

LUCAS DE ALMEIDA REZENDE

Desenvolvimento e análise experimental de um gerador de hidrogênio por eletrólise

Lucas de Almeida Rezende

Desenvolvimento e análise experimental de um gerador de hidrogênio por eletrólise

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador (a): Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna
Coorientador (a): Prof. Dr. José Luz Silveira

Guaratinguetá - SP
2021

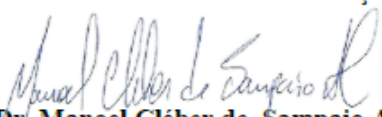
R467d	Rezende, Lucas de almeida Desenvolvimento e análise experimental de um gerador de hidrogênio por eletrólise / Lucas de Almeida Rezende – Guaratinguetá, 2021. 73 : il. Bibliografia: f. 44 Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2021. Orientador: Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna Coorientador: Prof. Dr. José Luz Silveira 1. Água eletrólise. 2. Hidrogênio. 3. Energia Fontes alternativas I. Título. CDU 620.91(043)
-------	--

LUCAS DE ALMEIDA REZENDE

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: MESTRADO

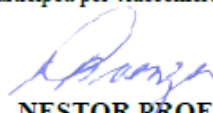
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



PROF. DR. CELSO EDUARDO TUNA
Orientador / UNESP/FEG
participou por videoconferência



PROF. DR. NESTOR PROENZA PEREZ
CEFET
participou por videoconferência



PROFA. DRA. ELIANA VIEIRA CANETTIERI
UNESP/FEG
participou por videoconferência

DADOS CURRICULARES

LUCAS DE ALMEIDA REZENDE

NASCIMENTO	03.03.1994 – Volta Redonda / RJ
FILIAÇÃO	Márcia Vânia de Almeida Rezende Augusto José de Rezende
2009/2011	Curso técnico em Eletrônica Escola Técnica Pandiá Calógeras (ETPC)
2011/2016	Graduação em Engenharia Mecânica Centro Universitário de Volta Redonda (UniFOA)
2019/2021	Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
2020/2021	Publicação de artigo científico em: <i>International Journal of Hydrogen energy</i> <i>“Educational Electrolyzer prototype: Improving engineering students’ knowledge in renewable energies”</i> DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.013

dedico este trabalho de modo especial, à toda
minha família e amigos

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos;

aos meus pais *Augusto José de Rezende e Márcia Vânia de Almeida Rezende*, que sempre acreditaram em meu potencial, me dando todo suporte necessário para esta jornada de conhecimento. A minha irmã *Camila de Almeida Rezende* que sempre me apoiou a continuar estudando e desenvolvendo minhas ideias;

ao meu orientador, *Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna* e Co orientador *Prof. Dr. José Luz Silveira* que jamais deixaram de me incentivar. Sem a orientação de ambos, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível;

aos amigos do Instituto de Pesquisa em Bioenergia (IPBEN-UNESP) e Laboratório de Otimização de Sistemas Energéticos (LOSE) que sempre apoiaram a pesquisa e acreditaram na ideia.

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá que de forma direta e indireta me ajudaram no desenvolvimento deste trabalho;

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001

“Em todo o espaço há energia... é só uma questão de tempo até que os homens tenham êxito em associar seus mecanismos ao aproveitamento desta energia.

Nikola Tesla

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo apresentar o processo de construção de um eletrolisador de água utilizando materiais de baixo custo. Aplicando a metodologia de planejamento avançado de qualidade do produto, modelagem termodinâmica e eletroquímica, foi possível construir um eletrolisador que custou apenas US\$ 205,00. A análise técnica e econômica do protótipo educacional foi feita considerando um circuito de eletrodos em paralelo, uma usina fotovoltaica de 3 kW e radiação solar média de 890 W/m². Os sais KOH e NaOH foram utilizados nas concentrações molares de 64 e 39 g.L⁻¹ de água, respectivamente, para a determinação do rendimento do eletrolisador. Durante a análise técnica foram aplicadas tensão de 12 V e corrente de 60 A, produzidos pelos painéis fotovoltaicos, o que resultou em uma vazão mássica de hidrogênio, similar para as duas soluções eletrolíticas, de 0,025 Nm³.h⁻¹. O rendimento do eletrolisador para este cenário foi de aproximadamente 2%, com uma eficiência de eletrólise de 10%. Os custos de produção do hidrogênio deste eletrolisador variaram de US\$ 0.64 a US\$ 0.70 por kWh. Com auxílio de um sensor de temperatura foi observado um aumento na temperatura dos eletrodos de acordo com o aumento da corrente. A temperatura máxima do eletrolisador usando KOH foi de 55 °C e utilizando o NaOH a temperatura foi de 45 °C. Nota-se que o aumento da produção de hidrogênio está relacionado com o aumento da temperatura do eletrizador. Conclui-se que os resultados da análise técnica e econômica de um sistema de produção de hidrogênio utilizando painéis fotovoltaicos ligados em paralelo, mostraram que este sistema tem capacidade para ser uma alternativa de produção de energia limpa no futuro.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrólise da Água. Eletrolisador. Produção de hidrogênio.

ABSTRACT

This work aims to demonstrate the process of building a low-cost water electrolyzer using common materials. Applying the Advanced Product Quality Planning methodology, thermodynamic and electrochemical modeling, it was possible to build an electrolyzer with about US\$ 205.00. The technical and economic analysis of the educational prototype was made considering a circuit of electrodes in parallel, a photovoltaic plant of 3 kW and average solar radiation of 890 W/m². In the electrolyzer, the electrolytic solutions with 1 M concentration of NaOH and KOH were used, i.e., 39 g.L⁻¹ and 64 g.L⁻¹, respectively, to test the performance of the electrolyser. In the technical analysis, voltage of 12 V and current of 60 A were applied, produced by the photovoltaic panels, which resulted in a hydrogen mass flow, similar for the two electrolytic solutions, of 0.025 Nm³.h⁻¹. The electrolyser yield for this scenario was approximately 2%, with an electrolysis efficiency of 10%. The hydrogen production costs of this electrolyser ranged from US\$ 0.64 a US\$ 0.70 per kWh. With the aid of a temperature sensor, an increase in the temperature of the electrodes was observed according to the increase in current. The temperature of the electrolyser using KOH was 55 °C and using NaOH the temperature was 45 °C. Note that the increase in hydrogen production is related to the increase in the temperature of the electrifier. It is concluded that the results of the technical and economic analysis of a hydrogen production system using photovoltaic panels connected in parallel, regardless that this system has the capacity to be an alternative for the production of clean energy in the future.

KEYWORDS: Water Electrolysis. Electrolyzer. Hydrogen production.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Eletrólise da água.....	6
Figura 2 - Molécula da água.....	7
Figura 3 - Produção e utilização do hidrogênio como vetor energético.....	10
Figura 4 - Célula de hidrogênio molhada.....	13
Figura 5 - Célula de hidrogênio a seco.....	14
Figura 6 - Fonte AC/CC utilizada nos testes de vazão volumétrica de hidrogênio e oxigênio	17
Figura 7 – Diagrama esquemático do sistema solar fotovoltaico para produção de hidrogênio por eletrólise de água alcalina	18
Figura 8 - Processo de produção do eletrolisador utilizando a metodologia APQP	20
Figura 9: Vista explodida do eletrolisador	29
Figura 10: Diagrama de blocos da construção do eletrolisador educacional	30
Figura 11 - Estrutura do protótipo do eletrolisador que consiste em: (1) reservatório de produção de gás; (2) reservatório de filtro de vapor; (3) parafusos, arruelas e pernos de aço inoxidável; (4) conexões pneumáticas.....	31
Figura 12 - Esponja de vedação do gerador	32
Figura 13 - Joelho de conexão instantânea.....	32
Figura 14 - Mangueira utilizada no gerador.....	33
Figura 15 - Válvulas de retenção.....	33
Figura 16 - Reservatório de produção de gás (1) Reservatório de filtragem de vapor (2)	34
Figura 17 - Primeiro passo para montagem do eletrolisador.....	35
Figura 18 - Método de construção do reservatório do eletrolisador.....	35
Figura 19 - Montagem da tampa dos reservatórios de produção de gás e filtragem de vapor	36
Figura 20 - Dimensão dos fixadores do eletrolisador.....	36
Figura 21 - Fixadores da tampa do eletrolisador.....	37
Figura 22 - Eletrodo em formato L	37
Figura 23 - Vazão de hidrogênio em função das correntes de 20 a 60 A com a solução de KOH e NaOH	39
Figura 24 - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise da água com energia fotovoltaica em função do período de amortização de capital	41
Figura 25 : <i>Payback</i> do investimento para produção de hidrogênio	42
Figura 26: Custo de produção de H ₂ US\$/kg.....	42
Figura 27: <i>Payback</i> do investimento para produção de hidrogênio em US\$/kg	43

Figura 28: Vazão de gases com solução eletrolítica de KOH e NaOH	45
Figura 29: Temperatura no eletrolisador em função da corrente para soluções de NaOH e KOH	45
Figura 30: Estágios da APQP.....	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes do painel fotovoltaico de 135 Wp e respectivas especificações.....	18
Tabela 2: Identificação das placas de acrílico usadas no eletrolisador.....	30
Tabela 3: Resultados da análise da eficiência energética da eletrólise utilizando soluções eletrolíticas de KOH e NaOH.....	38
Tabela 4: Custo total da pesquisa.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{el,sp}$	Custo de eletricidade produzida no painel solar	[US\$.kWh ⁻¹]
$C_{H_2,eletrólise}$	Custo de produção de hidrogênio a partir da eletrólise	[US\$.kWh ⁻¹]
$C_{man,eletrólizador}$	Custo de manutenção do eletrólizador	[US\$.kWh ⁻¹]
$C_{man,sp}$	Custo de manutenção do painel solar	[US\$.kWh ⁻¹]
$C_{op,eletrólizador}$	Custo de operação do eletrólizador	[US\$.kWh ⁻¹]
$C_{op,sp}$	Custo de operação do painel solar	[US\$.kWh ⁻¹]
C_{H_2c}	Custo do hidrogênio comercial	[US\$/kWh]
C_{H_2}	Custo de hidrogênio gerado pela Usina Solar	[US\$/kWh]
$E_{req.}$	Eletricidade requerida no eletrólizador	[kW]
$E_{gerador}$	Potencial elétrico padrão do gerador	[V]
$E^{\circ}_{gerador}$	Potencial padrão do gerador	[V]
\dot{E}_{H_2}	Potência suprida pelo hidrogênio	[kW]
\dot{E}_p	Potência gerada pelo painel solar	[kW]
F	Constante de Faraday [96.485,332]	[C.mol ⁻¹]
F_{H_2}	Faradays para produção das moléculas de H ₂	[C]
f	Fator de anuidade	[1/ano]
H	Período equivalente de utilização	[h.ano ⁻¹]
$Inv_{eletrólizador}$	Investimento no eletrólizador	[US\$]
$Inv_{painel solar}$	Investimento no painel solar	[US\$]
k	Período de amortização de capital (payback)	[anos]
$\ln Q =$	Logaritmo neperiano do coeficiente reacional	[-]
m	Massa	[g]
MA_{rel}	Peso atômico (ou massa atômica relativa) do elemento	[mol]
\dot{m}_{H_2}	Fluxo mássico de hidrogênio produzido	[kg.s ⁻¹]
\dot{m}_{H_2O}	Fluxo mássico de água no eletrólizador	[kg.h ⁻¹]
N_e	Número de elétrons gastos para produzir a reação	[-]
$\eta_{eletrólise}$	Eficiência energética do processo de eletrólise	[-]
$\eta_{eletrólizador}$	Eficiência do eletrólizador	[-]
η_{sp}	Eficiência de geração de eletricidade dos painéis solares	[-]
$\eta_{eletrólizador}$	Eficiência do eletrólizador	[-]

PCI_{H_2}	Poder calorífico inferior do hidrogênio	[kJ kg ⁻¹]
P_{elet}	Potência do eletrolisador	[kW]
P_{H_2O}	Preço de compra de água	[US\$.kg ⁻¹]
R	Constante universal dos gases	[8,314 J]
r	Taxa de anual de juros	[%]
T	Temperatura em Kelvin	[K]
ΔH°	Varição de entalpia na condição padrão	[kJ/mol]
ΔG°	Energia livre de Gibbs na condição padrão	[kJ/mol]
ΔS°	Varição de entropia na condição padrão	[kJ/mol]
τ_{ele}	Trabalho elétrico na condição padrão	[V]
$\tau_{ele} (40,1)$	Trabalho elétrico para temp.de 40 °C e 1 atm de pressão	[V]
τ_{ele}	Trabalho elétrico padrão (25°C e 1 atm)	[V]
T_a	Temperatura ambiente (25 °C)	[C]
T_f	Temperatura da célula (40 °C)	[C]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	3
1.2	OBJETIVO	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	ELETRÓLISE	5
2.2	HIDRÓLISE	6
2.3	HIDROGÊNIO	7
2.4	NORMAS PARA PRODUÇÃO E MANUSEIO DE HIDROGÊNIO	8
2.5	CONSUMO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL	9
2.6	GERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM HIDROGÊNIO	11
2.7	ELETROLISADORES	12
2.7.1	Soluções eletrolíticas	12
2.7.2	Eletrolisador célula molhada	13
2.7.3	Eletrolisador célula seca	13
2.8	EXPERIMENTOS COM ELETROLISADORES	14
3	PROTÓTIPO DE ELETROLISADOR EDUCACIONAL	16
3.1	EQUIPAMENTOS EXTERNOS	16
3.1.1	Transformador ac/dc	16
3.1.2	Usina Solar Fotovoltaica	17
4	METODOLOGIA	20
4.1	METODOLOGIA APQP	20
4.2	MODELO MATEMÁTICO TERMODINÂMICO	21
4.3	MODELO MATEMÁTICO ELETROQUÍMICO	23
4.4	ANÁLISE TÉCNICA DA ELETRÓLISE	24
4.5	ANÁLISE ECONÔMICA DA ELETROLISE	26
5	CONSTRUÇÃO DO ELETROLISADOR	29

5.1	MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO.....	30
5.2	CONSTRUÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DO ELETROLISADOR	34
5.3	CONSTRUÇÃO DO CIRCUITO DE ELETRODOS.....	37
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
6.1	ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	38
6.2	ANÁLISE ECONÔMICA DA ELETRÓLISE	40
6.3	COMPARAÇÃO ENTRE KOH x NaOH.....	44
7	CONCLUSÃO.....	47
	REFERÊNCIAS	49
	ANEXO A – CUSTO DE PRODUÇÃO DO PROTÓTIPO.....	59
	ANEXO B - PLANEJAMENTO DO PRODUTO.....	60

1 INTRODUÇÃO

Diante do acelerado crescimento populacional mundial, a demanda por energia elétrica tem aumentado cada vez mais, o que resulta em um impacto direto no meio ambiente.

De acordo com o relatório de balanço energético nacional, no ano de 2016, o total de emissões antrópicas associadas à matriz energética brasileira atingiu a marca de 428,95 milhões de toneladas de dióxido de carbono. Sendo que a maior parte dos resíduos é proveniente do setor de transportes (EPE, 2017).

O setor energético brasileiro emitiu, em média 101,03 kg de dióxido de carbono para produzir 1 MWh de energia elétrica. Se comparado com outros países desenvolvidos, o Brasil permanece menos intenso na emissão de carbono. (EPE, 2017)

De acordo com Tl. T. P. Conelheiro & Luciano (2012), diante da grande necessidade de se buscar avanços no âmbito de geração, de transmissão e de distribuição de energia elétrica, o que se tornou uma tendência mundial, objetiva-se favorecer um meio ambiente sustentável.

As práticas ambientais e o consumo descontrolado de energia estão presentes nas raízes da antiga sociedade e são diretamente afetados na aplicação de novos conceitos renováveis pelos jovens. A educação fortalece e inspira os jovens a criar responsabilidade moral para entender e resolver problemas ambientais relacionados à geração de energia renovável. Com fácil acesso a informação sobre energias renováveis e métodos de ensino de baixo custo, os alunos possuem mais chances de desenvolver ideias sustentáveis e que podem gerar consequências positivas para o meio ambiente. (dos Santos et al., 2017).

Quanto mais complexo o assunto abordado em sala de aula, aumenta a necessidade de equipamentos de última geração para demonstração dos experimentos práticos. Portanto, o desenvolvimento de protótipos educacionais de baixo custo é de grande interesse para as instituições de ensino, para o professor e o aluno. Os laboratórios usados na graduação necessitam de equipamentos bem específicos e que muitas vezes são de alto custo. (Cyr et al., 1997; Jara et al., 2011; Magin & Kanapathipillai, 2000; Yu & Mueller, 1985)

É fundamental que pesquisas e novos equipamentos de produção de energia renovável de baixo custo sejam desenvolvidos. De acordo com Deshpande et al., (2016), para construção de um protótipo de baixo custo é necessário utilizar ferramentas que minimizem os erros do projeto. A metodologia de planejamento avançado da qualidade do produto (APQP) possui

diretrizes que podem reduzir os erros e o tempo de fabricação de equipamentos que produzem energia renovável mantendo o alto nível de qualidade.

Um método que vem sendo estudado é a utilização do hidrogênio como vetor energético. Além de contribuir com o meio ambiente a utilização do hidrogênio reduz a emissão de gases de efeito estufa. (Aydin & Kenanoğlu, 2018; dos Santos et al., 2017)

Nesse contexto, segundo L. T. P. Conelheiro & Luciano, (2012), o hidrogênio é o mais simples e mais comum elemento do universo e ele está presente em quase tudo. Ele compõe 75 % da massa do universo e 90 % de suas moléculas, como a água (H₂O) e as proteínas nos seres vivos. No planeta Terra, compõe aproximadamente 70 % da superfície terrestre. No seu estado natural e sob condições ambientes de temperatura e pressão, o hidrogênio é um gás incolor, inodoro, insípido e muito mais leve que o ar.

Existem vários métodos para produzir hidrogênio, porém nem todas são provenientes de fontes renováveis como solar e eólica. O melhor método de minimizar os custos e facilitar a produção de hidrogênio é a junção de um eletrolisador com as fontes renováveis citadas acima. A produção de hidrogênio por eletrólise da água é simples e não demanda muita energia para iniciar a reação eletroquímica. (Barbir, 2005; Bhattacharyya et al., 2017; Olivares et al., 2013)

Segundo Russel (1994a) a eletrólise da água é o processo pelo qual se pode obter o hidrogênio a partir da água e da eletricidade. É praticada desde o início do século XX, porém com instalações de tamanho relativamente pequeno. Entre 1920 e o final da década de 30, muitos projetos direcionados à produção do hidrogênio foram desenvolvidos e com esse desenvolvimento novos projetos de substituição do combustível fóssil queimado nos veículos automotivos pelo hidrogênio surgiram.

