



**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
Autarquia Municipal de Regime Especial  
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76  
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP  
CNPJ 45.176.153/0001-22

**Departamento de Engenharia Elétrica**  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br

**Guilherme Barbieri da Cunha**  
**Jesus Daniel de Oliveira**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DE ENERGIA:  
ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO PARA O PROCESSO DE ELETRÓLISE**

Taubaté - SP  
2020

**Guilherme Barbieri da Cunha  
Jesus Daniel de Oliveira**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DE ENERGIA:  
ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO PARA O PROCESSO DE ELETRÓLISE**

Trabalho de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Taubaté, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Es. Rubens Castilho Junior  
Co orientador: Prof. Me. Carlos Henrique Silva  
Moura

Taubaté  
2020

## FICHA CATALOGRÁFICA

A confecção da ficha catalográfica é realizada exclusivamente pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação e deve ser inserida no lugar desta folha.



**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**  
Autarquia Municipal de Regime Especial  
pelo Dec. Fed. nº 78.924/76  
Recredenciada Reconhecida pelo CEE/SP  
CNPJ 45.176.153/0001-22


Departamento de Engenharia Elétrica  
Rua Daniel Danelli s/nº Jardim Morumbi  
Taubaté-Sp. 12060-440  
Tel.: (12) 3625-4190  
e-mail: eng.eletrica@unitau.br


**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO NA GERAÇÃO DE ENERGIA:  
ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO PARA O PROCESSO DE ELETRÓLISE**


**GUILHERME BARBIERI DA CUNHA  
JESUS DANIEL DE OLIVEIRA**

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE  
DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE “GRADUADO EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA”

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Es. Rubens Castilho Junior  
Orientador / UNITAU-DEE

  
Prof. Me. Seide da Cunha Filho  
UNITAU-DEE

  
Prof. Me. Leonardo do Nascimento Lopes  
UNITAU-DEE

Dezembro de 2020

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradecemos as nossas famílias, em especial aos nossos pais, que sempre se nos incentivaram e ajudaram durante toda nossa graduação.

Agradecemos nosso orientador, *Prof. Rubens Castilho Junior* que nos deu total suporte e colaboração durante a elaboração deste trabalho.

Agradecemos nosso coorientador, *Prof. Me. Carlos Henrique Silva Moura* que nos apresentou o tema e dedicou várias horas nos auxiliando, sem sua orientação e apoio, o estudo aqui presente não existiria.

Agradecemos aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica pelo empenho e dedicação em compartilhar seus conhecimentos ao longo dos cinco anos em que realizávamos nossa graduação.

Por fim, agradecemos a todos que de alguma maneira, direta ou indiretamente, participaram da realização desse projeto.

Cunha, G. B.; Oliveira, J. D. **Estudo da utilização de hidrogênio na geração de energia: análise de um protótipo para o processo de eletrólise**. 2020. 39 f. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica e Eletrônica – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2020.

## **RESUMO**

Neste trabalho aborda-se os principais aspectos do hidrogênio como vetor de energia, visando um desenvolvimento sustentável, discutindo suas características e benefícios devido ao elemento ser uma fonte de energia extremamente limpa. Ressaltam-se os processos para obtenção do elemento, enfatizando o processo de eletrólise, levando em consideração suas principais vantagens e desvantagens. A eletrólise é um processo simples e não poluente, mas que ainda não é o mais empregado devido aos elevados custos da eletricidade utilizada no processo, todavia, também dá-se ênfase no estudo de um protótipo a ser utilizado para realização da eletrólise. Tem-se como objetivo ressaltar a importância que o hidrogênio terá nos próximos anos, em um contexto no qual a sociedade busca uma maior eficiência energética ao mesmo tempo que se preocupa com a sustentabilidade.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrogênio. Eletrólise. Geração de Energia.

Cunha, G. B.; Oliveira, J. D. **Analysis of hydrogen as a power generator source: study of prototype device for electrolysis.** 2020. 39 p. Graduate Work in Electrical and Electronics Engineering – Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica, Universidade Taubaté, Taubaté, 2020.

### **ABSTRACT**

This work addresses the main aspects of using hydrogen as an energy vector, aiming its potential to achieve a sustainable development, discussing its characteristics and benefits as it's regarded as one of the most clean energy sources available today. It's emphasized the stages of production, specifically the electrolysis process and its perks and disadvantages. The electrolysis phenomenon is a simple process and highly non-pollutant but rarely used due to the high values of electrical power needed, although it's also emphasized a prototype to minimize the power consumption of the process. The objective of this work is to point out the importance of hydrogen as energy vector and possibly fuel in the years to come as a result of society's need of a clean and efficient power generation grid.

**KEYWORDS:** Hydrogen. Electrolysis. Power Generation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação de um átomo de hidrogênio .....	12
Figura 2 - Esquema dos processos de produção e utilização do hidrogênio .....	15
Figura 3 - Gerador de hidrogênio por eletrólise .....	17
Figura 4 - Esquema da célula a combustível .....	19
Figura 5 - Toyota Mirai em um posto de hidrogênio .....	22
Figura 6 - Vista do primeiro ônibus híbrido de célula a combustível brasileiro .....	22
Figura 7 - (a) Circuito base de uma fonte chaveada; (b) Circuito equivalente com chave; (c) Tensão de saída.....	26
Figura 8 - (a) Conversor Buck; Circuito equivalente com o bloco de chaveamento fechado; (c) Circuito equivalente com o bloco de chaveamento fechado.....	27
Figura 9 - (a) Tensão no indutor; (b) Corrente no indutor; (c) Tensão no capacitor.....	28
Figura 10 – Modelo do Conversor Buck de Retificação Síncrona.....	29
Figura 11 - Gerador de PWM através do CI-555 .....	31
Figura 12 - Diagrama esquemático completo do circuito Buck síncrono .....	32
Figura 13 - Design das trilhas do circuito Buck síncrono .....	33
Figura 14 - Trilhas do circuito protótipo montado .....	33
Figura 15 - Componentes do circuito protótipo montado.....	34
Figura 16 – Análise do sinal PWM gerado pelo CI-555 .....	35



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnica
CBMESP	Corpo de Bombeiros da Polícia Militar de São Paulo
CETESB	Agência Paulista de Proteção Ambiental
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
COPPE	Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
DC	Direct Current
EMTU	Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos São Paulo
FAPERJ	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
IPHE	Parceria Internacional para Economia do Hidrogênio
LC	Indutor-Capacitor
MOSFET	Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NR	Normas Regulamentadoras
PCI	Poder Calorífico Inferior
PCS	Poder Calorífico Superior
PNUD	Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento
PWM	Pulse Width Modulation
SP	São Paulo
UFRJ	Universidade Feral do Rio de Janeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_e$	Área máxima do núcleo de ferrite	$[m^2]$
$B_{max}$	Campo magnético máximo	[T]
$C$	Capacitância	[F]
$D$	Duty Cycle	[%]
$\Delta$	Diâmetro do condutor	[mm]
$\Delta I_L$	Corrente média no indutor	[A]
$\Delta V_{cmax}$	Taxa de ripple do capacitor	[V]
$E$	Equivalente grama	[g]
$f$	Frequência	[Hz]
$I$	Corrente elétrica	[A]
$I_L$	Corrente elétrica no indutor	[A]
$I_{Lrms}$	Corrente RMS do indutor	[A]
$I_o$	Corrente elétrica na saída	[A]
$I_{pico}$	Corrente elétrica de pico	[A]
$K$	Constante de proporcionalidade	[-]
$L$	Indutância	[H]
$M$	Massa	[g]
$N$	Número de espiras	[-]
$\eta_{elet}$	Eficiência do eletrolisador	[%]
$Q_m$	Vazão mássica de $H_2$	[g/s]
$r_C$	Resistência série do capacitor	$[\Omega]$
$T$	Tempo	[s]
$t_{off}$	Tempo desligado	[s]
$t_{on}$	Tempo ligado	[s]
$V$	Tensão em volts	[V]
$V_o$	Tensão de saída	[V]
$V_i$	Tensão de entrada	[V]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>10</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>12</b>
2.1 O HIDROGÊNIO .....	12
2.1.1 ASPECTOS GERAIS .....	12
2.1.2 QUÍMICA DO HIDROGÊNIO.....	13
2.1.2.1 POTENCIAL ENERGÉTICO .....	13
2.1.3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO .....	14
2.1.3.1 ELETRÓLISE.....	16
2.2 CELULA A COMBUSTÍVEL.....	18
2.2.1 FUNCIONAMENTO DA CELULA A COMBUSTÍVEL.....	18
2.3 ARMAZENAMENTO .....	19
2.4 NORMAS.....	20
2.5 ECONOMIA BASEADA NO HIDROGÊNIO.....	21
2.5.1 VEÍCULOS MOVIDOS A HIDROGÊNIO.....	21
2.5.2 GERAÇÃO DE ENERGIA ESTACIONÁRIA .....	23
2.5.3 EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS.....	23
2.5.4 APLICAÇÃO ESPACIAL .....	23
<b>3.0 METODOLOGIA APLICADA.....</b>	<b>24</b>
3.1 CONVERSORES DC/DC .....	25
3.1.1 BASE DE UMA FONTE CHAVEADA .....	26
3.1.2 CONVERSOR STEP-DOWN OU BUCK.....	27
3.1.3 CONVERSOR BUCK DE RETIFICAÇÃO SÍNCRONA .....	28
<b>4.0 ELABORAÇÃO DO PROTÓTIPO.....</b>	<b>29</b>
<b>5.0 RESULTADOS.....</b>	<b>35</b>
<b>6.0 CONCLUSÃO.....</b>	<b>36</b>
6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....	36
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>37</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Desde o começo do século XX o uso da energia elétrica se tornou muito difundido. Garantir seu suprimento de forma sustentável é de suma importância. Nos dias de hoje, a matriz energética mundial ainda é liderada pelo uso de combustíveis fósseis, como por exemplo, o petróleo, seus derivados e o carvão. É preocupante a dependência desses recursos devido, principalmente, a emissão de gases poluentes na atmosfera e o potencial esgotamento dessas fontes, o que traz além da preocupação dos prejuízos que podem ser causados ao meio ambiente, a necessidade de se achar, o quanto antes, fontes alternativas que sejam limpas, renováveis, seguras e viáveis economicamente para a obtenção de energia (COSTA et al., 2014; SENRA; LIMA; ABREU, 2014).

