



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CÂMPUS CARAÚBAS
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GABRIEL MOURA DE CARVALHO

**ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE SOB
DIFERENTES TENSÕES**

CARAÚBAS - RN

2017

GABRIEL MOURA DE CARVALHO

**ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE SOB
DIFERENTES TENSÕES**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao curso de Ciência e
Tecnologia da Universidade Federal
Rural do Semi-Árido (UFERSA),
Câmpus Caraúbas, como parte dos
requisitos para obtenção do Título de
Bacharel em Ciência e Tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Rudson de Souza
Lima - UFERSA.

CARAÚBAS - RN

2017

GABRIEL MOURA DE CARVALHO

**ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR ELETRÓLISE EM DIFERENTES
SOLUÇÕES**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao
Curso Bacharelado em Ciência e Tecnologia da
Universidade Federal Rural do Semiárido, como
requisito para a obtenção do título de Bacharel
em Ciência e Tecnologia.

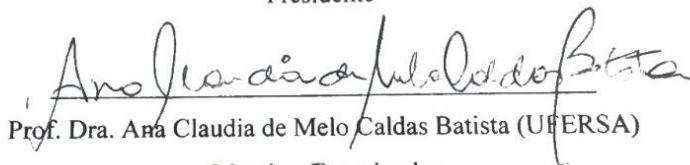
APROVADO EM: 19 / 10 / 2017.

BANCA EXAMINADORA



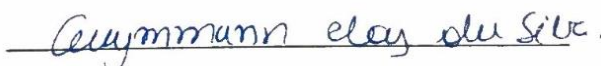
Prof. Dr. Rudson de Souza Lima (UFERSA)

Presidente



Prof. Dra. Ana Claudia de Melo Caldas Batista (UFERSA)

Membro Examinador



Prof. Dra. Guymmann Clay da Silva (UFERSA)

Membro Examinador

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

c9626 carvalho, Gabriel moura de carvalho.

a ANÁLISE DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO POR
ELETRÓLISE SOB DIFERENTES TENSÕES / Gabriel
moura de carvalho carvalho. - 2017.

40 f. : il.

Orientador: Rudson de Souza Lima lima .
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de
Ciência e Tecnologia,
2017.

1. Eletrólise. 2. Hidrogênio. I. Lima, Rudson
de Souza Lima, orient. II. Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

Dedico este trabalho com meu imenso amor aos meus pais, Gideon lima e Reinéria dos navegantes, por toda batalha enfrentada para proporcionar uma educação de qualidade, assim como para todos os docentes e discentes que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a deus pela saúde e a força de vontade para enfrentar todos os obstáculos e nunca desistir.

Em segundo, agradeço toda a minha família, meu pai, Gideon Lima, minha mãe, Reinéria dos Navegantes, minhas irmãs, Géssica Hamilly e Beatriz Moura, e meus avós materno, Cicero Mendonça (in memoriam) e Maria Garcia, e aos meus avós paterno, Lucia Pereira e Gezi Gomes.

Ao professor Rudson de Souza por toda orientação, paciência e atenção para que esse trabalho desse tudo certo.

Agradeço a todas as pessoas que contribuíram para a realização deste trabalho, em especial Renata Marinho e Thuanny Ravelly.

A todos vocês, meu muito obrigado!

“A persistência é o caminho do êxito”.

Charles Chaplin

RESUMO

O hidrogênio é um combustível visto com bons olhos e tido por muitos como o combustível do futuro, por ser uma substância limpa e abundante. A eletrólise é uma reação de oxirredução não espontânea, na qual precisa da energia elétrica para dissociação dos compostos. Essa forma de produção de hidrogênio é considerada cara, porém ainda é bastante utilizada nas indústrias. Existem grandes dificuldades na inserção do hidrogênio no mercado também devido ao seu armazenamento. Este trabalho tem como objetivo geral analisar as características de eficiência da produção de hidrogênio por eletrólise. Houve uma corrosão bastante elevada nos eletrodos e engate rápido. De acordo com os resultados obtidos, pode-se concluir que a tensão máxima analisada 13 V, dentre as tensões analisadas é a melhor para se produzir a maior quantidade de gás hidrogênio.

Palavras chave: Hidrogênio, Eletrólise, Tensão.

ABSTRACT

Hydrogen is considered by many as the fuel of the future, being a clean and abundant substance. Electrolysis is a non-spontaneous oxidation reaction in which it needs the electrical energy to dissociate the compounds. This form of hydrogen production is considered expensive, but is still widely used in industries. There are great difficulties in the insertion of hydrogen in the market also due to its storage. This work aims to analyze the efficiency characteristics of hydrogen production by electrolysis. There was a very high corrosion on the electrodes and quick coupling. According to the obtained results, it can be concluded that the analyzed maximum voltage 13 V, among the analyzed voltages, is the best one to produce the largest amount of hydrogen gas.