Ainda de acordo com Russel (1994b), a produção de hidrogênio por meio da eletrólise é bem interessante economicamente e relativamente simples, pois utiliza água como matéria prima. É realizada utilizando-se a energia elétrica para produzir uma hidrólise das moléculas de água (H₂O) e assim produzindo o hidrogênio e o oxigênio.

Devido a carência de desenvolvimento e interesse na área, a produção de hidrogênio por eletrólise da água representa apenas 4 % da produção mundial. A eletrólise da água produz gás hidrogênio com 99,99 % de pureza utilizando corrente contínua (CC) que atravessa uma solução eletrolítica por meio de um anodo e cátodo produzindo uma hidrólise da água. (Chi & Yu, 2018a, 2018b)

Dentro desse cenário apresentado, o presente trabalho teve como objetivo demonstrar um estudo técnico, econômico e a construção passo a passo do protótipo de eletrolisador educacional de baixo custo. Com a construção do protótipo, um estudo detalhado sobre a

produção de hidrogênio por eletrólise foi realizado, fomentando novas ideias e pesquisas no campo de energias renováveis.

1.1 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esse trabalho foi dividido em oito capítulos, nos quais são descritos resumidamente da seguinte forma:

- Capítulo 1 – INTRODUÇÃO: Neste capítulo é contextualizado a necessidade de desenvolver novas tecnologias de baixo custo de hidrogênio, apresenta a estrutura da dissertação e os objetivos do trabalho;
- Capítulo 2 – ELETRÓLISE: Neste capítulo apresenta uma revisão bibliográfica do estado da arte sobre o hidrogênio como: Tipos de eletrolisadores, o panorama nacional de produção de hidrogênio e experimentos realizados com eletrolisadores;
- Capítulo 3 – PROTÓTIPO DE ELETROLISADOR EDUCACIONAL: Este capítulo é apresentado todos os materiais utilizados para construção do protótipo e os equipamentos externos que foram utilizados durante o experimento prático;
- Capítulo 4 – METODOLOGIA: Neste capítulo detalha as metodologias aplicadas para dimensionamento e validação de desempenho do eletrolisador como: modelo matemático termodinâmico e eletroquímico, análise técnica e econômica;
- Capítulo 5 – CONSTRUÇÃO DO ELETROLISADOR: Neste capítulo é demonstrado o passo a passo de como foi feita a construção dos reservatórios do eletrolisador e do circuito de eletrodos;
- Capítulo 6 – RESULTADOS E DISCUSSÃO: Apresentação dos resultados da análise técnica, econômica e experimento prático do eletrolisador;
- Capítulo 7 – CONCLUSÃO: São apresentados as principais conclusões sobre o experimento.

1.2 OBJETIVO

O objetivo geral deste estudo é demonstrar o passo a passo da construção de um eletrolisador de água com circuito paralelo e de baixo custo, utilizando ferramentas simples e que pode ser usado em testes experimentais de pesquisa em energia renovável.

De maneira específica tem-se os seguintes objetivos:

- Fazer a análise técnica e econômica do protótipo construído;
- Comparar vazão volumétrica de hidrogênio e a temperatura do eletrolisador utilizando as soluções eletrolíticas de NaOH e KOH durante o experimento prático.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo apresenta o estado da arte sobre a eletrólise alcalina da água. Inicialmente é descrito o processo de eletrólise demonstrando os conceitos básicos da reação, em seguida é enfatizado a importância do hidrogênio e consumo deste combustível no Brasil. Por último é de mostrado os tipos de eletrolisadores, normas de segurança e aplicações do hidrogênio.

2.1 ELETRÓLISE

No início do século XIX, Michael Faraday (1791-1867) estabeleceu algumas relações quantitativas conhecidas como as leis de Faraday para eletrólise. A primeira lei diz que a quantidade de substâncias produzidas pela eletrólise é diretamente proporcional à quantidade de eletricidade utilizada. A segunda lei diz que para uma dada quantidade de eletricidade a quantidade de substâncias produzidas é proporcional à sua massa equivalente. Em outras palavras, quanto mais intensa for a corrente elétrica aplicada ao processo de eletrólise, maior será a quantidade de massa da substância produzida na reação.

Segundo Russel, (1994a) a eletrólise é um método utilizado na obtenção de reações de oxi-redução. Em soluções eletrolíticas, este processo se baseia na passagem de uma corrente elétrica contínua (C.C.) através de um sistema líquido que tenha íons presentes, gerando assim, reações químicas como mostra a Figura 1.

Denomina-se como eletrólise da água ao processo eletroquímico de dissociação, onde os produtos finais das reações desencadeadas são hidrogênio e oxigênio moleculares e o balanço mássico destas reações acusa somente a decomposição da água Russel, (1994b). Quando é aplicada uma força eletromotriz acima de um determinado potencial mínimo, há passagem de corrente entre os eletrodos, desencadeando as reações eletrolíticas, que para o caso de um meio condutor básico, são dadas pelas equações abaixo:

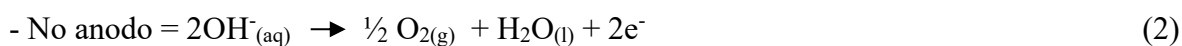
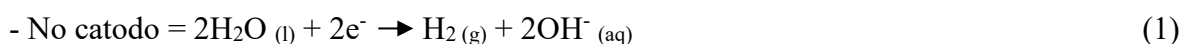
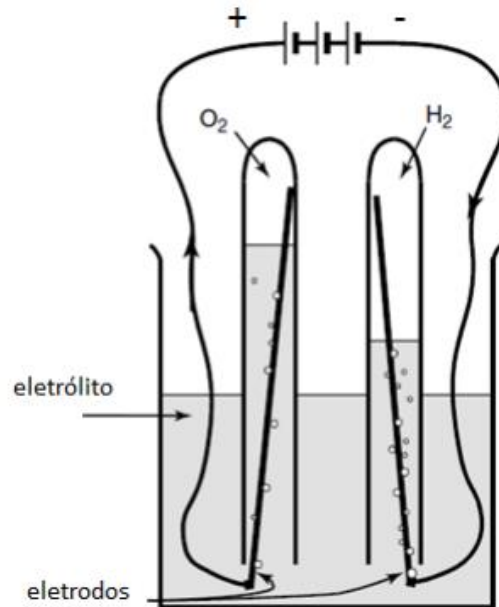




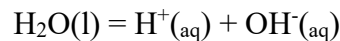
Figura 1 – Eletrólise da água



Fonte:Knob (2013).

2.2 HIDRÓLISE

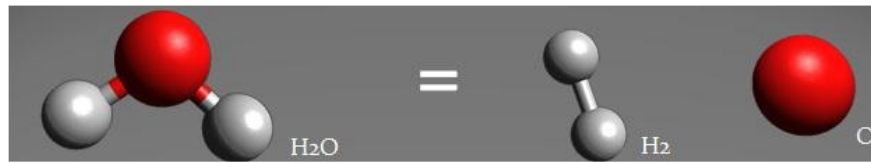
Segundo Russel, (1994b) a hidrólise é aplicada para as reações entre um cátion e um ânion e a água, que acarretam na quebra de ligações covalentes na molécula da água. Ocorre uma alteração de íons, sendo liberados para a solução cátions de hidrogênio (H^+) ou ânions de hidroxila (OH^-).



Dessa forma, determinada molécula fragmenta-se e tem suas ligações complementadas com os íons resultantes da molécula de água, tendo em vista a formação de uma molécula diferente do original. A hidrólise salina é uma importante aplicação para os processos da hidrólise, uma vez que os sais têm uma forte tendência em sofrerem dissociação em meio aquoso. Russel, (1994b)

A partir de uma solução salina, torna-se possível obter tanto soluções ácidas como soluções básicas, devido à água possuir características de se comportar como um ácido ou como uma base, dependendo das circunstâncias e das moléculas que com ela interagem. Dessa forma, os sais presentes em solução, ao sofrerem uma dissociação, liberam para o meio aquoso cátions e ânions, e, dependendo da concentração de íons, a solução resultante pode assumir diferentes valores de pH, como pode ser visto na Figura 2.

Figura 2 - Molécula da água



Fonte: Tl. T. P. Conelheiro & Luciano (2012).

2.3 HIDROGÊNIO

Segundo Senra et al. (2014) o hidrogênio é uma fonte renovável de energia, não tóxica, corrosiva ou cancerígena e embora seja inflamável, possui rápida dispersão e alto coeficiente de difusão, e possui quantidade de energia por unidade de massa maior que qualquer outro petróleo conhecido (52.000 BTU/lb ou 120,7kJ/g), cerca de três vezes mais que o petróleo em seu estado líquido.

De acordo com Estevão, (2008), quando duas moléculas de hidrogênio combinam-se com uma molécula de oxigênio, em presença de um agente de ignição, a reação é do tipo oxidante e exotérmica, produzindo luz e calor intenso, gerando 119,6 kJ/g e água vaporizada. A liberação de tanta energia térmica pode ser aproveitada de várias maneiras, sem preocupação com a poluição, pois o subproduto de sua combustão é basicamente água.

O hidrogênio tem a mais alta energia por unidade de peso comparativamente com qualquer combustível, uma vez que o hidrogênio é o elemento mais leve. É por essa razão que o hidrogênio tem sido usado intensamente nos programas espaciais onde o peso é crucial. A quantidade de energia liberada durante a reação de hidrogênio é cerca de 2,5 vezes maior que o poder de combustão de um hidrocarboneto (gasolina, metano, gasóleo, etc.). Assim, para satisfazer um consumo energético, a massa de hidrogênio necessária é apenas aproximadamente um terço da massa de um hidrocarboneto. (Miguel *et al.*, 2016)

De acordo com Miguel et al., (2016) mesmo que o hidrogênio seja frequentemente produzido no local de consumo com processadores de combustível, por vezes também é produzido em grandes fábricas, e é transportado e armazenado para um posterior uso nas pilhas de células de combustível. É cogitado que o hidrogênio se torne um vetor de energia do futuro para a substituição dos combustíveis fósseis, sendo este produzido a partir de fontes renováveis de energia. O hidrogênio é certamente inflamável e explosivo em contato com o oxigênio, tendo valores comparáveis ou melhores que os combustíveis. Qualquer fuga de hidrogênio se dispersa

rapidamente subindo no ar por causa da sua baixa densidade.

2.4 NORMAS PARA PRODUÇÃO E MANUSEIO DE HIDROGÊNIO

Segundo Ramenskiy et al., (2017), o hidrogênio é utilizado em vários campos, incluindo indústrias químicas, alimentícias e metalúrgicas. A produção e manuseio do hidrogênio deve ser seguido de normas que possam auxiliar e evitar qualquer tipo de falha ou acidente. Por conta disso, a ISO desenvolveu e implementou uma série de normas que determinam os requisitos para utilização o hidrogênio como combustível ou como fonte de energia de sistemas.

De acordo com Ramenskiy et al., (2017) a norma internacional ISO 22734-1:2008 descreve sobre os cuidados com o hidrogênio produzido por eletrólise da água, relatando o uso do hidrogênio industrial e comercial; A norma internacional ISO 22734-2:2011 também descreve o uso do hidrogênio produzido por eletrólise da água, porém essa norma está focada na aplicação de hidrogênio residencial.

De acordo com Rezende et al., (2021) a produção de hidrogênio em pequena escala também deve seguir algumas regras de segurança. A ISO/TR 15916:2015 está relacionada com as considerações básicas para segurança dos sistemas de produção de hidrogênio considerando os seguintes pontos:

- Mitigação de riscos de design;
- Inflamabilidade e riscos de explosão;
- Considerações de operação do eletrolisador.

Segundo Rezende et al., (2021) a ISO/TR 22734:2019 descreve a aplicação industriais, comerciais e residenciais do uso do hidrogênio e dentro desta normal estão relacionados os seguintes tópicos:

- Operação correta dos eletrolisadores;
- Sinais de alerta de explosão;
- Local apropriado para operação do eletrolisador.

2.5 CONSUMO DE HIDROGÊNIO NO BRASIL

Segundo Melo (2010), o uso de hidrogênio no Brasil é próximo de 920 mil toneladas por ano, constituindo-se como o maior consumidor de refinarias de petróleo, indústrias de fertilizantes, seguido pela indústria de alimentos, aço, entre outros. Apesar da quantidade produzida, o uso de energia de hidrogênio não faz sentido, principalmente devido à competição econômica com outras fontes de energia estabelecidas. A eletrólise da água não é algo novo, a tecnologia usada o aprimoramento da obtenção de hidrogênio a partir da água tem sido amplamente estudado, e a energia gerada nesse processo deve ser eficiente e barata. Acredita-se que o consumo de hidrogênio seja aumentado, minimizando o uso de gasolina no Brasil, por exemplo.

Ainda de acordo com Melo (2010), a mudança no setor de energia de um país é influenciada pela necessidade de reduzir as emissões de gases poluentes e aumentar a segurança energética. Um dos programas governamentais iniciais no Brasil é o *Fuel Cell Program* (Procac), sendo um combustível de hidrogênio promissor produzido por uma variedade de fontes. O objetivo era atingir 50 MW de capacidade instalada em 10 anos. Em 2005, o Procac foi renomeado como PROH₂, cujo objetivo é manter vínculos de informações entre redes cooperativas, criar projetos, promover padrões, entre outros. Os incentivos à produção de H₂ têm encontrado barreiras em desenvolver e estabelecer problemas relacionados principalmente à infraestrutura de produção, armazenamento, transporte e distribuição.

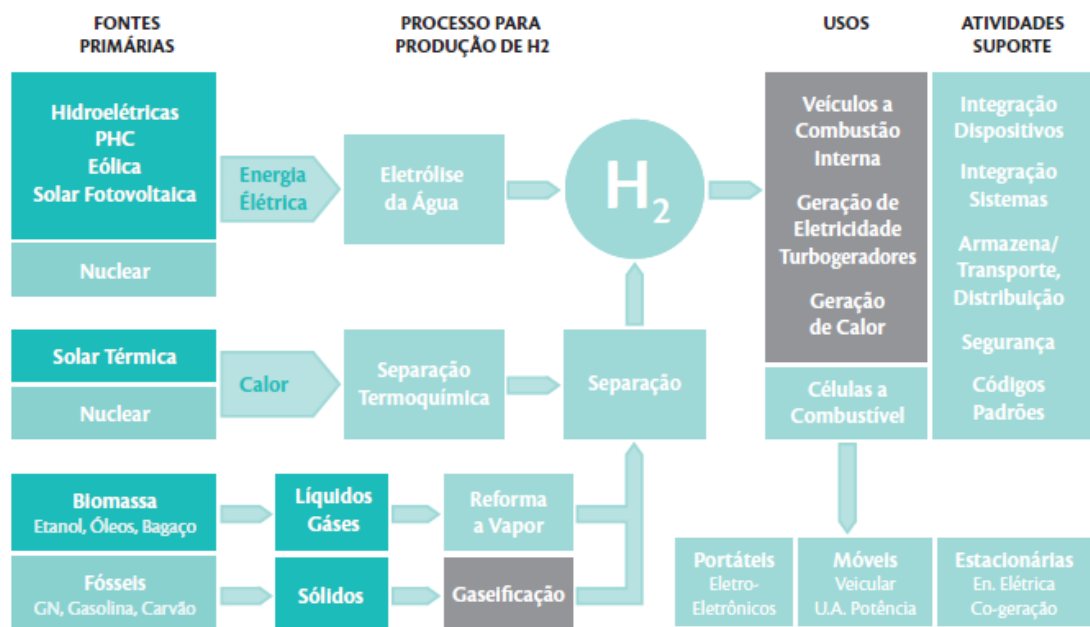
O Brasil investiu cerca de US \$ 134 milhões de 1999 a 2007 em tecnologias para produção de hidrogênio, o que correspondeu a cerca de 25% dos investimentos individuais feitos por países como Rússia e China. O Centro de Gerenciamento e Estudos Estratégicos estima que a produção de hidrogênio no mundo para o ano de 2015, atingindo 12,5 bilhões de metros cúbicos (1,12 milhão de toneladas). Além disso, a busca por tecnologias que permitam o armazenamento de H₂ no Brasil estão em estágios iniciais Melo (2010).

Foi observado por dos Santos et al., (2017) que o processo mais econômico para a produção de H₂ no Brasil é reformar o gás natural e o petróleo, mas outras formas sustentáveis também podem ser aplicadas devido à disponibilidade de matérias-primas, como eletrólise de água, etanol e gaseificação de biomassa de reforma. Existem projetos de pequena escala no Brasil para a produção de Hidrogênio de até 25 Nm³.h⁻¹ com eletrolisadores com polos em série 50 Nm³ h⁻¹ com eletrolisadores com polos em paralelo. No entanto, mesmo projetados em meados dos anos 70 e 80, alguns ainda não estão em operação.

De acordo com Hotza & Diniz da Costa, (2008), o Brasil tem capacidade para obtenção de hidrogênio, devido à diversidade de matérias-primas para geração de energia renovável. Além disso, muitas universidades contribuem para estudos na área principalmente para o desenvolvimento de eletrolisadores, catalisadores e eletrólitos. De acordo com Ball & Wietschel, (2009) a eletrólise é considerada viável para o meio ambiente, possibilitando a sustentabilidade, pois durante o processo ocorre a geração de subproduto poluente, mas não favorece o estabelecimento de hidrogênio atualmente em condições econômicas como vetor energético

Segundo Zhao & Pedersen, (2018), a produção de H₂ via processo de eletrólise representa apenas 4% da produção mundial de hidrogênio, devido ao alto custo de produção, depende do preço da eletricidade. Como método de viabilidade de geração, o consumo de energia precisa ser minimizado para que a eficiência da produção seja significativa. A eletrólise da água pode ser generalizada no Brasil com o processo de integração, pois em 2012, cerca de 70,1% da eletricidade provém da energia hidrelétrica. A integração de sistemas possibilita que a eletrólise se torne economicamente viável usando o excesso de energia decorrente de outro processo, como solar, eólico, hidrelétrico, entre outros conforme a Figura 3 seguir:

Figura 3 - Produção e utilização do hidrogênio como vetor energético



Fonte: Melo (2010).

Mesmo com esta estimativa comercial obtendo H₂ por eletrólise de água no país, atualmente é inexplorado no que diz respeito a estudos e iniciativas privadas que visam garantir o nicho de mercado futuro. Para incentivar essa rota, outra indústria tem sido amplamente

explorada, que são as células de combustível. Além de ser uma alternativa aos combustíveis fósseis, poderia ajudar com o incentivo à obtenção de hidrogênio por eletrólise da água segundo Crabtree & Dresselhaus, (2008).

2.6 GERAÇÃO DE ELETRICIDADE COM HIDROGÊNIO

De acordo com Gölle (2014), a eletrolise alcalina representa uma produção de energia com potência na ordem de megawatts, produzindo hidrogênio em larga escala. Normalmente o eletrólito mais utilizado na solução eletrolítica é o KOH, concentrado em uma solução aquosa entre 25 - 35 %.