Atualmente, a geração de eletricidade em alta escala, utiliza combustão do petróleo, por meio de geradores usualmente encontrados no mercado. Entretanto, pode-se observar um crescimento no número de pesquisas que relacionam o aumento da emissão de gases de efeito estufa, por exemplo, o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o metano (CH<sub>4</sub>), ao aumento da temperatura média anual da biosfera do nosso planeta, sendo esse fenômeno também conhecido como aquecimento global. Este fator, associado ao aumento do preço do petróleo e da demanda energética global, principalmente em países em desenvolvimento como a Índia, China e o Brasil, acaba incentivando a utilização de fontes de energia renováveis com o objetivo de se obter custos menores e diminuir a agressão ao meio ambiente (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010; SENRA; LIMA; ABREU, 2014).

Em particular no Brasil, o elevado potencial das fontes renováveis como a hídrica, solar e eólica evidencia a oportunidade de diminuir os impactos ambientais e gerar energia a um preço competitivo (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

Uma alternativa que surge para os problemas evidenciados são os estudos de células de combustível, nas quais a energia elétrica é gerada por meio de células eletroquímicas, através de uma conversão contínua da energia química do combustível e de um oxidante, o que vem apresentando resultados cada vez mais satisfatórios, mas que ainda acabam sendo inviáveis economicamente. As células a combustível têm baixas emissões de poluentes, ou até mesmo nulas, se comparada às tecnologias que utilizam combustíveis fósseis. Seus subprodutos, em geral, além da eletricidade, são vapor d'água e calor além de apresentarem uma eficiência maior na conversão da energia liberada na reação em trabalho (COSTA et al., 2014).

Existem vários elementos que são utilizados em células de combustível, mas o foco desse trabalho estará nas células de combustível a hidrogênio (H) pois nesse contexto, de busca por energias renováveis, o hidrogênio surge como uma alternativa muito válida dado que é o elemento mais abundante no universo e sua combustão direta produz uma quantidade significativa de energia e libera apenas água (H<sub>2</sub>O) (SENRA; LIMA; ABREU, 2014).

Por se tratar de uma opção que apresenta baixíssimos impactos ambientais, a aplicação das tecnologias relacionadas ao hidrogênio são consideradas por muitos especialistas como uma alternativa à utilização dos atuais combustíveis fósseis nos transportes. Entretanto, o hidrogênio não é encontrado na natureza na forma livre, sendo necessário produzi-lo por algum processo, uma vez que ele se encontra normalmente ligado a algum outro elemento ou composto químico (CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS, 2010).

A engenharia tem um papel fundamental na busca por novas técnicas e materiais que ajudem no desenvolvimento dessa tecnologia, diminuindo os custos de produção e incentivando a geração de energia elétrica em larga escala para atender indústrias, serviços e residências. Diversos governos investem em pesquisas para o avanço das células a hidrogênio, um exemplo disso foi a criação da Parceria Internacional para Economia do Hidrogênio (IPHE) – na sigla em inglês – da qual o Brasil é integrante. Embora o governo brasileiro apoie essa linha de pesquisa, os investimentos ainda são pequenos se comparados aos das outras nações interessadas. Entretanto, o planejamento nacional traça metas a curto, médio e longo prazo, para a ampliação e inovação desse setor, considerado por muitos a energia do futuro, eficiente e limpa (COSTA et al., 2014).

Uma das principais alternativas adotadas para o processo de produção de hidrogênio é através da eletrólise da água, sendo este o foco principal desse estudo. Além de ser um processo relativamente simples, não gerando nenhum resíduo que venha a ser prejudicial ao meio ambiente, a produção do hidrogênio torna-se uma técnica eficiente de transformação e armazenamento de energia limpa (SENRA; LIMA; ABREU, 2014).

Diante da necessidade de se buscar avanços no âmbito de geração e distribuição de energia, o que se tornou uma tendência mundial, e os estudos voltados para a melhora na produção de energia objetivando favorecer o desenvolvimento sustentável, este trabalho apresentará um estudo relacionado a energia do H<sub>2</sub>, os meios de obter o hidrogênio, sua utilização e por fim a análise de um circuito protótipo para realização do processo de eletrólise.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo agregar os conhecimentos necessários para o entendimento do leitor sobre o tema abordado.

A revisão bibliográfica abrange o elemento hidrogênio, célula a combustível de hidrogênio e os meios para obtenção do elemento com foco no processo de eletrólise.

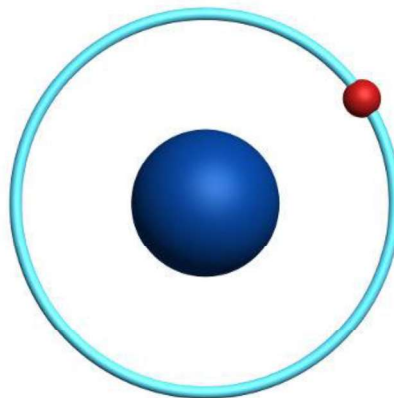
### 2.1 O HIDROGÊNIO

#### 2.1.1 ASPECTOS GERAIS

Descoberto em 1766, por Henry Cavendish, através da decomposição da água, o átomo de hidrogênio, nome dado por Lavoisier, é o mais simples e mais abundante elemento do universo. É presente em milhões de substâncias, em cerca de 76% da massa do universo e 93% de suas moléculas, como a água e as proteínas nos seres vivos. Existe em grande quantidade nas estrelas no estado de plasma e, no planeta Terra, representa cerca de 70% da superfície terrestre (CONELHEIRO; LUCIANO, 2012; ESTÊVÃO, 2008).

O hidrogênio molecular ( $H_2$ ) existe naturalmente na forma de dois átomos de hidrogênio ligados pelo compartilhamento de elétrons, denominada ligação covalente. Cada átomo é composto por um próton e um elétron, conforme demonstrado na Figura 1, e, como o hidrogênio tem densidade de catorze vezes menor do que o ar, alguns cientistas acreditam que ele pode ser a fonte de todos os outros elementos, por processos de fusão nuclear (VARGAS et al., 2006).

Figura 1 - Representação de um átomo de hidrogênio



Fonte: Dias [s.d.]

O gás hidrogênio é definido como incolor, inodoro, insípido e muito mais leve que o ar, quando encontrado em seu estado natural e sob condições ambiente de temperatura e pressão (SENRA; LIMA; ABREU, 2014).

Apesar de ser o elemento mais abundante do universo, o hidrogênio é encontrado apenas na forma gasosa, porém, o mesmo pode ser armazenado em estado líquido, ocupando um volume cerca de 700 vezes menor do se estivesse em forma de gás, neste caso ele tem que estar, a pressão atmosférica, a uma temperatura de  $-253^{\circ}\text{C}$ , em sistemas de armazenamento conhecidos como sistemas criogênicos. Acima dessa temperatura, em estado gasoso, pode ser armazenado em cilindros de alta pressão (CONELHEIRO; LUCIANO, 2012; VARGAS et al., 2006).

### 2.1.2 QUÍMICA DO HIDROGÊNIO

É difícil decidir a posição do hidrogênio na tabela periódica, uma vez que não se encaixa em nenhum dos grupos. Seu símbolo químico é o H e o que o diferencia de qualquer outro elemento é ser composto por apenas um próton e um elétron, exemplificado na Figura 1. Normalmente é colocado no topo do grupo I, grupo de metais alcalinos, tendo em conta a sua natureza eletropositiva, outras vezes, o seu comportamento assemelha-se ao dos halogêneos, aceitando um segundo elétron para formar um íon mono negativo (ESTÊVÃO, 2008).

De uma forma geral, participa da composição de diversos tipos de substâncias orgânicas e inorgânicas. Quando não participa de substâncias químicas, ele é encontrado exclusivamente na forma molecular sendo dois átomos de hidrogênio ligados por uma ligação covalente simples, cuja fórmula é  $\text{H}_2$  (DIAS, [s.d.]).

#### 2.1.2.1 POTENCIAL ENERGÉTICO

O hidrogênio possui um enorme potencial energético, a quantidade de energia que o elemento possui por unidade de massa, poder calorífico inferior (PCI), é superior do que qualquer outro combustível conhecido, tendo valor igual a  $120,7\text{ MJ/kg}$ . Também é a maior quantidade de energia por unidade de peso, poder calorífico superior (PCS), tendo um valor de  $141,9\text{ MJ/kg}$ . O PCS representa o calor liberado pela combustão tendo toda a água resultante na fase líquida e o PCI representa o calor liberado pela combustão estando toda a água resultante no estado gasoso. Como na maioria das vezes utiliza-se o hidrogênio em estado gasoso, é considerado apenas o PCI para a realização de cálculos. A título de comparação, um quilograma (kg) de hidrogênio representa a mesma quantidade de energia do que  $2,8\text{ kg}$  de gasolina (ESTÊVÃO, 2008).

Um exemplo do potencial energético do hidrogênio é a energia do solar, pois é com a energia adquirida do hidrogênio que a nossa estrela aquece o planeta, favorecendo a vida na Terra (CONELHEIRO; LUCIANO, 2012; VARGAS et al., 2006).

Para programas espaciais o peso do combustível é crucial, desde a década passada que o hidrogênio é utilizado e alvo de pesquisas, isso se deve porque o H<sub>2</sub> apresenta a mais alta energia por unidade de peso entre os combustíveis, além disso, ele é o elemento mais leve por não ter os pesados átomos de carbono (C) (LELUDAK; HAUS, 2013).

A principal vantagem do hidrogênio é que as reações químicas necessárias para reconverte-lo em energia produzem somente água como produto final, não havendo emissão de gases poluentes ou gases do efeito estufa, sendo de grande importância para o desenvolvimento sustentável (LELUDAK; HAUS, 2013).