Key words: Hydrogen, Electrolysis, Voltage.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1.OBJETIVOS	11
1.1.1.Objetivo Geral	11
1.1.2.Objetivo Específico	11
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	12
2.1.O HIDROGÊNIO	12
2.2.PROCESSOS DE OBTENÇÃO DO HIDROGÊNIO.....	13
2.2.1.Eletrólise	14
2.2.2.Biofotólise	16
2.2.2.1.Biofotólise direta	17
2.2.2.2.Biofotólise indireta	17
2.2.3.Reforma-vapor.....	17
2.3.ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO	17
2.3.1.Reservatório de Gás Hidrogênio Comprimido	18
2.3.2.Reservatório de Hidrogênio Líquido	19
2.3.3.Armazenamento através de hidretos metálicos	20
2.4.APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO	21
3.METODOLOGIA.....	23
3.1.MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.RESULTADOS E DISCUSSÕES	29
4.1.RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E TEMPO	30
4.2.RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E AMPERAGEM.	31
4.3.PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO	32
4.3.1.Tensão de 10 V	32
4.3.2.Tensão de 12 V	32
4.3.3.Tensão de 13 V	33
4.4.CORROSÃO NOS MATERIAIS	35
5. CONCLUSÕES	36
REFERÊNCIAS	37

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Eletrólise da água.....	15
Figura 2: Gás comprimido a alta pressão	19
Figura 3: Tanques de armazenamento.....	20
Figura 4: Armazenamento em hidretos metálicos.....	21
Figura 5: Corte dos recipientes.....	24
Figura 6: Recipientes de vidro cortados.....	25
Figura 7: Bacia de vidro.....	25
Figura 8: Tampa dos recipientes e eletrodos.....	25
Figura 9: Engate rápido.....	26
Figura 10: Mangueiras	26
Figura 11: Reservatório padrão de polietileno.....	26
Figura 12: Fonte de tensão	27
Figura 13: Aparato montado.	27
Figura 14: Solução final da eletrólise.....	29
Figura 15: Relação tensão e tempo.	30
Figura 16: Relação Tensão e Amperagem.	31
Figura 17: Produção de hidrogênio na tensão de 10 V.	32
Figura 18: Produção de hidrogênio na tensão de 12 V.	33
Figura 19: Produção de hidrogênio na tensão de 13 V.	34
Figura 20: Corrosão no eletrodo.	35
Figura 21: corrosão no engate rápido.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Poder calorífico de diferentes combustíveis.....	12
Tabela 2: Principais fontes de hidrogênio, tipo de energia usada para sua obtenção, e os seus respectivos processos.....	14
Tabela 3: Aplicações do hidrogênio na indústria.	22
Tabela 4: Materiais utilizados.	23

1. INTRODUÇÃO

O estudo e análise da produção de hidrogênio por meio da eletrólise vêm sendo feito há muitos anos. Devido o hidrogênio ter um alto poder calorífico (cerca de três vezes mais que derivados do petróleo), ser uma substância limpa, renovável e ser considerado melhor que os combustíveis fósseis, como por exemplo, o óleo diesel, gasolina, etc. Este combustível é visto com bons olhos e tido por muitos como o combustível do futuro. Devido à póstera escassez do petróleo, esse combustível renovável se torna então uma alternativa para redução dos custos e para a diminuição da poluição ambiental (MAIA, 1976).

Um dos grandes problemas da utilização do hidrogênio atualmente é o seu transporte e armazenamento. Em seu estado gasoso ocupa muito espaço, com perigo de vazamentos e explosão. Ele também pode estar no estado líquido, ocupando um espaço 700 vezes menor do que se estivesse em forma de gás, mas para isto ele tem que estar armazenado numa temperatura de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, em sistemas de armazenamento conhecidos como “sistemas criogênicos”. Acima desta temperatura, o hidrogênio não pode ser liquefeito, mas pode ser armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão, o que acaba dificultando bastante a sua utilização (CONELHEIRO e LUCIANO, 2012).

Não diferente dos outros combustíveis, não é comumente encontrado separadamente, mas sim ligado a compostos orgânicos e a moléculas de água, fazendo-se necessária uma reação química para a obtenção do gás puro.

Existe bastante expectativa a respeito do hidrogênio, pois a humanidade depende dele em um futuro próximo, onde poderá ser responsável por mover indústrias, carros e aviões.