É possível apresentar estratégias de projeto de controle de um parque eólico composto por geradores eólicos verticais, eletrolisadores e um sistema de capacitores de energia. Com esse projeto foi proposto um sistema de capacitores de energia, composto por dispositivos eletrônicos de potência e um capacitor elétrico de dupla camada para suavizar a potência de linha de um parque eólico com geradores de velocidade fixa. Muyeen *et al.*, (2009)

Segundo Kinoshita *et al.*, (2011) foi apresentado um sistema de combinação para geração de energia eólica e geração de hidrogênio, onde um gerador síncrono alimentado duplamente é usado como um gerador eólico de velocidade ajustável e um eletrolisador conectado a seus terminais para geração de hidrogênio, que é controlada por conversores eletrônicos de potência.

De acordo com Bandara *et al.*, (2020) afirma que, a energia eólica é a combinação mais usada, seguida pela energia solar. Ambas são as formas mais abundantes de energia sustentável, são consideradas as mais limpas e provenientes de fontes verdes, tendendo a ser livre de poluição, principalmente durante o uso, o que contribui para a preservação do meio ambiente.

Segundo Knob (2013), foi apresentado um sistema de produção de hidrogênio utilizando fontes de energia solar. O autor ressalta que este sistema pode se tornar viável no futuro devido a uma gradual redução no preço de sistemas fotovoltaicos, tornando, o custo da energia gerada por fontes renováveis mais atraente em comparação à eletricidade obtida pelo sistema atual. Assim o hidrogênio produzido seria proveniente de fontes renováveis e com o custo de produção reduzido.

2.7 ELETROLISADORES

De acordo com GÖLLEI (2014), o eletrolisador é o equipamento responsável por realizar o processo eletroquímico de eletrólise. Esta reação não espontânea consiste na passagem de uma corrente elétrica (CC) em um sistema utilizando uma solução eletrolítica líquida com íons presentes, gerando assim, a reação química e a produção dos gases. A solução eletrolítica é fundamental para que ocorra uma boa produção de hidrogênio. O eletrolisador é composto de placas pólo, denominadas eletrodos (anodo e catodo). No anodo o gás produzido é o oxigênio e no catodo o hidrogênio. Atualmente existem dois modelos de eletrolisadores, os célula molhada e célula seca.

2.7.1 Soluções eletrolíticas

Segundo Atkins (1994), existem substâncias que quando dissolvidas em água, ou em outros solventes adequados, possuem a propriedade de conduzir a corrente elétrica. Estas substâncias são denominadas de eletrólitos e as suas soluções são chamadas de soluções eletrolíticas.

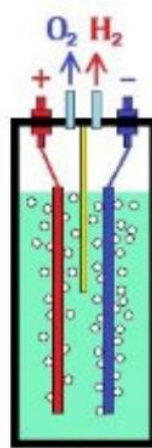
Um sistema eletroquímico é formado quando pelo menos dois eletrodos (metais ou condutores de elétrons) estão em contato com uma solução eletrolítica ou outro meio que permita a condução iônica. Neste arranjo mínimo é possível que ocorra uma reação global de oxi-redução espontânea entre as espécies em solução e os eletrodos, sendo então o sistema classificado como célula galvânica ou pilha, ou pode-se forçar a ocorrência de uma reação de oxi-redução não espontânea através da imposição de um potencial elétrico, de uma fonte externa, sobre os eletrodos, neste caso o sistema é chamado de célula eletrolítica conforme (Atkins, 1994).

De acordo com dos Santos et al., (2017) no eletrolisador a condutividade é gerada pelo movimento e concentração de ions livres de (OH^-), por isso são utilizados os sais de NaOH e KOH na solução eletrolítica. Além de ions livres, os sais possuem alta eficiência, alcançando 77 a 80 %. O sal eletrólito mais utilizado nos dias de hoje é o KOH, porém existem outros eletrólitos que também podem ser aplicados como NaCl.

2.7.2 Eletrolisador célula molhada

O eletrolisador de célula molhada é composto de dois ou mais eletrodos imersos em água formando um circuito série ou paralelo em um reservatório de produção de gases construído em acrílico, vidro ou plástico PVC. Esse tipo de eletrolisador não necessita de reservatório de água externo, visto que o eletrolisador comporta toda água em seu interior conforme e demonstrado na Figura 4. (Al-Rousan & Musmar, 2018; Enshasy et al., 2019; Subramanian & Ismail, 2018)

Figura 4 - Célula de hidrogênio molhada

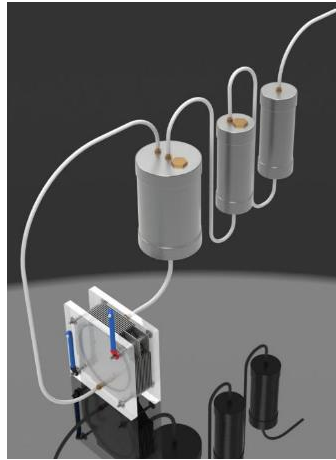


Fonte Shah *et al.* (2018).

2.7.3 Eletrolisador célula seca

Os eletrolisadores de célula seca são formados por um conjunto de eletrodos em um circuito série ou paralelo, onde o reservatório de produção de gás é composto dos próprios eletrodos, placas de acrílico e borrachas de isolamento, de acordo com a Figura 5. Neste modelo de eletrolisador a água é armazenada em um reservatório externo. A água sai do reservatório externo e entra na parte inferior do eletrolisador onde acumula-se água entre as placas e a borracha, formando um sanduíche. O gás hidrogênio e gás oxigênio ao ser produzido, passa pela mangueira superior do eletrolisador e volta para o reservatório de água onde será filtrado o vapor de água gerado durante a reação. Basicamente o processo de produção de gases entre os dois modelos é o mesmo, o que difere um do outro é a capacidade de armazenar a solução eletrolítica. (Göllei, 2014; Shah et al., 2018; Silva et al., 2015)

Figura 5 - Célula de hidrogênio a seco



Fonte: Tl. T. P. Conelheiro & Luciano (2012).

Os desenvolvimentos dos geradores de hidrogênio atualmente estão voltados para os modelos de “células a seco”. Esses modelos são constituídos de placas de aço inoxidável 304, 308 e 316L e possuem também *o-rings* separadores que são utilizados como isolantes entre as placas. Esse modelo de gerador é pouco eficiente e possui muitos vazamentos, além da corrosão em alguns casos. Já os modelos de “células molhadas” possuem um bom rendimento e uma capacidade volumétrica de água muito maior se comparado com os de células a seco. (Tl. T. P. Conelheiro & Luciano, (2012); GÖLLEI, (2014))

2.8 EXPERIMENTOS COM ELETROLISADORES

Ao desenvolver um novo protótipo é preciso entender os conceitos básicos e observar o que já foi estudado sobre a eletrólise da água. Portanto foram feitos experimentos em eletrolisadores utilizando o hidrogênio para diferentes finalidades.

Segundo Gölle *et al.* (2014), foi avaliado o potencial de otimização na geração de hidrogênio de um eletrolisador de célula seca, por meio da variação da concentração da solução eletrolítica de KOH de 5 a 5,02 mgL⁻¹, da variação da corrente elétrica de 5 a 10 A e da tensão elétrica aplicada à célula de hidrogênio e da distância entre as placas do gerador. Esses autores contataram que o aumento da concentração de KOH elevou a produção de hidrogênio.

Segundo Ji *et al.*, (2016) foi conduzido uma série de experimentos para otimizar o controle do eletrolisador e propuseram um sistema *start-stop* de partida de hidrogênio puro para

o motor, visando obter economia de combustível. Eles realizaram ensaios utilizando um motor a gasolina de quatro cilindros equipado com um sistema de injeção de hidrogênio controlado eletronicamente a velocidades de 1000, 1500, 2000 e 2600 rpm e atingiram uma redução 8,43% do combustível.

Conforme é descrito por Sudarmanta *et al.*, (2016) foi proposto a otimização do desempenho de um eletrolisador de gás HHO de célula seca variando o ciclo de trabalho da modulação de largura de pulso de 20 a 100 %. O desempenho do eletrolisador foi avaliado pelo consumo de energia, pela eficiência e temperatura. O gás de hidrogênio obtido foi utilizado com uma mistura de combustível no motor de Sinjai e introduzido por um mecanismo de Venturi montado no duto de entrada do ar de combustão. Os efeitos da adição do gás HHO sobre o desempenho do motor Sinjai e constataram que a aplicação do hidrogênio acima do tempo de ignição, produziu um aumento de desempenho do motor como, torque, potência e eficiência térmica, respectivamente de 2,27%, 2,76% e 3,05%.

De acordo com Olivares *et al.*, (2013) foi construído um eletrolisador de baixo custo utilizando ferramentas como a metodologia *Advanced Product Quality Planning* (APQP). O autor explica que utilizou esta técnica para desenvolver um eletrolisador minimizando as falhas no desenvolvimento do protótipo e o tempo de fabricação respeitando cada etapa da metodologia. O autor desenhou o protótipo em um programa CAD Solidworks e posteriormente o construiu. No experimento foi utilizado um eletrolisador com circuito de eletrodos em série ligado a um motor diesel onde era injetado 2 L min^{-1} de hidrogênio e oxigênio com a finalidade de reduzir as emissões de CO_2 . Durante os testes foi constatado uma redução significativa nas emissões de CO_2 em até 23 %, injetando hidrogênio e oxigênio a uma vazão de 2 L min^{-1} .

3 PROTÓTIPO DE ELETROLISADOR EDUCACIONAL

Após uma análise dos tipos de eletrolisadores desenvolvidos atualmente, foi observado que o tipo célula molhada possui reservatórios de água maiores que o célula seca. O custo elevado para produção dos eletrodos do tipo célula seca também foram um fator crucial na decisão de qual eletrolisador construir. Os eletrolisadores tipo célula molhada ocupam um espaço menor, visto que, não há necessidade de utilizar vários reservatórios. Portanto o eletrolisador escolhido para ser projetado e construído foi o de célula molhada. O protótipo de eletrolisador educacional é composto por um reservatório de produção de gás, um reservatório de filtragem de vapor utilizando placas de acrílico e um anodo e cátodo formado por placas de aço inox 316L.

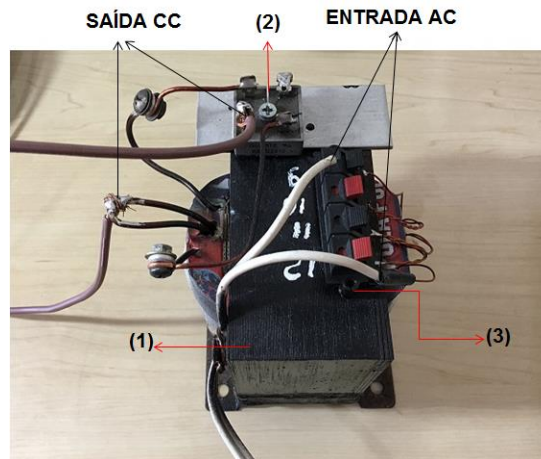
3.1 EQUIPAMENTOS EXTERNOS

No processo de validação do protótipo educacional é necessário utilizar transformadores AC/DC para avaliar a vazão volumétrica do gás hidrogênio utilizando uma tensão máxima de 12 V. Também será utilizado uma usina solar fotovoltaica para avaliar a vazão mássica de hidrogênio produzido neste protótipo.

3.1.1 Transformador ac/dc

Um transformador modelo 12/1s 12 DC 125/220 AC Hayonik e uma ponte retificadora de tensão KBPC – 2510 25A / 1000V foi usada durante os testes de vazão volumétrica com diferentes soluções eletrolíticas do eletrolisador de água. Esse circuito eletrônico é composto por um transformador (1) acoplado a uma ponte retificadora (2) modelo KBPC – 2510 25^a/1000V que transforma o sinal da corrente de AC para CC e um regulador de corrente (3), onde é possível estabelecer o limite de corrente desejado, conforme ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Fonte AC/CC utilizada nos testes de vazão volumétrica de hidrogênio e oxigênio



Fonte: Do autor.

Além do transformador, também foi utilizado medidores de vazão de gás HHO, sensores de temperatura e multímetro digital para retirar os dados reproduzidos nos resultados.

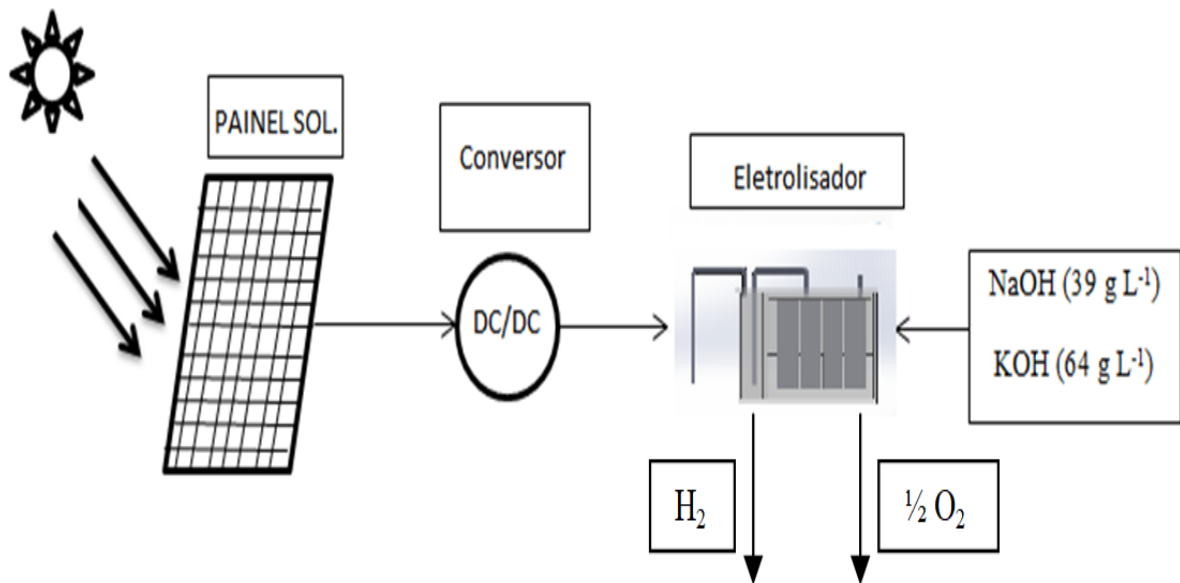
Para comparar o rendimento do eletrolisador foram utilizadas diferentes soluções eletrolíticas com sais de KOH e NaOH em diferentes concentrações.

3.1.2 Usina Solar Fotovoltaica

Realiza-se uma análise energética a fim de determinar a eficiência do sistema de produção de hidrogênio a partir de energia solar. Por último foi feito uma análise de engenharia econômica para determinar os custos da produção de hidrogênio em dólares por kWh. Esse estudo tem como base os parâmetros de investimento de capital, custo de manutenção e operação do eletrolisador, período equivalente de utilização, período de amortização de capital e *payback* de investimento.

Serão analisados a produção dos gases hidrogênio por meio de uma fonte renovável de energia, a fim de determinar qual é a vazão mássica de hidrogênio gerada com a energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos. O esquema do sistema estudado é representado pela Figura 7 a seguir:

Figura 7 – Diagrama esquemático do sistema solar fotovoltaico para produção de hidrogênio por eletrólise de água alcalina



Fonte: Do autor.

A planta solar fotovoltaica, com capacidade de 3.0 kWp, está instalada no Centro de Energias Renováveis, da Faculdade de Engenharia, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, *campus* de Guaratinguetá.

Na Tabela 1 podem ser observadas todas as especificações técnicas do painel fotovoltaico. O sistema é composto por dez painéis fotovoltaicos com potência de 335 Wp cada, ligados em paralelo.

Tabela 1 – Componentes do painel fotovoltaico de 335 Wp e respectivas especificações

Componentes	Especificações
Potência Máxima (P_{max})	335 Wp
Tolerância	3%
Corrente máxima (I_{mpp})	7.45 A
Voltagem máxima (U_{mpp})	18.14 V
Temperatura de operação (T_{noct})	50° C
Peso	11.1 kg
Dimensão	1460 mm x 660 mm x 35 mm
Maximum system voltage	715 V
Maximum series fuse rating	100 A
Material do Painel	Polycrystalline silicon

Fonte: Do autor.

Os painéis fotovoltaicos foram fixados com auxílio de grampos em uma estrutura de aço com inclinação de 32° e com declinação magnética de 21° posicionada em direção à linha do equador. As medições foram realizadas entre 12h00min e 13h00min e, utilizando um medidor de potência solar, verificou-se que os níveis de radiação solar variam entre 750- 890 W/m^2 . Os painéis solares foram ligados em circuito paralelo, gerando energia durante o período de uma hora. Com o auxílio de um controlador DC/DC, a demanda de energia foi estabilizada em 12 V e 60 A, sendo esta energia fornecida diretamente ao eletrolisador.

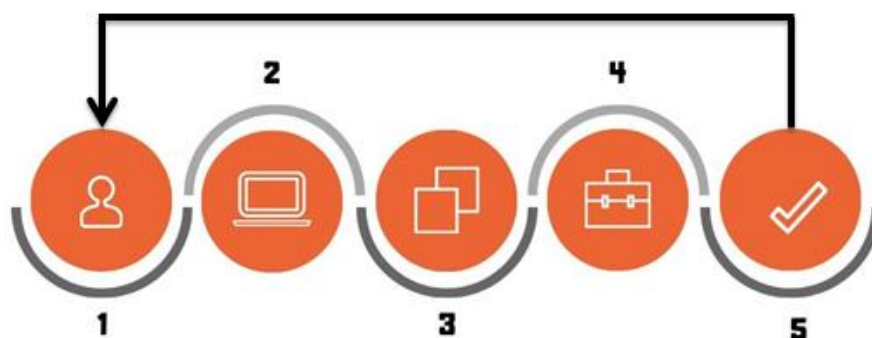
4 METODOLOGIA

Para o desenvolvimento e construção do eletrolisador foi utilizado a metodologia APQP, modelagem matemática termodinâmica e eletroquímica. Tais metodologias são essenciais para o funcionamento do protótipo respeitando as leis da eletrólise alcalina. No processo de validação do protótipo é proposto uma análise técnica e econômica da produção de hidrogênio solar.

4.1 METODOLOGIA APQP

A metodologia de *Advanced Quality Planning* (APQP) foi criada como uma ferramenta para auxiliar na construção e desenvolvimento de produtos. O ANEXO B exemplifica como esta metodologia foi desenvolvida. O processo de produção APQP possui as etapas de: 1) Planejamento e necessidade do cliente; 2) Design e desenvolvimento inicial do produto; 3) Design e desenvolvimento do processo de construção; 4) Validação do Produto e produção do protótipo final; 5) Feedback, avaliação e ação corretiva. conforme a Figura 8. (Mittal et al., 2012; Ray & Das, 2009)

Figura 8 - Processo de produção do eletrolisador utilizando a metodologia APQP



Fonte: Do autor.