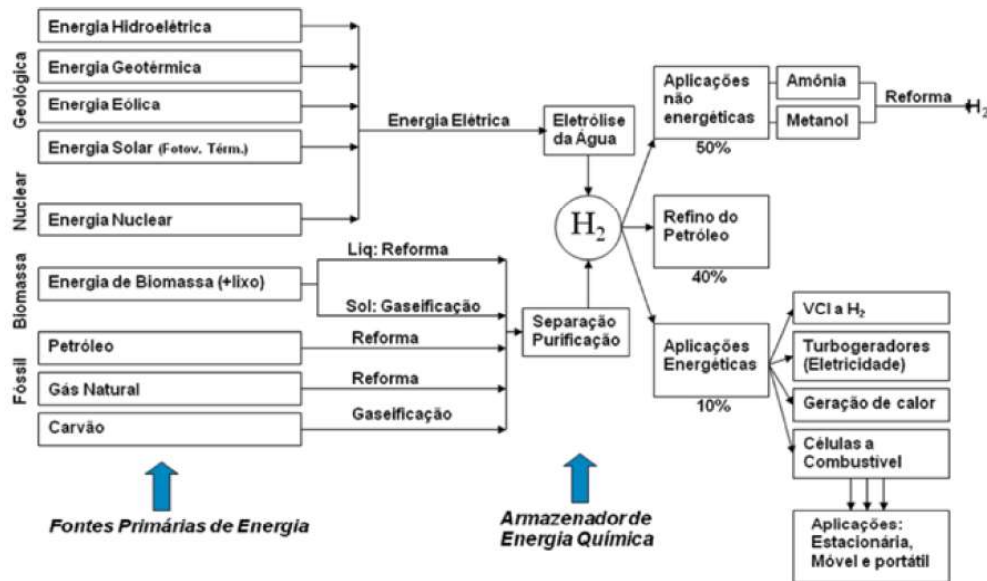
### 2.1.3 PROCESSOS DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio normalmente existe combinado a outros elementos como o oxigênio (O), formando a célula de água, o carbono, formando o cloro (Cl), e na maioria dos compostos orgânicos. Raramente o hidrogênio permanece sozinho como um único elemento, o que faz com que ele fique associado ao petróleo, carvão, metano, água, gás natural, proteínas, hidratos de carbono e também em todo tipo de vegetação (ESTÊVÃO, 2008; VARGAS et al., 2006).

Conforme comentado anteriormente, o hidrogênio tem propriedades que o fazem ser um combustível poderoso, mas pelo fato de não ser encontrado de forma prática e pronta para o uso traz a necessidade de separação dos átomos de hidrogênio dos restantes dos elementos. Cabe a nós analisar se a energia usada para separa-lo é compensatória para o que ele nos fornece. A Figura 2 exemplifica os processos de produção e utilização do hidrogênio (VARGAS et al., 2006).



Figura 2 - Esquema dos processos de produção e utilização do hidrogênio



Fonte: Linardi (2014)

Vargas et al. (2006) lista como as principais fontes de hidrogênio:

- Gás Natural;
- Etanol;
- Metanol;
- Água;
- Biomassa;
- Metano;
- Algas e Bactérias;
- Gasolina e Diesel.

O autor ainda também afirma que a água deverá ser uma das principais fontes de hidrogênio no futuro, por esse e outros motivos como a facilidade com que é encontrada e a abundância do elemento, esse recurso se torna foco desse trabalho. Para isso, é necessário entender o processo de eletrólise, conforme mencionado a seguir.

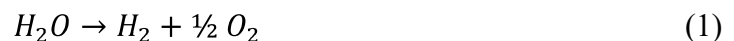
### 2.1.3.1 ELETRÓLISE

Para se extrair o hidrogênio da molécula de água é utilizado o método da eletrólise, que consiste em fazer uso da eletricidade para romper a água em átomos de hidrogênio e oxigênio, passando por ela uma corrente elétrica. Processo este que existe há mais de 100 anos e que seu funcionamento é a partir de dois eletrodos, um negativo (anodo) e outro positivo (catodo) que são submersos em água pura, à qual se dá uma maior condutibilidade pela aplicação de um eletrólito, como por exemplo sal, melhorando a eficiência do processo (ALDABÓ, 2004).

As cargas elétricas da corrente quebram as ligações químicas entre os átomos de hidrogênio e de oxigênio e separa em componentes atômicos, criando partículas de íons. O hidrogênio se concentra no catodo e o oxigênio no anodo. Uma tensão de 1,24V é necessária para separar os átomos de oxigênio e de hidrogênio em água pura a uma temperatura de 25° C e uma pressão de 1,03 Kg/cm<sup>2</sup>. Caso a pressão ou temperatura variem, a tensão necessária para quebrar a molécula de água é alterada (VARGAS et al., 2006).

Visualmente é possível ver o hidrogênio borbulhar em direção ao eletrodo de carga negativa e o oxigênio rumo ao eletrodo de carga positiva. A menor quantidade de eletricidade necessária para eletrolisar um mol de água é de 65,3 Wh, a uma temperatura de 25° C. A produção de um metro cúbico de hidrogênio requer cerca de 0,14 kWh de energia elétrica (VARGAS et al., 2006).

A reação da eletrólise é traduzida pela reação (1) a seguir, na proporção molar de 2 para 1 (ESTÊVÃO, 2008; URSÚA; GANDÍA; SANCHIS, 2012).



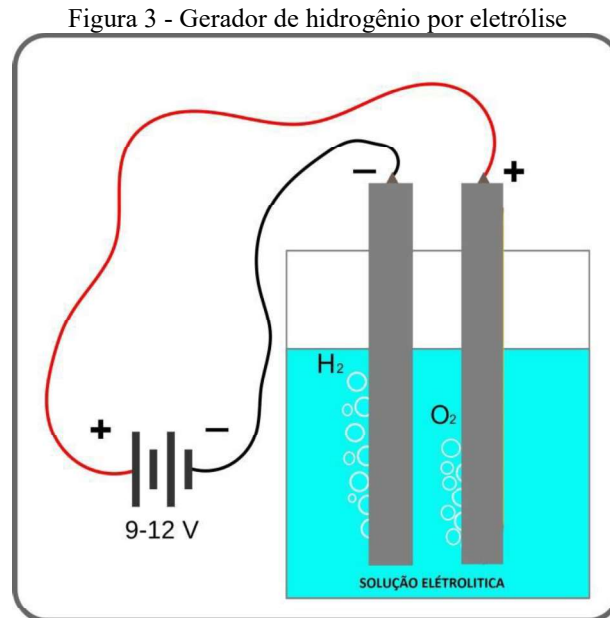
No eletrodo negativo o hidrogênio é formado por meio da reação (2) a seguir (ESTÊVÃO, 2008).



A água oxidada, no eletrodo positivo, forma o oxigênio conforme a reação (3) a seguir (ESTÊVÃO, 2008).



O esquema de uma célula eletrolítica na qual ocorre a eletrólise da água salgada é exemplificado na Figura 3.



Fonte: Wollmann (2013)

A vantagem desse processo é que ele possui um sistema químico muito limpo e independente de impurezas de carbono, enxofre, iodo, etc. A desvantagem desse sistema são os custos da eletricidade usada no processo, impedindo com que ela concorra com outros meios de obtenção como a reforma a vapor do gás natural e com o do etanol. A eletricidade pode custar de três a quatro vezes mais que o gás natural utilizado na reforma a vapor. A medida que o gás natural vai ficando mais escasso e caro, provavelmente a eletrólise fique mais competitiva. No Brasil, pode-se aproveitar os reservatórios das grandes hidrelétricas para produzir hidrogênio nos horários fora de pico, como durante a madrugada, de forma mais econômica (SALIBA-SILVA; LINARDI, [s.d.]; VARGAS et al., 2006).

Conforme os custos das células fotovoltaicas, da geração eólica, hídrica e geotérmica, todas estas formas de energia renováveis e livres de carbono, diminuem e suas eficiências aumentam, a produção de energia acaba sendo ainda mais barata e conseqüentemente o processo de eletrólise se torna bastante atrativo (MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA; FUNDO SETORIAL DE ENERGIA; SECRETARIA TÉCNICA, 2002).

## 2.2 CELULA A COMBUSTÍVEL

Células a combustível são conversores diretos de energia química em elétrica e térmica, de funcionamento contínuo, diferente das baterias, produzem corrente contínua pela combustão eletroquímica a frio de um combustível, geralmente o hidrogênio. Foram inventadas no século XIX por William Grove, entretanto, o fato de as fontes primárias de energia serem abundantes e baratas resultou na falta de interesse a respeito do desenvolvimento dessa tecnologia (SANTOS, 2012; W. VIELSTICH, A.LAMM, 2003).

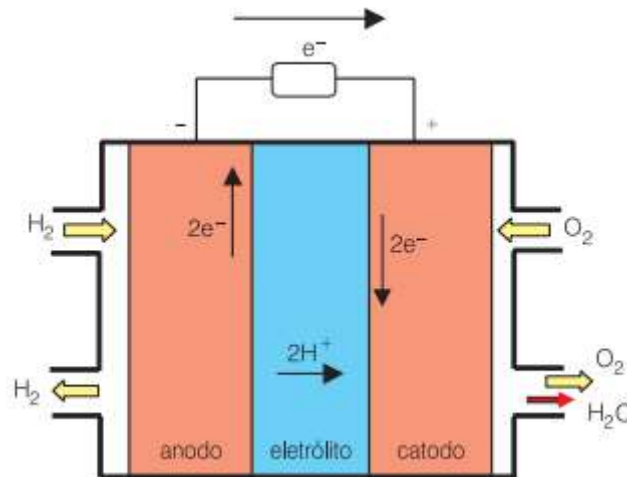
Pode-se perceber que a tecnologia das células a combustível é conhecida há vários anos, mas, com o apogeu da economia do petróleo, ela foi deixada para segundo plano. Nos dias atuais, com os impactos ambientais sendo de grande preocupação da população, as pesquisas com as células foram reativadas (W. VIELSTICH, A.LAMM, 2003).

O Departamento de Energia dos Estados Unidos mostra em seus estudos que o custo das células a combustível no país reduziu mais de 80%, de 275 dólares por kW para 52 dólares por kW, no período de 2002 até 2016. Além da diminuição do custo, a durabilidade das mesmas também quadruplicou no período. Grande parte da redução desse valor foi possível graças a diminuição da quantidade de platina, metal nobre e raro, utilizada no sistema (WANGHON, 2018).

