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2017a;

ENERGISA. **Tipos de Tarifas**. 2019. Disponível em <https://www.energisa.com.br/Paginas/informacoes/taxas-prazos-e-normas/tipos-tarifas.aspx>. Acesso em 04 de set. de 2019;

FARIAS, L. M.; SELLITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. **Revista Liberato**, v. 12, n. 17, p. 01-106, 2011;

FERNANDES, F. A. N.; PIZZO, S. M.; MORAES Jr, D. **Módulo de Termodinâmica Química**, 1. ed. UEA, 2006;

DOUBEK, G.; SANTIAGO, E. I.; LINARDI, M. Desenvolvimento de tecnologia para confecção de eletrodos e conjuntos eletrodo-membrana-eletrodo (MEA) por impressão à tela para aplicação em módulos de potência de células PEMFC. **Química Nova**, v. 35, n. 4, p. 775-779, 2012;

GALDINO, M.; LIMA, J.; RIBEIRO, C.; SERRA, E. **O contexto das energias renováveis no Brasil. Revista da Direng**, 2000. Disponível em: [www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Direng.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Direng.pdf). Acesso em: 24 de jan. de 2019;

GAMBETTA, F. **Análise Técnica e Econômica de Retificadores de Corrente para Produção de Hidrogênio Eletrolítico: Estudo de Caso Aproveitando a EVT da UHE de Itaipu**. 2010. 163 p. Dissertação (Mestrado em Planejamento de Sistemas Energéticos) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010;

GODOY, G. A. R. **Aproveitamento da Energia Vertida Turbinável da UHE Itaipu para uso em ônibus a hidrogênio: estudo de caso em Foz do Iguaçu**. 2008. 123 p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, Campinas, 2008;

GOLDEMBERG, J; LUCON, O. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n. 72, p. 6-15, 2007;

GOMES NETO, E. H. **Hidrogênio, Evoluir Sem Poluir: a era do hidrogênio, das energias renováveis e das células a combustível**. Brasil H<sub>2</sub> Fuel Cell Energy, Curitiba, 2005;

GOMES, L. Q. **Caracterização de uma monocélula combustível do tipo PEMFC** Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2013;

GOMES, W. Z. **Elaboração de protocolo de testes para células a combustível Portáteis**. 2011. 100 p. Dissertação (Mestrado Profissional) - Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento - LACTEC, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento de Tecnologia, Curitiba, 2011;

GRIGORIEV, S.; POREMBSKY, V.; FATEEV, V. Pure hydrogen production by PEM electrolysis for hydrogen energy. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 31, n. 2, p. 171–175, 2006;

GUPTA, R. B., **Hydrogen Fuel - Production, Transport, and Storage**, CRC Press, 2009;

REITZ, W. **Handbook of fuel cell**. Fundamentals Technology and Applications. New York: John Wiley & Sons Ltd., v. 1, 2003;

HÉMERY, D.; BEBIER, J. C.; DELÉAGE, J-P. **Uma História da Energia**. Brasília: Editora Universidade de Brasília, 1993;

HERMANN, A.; CHAUDBURI, T.; SPAGNOLI, P. Bipolar plates for PEM fuel cells: A Review. **International Journal of Hydrogen Energy**, n. 30, p. 1297-1302, 2005;

HITES, R. **Persistent organic pollutants in the great lakes: an overview**. The Handbook of Environmental Chemistry, Berlin, Heidelberg: Springer, v. 5N, 2006;

HODGE, B. K. **Sistemas e aplicações de energia alternativa**. 1. ed, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2011;

IEA, **Key World Energy Statics**, 2017. Disponível em: <http://www.iea.org/statistics/>. Acesso em: 10 de dez. de 2018;

IEA, **Renewables: Hidropower**, 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/topics/renewables/hydropower/>. Acesso em: 26 de jan. de 2019;

IEA, **Renewables: Solar**, 2018. <https://www.iea.org/topics/renewables/solar/>. Acesso em: 27 de jan. de 2019;

KIRUBAKARAN, A.; JAIN, S.; NEMA, R. K. A review on fuel cell technologies and power electronic interface. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 2430-2440, 2009;

KLEIJN, R.; VOET, E. Resource constraints in a hydrogen economy based on renewable energy sources: An exploration. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 9, p. 2784-2795, 2010;

KNOB, D. **Geração de hidrogênio por eletrólise da água utilizando energia solar fotovoltaica**. 2013. 112 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear - Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013;

KOTHARI, R.; BUDDHI, D.; SAWHNEY, R.L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 12, n. 2, p. 553-563, 2008;

LARMINIE, J.; DICKS, A. **Fuel Cell Systems Explained**. 2. ed. New York: J.Wiley & Sons, 2003;