De acordo com Olivares et al. (2013), esta metodologia é capaz de reduzir o número de falhas na construção deste protótipo, conseqüentemente o custo para produção do eletrolisador. Esta ferramenta ainda permite o trabalho em grupo de dois setores, o design de produto e engenharia de construção.

O foco deste trabalho está na fase de produção e teste do equipamento (4) onde é demonstrada passo a passo a construção de forma simples, tornando possível, reproduzi-lo junto aos alunos em aulas práticas no laboratório de energias renováveis.

Utilizando o software CADSolidWorks, foi desenvolvido o projeto em 3D do eletrolisador de circuito paralelo. A montagem do equipamento foi separada em duas etapas: 1) Construção dos reservatórios do eletrolisador e tampa; 2) Construção dos eletrodos do protótipo.

4.2 MODELO MATEMÁTICO TERMODINÂMICO

Para separar as moléculas da água é necessário fornecer uma quantidade mínima de energia elétrica para produzir a reação de eletrólise. Segundo Zeng & Zhang (2010), este fenómeno é termodinamicamente desfavorável à temperatura ambiente (25 °C), portanto para que haja produção de hidrogênio e oxigênio é necessário fornecer ao gerador de hidrogênio uma tensão elétrica mínima.

Segundo Ni *et al.* (2008), é preciso realizar uma análise detalhada na modelagem eletroquímica e termodinâmica da produção de hidrogênio. Essas análises são importantes para a compreensão dos mecanismos de trabalho do gerador de hidrogênio, conseqüentemente melhorando seu design e eficiência.

De acordo com Ulleberg (2003), a termodinâmica oferece uma base para descrever a reação de equilíbrio e os efeitos térmicos em um gerador de hidrogênio. Ela também possibilita estabelecer as definições de transporte de elétrons na reação e descreve as propriedades das soluções eletrolíticas.

Com isso este estudo terá como base as condições padrão de um sistema onde a temperatura é de 25 °C e 1 atm de pressão alcançando o patamar de 40 °C com 1 atm de pressão.

Ulleberg (2003) ressalta que, quando se fala em eletrólise da água, algumas definições são feitas como: o hidrogênio e o oxigênio são gases ideais, a água é um fluido incompressível e as fases de gás e de líquido são separadas.

De acordo com as informações do primeiro parágrafo a eletrólise da água pode ser calculada por meio da energia livre de Gibbs nas condições padrão (25 °C e 1 atm).

De acordo com (Ulleberg, 2003), a equação da energia livre de Gibbs na condição padrão é:

$$\Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ} \quad (1)$$

Onde:

ΔG° = Energia livre de Gibbs na condição padrão [kJ.mol⁻¹];

ΔH° = Variação de entalpia na condição padrão [kJ.mol⁻¹];

T = Temperatura em Kelvin [K];

ΔS° = variação de entropia na condição padrão [kJ.mol⁻¹].

De acordo com Ulleberg (2003), na condição padrão, ao iniciar a reação, a transformação de água líquida em gás H₂ e ½ O₂, a energia livre de Gibbs para condição padrão se torna positiva no valor de $\Delta G^\circ + 237 \text{ kJ. mol}^{-1}$.

Com isso o trabalho elétrico para que a reação ocorra é determinada pela equação (2).

$$\tau_{ele} = \frac{\Delta G^\circ}{N_e \times F} \quad (2)$$

Onde:

τ_{ele} = Trabalho elétrico na condição padrão [V];

ΔG° = Energia livre de Gibbs na condição padrão [kJ.mol⁻¹];

N_e = Número de elétrons gastos para produzir a reação [-];

F = Constante de Faraday [96.485,332 C.mol⁻¹].

Portanto, se o $\Delta G^\circ + 237 \text{ kJ.mol}^{-1}$, a temperatura padrão (298,15 K) e o número de elétrons utilizado na reação é 2, nas condições padrão, o trabalho elétrico realizado será 1,23 V.

Ainda de acordo com Ulleberg (2003), para cada grau de aumento de temperatura é acrescentado 0,8460 mV ao trabalho elétrico do gerador de hidrogênio. A partir daí, é possível calcular o trabalho elétrico necessário para um eletrodo em uma temperatura de 40 °C e 1 atm de pressão, de acordo com a equação (3).

$$\tau_{ele}(40,1) = \tau_{ele} + \left[0,8460 \times 10^3 \cdot (T_f - T_a) \right] \quad (3)$$

Onde:

$\tau_{ele}(40,1)$ = Trabalho elétrico para temperatura de 40 °C e 1 atm de pressão [V];

τ_{ele} = Trabalho elétrico padrão (25°C e 1 atm) [V];

T_f = Temperatura da célula (40 °C) [C];

T_a = Temperatura ambiente (25 °C) [C].

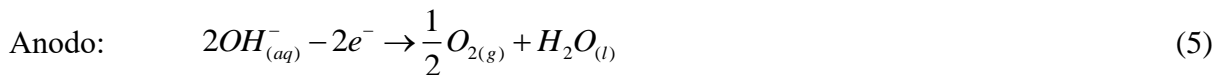
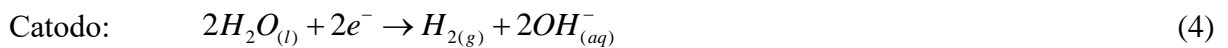
Logo:

$$\tau_{ele}(40,1) = 1,229 + \left[0,8460 \times 10^3 \cdot (40 - 25) \right] = 1,2416 \text{ V}$$

4.3 MODELO MATEMÁTICO ELETROQUÍMICO

Segundo Gomes (2013), há uma relação direta entre a eletroquímica e a termodinâmica. O funcionamento de um gerador de hidrogênio se dá por meio da carga elétrica aplicada ao sistema, ou seja, com o aumento da carga elétrica do sistema ocorre também uma variação da energia livre de Gibbs produzida. Desta forma, ocorre uma variação do potencial elétrico do gerador de hidrogênio. A equação de Nernst permite calcular o valor da tensão elétrica reversível dado a um nível de pressão e temperatura.

Observando a reação de hidrólise da água, dois moles de elétrons foram usados para produzir uma molécula de H_2 e meia molécula de oxigênio no estado gasoso.



Eq. Global da Eletrólise



De acordo com Gomes (2013), para calcular a tensão elétrica de uma célula é preciso analisar qual reação está acontecendo no anodo e no catodo do gerador. Com isso é utilizado uma tabela de potencial padrão Atkins (1994). Após o reconhecimento dos potenciais padrão do anodo e do catodo é aplicada a equação. (7).

$$E^o_{gerador} = E^o_{catodo} - E^o_{anodo} \quad (7)$$

De acordo com a tabela de potencial padrão Atkins (1994), para reação de oxidação e redução da água, no gerador são utilizados os seguintes potenciais padrão:

$$E^o_{catodo} = 0$$

$$E^o_{anodo} = 1,23 \text{ V}$$

Logo,

$$E^o_{gerador} = - 1,23 \text{ V}$$

O cálculo do potencial elétrico padrão do gerador foi realizado, de acordo com Spiegel, (2008), utilizando a equação (8)

$$E_{gerador} = E^o_{gerador} - \frac{RT \ln Q}{N_e F} \quad (8)$$

$E_{gerador}$ = Potencial elétrico padrão do gerador [V]

$E^{\circ}_{gerador}$ = Potencial padrão do gerador [V]

N_e = Número de elétrons gastos para produzir a reação [-];

F = Constante de Faraday [96.485,332 C.mol⁻¹].

R = Constante universal dos gases [8,314 J];

T = Temperatura [K];

$\ln Q$ = Logaritmo neperiano do coeficiente reacional [-].

Ainda de acordo com Spiegel (2008), para calcular o potencial elétrico padrão do gerador, deve-se levar em consideração o potencial elétrico padrão menos as concentrações da solução eletrolítica.

No caso específico em que a temperatura é 25 °C e a pressão de 1 atm, tem-se:

$$Q = \frac{H_2 O_2^{0,5}}{H_2 O} \quad (9)$$

Portando, se $\ln Q = 0$, o valor do potencial elétrico padrão da célula na temperatura ambiente é o próprio potencial padrão, que é igual ao trabalho elétrico a 25° C.

$$E_{gerador} = E^{\circ}_{gerador}$$

4.4 ANÁLISE TÉCNICA DA ELETRÓLISE

De acordo com Russel (1994b) a quantidade de hidrogênio produzida pela eletrólise é proporcional à quantidade de eletricidade aplicada ao eletrolisador. Para uma dada quantidade de eletricidade a quantidade de hidrogênio produzida é proporcional à sua massa equivalente, sendo necessários dois elétrons para produzir uma molécula de H₂.

Portanto Russel (1994b) descreve que, um mol de elétron constitui uma quantidade elevada de eletricidade denominada Faraday (F). Uma unidade menor é o Coulomb (C), onde há 9,6487 x 10⁴ C em um Faraday. Quando um Coulomb de eletricidade atravessa um condutor em um segundo, é constatado que o condutor transporta uma corrente elétrica de um Ampère (A). Em outras palavras um ampere é igual a um coulomb por segundo.

Segundo Russel (1994b):

- 1 mol de elétron equivale a 1 Faraday (F);
- 1 Faraday = 9,65 x 10⁴ Coulombs;
- 1 Ampère = 1 Coulomb / segundo.

Com a corrente elétrica em cada eletrodo e o tempo é possível calcular a massa de oxigênio e hidrogênio produzido: Coulombs = Corrente x Tempo.

Segundo Russel (1994b), é possível calcular a massa de hidrogênio aplicando a equação (10). Para calcular o número de Faraday que atravessam o eletrolisador é preciso determinar qual corrente será aplicada nos eletrodos em uma determinada faixa de tempo.

$$m = F \times \frac{MA_{rel}}{F_{H_2}} \quad (10)$$

Onde:

m = Massa [g];

F = Número de Faradays que atravessam o eletrolisador[C];

MA_{rel} = Peso atômico (ou massa atômica relativa) do elemento [mol];

F_{H_2} = Número de Faradays para produção das moléculas de H₂ ou ½ O₂ [C].

No sistema avaliado neste estudo, foram aplicados 60 A e 12 V e a determinação da vazão de hidrogênio produzido foi considerada para a análise técnica e econômica. De acordo com Braga (2014), a eficiência energética do processo de eletrólise utilizando a eletricidade fornecida pelos painéis solares foi calculada pela equação (11).

$$\eta_{eletro.el.sp} = \eta_{eletrolisador} * \eta_{sp} \quad (11)$$

Onde:

$\eta_{eletro.el.sp}$: eficiência energética do processo de eletrólise [-]

$\eta_{eletrolisador}$: eficiência do eletrolisador [-]

η_{sp} : eficiência de geração de eletricidade dos painéis solares[-]

De acordo com Braga (2014), a eficiência energética do eletrolisador foi determinada pela equação 12.

$$\eta_{eletrolisador} = \frac{\dot{m}_{H_2} * PCI_{H_2}}{E_{req.}} \quad (12)$$

Onde:

$E_{req.}$: eletricidade requerida no eletrolisador [kW]

\dot{m}_{H_2} : fluxo mássico de hidrogênio produzido [kg.s⁻¹]

PCI_{H_2} : Poder calorífico inferior do hidrogênio [kJ.kg⁻¹]

$\eta_{eletrolisador}$: eficiência do eletrolisador [-]

Segundo PAULINO (2017), o poder calorífico inferior do biohidrogênio (PCI_{H_2}) é $119950 \text{ kJ kg}^{-1}$.

4.5 ANÁLISE ECONÔMICA DA ELETROLISE

O custo de produção de hidrogênio a partir de eletrólise da água, com eletricidade proveniente de painéis solares foi determinado pela metodologia desenvolvida por Issues (2017), conforme equação 13.

$$C_{H_2\text{eletrólise}} = \frac{Inv_{eletrolisador} * f}{H * \dot{E}_{H_2}} + Cop_{eletrolisador} + Cman_{eletrolisador} \quad (13)$$

Onde:

$C_{H_2\text{eletrólise}}$: custo de produção de hidrogênio a partir da eletrólise [$\text{US}\$.kWh^{-1}$]

$Cman_{eletrolisador}$: custo de manutenção do eletrolisador [$\text{US}\$.kWh^{-1}$]

$Cop_{eletrolisador}$: custo de operação do eletrolisador [$\text{US}\$.kWh^{-1}$]

\dot{E}_{H_2} : potência suprida pelo hidrogênio [kW]

f : fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h ano^{-1}]

$Inv_{eletrolisador}$: investimento no eletrolisador [US\$]

De acordo com Braga (2014), a potência suprimida pelo hidrogênio \dot{E}_{H_2} produzido pode ser calculado pela equação (14).

$$\dot{E}_{H_2} = \dot{m}_{H_2} \cdot PCI_{H_2} \quad (14)$$

O custo de operação do eletrolisador envolve o custo da eletricidade e da água utilizada no processo com as respectivas soluções, e sua determinação foi realizada pela equação 15.

$$Cop_{eletrolisador} = \frac{\dot{E}_{req} * Cel_{sp}}{\dot{E}_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{H_2O} * P_{H_2O}}{\dot{E}_{H_2}} \quad (15)$$

Onde:

Cel_{sp} : custo de eletricidade produzida no painel solar [US\$. kWh⁻¹]

$Cop_{eletrolisador}$: custo de operação do eletrolisador [US\$. kWh⁻¹]

\dot{E}_{req} : eletricidade requerida no eletrolisador [kW]

\dot{E}_{H_2} : potência suprida pelo hidrogênio [kW]

\dot{m}_{H_2O} : fluxo mássico de água no eletrolisador [kg. h⁻¹]

P_{H_2O} : Preço de compra de água [US\$.kg⁻¹]

De acordo com SILVEIRA (1998), o custo de manutenção do processo de eletrólise pode ser considerado como sendo 3% do custo de investimento da planta, conforme equação 16.

$$Cman_{eletrolisador} = 0,03 * \frac{Inv_{eletrolisador} * f}{H * \dot{E}_{H_2}} \quad (16)$$

De acordo com Brizi et al. (2014), para determinar o custo de produção de eletricidade a partir dos painéis solares, foi utilizada a equação 17.

$$Cel_{sp} = \frac{Inv_{sp} * f}{H * \dot{E}_p} + Cop_{sp} + Cman_{sp} \quad (17)$$

Cel_{sp} : custo de eletricidade produzida no painel solar [US\$.kWh⁻¹]

$Cman_{sp}$: custo de manutenção do painel solar[US\$. kWh⁻¹]

Cop_{sp} : custo de operação do painel solar [US\$. kWh⁻¹]

\dot{E}_p : potência gerada pelo painel solar [kW]

f :fator de anuidade [1/ano]

H : período equivalente de utilização [h.ano⁻¹]

$Inv_{eletrolisador}$: investimento no painel solar [US\$]

Para este trabalho foi desconsiderado o custo de operação, por se tratar de um ensaio experimental. De acordo com Silveira, (1998), o custo de manutenção dos painéis solares pode ser considerado como sendo 3% do custo de investimento da planta, conforme equação 18.

$$Cman_{sp} = 0,03 * \frac{Inv_{sp} * f}{H * \dot{E}_p} \quad (18)$$

Segundo Issues (2017), o fator de anuidade que leva em consideração a taxa anual de juros (r) e o período de amortização (k) foi calculado pelas equações 19 e 20.

$$f = \frac{q^k(q-1)}{q^k-1} \quad (19)$$

Onde:

$$q = 1 + \frac{r}{100} \quad (20)$$

Onde:

f : fator de anuidade [1/ano]

k : período de amortização de capital [anos]

r : taxa de anual de juros [%]

Segundo Moura et al. (2020), para determinar o período de retorno de investimento, é utilizada a equação (21). De acordo com o autor, o custo esperado para o hidrogênio comercial produzido por energia solar é de aproximadamente 0.42 US\$/kWh.

$$G_{H_2} = P_{elet} \cdot H (C_{H_2c} - C_{H_2}) \quad (21)$$

P_{elet} : Potência do eletrolisador [kW];

H : Período de operação do eletrolisador [h/ano];

C_{H_2c} : Custo do hidrogênio comercial [US\$/kWh];

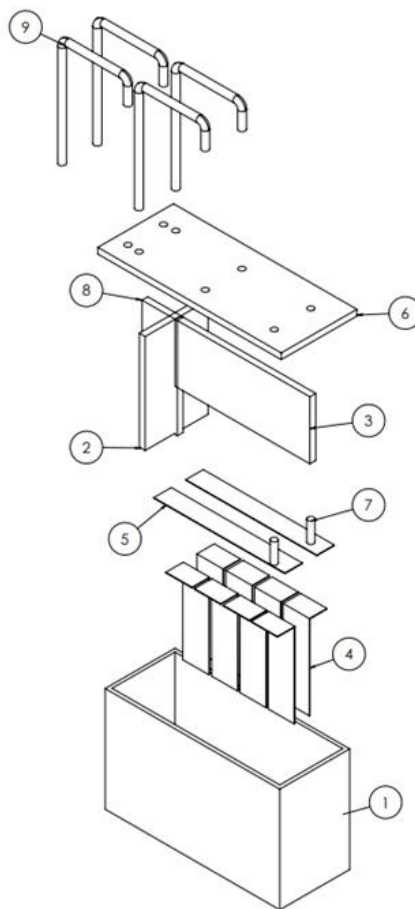
C_{H_2} : Custo de hidrogênio gerador pela Usina Solar [US\$/kWh].

5 CONSTRUÇÃO DO ELETROLISADOR

Esse protótipo educacional de eletrolisador foi baseado no conceito de Michael Faraday para produzir hidrólise da água por reação química da eletrólise. Utilizando as equações (3) e (8) foi possível observar que o circuito do eletrolisador requer apenas 1,5 V para separar as moléculas de hidrogênio e oxigênio da água. (Ulleberg, 2003).

Este eletrolisador possui três placas que dividem os reservatórios em diferentes partes marcados com os numeros 2, 3 e 8 que podem ser observados na Figura 9. O número 1 representa a parte externa do eletrolisador, o numero 9 representa as mangueiras que conectam os reservatórios. Os numeros 4 e 5 sinalizam os eletrodos que compoem o eletrolisador. O número 7 mostra onde os polos positivo e negativos são conectados aos eletrodos.