### 2.2.1 FUNCIONAMENTO DA CELULA A COMBUSTÍVEL

A estrutura básica de toda célula a combustível é semelhante, a célula unitária consiste em dois eletrodos porosos, cuja composição depende do tipo de célula, separados por um eletrólito e conectados por meio de um circuito externo. Os eletrodos são expostos a um fluxo de gás ou líquido para suprir os reagentes, o combustível e o oxidante. Na Figura 4 a seguir é exemplificado o esquema de uma célula a combustível hidrogênio/oxigênio (SANTOS, 2012).

Figura 4 - Esquema da célula a combustível



Fonte: Santos (2012)

O hidrogênio gasoso penetra por meio da estrutura porosa do anodo, dissolve-se no eletrólito e reage na superfície do eletrodo, liberando elétrons e formando prótons (H<sup>+</sup>). Os elétrons liberados na oxidação do hidrogênio chegam por meio do circuito externo e participam da reação de redução do oxigênio. Os prótons formados no anodo são transportados ao catodo onde reagem formando o produto da reação global da célula a combustível, água e calor. A reação global da célula a combustível é definida pela reação (4) a seguir (LINARDI, 2014; SANTOS, 2012).



Células unitárias apresentam um potencial de 1 a 1,2 V e liberam, sob solitação de 0,5 a 0,7 V<sub>DC</sub>. Estes valores são, sob o ponto de vista prático, muito baixos. Para que seja fornecido um potencial da ordem de 150 a 200 V é necessário o empilhamento em série de várias unidades de células, 200 a 300, também chamado módulo (LINARDI, 2014).

### 2.3 ARMAZENAMENTO

Se o primeiro desafio da tecnologia do hidrogênio é a produção, o segundo é como armazená-lo, um dos principais obstáculos para o estabelecimento da infraestrutura para a tecnologia do hidrogênio. Além da questão de segurança, a capacidade de armazenamento é importante, pois define, por exemplo, a autonomia de um veículo (VARGAS et al., 2006).

O hidrogênio tem uma baixa densidade e por consequência uma baixa densidade de energia, o que resulta em uma menor quantidade de energia que outros combustíveis em um mesmo volume, em condições normais de temperatura e pressão. Porém, apesar de sua baixa densidade de energia volumétrica, o elemento tem a maior relação energia peso que qualquer outro combustível (VARGAS et al., 2006).

As cinco principais formas de se armazenar, segundo Neto ([s.d.]), hidrogênio são:

- Reservatórios de Gás Hidrogênio Comprimido;
- Reservatórios para Hidrogênio Líquido;
- Hidretos Metálicos;
- Adsorção de Carbono;
- Microesferas.

Uma das mais pesquisadas no Brasil é através de hidretos metálicos, onde o hidrogênio é absorvido por metais. Esta tecnologia vem sendo pesquisada pelo Laboratório de Hidrogênio do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ). O instituto de pesquisa do hidrogênio é uma referência da tecnologia do hidrogênio no Brasil e no mundo, e vem pesquisando o armazenamento do combustível em hidretos metálicos com apoio da Renault, CNPq e FAPERJ (NETO, [s.d.]).

Além do armazenamento em materiais sólidos, há pesquisas para compressão de hidrogênio em cilindros que suportem altíssimas pressões. O objetivo das montadoras de automóveis é atingir pressões internas de até 10.000 psi, pelo menos. Algumas já conseguiram, mas o nível de segurança deve ser altamente confiável. Por isso, a maioria dos protótipos são de 5.000 psi (VARGAS et al., 2006).

## 2.4 NORMAS

Para operar no Brasil, as empresas precisam de uma variedade de autorizações e licenças de operação emitidas por órgãos dos governos municipal, estadual e federal. As licenças do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar de São Paulo (CBMESP/SP) e da Agência Paulista de Proteção Ambiental (CETESB/SP) são de competência estadual e têm especial importância no caso de empresas que utilizam materiais combustíveis. O nível de complexidade para a obtenção dessas licenças depende das quantidades de materiais combustíveis armazenados e de suas densidades de energia (NEVES; PINTO, 2013).

A jurisdição do Corpo de Bombeiros é o estado de São Paulo e o corpo de bombeiros de outros estados podem apresentar diversas solicitações para a emissão de autorizações e licenças. Em geral, o trabalho do CBMESP conta com 38 Instituições Técnicas próprias, que se referem às normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Normas Regulamentadoras (NR). Para casos não previstos nas normas brasileiras, podem ser utilizadas publicações e normas internacionais (NEVES; PINTO, 2013).

Como o número de solicitações envolvendo hidrogênio ainda é baixo, o CBMESP considera que ainda não há a necessidade de desenvolver uma Instrução Técnica para o gás. Assim, os requisitos das instalações, como distâncias mínimas e número de extintores de incêndio, em muitos casos são definidos pela semelhança ao GLP (NEVES; PINTO, 2013).

## 2.5 ECONOMIA BASEADA NO HIDROGÊNIO

O hidrogênio promete ser essencial para a produção de energia nos próximos anos, essa revelação se deve a emissão de gases que necessita de intervenção por parte do homem. Neste sentido existem vários projetos que utilizam o hidrogênio como combustível, a seguir veremos alguns deles (CABRAL et al., 2014).

### 2.5.1 VEÍCULOS MOVIDOS A HIDROGÊNIO

Sendo o transporte um dos principais consumidores de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, poluidores do meio ambiente, ele também é um dos principais meios onde buscam-se a aplicação de células a combustível (WANGHON, 2018).

Atualmente, todas as montadoras de carros do mundo já possuem modelos movidos a célula a combustível. Além disso, já existem no mundo mais de 300 estações de abastecimento de hidrogênio, devendo ultrapassar a marca de 1000 unidades em 2020. Isso explica as audaciosas estimativas dos governos japonês e chinês para os próximos anos. A China planeja ter 50.000 veículos movidos a célula a combustível em 2025 e 1 milhão em 2030. A Figura 5 a seguir mostra um carro da montadora Toyota, o Toyota Mirai, em um posto de abastecimento de hidrogênio (WANGHON, 2018).

Figura 5 - Toyota Mirai em um posto de hidrogênio



Fonte: PlanetCarsZ (2014)

No Brasil já existem automóveis movidos a célula a combustível, mas que não são comercializados em larga escala, apesar de serem utilizados pela população. Um exemplo é o ônibus da Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos de São Paulo (EMTU), ilustrado na Figura 6, que circula na cidade de São Paulo fazendo parte da frota de transporte público. Essa foi uma iniciativa em parceria com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) (WANGHON, 2018).

Figura 6 - Vista do primeiro ônibus híbrido de célula a combustível brasileiro



Fonte: Neves e Pinto (2013)



Além de pequenos automóveis, existem pesquisas nas áreas de transporte como trens e aviões, por exemplo, de acordo com estudos realizados pela Boeing na área de aviação, as células a combustível podem diminuir o consumo em até 75% em aviões, além de diminuir a poluição de aeroportos (WANGHON, 2018).

### 2.5.2 GERAÇÃO DE ENERGIA ESTACIONÁRIA

O Primeiro Banco Nacional de Omaha, Estados Unidos, fez um estudo e chegou ao cálculo que um blecaute de uma hora no seu sistema de processamento de cartões de crédito traria um prejuízo de 6 milhões de dólares. A partir disso instalou um sistema de células a combustível que oferece energia com quase 100% de segurança. Várias empresas, bases militares, hospitais e centros de pesquisa já adotaram formas semelhantes de gerar energia (KENSKI, 2003).

### 2.5.3 EQUIPAMENTOS PORTÁTEIS

Para o grande público consumidor, a tendência é que os primeiros produtos a hidrogênio que irão chegar as lojas serão aparelhos eletrônicos portáteis como laptops e celulares. A quantidade de recursos, monitores, memória e capacidade de processamento que eles têm recebido requer energia, mas ao contrário dos chips, as baterias têm evoluído muito lentamente. O preço das baterias permanece alto o que torna as células a combustível uma opção, podendo ser feitas em qualquer tamanho, as células duram duas a quatro vezes mais que a bateria, com potencial para aumentar ainda mais (KENSKI, 2003).

### 2.5.4 APLICAÇÃO ESPACIAL

Não podemos esquecer também que atualmente, uma das principais aplicações do hidrogênio é como combustível dos foguetes espaciais. Isso ocorre pois ele apresenta um maior potencial energético que a gasolina ou diesel e todos os lançamentos realizados pela Agencia Nacional Americana de Administração da Aeronáutica e Espaço (NASA), nas últimas décadas, tiveram hidrogênio e oxigênio como combustíveis propulsores (WANGHON, 2018).

### 3.0 METODOLOGIA APLICADA

A partir de tudo que foi anteriormente apresentado, verifica-se a importância do hidrogênio e a possibilidade do elemento se tornar uma grande fonte de energia em um futuro próximo, entretanto, se faz necessário a redução dos custos para extração e utilização como também uma maneira de minimizar os impactos ambientais, pensando na sustentabilidade. Sendo assim, optou-se por fazer um protótipo para estudo do processo de eletrólise.

A partir de experimentos realizados por Palhares (2016) e por Neto e Moreira (2007) observou-se que, para um melhor rendimento do eletrolisador o ideal é a utilização de eletrodos de aço inox 304, uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 3,5 mol/L e uma tensão de aproximadamente 1,48 V.

Para se calcular a quantidade de hidrogênio que pode ser obtido utiliza-se a equação (1) (MORA; SIHVENGER; LUCAS, 2006). Para fins teóricos, considerou-se na equação (1) um ambiente que utiliza uma alimentação de 1,5 V e 666,67 A, onde calculou-se quanto de hidrogênio seria obtido em uma hora.

$$M = K \cdot E \cdot I \cdot T \quad (1)$$

$$M = M = \frac{1}{96500} \cdot 1 \cdot 666,67 \cdot 3600 \cong 24,8706g \text{ de } H_2$$

Um mol de  $H_2$  possui uma grama e 22,4 L (SALIBA-SILVA; LINARDI, [s.d.]). Sendo assim, com a quantidade de hidrogênio obtida no exemplo anterior pode-se utilizar o raciocínio demonstrado a seguir e concluir que no exemplo apresentado produziu-se  $0,5571 \text{ m}^3$  de hidrogênio por kWh.

$$\begin{aligned} 1 \text{ g de } H_2 &\cong 22,4 \text{ L} \\ \therefore 24,8706 \cdot 22,4 &\cong 557,1014 \text{ L} \cong 0,5571 \text{ m}^3 \end{aligned}$$

Para calcular a eficiência, segundo Ahmad e El Shenawy (2006), de um eletrolisador utiliza-se a equação (2):

$$\eta_{elet} = \frac{Q_m \cdot PCI}{V \cdot I} \cdot 1000 \quad (2)$$

O valor de PCI do hidrogênio é aproximadamente 120 MJ/kg a 25° C, com esse valor aplicado a equação (2), calculou-se que a eficiência do eletrolisador do exemplo anterior seria de aproximadamente 83%, conforme demonstrado a seguir (SANTOS; SANTOS, 2016).

$$\eta_{elet} = \frac{\left(\frac{24,8706}{3600}\right) \cdot 120}{1,5 \cdot 666,67} \cdot 1000 \cong 0,829 \cong 83\%$$

Como dificilmente obtém-se os valores ideais de vazão e temperatura, a eficiência real se aproximaria de 75% a 90%, valor esse que se altera com melhorias no processo da eletrólise que, entre elas, existe a utilização da corrente pulsada (NETO; MOREIRA, 2007).