LAURENCELLE, F.; CHAHINE R.; HAMELIN, J.; AGBOSSOU, K.; FOURNIER, M.; BOSE, T. K.; LAPERRIÈRE, A. Characterization of a Ballard MK5-and Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack. **Fuel Cells**, v. 1, n. 1, p. 66-71, 2001;

LIOR, N. Thoughts about future power generation systems and the role of energy analysis in their development. **Energy Conversion and Management**, v. 43, n. 9-12, p. 1187–1198, 2002;

LUND, H. Renewable energy strategies for sustainable development. **Energy**, v. 32, n. 6, p. 912–919, 2007;

MARQUES, A. R.; AUGUSTO, A. F.; MONTEIRO, P. T. O. **O Hidrogénio como vector energético nos Transportes**. Seminário de Desenvolvimento Sustentável. Instituto Superior Técnico, Lisboa, 2004;

MARSHALL, A.; BØRRESEN, B.; HAGEN, G.; TSYPKIN, M.; TUNOLD, R. Hydrogen production by advanced proton exchange membrane (PEM) water electrolyzers-Reduced energy consumption by improved electrocatalysis. **Energy**, v. 32, n. 4, p. 431-436, 2007;

MARTINS, R.; KRAJACIC, G.; ALVES, L.; DUIC, N.; TOSTE AZEVEDO, J. **Selection and installation of a hydrogen-based energy storage**. II Iberian Symposium on Hydrogen, Fuel Cells and Advanced Batteries, Vila Real, Santa Catarina, 2009;

MAURITZ, K. A.; MOORE, R. B. State of Understanding of Nafion. **Chemical Reviews.**, v. 704, p. 4535-4585, 2004;

McLELLAN, B.; SHOKO, E.; DICKS, A. L.; COSTA, J. C. D. Hydrogen production and utilization opportunities for Australia. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 30, p. 669-679, 2005;

MELHORCAMBIO. **Dólar Hoje.** 2019. Disponível em: <https://www.melhorcambio.com/dolar-hoje>. Acesso em: 04 de ago. de 2019;

MIKKOLA, M. **TKK Advanced Energy Systems, Polymer electrolyte membrane fuel cells.** Disponível em: [http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/pem\\_5.html](http://tfy.tkk.fi/aes/AES/projects/renew/fuelcell/pem_5.html). Acesso em: 25 de nov. de 2018;

NASCIMENTO, F. M, ALENCAR Jr, F. L; CARVALHO, J. S. **Energias renováveis: conhecendo as principais fontes e suas vantagens e desvantagens.** Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, Foz do Iguaçu, 2016;

NGOH, S. K.; NJOMO, D. An overview of hydrogen gas production from solar energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 16, n. 9, p. 6782–6792, 2012;

NUNES, G. M. F. **Caracterização de pilha de combustível de hidrogênio e monitorização de célula individual.** 2010. 100 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, 2010;

PAGANIN, V. A.; TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. Development of small polymer electrolyte fuel cell stacks. **Journal of Power Sources**, v. 70, n. 1, p.55-58, 1998;

PALHARES, D. D'ARC F., **Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar.** 2016. 101 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Uberlândia, 2016;

PEREIRA, D. I. S. **Avaliação de um reator constituído por eletrodos porosos de níquel para a produção de hidrogênio eletrolítico**. 2015. 90 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2015;

PERLES, C. E. **Propriedades físico-químicas relacionadas ao desenvolvimento de membranas de Nafion® para aplicações em células a combustível do tipo PEMFC**. *Polímeros*, São Carlos, v. 18, n. 4, p. 281-288, 2008;

**Portal Energias Renováveis: Vantagens e desvantagens das energias renováveis**, 2018. Disponível em: <https://www.portal-energia.com/vantagens-e-desvantagens-das-energias-renovaveis/>. Acesso em: 14 de fev. de 2019;

**Portal Solar. Produção de energia solar fotovoltaica pode dobrar em 2018**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/blog-solar/energia-solar/producao-de-energia-solar-fotovoltaica-pode-dobrar-em-2018.html>. Acesso em: 31 de jan. de 2019;

RAMPINELLI, G. A.; ROSA Jr., C. G. Análise da Geração Eólica na Matriz Brasileira de Energia Elétrica. *Revista Ciências Exatas e Naturais*, v. 14, n. 2, 2012;

REVANKAR, S.; MAJUMDAR, P. **Fuel Cells - Principles, Design, and Analysis**. Boca Raton: CRC Press, 2014;

RICARDO, A; ESPARTA, A. R. J; LUCON, O.; UHLIG, A. **Energia Renovável no Brasil**. X Congresso Brasileiro de Energia, Rio de Janeiro, 2004;