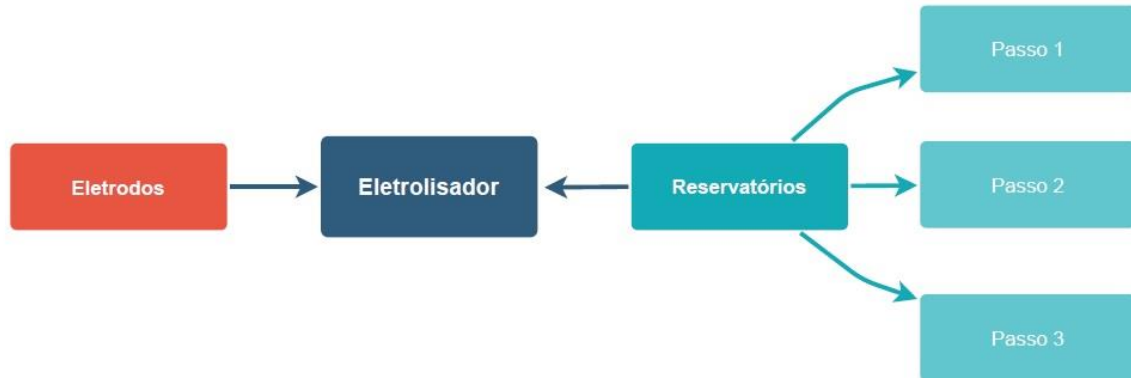
Figura 9: Vista explodida do eletrolisador



Fonte: Do autor.

Como pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 10, a construção do eletrolisador foi dividida em duas etapas diferentes. Na parte dos reservatórios o equipamento foi construído em três passos diferentes. A etapa do eletrodos não necessitou ser dividida em vários passos.

Figura 10: Diagrama de blocos da construção do eletrolisador educacional



Fonte: Do autor.

5.1 MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO

O protótipo construído é constituído de placas de acrílico conforme a Tabela 2 a seguir.

Tabela 2: Identificação das placas de acrílico usadas no eletrolisador

Placas	Área	Espessura	Unidades
A	31.6 cm x 18 cm	8 mm	2
B	18 cm x 12 cm	8 mm	2
C	30 cm x 12 cm	8 mm	1
D	17.2 cm x 12 cm	8 mm	1
E	17.2 cm x 4.8 cm	8 mm	1
F	23.2 cm x 4 cm	8 mm	1
G	35 cm x 17 cm	8 mm	1
H	3.5 cm x 1.5 cm	8 mm	6

Fonte: Do autor.

As placas de acrílicos **A**, **B** e **C** foram utilizadas para a construção do reservatório, a placas de acrílico **D** para isolar um reservatório de outro. As placas **E**, **F** e **G** foram usadas para dividir o tanque de produção de gás e de filtragem de vapor em duas partes e como tampa do reservatório.

Os eletrodos são compostos por duas placas de aço inoxidável 316L de 20 cm x 17.5 cm x 0,1 cm; dois parafusos de aço inoxidável 304 e quatro arruelas de aço inoxidável 304 conforme a Figura 11. As chapas de aço inoxidável 316 L têm a característica de alta resistência à corrosão e boa condutividade elétrica; portanto, foram utilizadas na montagem do circuito do eletrodo. (Al-Rousan & Musmar, 2018; Gentil, 1996)

Figura 11 - Estrutura do protótipo do eletrolisador que consiste em: (1) reservatório de produção de gás; (2) reservatório de filtro de vapor; (3) parafusos, arruelas e pernos de aço inoxidável; (4) conexões pneumáticas.



Fonte: Do autor.

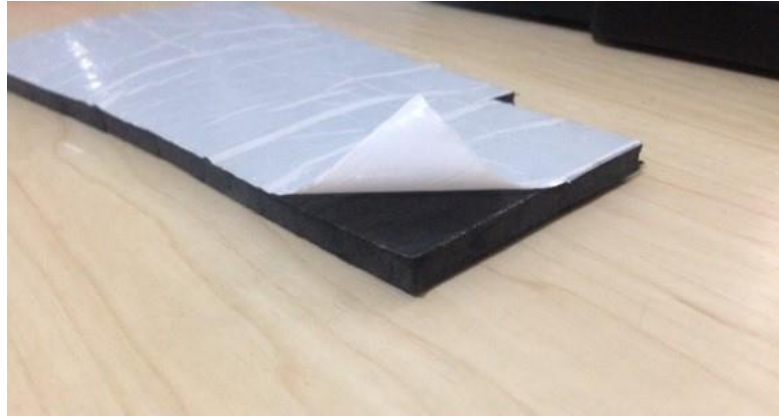
Para fixar as placas de acrílico nessa construção do protótipo foram utilizadas cola acrílica S-320, aplicada por meio de seringas descartáveis.

- **ESPONJA DE VEDAÇÃO**

Para a vedação da tampa do reservatório foi utilizada uma esponja de etileno-propileno-dieno (EPDM) que possui uma cola em uma das faces, que auxilia na fixação com as extremidades do reservatório. Com a compressão dos parafusos na tampa do reservatório, a esponja sofre uma leve deformação axial que proporciona uma boa vedação impedindo a fuga

de gás. Um pedaço de esponja de 35 cm x 17 cm x 0.5 cm foi cortada para vedar a tampa. A Figura 12 ilustra a esponja de vedação do gerador.

Figura 12 - Esponja de vedação do gerador



Fonte: Do autor.

- **JOELHO DE CONEXÃO INSTANTÂNEA**

Os joelhos de conexão instantânea têm um papel fundamental no transporte do gás do reservatório 1 para o reservatório 2. O modelo utilizado na célula de hidrogênio é o joelho M5 de 8 mm de diâmetro nas duas saídas. Esse joelho é muito utilizado em circuitos pneumáticos, sendo o mais apropriado para utilização em sistemas de fluxo de gás. Outro benefício é o baixo custo para a aquisição desse material. A Figura 13 ilustra o joelho de conexão instantânea.

Figura 13 - Joelho de conexão instantânea



Fonte: Do autor.

- **MANGUEIRA**

As mangueiras utilizadas neste projeto são mangueiras de 8 mm de diâmetro e com 150 mm de comprimento, feitas de um material chamado poliuretano. São amplamente utilizadas em sistemas pneumáticos e ideais para trabalhar com gases. A Figura 14 ilustra as mangueiras utilizadas no gerador de hidrogênio.

Figura 14 - Mangueira utilizada no gerador



Fonte: Do autor.

- **VÁLVULA DE RETENÇÃO**

A célula de hidrogênio conta com duas válvulas de retenção que são colocadas na saída do reservatório 2. Elas são empregadas como medida de segurança; caso haja algum retorno de chama, as válvulas não deixam que a mesma volte à célula e cause a sua explosão. Possuem um diâmetro de entrada e de saída de 8 mm e suportam pressões de até 120 psi (827 kPa). A Figura 15 ilustra as válvulas de retenção utilizada no projeto.

Figura 15 - Válvulas de retenção



Fonte: Do autor.

O custo total da pesquisa constitui de todos os materiais gastos para a construção do gerador de hidrogênio e para os testes realizados no mesmo são apresentados no ANEXO A.

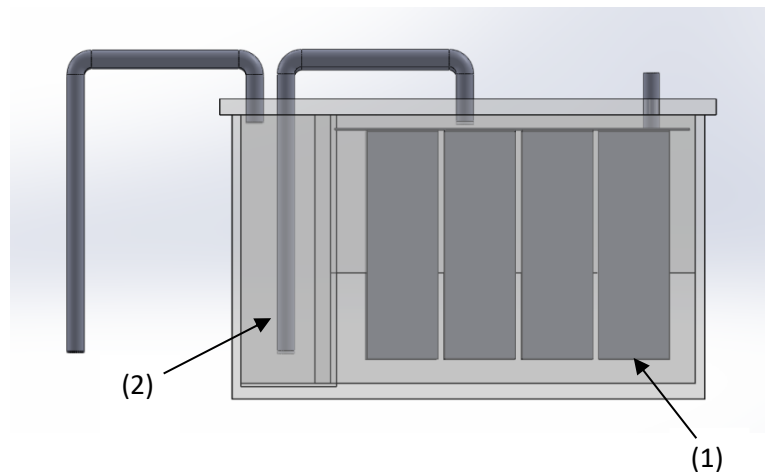
Também está inclusa a taxa de frete de cada loja online em que os produtos foram comprados. O custo total para construção deste protótipo foi de US\$ 205,00.

5.2 CONSTRUÇÃO DOS RESERVATÓRIOS DO ELETROLISADOR

De acordo com Rezende et al. (2021), para construção do eletrolisador de água foi utilizado modelagens termodinâmicas e eletroquímicas que auxiliam na otimização do protótipo educacional. Utilizando a metodologia APQP e um software CADSolidWorks foi possível reduzir os desperdícios do projeto e acelerar o processo de construção do protótipo.

O custo para construção do eletrolisador foi de US\$ 205,00 e os materiais foram obtidos facilmente em loja de materiais de construção e lojas online de ferramentas. Este eletrolisador possui dois reservatórios, um para produção de gás (1) e outro para filtragem de vapor (2), como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Reservatório de produção de gás (1) Reservatório de filtragem de vapor (2)



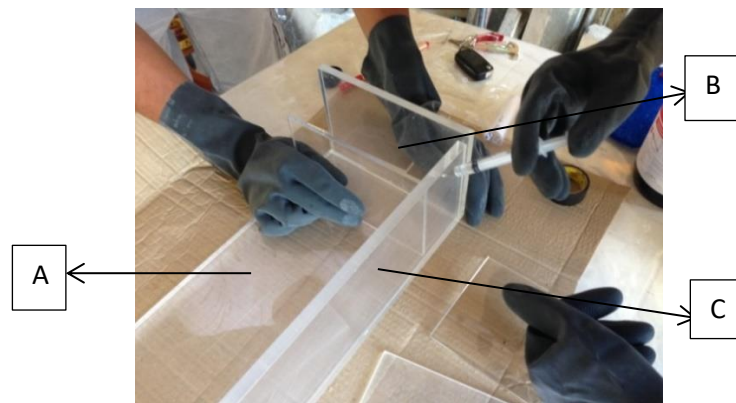
Fonte: Do autor.

O reservatório de produção de gás foi dividido em duas partes, com um circuito de eletrodos em paralelo, imersos em uma solução eletrolítica. A construção do protótipo foi dividida em duas fases, uma de construção dos reservatórios e outra fase de montagem dos eletrodos de aço inox.

A primeira etapa foi dividida em 3 passos diferentes, sinalizando quais placas foram usadas em cada passo do processo de montagem do eletrolisador. Com auxílio da Tabela 1 que foi apresentada anteriormente, será demarcado cada chapa de acrílico usado na primeira etapa.

Para construção do eletrolisador é bem simples e rápido, para o primeiro passo foi utilizado as placas **A**, **B** e **C** conforme a Figura 18 a seguir. As placas foram fixadas com auxílio de uma cola especial de acrílico S-320 e uma seringa para aplicação da cola conforme é mostrado na Figura 17.

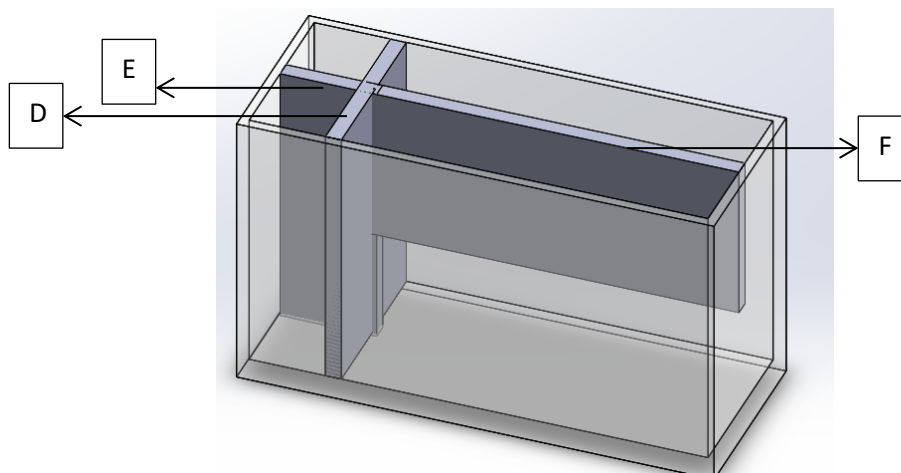
Figura 17 - Primeiro passo para montagem do eletrolisador.



Fonte: Do autor.

A placa **D** com um espaçamento de 6,6 cm é colada para separar os reservatórios de produção de gás e o de filtragem de vapor. A placa **E** foi utilizada para dividir os reservatórios de filtragem de vapor em duas partes iguais. A placa **F** vai dividir o reservatório de produção de gases em dois conforme mostra a Figura 18.

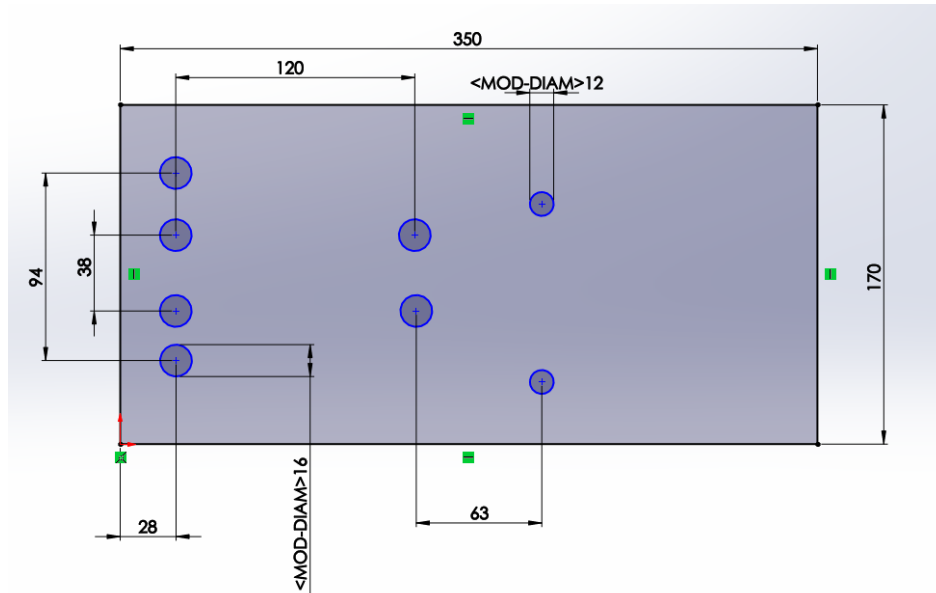
Figura 18 - Método de construção do reservatório do eletrolisador



Fonte: Do autor.

Após a montagem dos reservatórios e do circuito de eletrodos foi montado a tampa do eletrolisador. No segundo passo a placa **G** utilizada como tampa foi perfurada em pontos específicos para passagem dos parafusos e conexões pneumáticas conforme a Figura 19 abaixo.

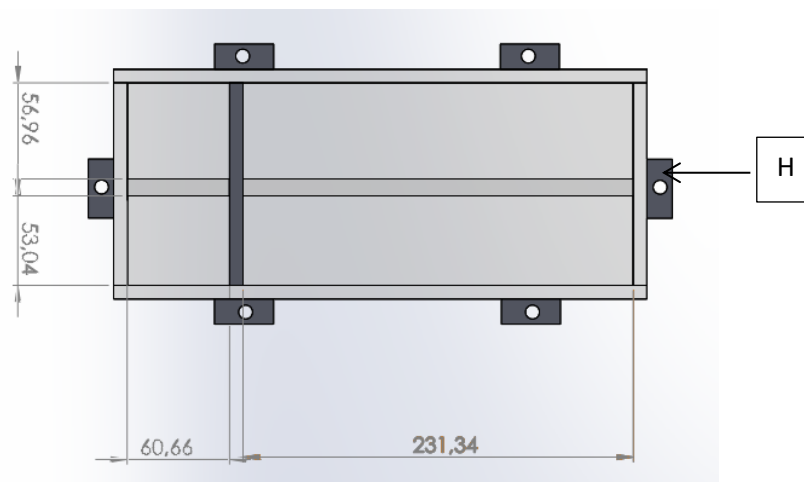
Figura 19 - Montagem da tampa dos reservatórios de produção de gás e filtragem de vapor



Fonte: Do autor.

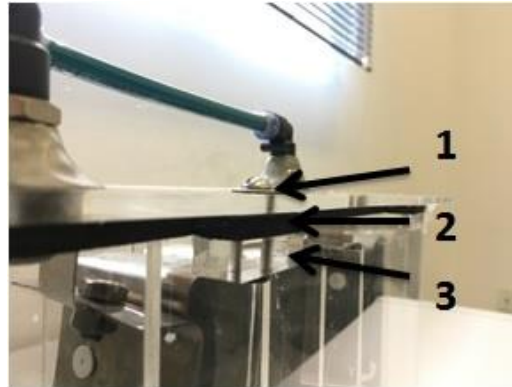
O último passo é colar as placas **H** na lateral dos reservatórios do eletrolisador, e colar a borracha EPDM sobre a tampa. Para fixar a tampa ao reservatório será utilizado parafusos, porcas e arruelas de aço inox 304 (1); uma borracha de vedação EPDM (2); Placa **H** (3) como demonstra a Figura 20 e 21.

Figura 20 - Dimensão dos fixadores do eletrolisador



Fonte: Do autor.

Figura 21 - Fixadores da tampa do eletrolisador



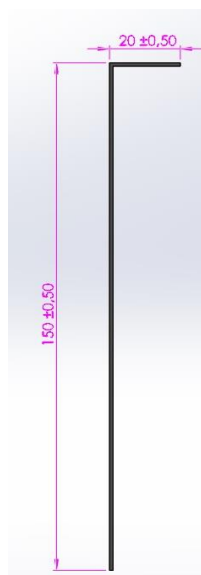
Fonte: Do autor.

5.3 CONSTRUÇÃO DO CIRCUITO DE ELETRODOS

De acordo com Gentil (1996), para a construção dos eletrodos foi utilizado aço inox 316L devido sua boa resistência à oxidação, à baixa concentração de carbono em sua composição, boa resistência a altas temperaturas e boa condutividade elétrica.

Ao manusear as chapas de aço inox foi utilizado luvas de borracha para evitar qualquer tipo de acidente. Dois eletrodos de aço inox 316L de 15 cm x 20 cm x 0,1 cm são cortados e é feito um furo em cada chapa com uma broca de ferro 3/8. Por último os eletrodos são dobrados em formato **L** como mostra a Figura 22 a seguir.

Figura 22 - Eletrodo em formato L



Fonte: Do autor.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir será apresentado os resultados da análise técnica e econômica do hidrogênio produzido no protótipo utilizando uma fonte de energia solar e os resultados do impacto do experimento prático na aprendizagem dos alunos.

6.1 ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Os resultados da vazão mássica de hidrogênio produzido em $\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$ da eficiência do eletrolisador e da eficiência energética do processo de eletrólise, utilizando energia fornecida por painéis solares com eficiência de 17%, são apresentados na Tabela 3. Os sais KOH e NaOH foram utilizados nas concentrações molares de 64 e 39 g.L^{-1} de água respectivamente, para testar o rendimento do eletrolisador.