John Brockris realizou na Universidade do Texas (Texas A&M University) um experimento utilizando corrente pulsada no processo da eletrólise, nesse experimento notou-se que quando a tensão aplicada era desconectada do sistema, uma quantidade significativa de corrente continuava fluindo durante um curto período. Em seu experimento, Brockris concluiu que a taxa de produção do hidrogênio tinha sido dobrada em relação ao mesmo processo utilizando tensão contínua. Suas conclusões foram posteriormente confirmadas por outros cientistas ao redor do mundo, sendo que alguns atribuíram esse aumento na taxa de produção a melhorias em relação à transferência de massa no eletrolisador (NETO; MOREIRA, 2007).

Durante o processo de eletrólise convencional, um filme de gás forma-se sobre os eletrodos aumentando a resistência de sobretensão. Quando o sistema é excitado com tensão pulsada, essa resistência de sobretensão das bolhas de gás torna-se nula e se o sistema for alimentado com tensão pulsada em frequências de ressonância com os componentes que fazem parte do processo eletroquímico, o efeito sobre a eficiência da eletrólise se torna mais forte (SHAABAN, 1994).

Com os conceitos definidos anteriormente, iniciou-se a projeção dos circuitos conversores contínuo e pulsante para a montagem e estudo do protótipo.

### 3.1 CONVERSORES DC/DC

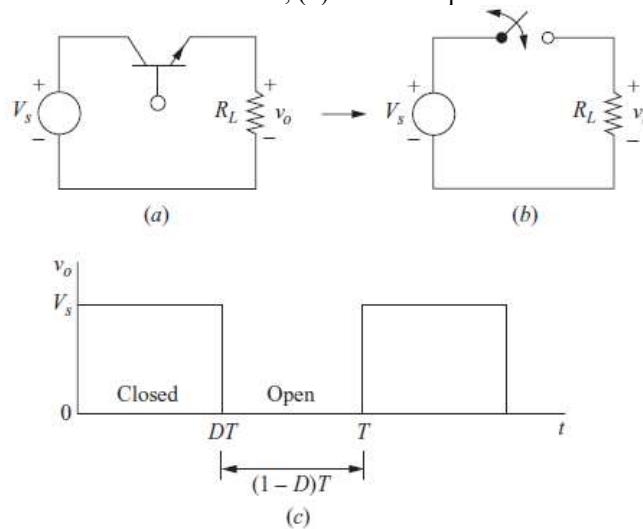
Os conversores DC/DC são componentes ou um conjunto deles que, em determinada configuração, convertem uma dada tensão DC em outro valor de tensão DC. Os conversores DC/DC apresentam diferentes categorias, tal como os reguladores de tensão lineares construídos a partir de reguladores, família 78XX e 79XX, e os chamados fontes chaveadas que

são construídos a partir dos transistores e MOSFETs, tal qual o Conversor Step-Down ou Buck, Step-Up ou Boost e Buck Boost (HART, 2011).

### 3.1.1 BASE DE UMA FONTE CHAVEADA

A fonte chaveada se dá por meio da utilização de transistores ou MOSFETs, operando como uma chave ON/OFF, ou seja, nas zonas de cutoff. Essencialmente é um circuito chopper DC (HART, 2011).

Figura 7 - (a) Circuito base de uma fonte chaveada; (b) Circuito equivalente com chave; (c) Tensão de saída.



Fonte: adaptado de Hart (2011)

A tensão DC média de saída no pulso gerado pelo chaveamento é calculado a partir da equação (3) (HART, 2011).

$$V_o = \frac{1}{T} \int_0^T v_o(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{DT} V_s dt = V_s D \quad (3)$$

A componente DC da saída é controlada por meio do ajusto do duty cycle, demonstrado na equação (4) (HART, 2011).

$$D = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} = \frac{t_{on}}{T} = t_{on} \cdot f \quad (4)$$

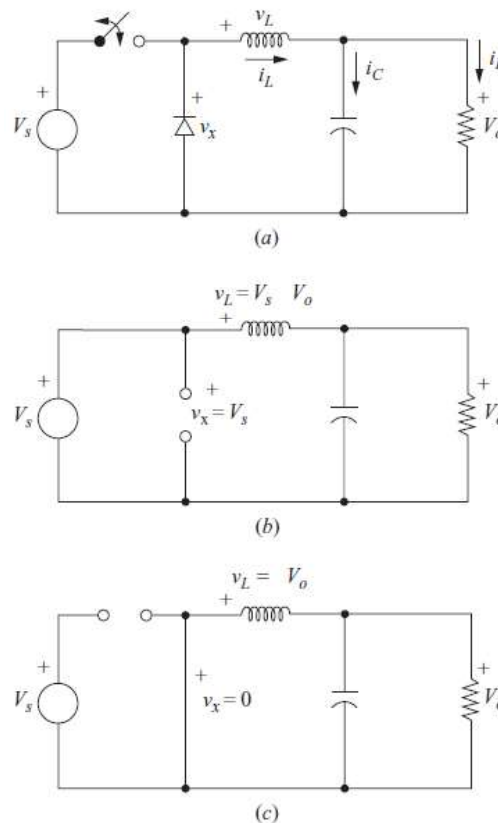
### 3.1.2 CONVERSOR STEP-DOWN OU BUCK

Com a adição de um filtro utilizando indutores e capacitores (filtro LC) passa baixa no circuito base da fonte chaveada ilustrado na Figura 7(a), o diodo, geralmente Schottky, assegura um trajeto para a corrente do indutor quando o bloco de chaveamento está aberto, o mesmo terá efeito contrário quando o bloco de chaveamento estiver fechado, fazendo com que surja, considerando um filtro ideal, a seguinte análise (HART, 2011):

1. A tensão de entrada do filtro será  $V_s$  quando o bloco de chaveamento estiver fechado e zero quando estiver aberto, considerando que o sinal da corrente no indutor continue positivo, mantendo o diodo em estado de condução;
2. Se o chaveamento ocorrer periodicamente com valor  $D$ , a tensão média na entrada do filtro será  $V_s D$ , como exemplificado na equação (3) (HART, 2011).

A partir da análise acima, observou-se que a tensão de saída do circuito é menor do que a tensão de entrada, logo obteve-se um conversor buck conforme a Figura 8.

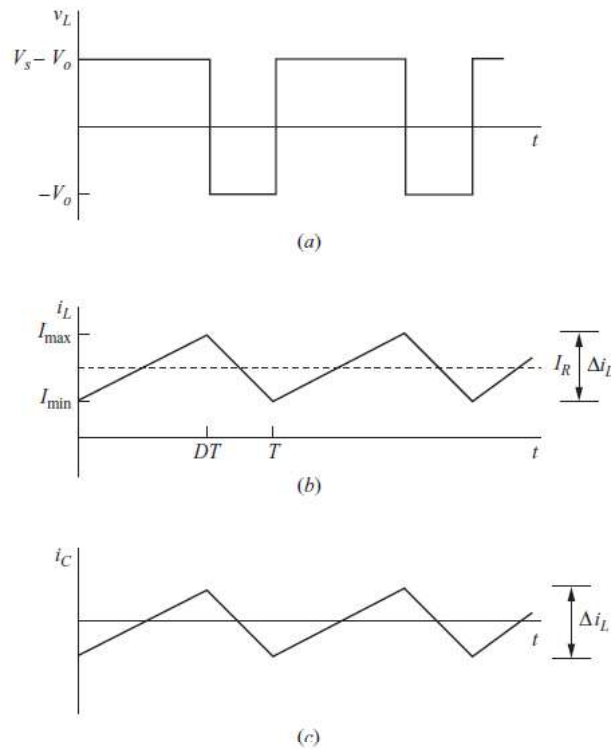
Figura 8 - (a) Conversor Buck; Circuito equivalente com o bloco de chaveamento fechado; (c) Circuito equivalente com o bloco de chaveamento aberto.



Fonte: adaptado de Hart (2011)

Na Figura 9 a seguir, é possível entender as formas de onda nos componentes do filtro para a análise de corrente e tensão. (HART, 2011)

Figura 9 - (a) Tensão no indutor; (b) Corrente no indutor; (c) Tensão no capacitor.

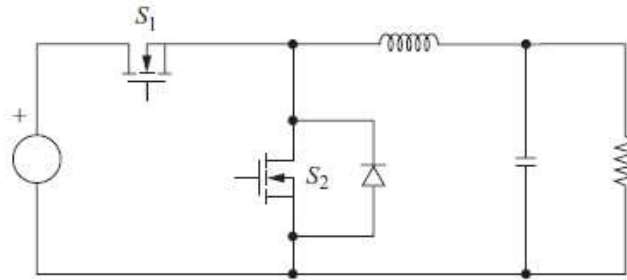


Fonte: adaptado de Hart (2011)

### 3.1.3 CONVERSOR BUCK DE RETIFICAÇÃO SÍNCRONA

O conversor Buck de retificação síncrona utiliza um segundo MOSFET no local do diodo Schottky, pois apresenta uma queda de tensão menor graças a sua baixa resistência de condução ( $R_{DSon}$ ), que tem valor na casa dos miliohms ( $m\Omega$ ). Dessa forma, ele é ideal para aplicações com baixa tensão e alta corrente, como o circuito necessário para fornecer os parâmetros necessários para realizar-se a eletrólise. Vale ressaltar que os parâmetros e equações necessárias para o cálculo deste tipo de circuito, dos quais temos a alta frequência de chaveamento para evitar perdas, ficam entre 300 kHz a 1 MHz. A Figura 10 a seguir ilustra um modelo de conversor Buck (HART, 2011).