RIFKIN, J. **A economia do hidrogênio**. São Paulo: Makron Books do Brasil, 2003;

ROGGIA, L.; RECH, C.; SCHUCH, L.; BAGGIO, J. E.; HEY, H. L.; PINHEIRO, J. R. **Design of a sustainable residential microgrid system including PHEV and energy storage device**. Proceedings of the 14<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications, Birmingham, p. 1-9, 2011;

ROSSATO, V. B. **Dimensionamento da capacidade de produção de hidrogênio a partir da energia Vertida Turbinável de Itaipu e sua Utilização em veículos Automotivos**. 2013. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso - Tecnólogo em Biocombustíveis, Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2013;

SANTOS, F. M. S. M.; SANTOS, F. A. C. M. O. **Combustível “Hidrogênio”**. Disponível em: <http://www.ipv.pt/millennium/Millennium31/15.pdf>. Acesso em: 03 de jan. de 2019;

SANTOS, J. E. **Controle e automação de um sistema de geração de energia elétrica renovável: Avaliação da célula a combustível H<sub>2</sub>/ar tipo PEMFC**. 2013. 156 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Recursos Regionais e Meio Ambiente, Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, 2013;

SAUR, G. **Wind-To-Hydrogen Project: Electrolyzer Capital Cost Study**. Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2008;

SILVA, E. P.; CAMARGO, J. C. **Integração e Sistemas com Células Combustível**. 1º Workshop Internacional sobre Células a Combustível. São Paulo, 2002;

SILVA, M. E. **Análise experimental da reforma a vapor de etanol: aspectos técnicos, econômicos e ecológicos**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010;

SILVEIRA, J.L.; GOMES, L.A. Fuel Cell Cogeneration System: A Case of Techno economic Analysis. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v.3, p. 233-242. 1999;

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M., **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**, 7. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora, 2007;

SMOLINKA, T.; GÜNTHER, M.; GARCHE, J. **Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien**. Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, Berlin. 2011;

SØRENSEN, B. **Hydrogen and fuel cells: emerging technologies and applications**. New York: Elsevier Academic Press, 2012;

SPIEGEL, S. C. **Designing & building fuel cells**. 1. ed. United States: McGraw-Hill Companies, 2007;

SULEMAN, F. DINCER, I. AGELIN-CHAAB, M. Environmental impact assessment and comparison of some hydrogen production options. **International Journal of Hydrogen Energy**., v. 40, n. 21, p. 6976-6987, 2015;

TABBI WILBERFORCE, ALASWAD A, PALUMBO A, DASSISTI M, OLABI AG. Advances in stationary and portable fuel cell applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, n. 37, p. 16509-16522, 2016;

THOMAS, S.; ZALBOWITZ M., **Fuel Cells Green Power Brochure**, Los Alamos National Laboratory in Los Alamos, New Mexico. 2005. Disponível em: <http://www.lanl.gov/orgs/mpa/mpa11/Green%20Power.pdf>. Acesso em: 25 de nov. de 2018;

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. **Eletroquímica: Princípios e Aplicações**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005;

TOLMASQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. 1. ed., Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003;

U.S - D.E. US - **Department of Energy (Office of Energy Efficiency and Renewable Energy)**. 2015. Disponível em: <http://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cell-technologies-office>. Acesso em: 02 de fev. de 2019;

UMBERTO, L. Overview on fuel cells. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30. p. 164-169, 2014;

URSÚA, A.; GANDÍA, L. M.; SANCHIS, P. Hydrogen production from water electrolysis: current status and future trends. **Proceedings of the IEEE**, v. 100, n. 2, p. 410-426, 2012;

**Veículos Elétricos: Os Carros Verdes - Emissão "Zero" de Carbono - Tecnologias e Empreendimentos.** Disponível em:

<http://automoveiseletricos.blogspot.com/2013/06/como-uma-celula-combustivel-e-o.html>.

Acesso em: 04 de abr. de 2019;

WALTER, O. L. **História de eletricidade.** 2010. Disponível em:

<http://www.univasf.edu.br/~edmar.nascimento/iee/1HistoriaEletricidade.pdf>. Acesso em: 21

de fev. de 2019;

WILSON J. F.; SRINIVASAN, S. S.; MOORE, B. M.; HENDERSON, L.; SHARMA, P. C.; ELY III, S. Hydrogen production using solar energy. **Journal of Undergraduate Research in Physics**, v. 27, p. 1-2, 2013;

YUNEZ-CANO, A.; GONZÁLEZ-HUERTA, R. G.; TUFÍÑO-VELÁZQUEZ, M.; BARBOSA R.; ESCOBAR, B. Solar-hydrogen hybrid system integrated to a sustainable house in Mexico. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 41, p. 19539-19545, 2016;

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307-326, 2010.