Tabela 3 – Resultados da análise da eficiência energética da eletrólise utilizando soluções eletrolíticas de KOH e NaOH e energia solar

Parâmetros de Eficiência Energética	KOH	NaOH
Produção de hidrogênio [$\text{Nm}^3.\text{h}^{-1}$]	0,025	0,025
Eficiência do eletrolisador ($\eta_{\text{eletrolisador}}$) [%]	10,00	10,00
Eficiência energética do processo de eletrólise (η_{eletro}) [%]	1,77	1,77

Fonte: Do autor.

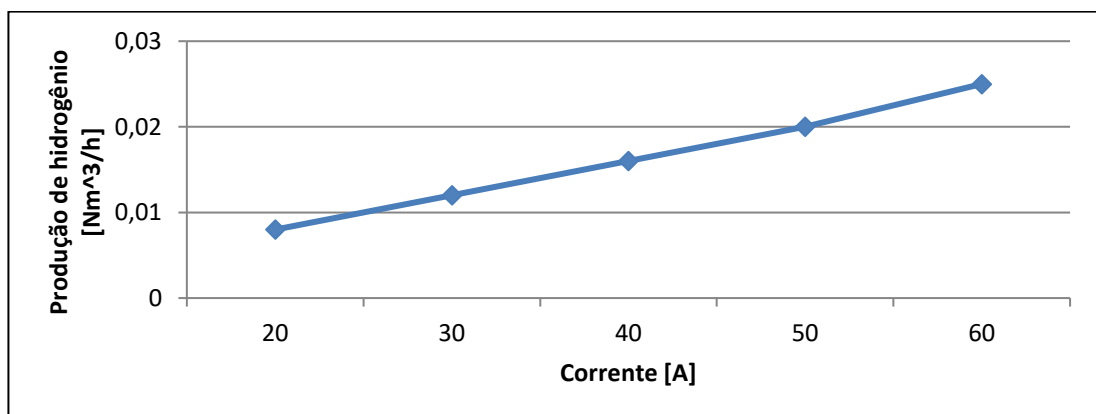
A vazão mássica de hidrogênio produzida de 0,025 $\text{Nm}^3.\text{h}$ foi calculado utilizando a equação (10). Neste modelo de cálculo a variação da solução eletrolítica não interferiu na produção de hidrogênio. Utilizando a equação (12) foi encontrada a eficiência do eletrolisador de apenas 10 % devido ao seu tamanho e número de eletrodos ou células eletrolíticas. A eficiência da eletrólise foi de 1,77 % utilizando a equação (11). A baixa eficiência pode estar ligada ao tamanho do eletrolisador utilizado na análise com uma potência máxima de 720 W e o rendimento de 17 % dos painéis solares.

Segundo Knob (2013) ao extrapolar uma curva $V \times I$ de um eletrolisador utilizando painéis solares foi observado uma intersecção nos pontos de 49 V e 143 A. Utilizando um eletrolisador de 24 células de eletrólise (eletrodos) em série com eficiência de 60 % e um sistema solar fotovoltaico com eficiência de 15 % foi observado que a eficiência da eletrólise de 9,2 %. E em dias nublados onde não se tem tanta incidência solar os valores dessas eficiências seriam ainda menores visto que a produção de hidrogênio é proporcional a corrente.

De acordo com Kovač et al. (2018), os sais mais utilizados para eletrólise alcalina encontrado na literatura são o hidróxido de potássio (KOH) e o hidróxido de sódio (NaOH). Estes dois eletrólitos têm alto grau de concentração de íons, com $\text{pH} = 13$ a 14. A pureza do hidrogênio produzido via eletrólise alcalina é de 99,98%, satisfazendo as exigências do sistema de produção de hidrogênio solar. Não foram verificadas diferenças entre os resultados obtidos com as diferentes soluções eletrolíticas quanto a eficiência energética e produção de hidrogênio.

Utilizando a equação 10 foi possível determinar a vazão mássica de hidrogênio considerando um período de uma hora com uma corrente máxima de 60 A. Dois elétrons foram considerados para que a eletrólise da água ocorra. De acordo com PAULINO (2017) um eletrolisador capaz de produzir $1 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de hidrogênio possui uma vazão mássica de hidrogênio aproximada de 0,0899 kg/h. Portanto ao converter a vazão mássica de hidrogênio do protótipo construído utilizando a equação 10 para $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ o valor da vazão de hidrogênio encontrado é de $0,025 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ para uma corrente de 60 A. O mesmo processo foi repetido para todas as outras faixas de corrente e os resultados são demonstrados na Figura 23.

Figura 23 - Vazão de hidrogênio em função das correntes de 20 a 60 A com a solução de KOH e NaOH



Fonte: Do autor.

Como pode ser observado na Figura 23, o eletrolisador apresentou uma vazão de hidrogênio de $0.008 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ utilizando uma corrente de 20 A e $0,025 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ com uma corrente de 60 A. Houve aumento linear na vazão de hidrogênio com o aumento da incidência solar de 500 W/m^2 para 890 W/m^2 e com o aumento da corrente de 20 A para 60 A, entretanto, não foi verificada diferença significativa para vazão de hidrogênio utilizando as duas soluções eletrolíticas de KOH e NaOH.

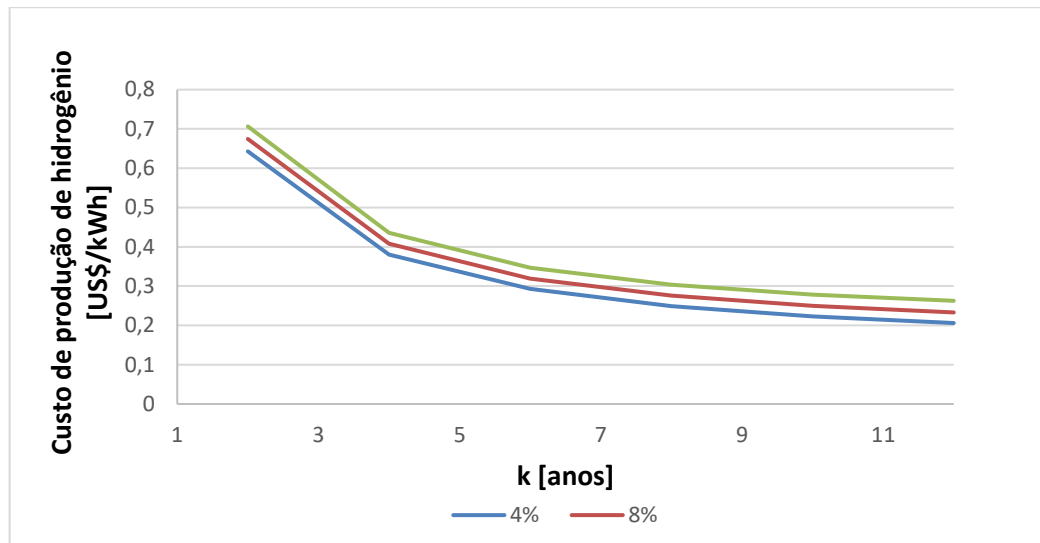
O mesmo comportamento foi observado por Bhattacharyya et al. (2017), onde foi instalado uma planta solar com painéis ligados em série paralelo e capacidade de geração máxima de 120 kW. O rendimento do painel neste sistema foi de 14 -16 %, a corrente nominal de 480 A, a tensão nominal 125 V e uma incidência solar máxima 900 W/m^2 . Nesta usina solar foi utilizado uma concentração de 30% de KOH em 50 eletrolisadores, onde foi encontrada uma vazão de $10.5 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ de hidrogênio com uma energia requerida de 60 kW. Foi considerada a geração de hidrogênio por um período de um ano e foi constatado que nos meses de baixa incidência solar, a vazão de hidrogênio foi inferior chegando a $2 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$ aproximadamente.

6.2 ANÁLISE ECONÔMICA DA ELETRÓLISE

Para a análise econômica da produção de hidrogênio por eletrólise da água foram considerados os investimentos em: painéis solares (US\$3850.00); construção do eletrolisador (US\$150.00); soluções eletrolíticas de KOH (US\$ 1.18 por litro) e NaOH (US\$ 1.62 por litro); taxas anuais de juros variando em 4, 8 e 12%; período equivalente de utilização do sistema de 8000 h.ano^{-1} ; período de amortização de capital, variando de 2 a 12 anos; produção de 0.023 kg h^{-1} de hidrogênio ($0.025 \text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$). Segundo Dantas & Pompermayer (2018), o custo padrão de eletricidade gerada pelos painéis fotovoltaicos é de 0,41 R\$/kWh ou 0,1 US\$/kWh considerando a cotação do dólar de R\$ 5,20.

Utilizando a equação (13) foi calculado os custos de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água com eletricidade obtida de painéis solares, usando as soluções eletrolíticas de KOH e NaOH em função do período de amortização de capital são apresentados na Figura 24.

Figura 24 - Custo de produção de hidrogênio por eletrólise da água com energia fotovoltaica em função do período de amortização de capital

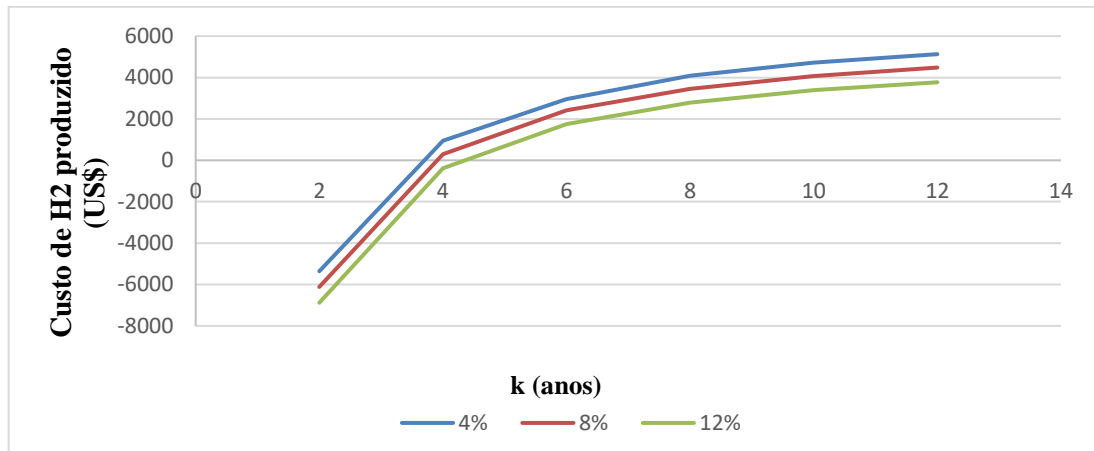


Fonte: Do autor.

As vazões mássicas de hidrogênio para ambas as soluções eletrolíticas foram iguais, portanto o custo de produção de hidrogênio será o mesmo para KOH e NaOH. Como mostra a Figura 24 o custo de produção de hidrogênio se situa na faixa de US\$ 0.64 a US\$ 0.70 por kWh, considerando o melhor e pior cenário, respectivamente. A autora Braga (2014) obteve o custo de produção de hidrogênio por eletrólise da água na faixa de US\$ 1.78 a US\$ 7.17 por kWh, para a produção de $1 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ de hidrogênio produzido por energia solar.

Utilizando a equação (21) foi calculado o custo de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água com eletricidade obtida de painéis solares, usando as soluções eletrolíticas de KOH e NaOH. Foram consideradas 8000 horas de operação por ano e um custo de hidrogênio comercial de 0.42 US\$/kWh. A Figura 25 demonstra os custos de produção de hidrogênio pelo eletrolisador educacional construído. Com as taxas de juros de 4 % até 12 % a.a., o *payback* deste sistema atual levaria 4 anos para ser pago no pior cenário.

Figura 25 : *Payback* do investimento para produção de hidrogênio

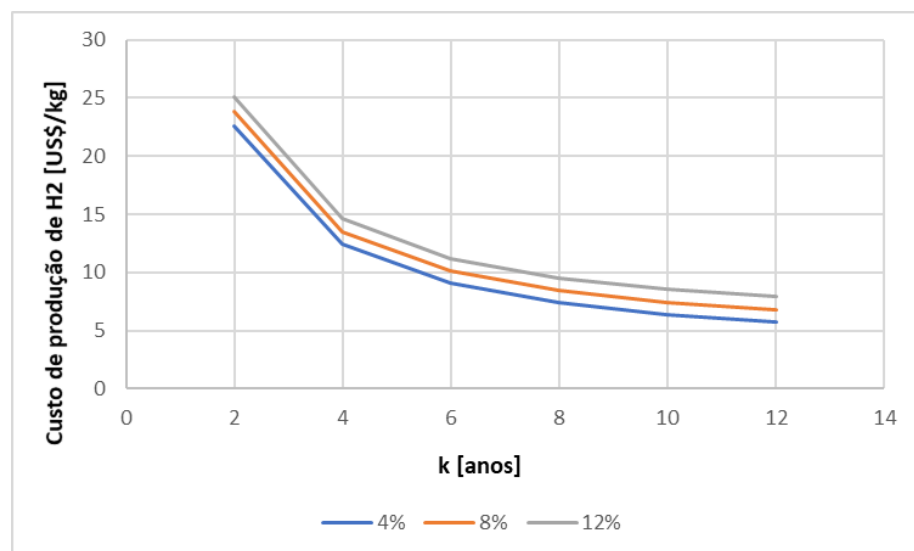


Fonte: Do autor.

De acordo com Szwarcfiter & Dalcol (2011), o aumento do volume da produção de um bem por período, reduz os seus custos. Aumentando a produção de hidrogênio do eletrolisador analisado neste estudo, obterá valores inferiores à faixa de US\$ 0.64 a US\$ 0.70 por kWh.

Adaptando a equação (13) foram calculados os custos para produção de hidrogênio deste sistema em US\$/kg. Considerando o uso da energia proveniente de usinas solares os custos de produção de hidrogênio deste sistema se situam na faixa de 22 a 25 US\$/kg considerando uma variação na taxa de juros de 4, 8 e 12 % a.a. conforme demonstra a Figura 26. Foram considerados 8000 horas de operação e com um custo de eletricidade de 0,1 US\$/kWh.

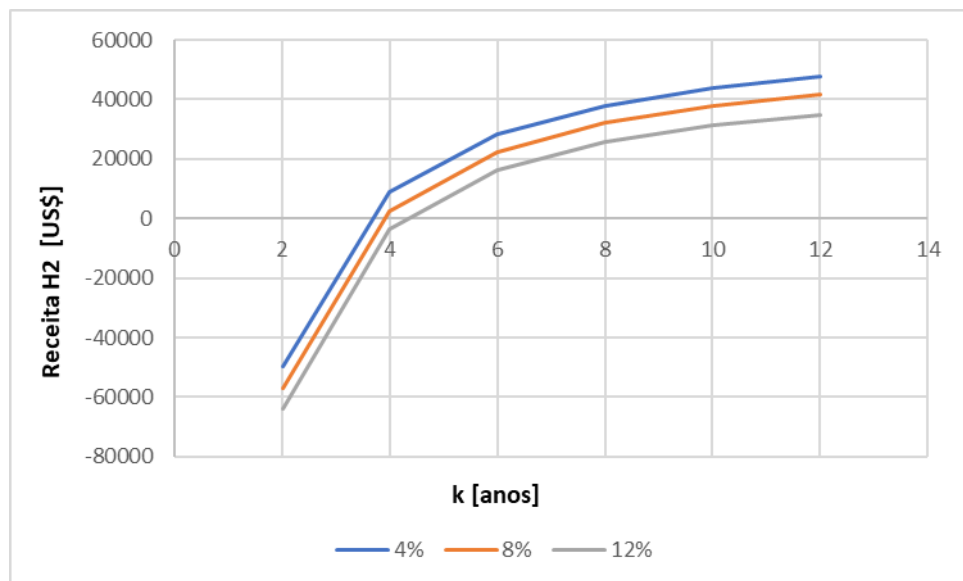
Figura 26: Custo de produção de H2 US\$/kg



Fonte: Do autor.

De acordo com Newsom (2019), o custo comercial do hidrogênio produzido por energia solar pode variar entre 9,8 – 13,99 US\$/kg. Adaptando a equação (21) foi calculado o retorno do investimento em US\$/kg da produção de hidrogênio solar. Foi possível notar que a partir do 4º ano a venda do hidrogênio se torna positiva conforme mostra a Figura 27 a seguir. Para este calculo foi adotado uma vazão mássica de hidrogênio 0,1 kg/dia, 8000 horas de operação com um sistema solar de 3kWp.

Figura 27: Payback do investimento para produção de hidrogênio em US\$/kg



Fonte: Do autor.

Segundo Micena et al. (2019) o preço de venda do hidrogênio praticado no mercado norte-americanos é de 13,44 US\$/kg. Neste estudo o autor encontrou valores do custo do hidrogênio proveniente de energia solar e eletrólise inferiores a média do mercado americano, variando entre 10 -12 US\$/kg. O sistema estudado pelo autor possui um eletrolisador com eficiência de 20 % o que proporcionou um custo de produção de hidrogênio menor que a média do mercado americano. Para este sistema o retorno de investimento foi de 2 a 3 anos considerando as taxas de juros de 6,8 e 12 % a.a.

6.3 COMPARAÇÃO ENTRE KOH x NaOH

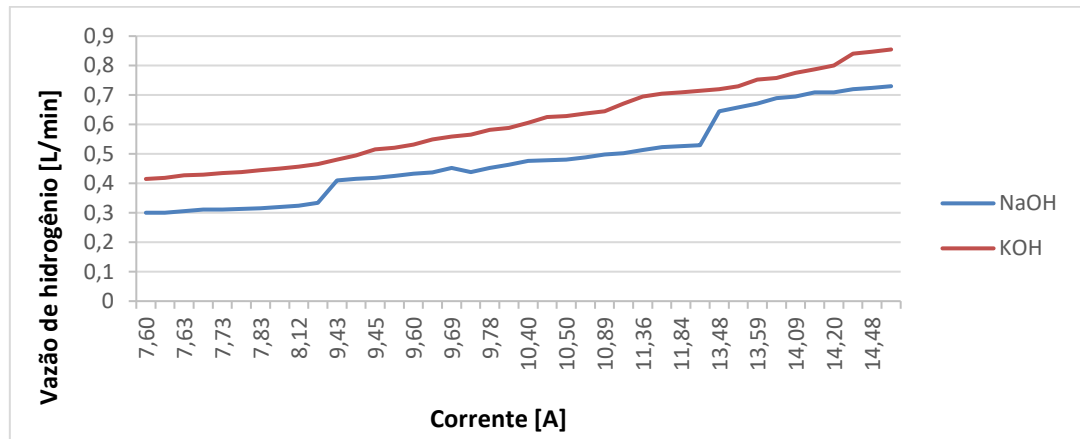
Com o protótipo construído, foi possível analisar a reação química da eletrólise da água e seu desempenho na produção de gases hidrogênio e oxigênio através da aplicação de diferentes sais em soluções eletrolíticas, como KOH e NaOH. O circuito em paralelo facilitou a construção deste eletrolisador, pois é de baixo custo, compacto, com materiais de construção simples e fácil acesso. O transformador usado neste projeto foi extremamente importante para o controle do sistema de produção de hidrogênio e para a aquisição de todos os dados retirados no experimento prático.