Figura 10 – Modelo do Conversor Buck de Retificação Síncrona



Fonte: adaptado de Hart (2011)

#### 4.0 ELABORAÇÃO DO PROTÓTIPO

Para a alimentação do protótipo, seria utilizada fonte externa capaz de suprir 5 V e 13,5 A, sendo necessário regular a tensão DC para que se chegasse ao valor ideal de 1,5 V com um conversor Buck de retificação síncrona.

É necessário a utilização das equação (5) a equação (11), apresentadas a seguir, para a construção do conversor Buck de retificação síncrona (HART, 2011).

$$D = \frac{V_o}{V_s} \quad (5)$$

$$I_L = I_o \quad (6)$$

$$\Delta I_L = 0,4 \cdot I_L \quad (7)$$

$$L = \left( \frac{V_s - V_o}{\Delta I_L \cdot f} \right) \cdot D \quad (8)$$

$$I_{Lrms} = \sqrt{(I_L)^2 + \left( \frac{\Delta I_L / 2}{\sqrt{3}} \right)^2} \quad (9)$$

$$C = \frac{1 - D}{8 \cdot L \cdot \Delta V_{Cmáx} \cdot f^2} \quad (10)$$

$$r_c = \frac{V_o \cdot \Delta V_{Cmáx}}{\Delta I_L} \quad (11)$$

Os parâmetros utilizados na elaboração do protótipo são apresentados a seguir.

$$\begin{aligned}
\Delta V_{c_{\max}} &= 0,2\% \\
D &= \frac{1,5V}{5,0V} = 0,3 \\
f &= 400kHz \\
I_o &= 13,5A \\
V_o &= 1,5V \\
\Delta I_L &= 0,4 \cdot I_o = 5,4 A \\
L &= \left( \frac{V_s - V_o}{\Delta I_L \cdot f} \right) \cdot D = \left( \frac{5 - 1,5}{5,4 \cdot 400000} \right) \cdot 0,3 \cong 486,11 nH
\end{aligned}$$

O valor do indutor obtido não é um valor comercial, logo necessitou-se a construção de um indutor, para isso calculou-se a corrente a qual o mesmo deveria suportar por meio da equação (9).

$$\begin{aligned}
I_{Lrms} &= \frac{\sqrt{(I_L)^2 + \left(\frac{\Delta I_L/2}{\sqrt{3}}\right)^2}}{1 - D} = \frac{\sqrt{(13,5)^2 + \left(\frac{5,4/2}{\sqrt{3}}\right)^2}}{1 - 0,3} \cong 13,59 A \\
C &= \frac{8 \cdot L \cdot \Delta V_{c_{\max}} \cdot f^2}{V_o \cdot \Delta V_{c_{\max}}} = \frac{(8 \cdot 4,9\mu) \cdot 0,002 \cdot (400000)^2}{1,5 \cdot 0,002} = 562,5 \mu F \\
r_C &= \frac{V_o \cdot \Delta V_{c_{\max}}}{\Delta I_L} = \frac{1,5 \cdot 0,002}{5,4} = 555,56 \mu\Omega
\end{aligned}$$

Logo, com os cálculos realizados obteve-se que o indutor deveria suportar 13,59 A, o capacitor iria ser de 560  $\mu F$ , valor comercial mais próximo do calculado, e a resistência em série do capacitor deveria ser de aproximadamente 555,56  $\mu\Omega$ .

Era necessário que os MOSFETs suportassem no mínimo 12 V e 15 A, para atender a essas especificações escolheu-se os modelos IRF1404 e IRF4905. Para as funções de pull-up e pull-down utilizou-se resistores de 10 k $\Omega$  (FOLEY, 2008).

O chaveamento dos MOSFETs foi realizado utilizando-se o CI 555 em sua configuração astável, para gerar o sinal PWM, um potenciômetro de 4,7 k $\Omega$  e dois diodos foram utilizados para realizar o controle do duty cycle. Os valores dos resistores R1, R2 e do capacitor C1 ilustrados na Figura 11 foram calculados a partir da equação (12).

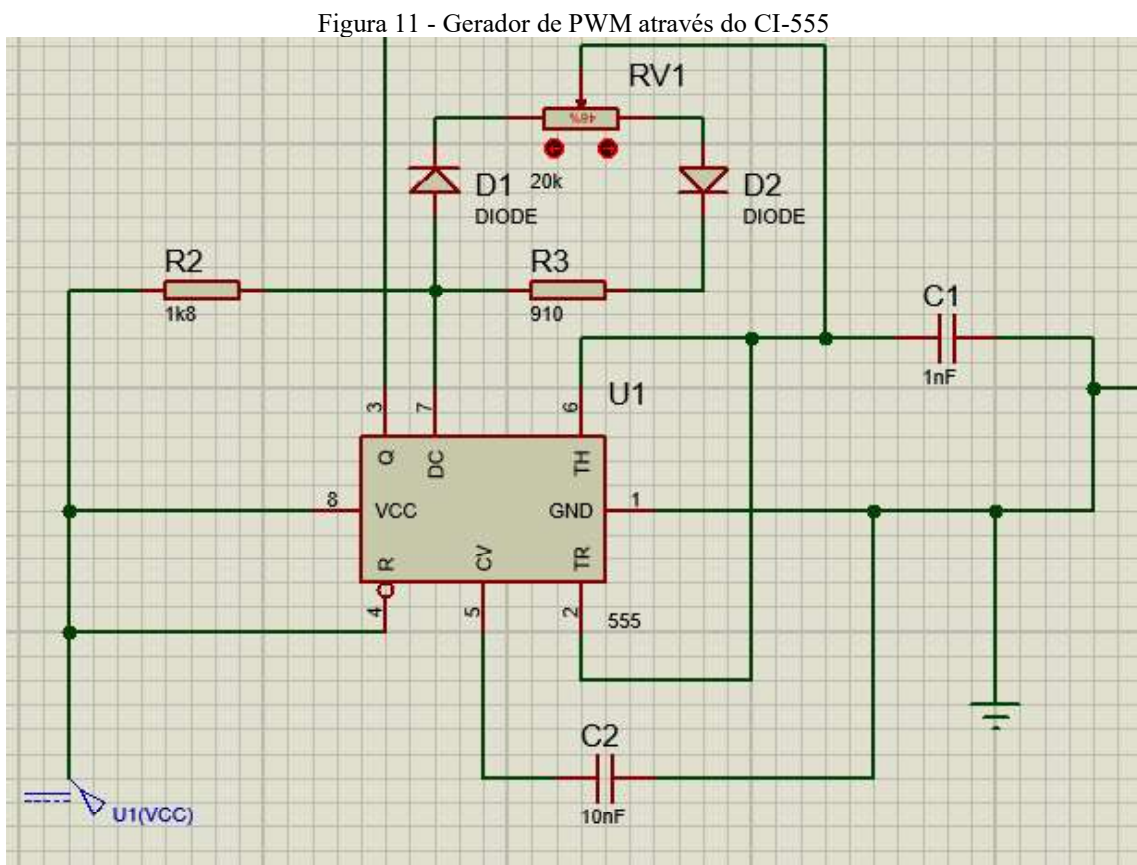
$$f = \frac{1,44}{(R1 + 2 \cdot R2) \cdot C} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}
\therefore 400000 &= \frac{1,44}{(R1 + 2 \cdot R2) \cdot C} \\
(R1 + 2R2) \cdot C &= 3,6 \cdot 10^{-6}
\end{aligned}$$



Os valores comerciais dos componentes mais próximos do necessário são de 1,8 k $\Omega$  e 910  $\Omega$  para os resistores e 1 nF para o capacitor.

Para auxiliar na elaboração do protótipo, utilizou-se o software de criação de projetos eletrônico Proteus Design Suite do desenvolvedor Labcenter Electronics Ltd., programa no qual foi possível criar e simular o circuito como também realizar a impressão para confeccionar o circuito impresso. A Figura 11 a seguir ilustra o gerador de sinal PWM por meio do CI 555 simulado no software Proteus.



Fonte: Autoria própria

Para a construção do indutor optou-se pelo tipo de bobina com núcleo de ferrite, esta apresenta um melhor direcionamento da corrente. Utilizou-se as equações (13), (14) e (15) para a calcular-se os parâmetros do indutor (BARBI; FONT; ALVES, 2002).

$$I_{pico} = I_o + \left(\frac{\Delta I_L}{2}\right) \quad (13)$$

$$I_{pico} = 13,5 + \left(\frac{0,4 \cdot 13,5}{2}\right) = 16,2 A$$

$$N = \frac{L \cdot I_{pico}}{B_{max} \cdot A_e} \quad (14)$$

$$N = \frac{490 \cdot 10^{-9} \cdot 16,2}{0,3 \cdot 19,625 \cdot 10^{-6}} \cong 1,34 \cong 2 \text{ espiras}$$