De acordo com Göllei et al. (2014), o fluxo volumétrico é diretamente proporcional à corrente elétrica, portanto, quando há uma variação de tensão e corrente na saída do transformador, há também uma variação na produção de hidrogênio e oxigênio, o que também foi observado nos testes do protótipo.

De acordo com dos Santos et al. (2017) é necessário estabelecer um equilíbrio entre a solução eletrolítica e a distância entre os eletrodos, para que haja uma boa produção de gás e uma temperatura operacional que não exceda $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Também afirmou que a eficiência do eletrolisador depende dos sais utilizados na solução eletrolítica. A variação da área de eletrodos também afetou diretamente o desempenho do eletrolisador e verificou-se que o circuito de eletrodos paralelo, com maior área de eletrodos resultou em uma menor resistência ao fluxo de corrente.

Utilizando um medidor de vazão e um cronômetro foi determinado a vazão volumétrica de hidrogênio durante o experimento prático. Dentre os sais utilizados nas soluções eletrolíticas, o KOH resultou em maior produção de gás atingindo $0,8547\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, superior à obtida com solução de NaOH, que foi de $0,7299\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, com diferença de $0,12\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$, mostrado na Figura 28.

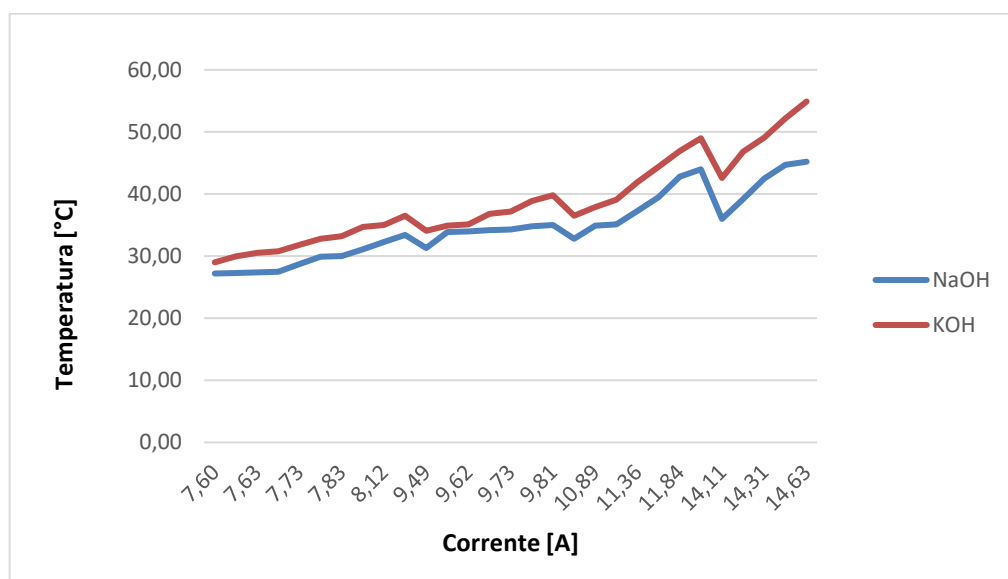
Figura 28: Vazão de gases com solução eletrolítica de KOH e NaOH



Fonte: Do autor.

Foram realizadas medições de temperatura no eletrolisador ao longo dos testes de desempenho. Observou-se que o aumento da corrente e tensão do equipamento proporciona um aumento na temperatura dos eletrodos. Na Figura 29 a seguir mostra os resultados da variação de temperatura para as soluções eletrolíticas de NaOH e KOH na concentração de 39 g.L^{-1} e 64 g.L^{-1} respectivamente.

Figura 29: Temperatura no eletrolisador em função da corrente para soluções de NaOH e KOH



Fonte: Do autor.

De acordo com Millet et al. (2011), a medida que a temperatura do eletrolisador aumenta, há uma redução na energia livre de Gibbs na reação de dissociação e ao mesmo tempo a entalpia da reação permanece constante. Para eletrodos sólidos é necessário aumentar a temperatura da reação para produzir mais hidrogênio e oxigênio com maior eficiência.

Foi observado que o aumento da corrente no eletrolisador teve um impacto direto na temperatura da reação. A Figura 29 mostram que para a produção de KOH a temperatura foi maior se comparado com NaOH. A Figura 28 mostra que a produção de hidrogênio e oxigênio foi maior para solução de KOH, portanto, a medida que aumenta a corrente e tensão do eletrolisador a temperatura também se altera.

7 CONCLUSÃO

Concluiu-se no presente trabalho que é possível construir passo a passo um eletrolisador utilizando materiais fáceis de comercializar e que dependem apenas de um investimento de US \$ 205,00 para montar o protótipo.

Os resultados da análise técnica e econômica de um sistema de produção de hidrogênio utilizando painéis fotovoltaicos ligados em paralelo, mostraram que este sistema tem capacidade para ser uma alternativa na produção de energia limpa no futuro. Da análise técnica do eletrolisador com circuito paralelo, observa-se a mesma vazão mássica de hidrogênio produzida pelas duas soluções eletrolíticas atingindo $0,025 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ e um rendimento de aproximadamente 2 %. O eletrolisador com circuito paralelo foi testado com valores de corrente de 20 a 60 A. Foi verificado durante os testes experimentais que o aumento da produção de hidrogênio teve influencia na corrente elétrica do sistema. A eficiência do protótipo educacional foi baixa, entretanto na literatura também foram encontrados valores similares para outros eletrolisadores nas mesmas condições de funcionamento.

A análise econômica mostra que os custos de produção de hidrogênio deste sistema variaram entre 0.64 a 0.70 US\$/kWh com 8000h de operação por ano. Na referência encontrada, os custos de produção de hidrogênio por eletrólise foram na faixa de US\$ 1.78 a US\$ 7.17 por kWh considerando 2920h de operação por ano. Com o aumento do volume da produção há uma redução dos custos de produção de hidrogênio. Ao atingir $1 \text{ Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de produção, o eletrolisador analisado apresenta faixa de valores inferiores à 0.64 a 0.70 US\$/kWh. O cálculo de payback do investimento considerando uma taxa de juros de 4 % a 12 % a.a., demonstrou que este sistema levaria 4 anos para ser pago.

O experimento prático permitiu analisar diferentes pontos da eletrólise da água. Foi observado que a variação da corrente e da tensão no eletrodo afetou diretamente a produção de hidrogênio no eletrolisador. Utilizando diferentes soluções eletrolíticas ficou evidente que a concentração de diferentes sais na água interfere na passagem de íons livres entre os eletrodos e conseqüentemente também altera produção de hidrogênio e temperatura dos eletrodos.

A vazão volumétrica de hidrogênio com a solução eletrolítica de KOH é de $0,8547 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ e para solução de NaOH foi de $0,7299 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ utilizando um transformador com uma tensão de 12 V e uma corrente de 15 A. A variação da corrente no eletrolisador elevou a temperatura dos eletrodos e da solução eletrolítica durante o experimento. Foi observado que a medida que a temperatura do eletrolisador aumentava, a produção de hidrogênio era maior.

Utilizando a solução eletrolítica de KOH o eletrolisador alcançou uma temperatura de 55 ° C com uma corrente de 15 A. Com a solução de NaOH o eletrolisador chegou a 45° C com uma corrente de 15 A durante o experimento prático.

O protótipo construído demonstra vários aspectos da eletrólise que podem ser otimizados. Este processo de construção pode ser replicado se as medidas forem respeitadas, contribuindo para futuras pesquisas em energia renovável.

Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se:

- Aumentar o tamanho do eletrolisador;
- Buscar novos modelos de eletrodos como circuito serie;
- Buscar novos modelos de eletrolisadores como célula seca:
- Tentar separar o hidrogênio e oxigênio fora do eletrolisador por meio de catalisadores ou membranas poliméricas;
- Utilizar painéis solares com potências acima de 450W e com eficiência acima de 20 %;
- Otimizar circuito eletrônico de alimentação do eletrolisador.

REFERÊNCIAS

- AL-ROUSAN, A. A., & MUSMAR, S. A. (2018). Effect of anodes-cathodes inter-distances of HHO fuel cell on gasoline engine performance operating by a blend of HHO. **International Journal of Hydrogen Energy**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.08.118>.
- ATKINS, P. W. (1994). **Physical Chemistry (5th ed.)**. Oxford University Press. Acesso em: 2 maio 2019.
- AYDIN, K., & KENANOĞLU, R. (2018). Effects of hydrogenation of fossil fuels with hydrogen and hydroxy gas on performance and emissions of internal combustion engines. **International Journal of Hydrogen Energy**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.04.026> Acesso em: 15 maio 2019.
- Ball, M., & Wietschel, M. (2009). The future of hydrogen - opportunities and challenges. **International Journal of Hydrogen Energy**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.11.014> Acesso em: 7 julho 2019.
- BANDARA, A., HEMAPALA, K., & EKANAYAKE, N. C. (2020). A survey on hybrid renewable energysystems for microgrid application. **PIICON 2020 - 9th IEEE PowerIndia International Conference**. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/PIICON49524.2020.9113033>. Acesso em: 8 julho 2020.
- BARBIR, F. (2005). PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. **Solar Energy**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2004.09.003> Acesso em: 9 março 2019.
- BHATTACHARYYA, R., MISRA, A., & SANDEEP, K. C. (2017). Photovoltaic solar energy conversion for hydrogen production by alkaline water electrolysis: Conceptual design and analysis. **Energy Conversion and Management**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.057> Acesso em: 11 abril 2019.

BOBREK, M., & SOKOVIC, M. (2005). Implementation of APQP-concept in design of QMS. **Journal of Materials Processing Technology**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jmatp rotec.2005.02.225> Acesso em: 25 março 2019.

BRAGA, L. B. (2014). **Aspectos técnicos , econômicos e ecológicos de Processos de produção de hidrogênio**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). *Faculdade de Engenharia Do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, São Paulo, 2014*. Disponível em: <https://doi.org/CDU 546.11> Acesso em: 1 julho 2019.

BRIZI, F., SILVEIRA, J. L., DESIDERI, U., REIS, J. A. DOS, TUNA, C. E., & LAMAS, W. D. Q. (2014). Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.088> Acesso em: 12 março 2020.

CARBONE, T. A. (2005). Integrating operations and product development methodologies for improved product success using advanced product quality planning. **ASMC (Advanced Semiconductor Manufacturing Conference)**. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/asmc .2005.1438800> Acesso em: 13 março 2020.

CHI, J., & YU, H. (2018A). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. **Chinese Journal of Catalysis**, Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1872 2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10.1016/S1872 2067(17)62949-8) Acesso em: 8 dezembro 2019.

CHI, J., & YU, H. (2018B). Water electrolysis based on renewable energy for hydrogen production. **Cuihua Xuebao /Chinese Journal of Catalysis**. Disponível em: [https://doi.org/10. 1016/S1872-2067\(17\)62949-8](https://doi.org/10. 1016/S1872-2067(17)62949-8) Acesso em: 5 outubro 2019.

CONELHEIRO, L. T. P., & LUCIANO, A. (2012). Desenvolvimento de um Sistema Gerador de Hidrogênio Gasoso para Utilização como Combustível Alternativo em Veículos Automotores. **Anais Da 6th Mostra Interna de Trabalhos de Iniciação Científica**. Disponível em: http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/mostras/vi_mostra/luis_thiago_panage_conelheiro.pdf Acesso em: 5 outubro 2019.

CRABTREE, G. W., & DRESSELHAUS, M. S. (2008). The hydrogen fuel alternative. **MRS Bulletin**. Disponível em: <https://doi.org/10.1557/mrs2008.84> Acesso em: 20 março 2019.

CYR, M., MIRAGILA, V., NOCERA, T., & ROGERS, C. (1997). Low-cost, innovative methodology for teaching engineering through experimentation. **Journal of Engineering Education**. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.1997.tb00280.x> Acesso em: 8 abril 2021.

DANTAS, S. G., & POMPERMAYER, F. M. (2018). Viabilidade Econômica De Sistemas Fotovoltaicos No Brasil E Possíveis Efeitos No Setor Elétrico. **IPEA**. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br> Acesso em: 17 maio 2020.

DESHPANDE, A. M., SIDDHALINGESHWAR, I. G., & EKABOTE, N. (2016). Implementation of Advanced Product Quality Planning in Engineering Project. **Journal of Engineering Education Transformations**. Disponível em: <https://doi.org/10.16920/jeeet/2016/v0i0/85705> Acesso em: 13 março 2021.

DOS SANTOS, K. G., ECKERT, C. T., DE ROSSI, E., BARICCATTI, R. A., FRIGO, E. P., LINDINO, C. A., & ALVES, H. J. (2017). Hydrogen production in the electrolysis of water in Brazil, a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.128> Acesso em: 18 setembro 2020.

Energética, E. de P. (2017). *Balanco Energético Nacional - Empresa de Pesquisa Energética EPE. Ano Base 2017* Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>. Acesso em: 20 setembro 2019.

ENSHASY, H., ABU AL-HAIJA, Q., AL-AMRI, H., AL-NASHRI, M., & AL-MUHAISEN, S. (2019). aSchematic Design of Hho Cell As Green Energy Storage. **Acta Electronica Malaysia**. Disponível em <https://doi.org/10.26480/aem.02.2019.09.15> Acesso em: 9 janeiro 2021.

ESTEVIÃO, T. E. R. (2008). **O Hidrogénio como combustível**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf> Acesso em: 20 janeiro 2020.

GENTIL, V. (1996). **Corrosão** (3rd ed.). LTC Editora S.A. Disponível em:http://bibcentral.ufpa.br/arquivos/120000/120000/19_120035.htm. Acesso em: 15 junho 2019.

GÖLLEI, A. (2014). Measuring and optimization of HHO dry cell for energy efficiency. **ACT TEHNIC ACORVINIENSIS-Bulletin of Engineering**. Disponível em:<http://acta.fih.upt.ro/pdf/2014-4/ACTA-2014-4-01.pdf> Acesso em: 14 maio 2020.

GÖLLEI, A., GÖRBE, P., MAGYAR, A., & NEUKIRCHNER, L. (2014). Measurement-Based Modelling and Simulation of a Hydrogen-Generating Dry Cell for Complex Domestic Renewable Energy Systems. **Hungarian Journal of Industry and Chemistry**, Disponível em: <https://doi.org/10.1515/490>. Acesso em: 11 setembro 2019.

GOMES, L. Q. (2013). **Caracterização De Uma Monocélula Combustível Do Tipo Pemfc**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Viçosa, 2013. Disponível em: <https://docplayer.com.br/17989925Caracterizacao-de-umamonocelula-combustivel-do-tipo-pemfc.html> Acesso em: 7 agosto 2020.

HOTZA, D., & DINIZ DA COSTA, J. C. (2008). Fuel cells development and hydrogen production from renewable resources in Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.06.028> Acesso em: 28 setembro 2020.

ISSUES, E. (2017). **Sustainable Hydrogen Production Processes**. Energy, Editora Springer Disponível em:<https://doi.org/10.1007/9783319-41616-8> Acesso em: 15 outubro 2019.

JARA, C. A., CANDELAS, F. A., PUENTE, S. T., & TORRES, F. (2011). Hands-on experiences of undergraduate students in Automatics and Robotics using a virtual and remote laboratory. **Computers and Education**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.07.003> Acesso em: 20 março 2019.

JI, C., YU, M., WANG, S., ZHANG, B., CONG, X., FENG, Y., & LIN, S. (2016). The optimization of on-board H₂ generator control strategy and fuel consumption of an engine under the NEDC condition with start-stop system and H₂ start. **International Journal of Hydrogen Energy**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.08.127> Acesso em: 6 março 2020.

KINOSHITA, H., TAKAHASHI, R., MURATA, T., TAMURA, J., SUGIMASA, M., KOMURA, A., FUTAMI, M., ICHINOSE, M., & IDE, K. (2011). A Study of Hydrogen Generation with Doubly-Fed Adjustable Speed Wind Generator. **Electrical Engineering in Japan**. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/ej.21003> Acesso em: 16 novembro 2020.

KNOB, D. (2013). **Geração de hidrogênio por eletrólise de água utilizando energia solar fotovoltaica**. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Nuclear). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2013. Disponível em: [10.1160/D.85.2014.tde-11062014-143621](https://doi.org/10.1160/D.85.2014.tde-11062014-143621). Acesso em: 13 abril 2020.

KOVAČ, A., MARCIUŠ, D., & BUDIN, L. (2018). Solar hydrogen production via alkaline water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.11.007> Acesso em: 11 abril 2019.

KWON, S., KOON LEE, K., & PARK, Y. H. (2007). A Study on a Methodology of Integrating Lean DFSS and Advanced Product Quality Planning (APQP) in ISO/TS16949. **Asian Journal on Quality**. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/1598268820070003>. Acesso em: 2 outubro 2019.

MAGIN, D., & KANAPATHIPILLAI, S. (2000). Engineering students' understanding of the role of experimentation. **International Journal of Phytoremediation**. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/03043790050200395>. Acesso em: 15 fevereiro 2020.

MELO, L. C. P. DE. (2010). **Hidrogênio energético no Brasil**. *Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2010–2025. E-book* Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/Hidrogenio_energetico_completo_22102010_9561.pdf/367532ec-43ca4b4f8162acf8e5ad25dc?version=1.5 Acesso em: 23 março 2021.

MICENA, R. P., LLERENA-PIZARRO, O. R., DE SOUZA, T. M., & SILVEIRA, J. L. (2019). Solar-powered Hydrogen Refueling Stations: A techno-economic analysis. **International Journal of Hydrogen Energy**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.11.092> Acesso em: 2 março 2020.

MIGUEL, F., MAMEDE, S., SANTOS, D. O. S., ANTÓNIO, F., MAMEDE, C., & SANTOS, D.O.S.(2016). **Combustível“hidrogênio.”**Dissertação(Mestradoem EngenhariaElectrotécnica) Instituto Superior Politécnico de Viseu. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/277188080_Combustivel_hidrogenio . Acesso em: 25março 2019.

MILLET, P., MBEMBA, N., GRIGORIEV, S. A., FATEEV, V. N., AUKAULOO, A., & ETIÉVANT, C. (2011). Electrochemical performances of PEM water electrolysis cells and perspectives. **International Journal of Hydrogen Energy**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.06.105> Acesso em: 21 fevereiro 2020.

MITTAL, K., KAUSHIK, P., & KHANDUJA, D. (2012). Evidence of apqp in quality improvement: Sme case study. **International Journal of Management Science and Engineering Management**. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17509653.2012.10671203> Acesso em: 22 março 2020.