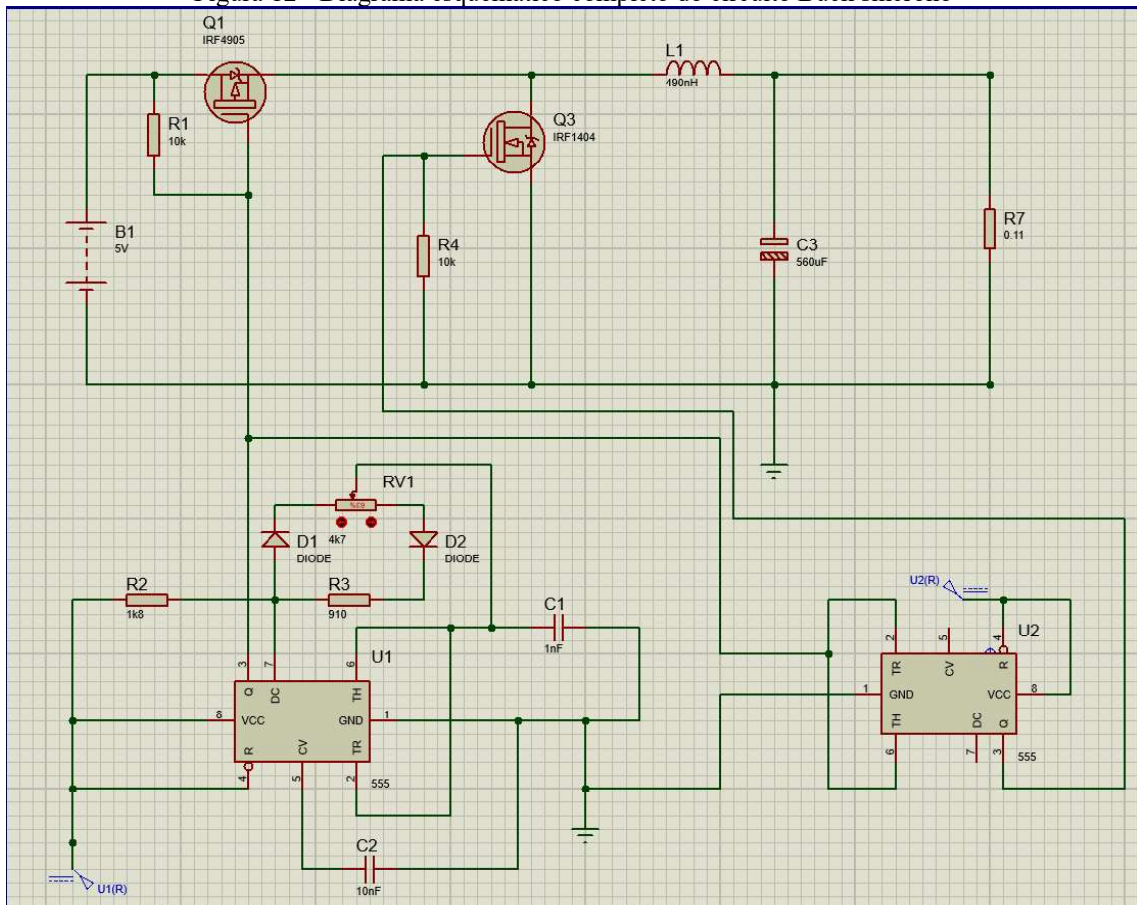
$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{f}} \quad (15)$$

$$\Delta = \frac{7,5}{\sqrt{400000}} = 11,8585 \text{ mm}$$

$$\therefore 2\Delta = 23,7171 \text{ mm}$$

Dispondo dos dados em mãos finalizou-se o diagrama esquemático completo do circuito no programa Proteus, conforme ilustrado na Figura 12 a seguir.

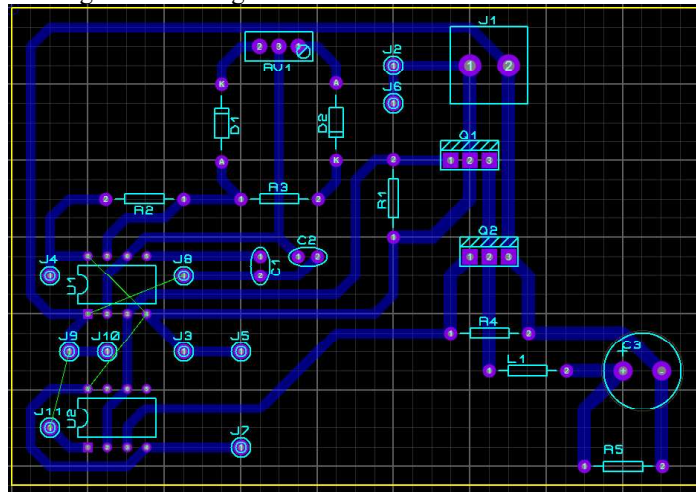
Figura 12 - Diagrama esquemático completo do circuito Buck síncrono



Fonte: Autoria própria

A resistência R7 na Figura 12 simula os eletrodos do eletrolisador na saída do circuito e, na Figura 13, é possível ver os design das trilhas do circuito Buck síncrono obtido com o software Proteus.

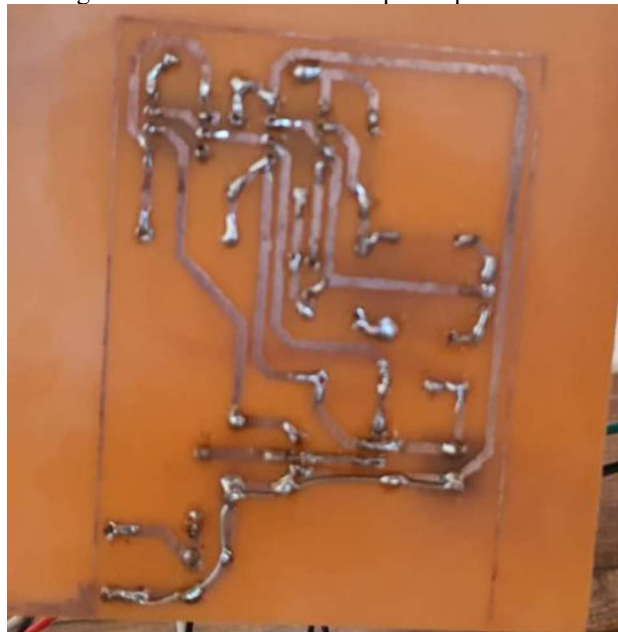
Figura 13 - Design das trilhas do circuito Buck síncrono



Fonte: Autoria própria

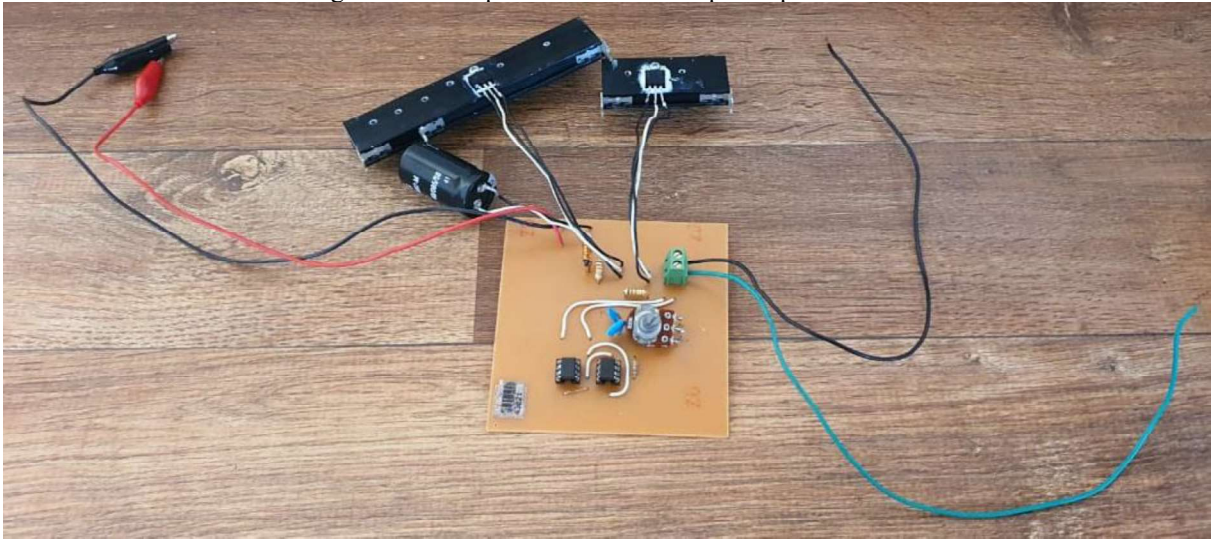
As Figuras 14 e 15 apresentam o circuito protótipo desenvolvido para a montagem do eletrolisador.

Figura 14 - Trilhas do circuito protótipo montado



Fonte: Autoria própria

Figura 15 - Componentes do circuito protótipo montado



Fonte: Autoria própria



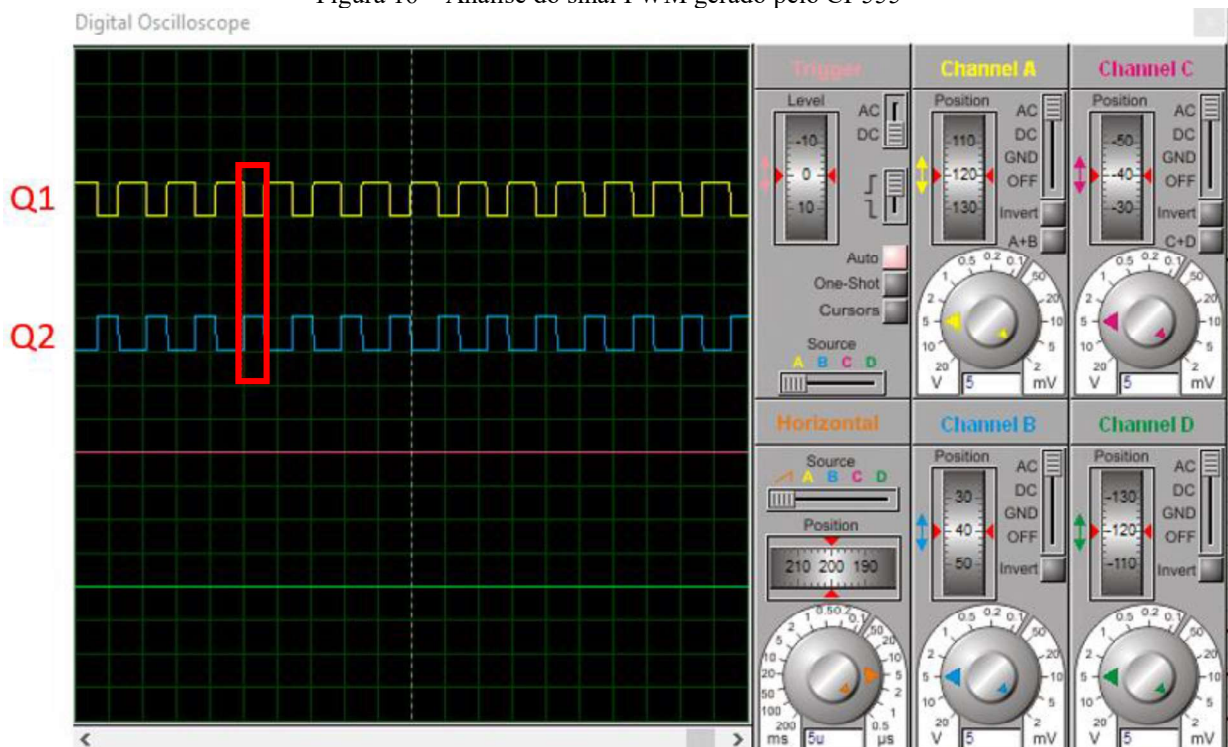
## 5.0 RESULTADOS

Com o protótipo pronto, iniciou-se os testes em laboratório para verificar a eficácia do mesmo. O circuito foi alimentado com uma fonte de 5 V e, logo de início, constatou-se que a tensão de saída do circuito era zero, diferente do valor de 1,5 V inicialmente projetado, o mesmo também apresentou um aumento notável na temperatura durante a operação o que levantou a hipótese de curto circuito.