MOURA, C. H. S., SILVEIRA, J. L., & LAMAS, W. DE Q. (2020). Dynamic production, storage, and use of renewable hydrogen: A technical-economic-environmental analysis in the public transport system in São Paulo state, Brazil. **International Journal of Hydrogen Energy**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.08.198> Acesso em: 1 janeiro 2021.

MUYEEN, S. M., TAMURA, J., & MURATA, T. (2009). **Wind Farm Operating Strategy with an Energy Capacitor System and a Hydrogen Generator**. *Stability Augmentation of a Grid connected Wind Farm*. Springer London. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-1-84800-3163_7 Acesso em: 23 outubro 2019.

NEWSOM, G. (2019). **California Energy Commission - Report on Assembly Bill 8:2019 Annual Assessment of Time and Cost Needed to Attain 100 Hydrogen Refueling Stations in California, 2019 E-book** Disponível em: <https://www.energy.ca.gov/sites/default/files/202104/CEC-600-2015-016.pdf> Acesso em: 13 agosto 2020.

NI, M., LEUNG, M. K. H., & LEUNG, D. Y. C. (2008). Energy and exergy analysis of hydrogen production by a proton exchange membrane (PEM) electrolyzer plant. **Energy Conversion and Management**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.03.018> Acesso em: 9 março 2020.

OLIVARES, I., MORANCHEL, F., & ZAPATA, L. (2013). Design of alkaline electrolyser for integration in diesel engines to reduce pollutants emission.pdf. **Chemistry Asian Journal** Disponível em: [10.1016/j.ijhydene.2019.07.256](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.256). Acesso em: 17 dezembro 2019

PAULINO, R. F. S. (2017). **Uso Do Biogás Para Produção De Biohidrogênio Eletrólise Versus Reforma a Vapor**. 111. Dissertação (Mestrado em Transmissão e Conversão de energia) Faculdade de Engenharia Do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Guaratinguetá, São Paulo, 2017. Disponível em <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/150655> Acesso em: 20 dezembro 2019.

RAMENSKIY, A. Y., GRIGORIEV, S. A., RAMENSKAYA, E. A., & GRIGORIEV, A. S. (2017). Technical regulation issues concerning fuel cell technologies in the Russian Federation, countries of the Eurasian Economic Union and CIS countries. **International Journal of Hydrogen Energy**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.04.301> Acesso em: 18 maio 2019.

RAY, S., & DAS, P. (2009). Improving efficiency and effectiveness of APQP process by using DFSS tools. **International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage**. Disponível em: <https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2009.028094> Acesso em: 20 fevereiro 2019.

REZENDE, L. A., DE CAMPOS, V. A. F., SILVEIRA, J. L., & TUNA, C. E. (2021). Educational electrolyzer prototype: Improving engineering students' knowledge in renewable energies. **International Journal of Hydrogen Energy**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.02.013> Acesso em: 2 maio 2021.

ROCHA, J. R. P. (2009). **A Gestão Do Desenvolvimento De Produto Via APQP na Indústria Automobilística**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Universidade de São Paulo, 2009. Disponível em: [Acesso em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3136/td-e-20082010152136/publico/Dissertacao_Juliana_Rossi_Pereira_Rocha.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3136/td-e-20082010152136/publico/Dissertacao_Juliana_Rossi_Pereira_Rocha.pdf) 12 julho 2019.

RUSSEL, J. B. (1994a). **Química Geral** (2nd ed., Vol. 1). Pearson Makron Books. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004> Acesso em: 20 janeiro 2020.

RUSSEL, J. B. (1994B). **Química Geral** (2nd ed., Vol. 2). Pearson Makron Books. Disponível em: <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004> Acesso em: 7 março 2020.

SENRA, F. O., LIMA, K. A. M. DE, & ABREU, R. A. DE. (2014). SENRA, F. O.; LIMA, K. A.M.; ABREU,R. A.**Estudo da aplicação de hidrogênio e gasolina em motor ciclo Ott.** 2014. 41 f. Monografia(Curso de Engenharia Mecânica – Automação e Sistemas) – Universidade São Francisco, Itatiba, 2014. Disponível em:<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/13710/1/BDSG23112018.pdf> Acessoem: 23 abril 2019.

SHAH, S. A. Q., ALI, Z., LARIK, J., & KAIMKHANI, A. A. (2018). **Comparative study of dry cell and wet cell for the HHO gas generation as a supplement fuel for I.C. engine.** *ICOMET 2018 - Proceedings - 2018 International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies: Invent, Innovate and Integrate for Socioeconomic Development.* Disponível em: <https://doi.org/10.1109/ICOMET.2018.8346422> Acesso em: 20 março 2019.

SILVA, T. S. DE, SENEVIRATHNE, L., WARNASOORIYA, T. D., & SILVA, D. (2015). HHO Generator – An Approach to Increase Fuel Efficiency in Spark Ignition Engines TS. **European Journal of Advances in Engineering and Technology.** Disponível em:www.ejaet.com/PDF/2-4/EJAET-2-4-17.pdf Acesso em: 15 dezembro 2020.

SILVEIRA, J. L.(1998).**Uma contribuição para a Modelagem termoeconômica: Otimização da Operação e do projeto de sistemas energéticos.** *Trabalho (Livre Docência). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 1998.* Disponível em: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4778.8409> Acesso em:13 maio 2019.

SPIEGEL, C. (2008). **PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab.** *E-book* Academic Press.Acesso em: 20 junho 2019.

SUBRAMANIAN, B., & ISMAIL, S. (2018). Production and use of HHO gas in IC engines. **International Journal of Hydrogen Energy**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.02.120> Acesso em: 23 março 2019.

SUDARMANTA, B., DARSOPUSPITO, S., & SUNGKONO, D. (2016). Application of dry cell HHO gas generator with pulse width modulation on Sinjai spark ignition engine performance. **International Journal of Research in Engineering and Technology**. Disponível em: <http://esatjournals.net/ijret/2016v05/i02/IJRET20160502019.pdf> Acesso em: 9 março 2019.

SZWARCFITER, C., & DALCOL, P. R. T. (2011). Economias de escala e de escopo: desmistificando alguns aspectos da transição. **Production**. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/s010365131997000200001> Acesso em: 20 outubro 2020.

THISSE, L. C. (1998). **Advanced quality planning: A guide for any organization. E-book**. Disponível em: <https://qualitytexas.org/wpcontent/uploads/2014/11/QualityPlanning.pdf>. Acesso em: 17 junho 2019.

TITU, M. A. (2019). **Review of Advanced Product Quality Planning (Apqp) in the Aerospace Industry. E-book**. Disponível em: <http://quality.unze.ba/zbornici/QUALITY%202019/013-Q19011.pdf>. Acesso em: 3 março 2021.

ULLEBERG, Ø. (2003). Modeling of advanced alkaline electrolyzers: a system simulation approach. **International Journal of Hydrogen Energy**. Disponível em: [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(02\)00033-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0360-3199(02)00033-2) Acesso em: 22 setembro 2019

YU, F. T. S., & MUELLER, H. M. (1985). A Low-Cost White-Light Optical Processor for the Undergraduate Optics Laboratory. **IEEE Transactions on Education**. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TE.1985.4321760> Acesso em: 8 outubro 2019

ZENG, K., & ZHANG, D. (2010). Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002> Acesso em: 20 março 2019

ZHAO, G., & PEDERSEN, A. S. (2018). Life Cycle Assessment of Hydrogen Production and Consumption in an Isolated Territory. **Procedia CIRP**, Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.100> Acesso em: 22 abril 2021

ANEXO A – CUSTO DE PRODUÇÃO DO PROTÓTIPO

Tabela 4- Custo total da pesquisa

Itens	Unidades	Valor Total
Placas de Acrílico	1	R\$ 607,00
Chapa de Aço Inox 316L 1 mm	2	R\$ 132,00
Cola Para Acrílico	1	R\$ 102,00
Borracha de Vedação	1	R\$ 33,00
Arruelas de Aço Inox 304	2	R\$ 4,00
Porcas de Aço Inox 304	4	R\$ 6,50
Parafusos de Aço Inox 304	4	R\$ 12,35
Arruelas e Porcas em Aço	12	R\$ 1,50
Parafusos de Aço	6	R\$ 2,00
Joelho de Conexão Instantânea	3	
Conexão Metálica	3	
Mangueira Diâmetro (0,8 m)	2	R\$ 68,00
Mangueira Diâmetro (0,6 m)	0,15	
<i>O'ring</i>	3	
Carbonato de Potássio (g)	500	R\$ 54,67
Água Desmineralizada (L)	10	R\$ 40,00
Custo Total do Projeto		R\$ 1.062,35
Custo Total da Pesquisa em Dólar		US\$ 205,00

Fonte: Do autor

Cotação do dólar: R\$ 5,18 data 29/05/2021

ANEXO B - PLANEJAMENTO DO PRODUTO

De acordo com Carbone (2005), a necessidade de desenvolver novos produtos e com uma complexidade cada vez maior em sua fabricação nas indústrias, é necessário utilizar ferramentas no processo de construção de um protótipo que diminua o custo de produto e tempo de fabricação. A integração e a colaboração entre grupos de desenvolvimento são sugeridas como um fator que melhora o sucesso de novos produtos.

Segundo Carbone (2005), foi observado um padrão de cooperação necessário entre diferentes setores e uma mesma empresa como os grupos funcionais de P&D, marketing e operações, durante as várias fases do projeto. Foi constatado que um alto nível de cooperação entre os grupos funcionais era um fator crítico que estava relacionado ao sucesso do projeto para altos níveis de inovação.

De acordo com Bobrek & Sokovic, (2005) e Kwon et al., (2007) durante a construção de um produto diversos setores enfrentam problemas diferentes, mas que interferem diretamente no tempo de produção do protótipo. Muitas das vezes o produto não é feito por apenas um indivíduo, portanto é necessário a conscientização de cada membro do projeto para que uma área não afete a outra. Essa conscientização requer a compreensão de cada etapa do produto, se não for respeitada, o projeto tende a passar por transformações repentinas que aumentam o custo de produção e tempo de fabricação.

Conforme é explicado por Carbone, (2005) a preocupação com a melhoria na fabricação de um produto não é recente. Há décadas o setor industrial investe em técnicas de qualidade como o método *Plan, Do, Check, Act* (PDCA); Gestão da Qualidade Total (TQM); Planejamento Avançado de Qualidade do Produto (APQP) entre outros. A metodologia APQP é uma das mais importantes técnicas para construção de um novo produto e trabalho em equipe. Portanto esses são alguns dos métodos mais usados durante o processo colaborativo de construção de um produto.

PLANEJAMENTO AVANÇADO DE QUALIDADE DO PRODUTO (APQP)

De acordo com Thisse, (1998), esta metodologia foi lançada pela Chrysler, Ford e General Motors em julho de 1994, porém não recebeu tanta atenção dos fornecedores se comparado com outras metodologias na época. Entretanto após o lançamento de um manual com alguns requisitos sobre sistemas de qualidade esta metodologia ganhou mais atenção.

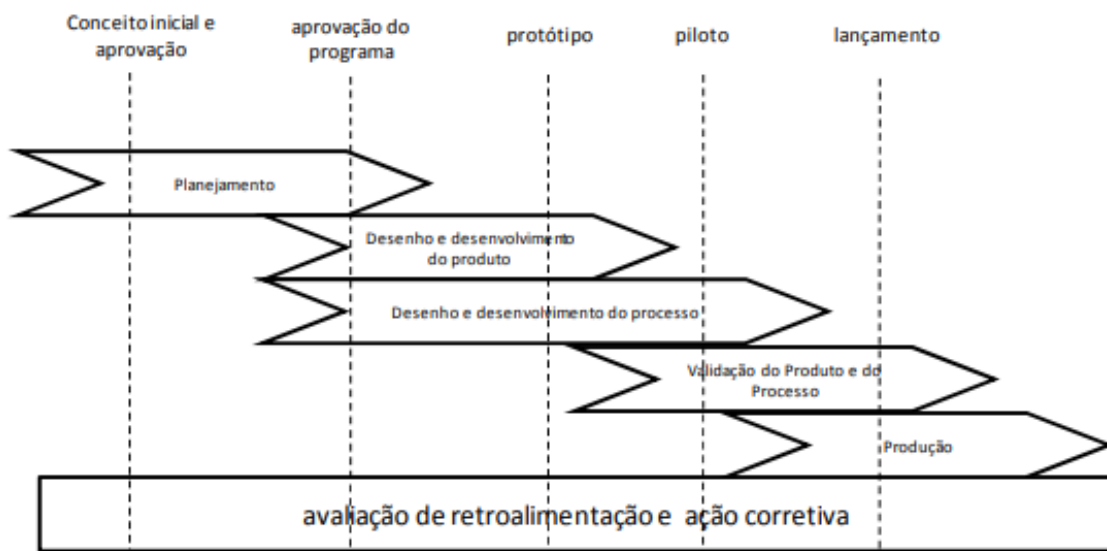
Ainda de acordo com Thisse, (1998), o manual fornece orientações destinadas a produzir um plano de qualidade que irá apoiar o desenvolvimento de um produto ou serviço que irá satisfazer o cliente. O manual usa uma abordagem de equipe multifuncional para gerenciar todas as facetas do processo de qualidade e planejamento, definindo uma estrutura de método e estabelecendo as etapas necessárias para garantir que um produto satisfaça o cliente.

Segundo Olivares et al., (2013), o objetivo do planejamento de qualidade é facilitar a comunicação com todas as áreas envolvidos no projeto para garantir que todas as etapas necessárias sejam concluídas corretamente e na hora certa. O manual também ressalta que o planejamento eficaz da qualidade do produto depende da alta administração de uma empresa individual compromisso com o esforço necessário para alcançar satisfação do cliente.

De acordo com Titu (2019), a metodologia APQP concentra o foco no aspecto de planejamento de qualquer projeto, a fim de identificar, da forma mais robusta possível, os requisitos do cliente. Assim que os requisitos do cliente são identificados e compreendidos, o APQP se concentra em planejar e desenvolver com eficiência um produto no menor tempo possível e com o menor custo possível.

Conforme é descrito por Mittal *et al.*, (2012) a metodologia APQP possui cinco fases do planejamento da qualidade como demonstra a Figura 30.

Figura 30: Estágios da APQP



Fonte: Rocha (2009)

- **Fase 1: Planejamento e necessidade do cliente**

Esta fase descreve que a voz do cliente vem em primeiro lugar, determinando as necessidades e expectativas do cliente para planejar e definir um programa de qualidade. A ideia é determinar quais necessidades e expectativas do cliente são totalmente compreendidas antes de prosseguir com o design e desenvolvimento do produto ou serviço, ou o processo de fabricação associado ao produto.

- **Fase 2: Design e desenvolvimento inicial do produto**

No nesta fase do processo de planejamento, o design do protótipo é desenvolvido quase no formato final. Esta fase se concentra no desenvolvimento do design do produto ou serviço, e em garantir que seja viável e atenderá às expectativas do cliente.

- **Fase 3: Design e desenvolvimento do processo de construção**

Esta fase do processo de planejamento se concentra em desenvolver um sistema de manufatura e planos de controle para alcançar um produto de qualidade. O foco é criar um processo que irá produzir o design que foi desenvolvido na fase anterior em nível de qualidade, quantidade e custo cotados, enquanto em ao mesmo tempo, garantindo que qualquer outro requisito do cliente e expectativas serão atendidos. Isto é onde o fornecedor deve ter certeza de que o produto ou serviço representa um valor para o cliente.

- **Fase 4: Validação do Produto e produção**

Esta fase concentra-se na validação do processo de fabricação por meio de um teste de produção e todas as atividades relacionadas a ele. O foco é em métodos e técnicas para determinar que o processo de produção de longo prazo é capaz de atender a todos os requisitos que foram pesquisados e documentado através das fases anteriores. Outras preocupações ou requisitos podem ser descoberto durante esta fase, e deve ser abordada antes do início da produção do produto de longo prazo.

- **Fase 5: Feedback, avaliação e ação corretiva.**

Neste ponto, é avaliado o processo como um todo a afim de minimizar qualquer problema que interfira na construção do produto. Esta também é a hora de avaliar a eficácia do próprio esforço de planejamento da qualidade.

APLICAÇÕES DA (APQP)

De acordo com Mittal et al., (2012), foi feita uma tentativa de implantar o APQP para melhoria da qualidade em uma pequena indústria de fabricação de suportes de montagem de motores para o setor automotivo. Os resultados do estudo mostraram amplamente que o APQP é uma estratégia versátil para alcançar a melhoria da produtividade e tem muito potencial como estratégia de melhoria da qualidade junto com a sua utilização na área de desenvolvimento de produtos. Após um estudo de Repetibilidade e reprodutibilidade, descobriu-se que a rejeição não era devido a um fator humano ou de instrumentação.

Ainda de acordo com Mittal et al., (2012), durante as fases da APQP muitas modificações / mudanças foram sugeridas, como a redução do tempo de substituição da ferramenta de 140 horas para 96 horas e o projeto de um acessório para segurar o suporte de montagem do motor durante a usinagem. As ferramentas e metodologia APQP evoluíram para abranger vários domínios associados ao desenvolvimento de produtos e melhoria de processos. A evolução do APQP é paralela à evolução dos métodos de qualidade. Ele fornece um sistema abrangente e flexível para maximizar o sucesso dos negócios e foi considerado uma abordagem revolucionária à melhoria do produto e do processo.

Segundo Rocha (2009), foram realizados estudos de casos na indústria automotiva com objetivo de identificar condições em que a metodologia APQP contribuiu para a gestão de processo de desenvolvimento do produto. Foi observado que o fornecedor, ao trabalhar em conjunto com o cliente, possui informações cruciais que possibilitam cumprir prazos e administrar possíveis atrasos, antecipando possíveis formalizações da montadora.

Ainda de acordo com Rocha (2009), a metodologia APQP funciona com uma dinâmica diferente da proposta originalmente. Hoje, ele pode ser utilizado como um instrumento que auxilia a orientação de prazos e alinhamento entre montadora e fornecedor e, algumas vezes, até mesmo como um instrumento de defesa para problemas futuros do projeto.

De acordo com Deshpande et al. (2016), foi implementada a metodologia APQP em um projeto de graduação de um veículo solar elétrico para um campeonato de carros elétricos organizado anualmente pela *Imperial Society of Innovative Engineers*. A competição é dividida em duas fases, uma rodada virtual e uma rodada dinâmica. Na rodada virtual, os alunos apresentaram o projeto completo do veículo. Após serem qualificados, o veículo foi fabricado

para competir na rodada dinâmica em nível nacional contra times de estudantes de outras instituições educacionais.

Ainda de acordo com Deshpande et al. (2016), a implementação do APQP, a equipe de alunos teve uma ideia clara das tarefas que precisavam ser concluídas dentro do prazo estabelecido nas respectivas fases de desenvolvimento do projeto do carro elétrico. O trabalho em grupo ajudou os alunos absorverem a transformação da ideia para em veículo solar real.