Realizou-se uma segunda análise das trilhas do circuito e o teste de funcionamento de cada componente separadamente, constatou-se então que nenhum dos elementos acima citados estava com defeito e/ou errado.

Aprofundando-se nas bibliografias, foi possível perceber que o problema que estava ocorrendo era um fenômeno conhecido como dead time, região onde os sinais inversos mudam de fase fazendo assim com que não haja uma alternância de chaveamento entre os MOSFETs, havendo um curto circuito (FOLEY, 2008). No funcionamento do protótipo isso se manifestou como uma geração de calor extremamente alta e impossibilitou o funcionamento do mesmo. A Figura 16 a seguir mostra o sinal gerado pelo PWM no simulador, onde é possível ver o fenômeno ocorrendo.

Figura 16 – Análise do sinal PWM gerado pelo CI-555



Fonte: Autoria própria

## 6.0 CONCLUSÃO

O hidrogênio apresenta um potencial energético capaz de transformá-lo na maior fonte de energia nos próximos séculos. O maior problema encontrado é que ele, como um recurso natural, não se encontra livre na natureza, sendo necessário a extração do elemento por meios como a reforma a vapor do gás natural e a eletrólise da água.

A eletrólise tende a ser o futuro quando se fala na obtenção de hidrogênio, com o avanço das pesquisas de geração de energia renovável, a eletrólise terá seu custo cada vez mais reduzido, tornando-a mais competitiva economicamente.

Mesmo já sendo utilizado em diversas áreas, como a espacial, a tendência é que nos próximos anos haja uma participação ainda maior do hidrogênio na economia global, sendo utilizado no transporte, na geração de energia e desempenhando as funções dos mais variáveis tipos de bateria por meio do uso das células a combustível.

O protótipo proposto apresentou de forma inesperada o fenômeno do dead time e podendo, assim, concluir que a forma na qual ele foi projetado, não é eficaz para a produção de hidrogênio. Entretanto, como o fenômeno não é raro, a solução do problema pode ser simples, dentre elas a utilização do circuito integrado TL494, CIs da família IR21XX ou a utilização de um microcontrolador para a geração do sinal PWM, soluções essas que não puderam ser estudadas em virtude do cronograma que foi afetado por conta da pandemia do COVID-19.

Por fim, conclui-se que o hidrogênio será um importante vetor energético tendo em vista o seu potencial de fornecer energia e a sustentabilidade do mesmo quando utilizado, sendo uma das fontes de energia menos poluentes da qual podemos utilizar.

### 6.1 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

São sugestões de trabalhos futuros:

- Estudos para mitigação do fenômeno dead time no protótipo apresentado;
- Estudos de outros sistemas geradores de hidrogênio.

## REFERÊNCIAS

AHMAD, G. E.; EL SHENAWY, E. T. Optimized photovoltaic system for hydrogen production. Elsevier, v. 31, n. 7, p. 1043–1054, 2006. DOI: 10.1016/j.renene.2005.05.018.

ALDABÓ, R. Célula a Combustível: fonte de energia da nova era. Artliber ed. São Paulo.

BARBI, Ivo; FONT, Carlos Henrique Illa; ALVES, Ricardo Luiz. Projeto físico de indutores e transformadores. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, p. 10, 2002.

CABRAL, Ana Claudia; FRIGO, Elisandro Pires; PERISSATO, Sama Moreira; AZEVEDO, Késia Damaris De; FRIGO, Jianice Pires; BONASSA, Gabriela. Hidrogênio Uma Fonte De Energia Para O Futuro. Revista Brasileira de Energias Renováveis, n. 3, p. 128–135, 2014.

CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. Hidrogênio energético no Brasil Centro de gestão e estudos estratégicos, 2010.

CONELHEIRO, Luis Thiago Panage; LUCIANO, Arquimedes. Desenvolvimento de um sistema gerador de Hidrogênio gasoso para utilização como combustível alternativo em veículos automotores. Centro Universitário de Maringá, Maringá, p. 10, 2012.

COSTA, Eduardo Limas; NETO, Georgios Jannis Ninos; FILHO, José Roberto Branco Ramos; CORRÊA, Marlison Jorge Imbiriba. Estudo sobre células a combustível de hidrogênio através da eletrólise da água: um desafio a engenharia nacional Santarém Universidade Federal do Oeste do Pará, , 2014.

DIAS, Diego Lopes. Hidrogênio. [s.d.]. Disponível em: <https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/hidrogenio.htm>. Acesso em: 29 jul. 2020a.

DIAS, Diego Lopes. “Hidrogênio”. [s.d.]. Disponível em: <https://brasilescola.uol.com.br/quimica/hidrogenio.htm>. Acesso em: 4 ago. 2020b.

ESTÊVÃO, Tânia Esmeralda Rodrigues. O Hidrogênio como combustível. 2008. Universidade do Porto, 2008.

FOLEY, Simon. Selection of MOSFETs for DC/DC Synchronous Buck Controllers: SiP12201 Single 10 A Controller and SiP12203 Triple Step Down Controller IC for 2 Synchronous and 1 Linear Power Rail. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.vishay.com/docs/68952/an836.pdf>.

HART, Daniel W. Power Electronics. 1. ed. New York: McGraw-Hill, 2011.

KENSKI, Rafael. O futuro começa com H. Super Interessante, 2003. Disponível em: <https://super.abril.com.br/ciencia/o-futuro-comeca-com-h/>.

LELUDAK, Frederico Thomas; HAUS, Tiago Luis. CÉLULA DE HIDROGÊNIO: ESTUDO E CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA ELETROLÍTICA PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO GASOSO. p. 383–398, 2013. Disponível em: <https://cadernopaic.fae.edu/cadernopaic/article/view/25>.

LINARDI, MARCELO. Hidrogênio e células a combustível: programa brasileiro de I&D. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, v. 23, n. Abril 2010, p. 11, 2014.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA; FUNDO SETORIAL DE ENERGIA; SECRETARIA TÉCNICA. Programa Brasileiro de Células a Combustível: proposta para o programa. Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos - CGEE, , 2002.

MORA, Nora Díaz; SIHVENGER, João Carlos; LUCAS, Juliana Fenner R. Apostila de Química Geral. Foz do Iguaçu: UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ, 2006. Disponível em: <http://www.foz.unioeste.br/~lamat/downquimica.html>.

NETO, Emilio Hoffmann Gomes. Armazenamento de Hidrogênio. [s.d.]. Disponível em: [https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula\\_combustivel/armazenamento\\_de\\_hidrogenio.html](https://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html). Acesso em: 20 out. 2020.

NETO, José Roberto Liberato; MOREIRA, José Roberto Simões. Geração e Combustão do Hidrogênio Obtido Através do Processo de Eletrólise da Água. Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 1–9, 2007. Disponível em: [http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art\\_TCC\\_018\\_2007.pdf](http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_018_2007.pdf).

NEVES, N. P.; PINTO, C. S. Licensing a fuel cell bus and a hydrogen fueling station in Brazil. Elsevier, v. 38, n. 8215–8220, p. 6, 2013. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2013.01.035. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.035>.

PALHARES, Dayana D'Arc de Fátima. Produção de hidrogênio por eletrólise alcalina da água e energia solar. 2016. Universidade Federal de Uberlândia, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/handle/123456789/21286>.

PLANETCARSH. Novas Fotos do Toyota Mirai. 2014. Disponível em: <https://www.planetcarsz.com/index.php/noticias/veja-novas-fotos-do-toyota-mirai>. Acesso em: 16 set. 2020.

SALIBA-SILVA, A. M.; LINARDI, M. Hidrogênio Nuclear—Possibilidades para o Brasil. v. 4, n. 1, p. 1–8, [s.d.].

SANTOS, Fernando Miguel Soares Mamede Dos; SANTOS, Fernando António Castilho Mamede Dos. Combustível “hidrogênio”. v. 0, n. 31, p. 252–270, 2016.

SANTOS, Janaína Alves Dos. O que é célula a combustível? 2012. Disponível em: <http://www.usp.br/portalbiossistemas/?p=4316>. Acesso em: 1 set. 2020.

SENRA, Fernando Osório; LIMA, Kelly Aparecida Moreira De; ABREU, Rodrigo Araujo De. Estudo da aplicação de hidrogênio e gasolina em motor ciclo Otto. 2014. Universidade São Francisco, 2014.

SHAABAN, Aly H. Pulsed DC and anode depolarization in water electrolysis for hydrogen generation Florida, 1994.

URSÚA, Alfredo; GANDÍA, Luis M.; SANCHIS, Pablo. Hydrogen production from water



electrolysis: Current status and future trends. Proceedings of the IEEE, v. 100, n. 2, p. 410–426, 2012. DOI: 10.1109/JPROC.2011.2156750.

VARGAS, Reinaldo A.; CHIBA, Rubens; FRANCO, Egberto G.; SEO, Emília S. M. Hidrogênio : O Vetor Energético do Futuro ? Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, p. 13, 2006. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/2006/eventos/15435.pdf>.

W. VIELSTICH, A.LAMM, H. A. Gasteiger. Handbook of Fuel Cells – Fundamentals, Technology and Applications. England: John Wiley & Sons Ltd, 2003. v. 1

WANGHON, Alexandre José Lobato. ENERGIA DO HIDROGÊNIO. 2018. Universidade do Sul de Santa Catarina, 2018.

WOLLMANN, Fábio Leandro. Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores. 2013. Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: <https://bibliodigital.unijui.edu.br:8443/xmlui/handle/123456789/1877>.