Tendo em vista estas afirmações, vamos analisar a obtenção do hidrogênio, através do método da eletrólise com a utilização de diferentes tensões de uma forma economicamente viável e simples, com o intuito de se obter a melhor produção e ser o mais eficiente possível, extraindo o máximo desta substância tão rica.

O hidrogênio possui diversas aplicações tanto na física quanto na engenharia, com grande presença nas indústrias, como por exemplo, a produção de soda cáustica e cloro. Esta energia é também bastante utilizada como combustível para meios aeroespaciais.

Grande parte do hidrogênio produzido atualmente no mundo é utilizado como matéria-prima na fabricação de produtos como os fertilizantes, na conversão de óleo líquido em margarina, na fabricação de plásticos e no resfriamento de geradores e motores (CONELHEIRO E LUCIANO, 2012).

No Brasil o Ford Fusion Hybrid foi o primeiro veículo totalmente híbrido à venda, ele tem dois motores: um movido à combustão e outro elétrico. Porém, o alto preço, no qual chegou a alcançar os R\$ 133.900,00, se torna um carro inviável para quase toda a população. Entretanto a montadora admite que o carro, a princípio, não é voltado para o público ambientalista em geral, mas, para os interessados por novas tecnologias (CONELHEIRO E LUCIANO, 2012).

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Analisar as características de eficiência da produção de hidrogênio por eletrólise.

1.1.2. Objetivo Específico

- Analisar como se desenvolve a produção de energia através do hidrogênio;
- Identificar a importância da produção da energia limpa através do hidrogênio para o meio ambiente;
- Desenvolver testes que demonstrem a decomposição da água para a obtenção do hidrogênio;
- Identificar suas aplicabilidades técnicas e seus benefícios econômicos;
- Verificar a melhor tensão para a produção do hidrogênio;

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. O HIDROGÊNIO

Por mais que o hidrogênio seja encontrado juntamente com outro composto, ele é a substância mais abundante da natureza. Visto que as moléculas de hidrogênio são muito leves, fazendo com que escapem facilmente da atmosfera terrestre para o espaço (LAMTEC, 2017).

O hidrogênio possui um alto poder calorífico de combustão [141.800 kJ/kg segundo Çengel (2013)], diante deste fato, é considerado uma grande forma de combustível alternativo. Na Tabela 1 podemos ver a diferença do poder calorífico do hidrogênio comparado aos outros combustíveis.

Tabela 1: Poder calorífico de diferentes combustíveis.

Combustível:	Valor do poder calorífico superior (a 25°C e 1 atm)	Valor do poder calorífico inferior (a 25°C e 1 atm)
Hidrogênio	141,86 KJ/g	119,93 KJ/g
Metano	55,53 KJ/g	50,02 KJ/g
Propano	50,36 KJ/g	45,6 KJ/g
Gasolina	47,5 KJ/g	44,5 KJ/g
Gasóleo	44,8 KJ/g	42,5 KJ/g
Metanol	19,96 KJ/g	18,05 KJ/g

Fonte: adaptado SANTOS e SANTOS (2004).

Um dos pontos que fortalece ainda mais o crescimento do hidrogênio, além de ser um bom combustível, quando se combina com oxigênio forma água, fazendo com que não gere poluentes para atmosfera, favorecendo a natureza.

O hidrogênio possui diversas aplicações, podendo ser usado tanto em motores de combustão interna como em células de combustível para a geração de energia. Também é bastante usado no meio aeroespacial, em indústrias, entre outras diversas aplicações. A tecnologia de motores de combustão interna já é bem desenvolvida, porém, sua eficiência é baixa se compararmos com a eficiência da célula de combustível.

A respeito das fontes de energia utilizadas para produção de hidrogênio, elas podem ser renováveis ou não renováveis. Temos como exemplos de fontes renováveis a energia hidráulica, a energia solar e a energia eólica. E como exemplos de energia não renovável, na qual podemos levar em consideração o petróleo e seus derivados, o gás natural e o carvão mineral, recursos minerais que sua formação leva milhões de anos, e o consumo ocorre de forma desordenada, levando para um futuro esgotamento. Porém, atualmente a fonte de energia mais utilizada é a não renovável, sendo esta fonte de energia responsável por 95% da produção do hidrogênio (LOPES, 2009).

Ainda de acordo com Lopes (2009), existem diferentes tipos de tecnologia para cada forma de produção de hidrogênio. Atualmente, a produção de hidrogênio acontece principalmente pela reforma de combustíveis, tendo destaque a produção por reforma-vapor do gás natural, e em menor escala também pela eletrólise da água.

A partir do momento após obtido o hidrogênio, o seu poder energético pode ser aplicado em uma diversidade de sistemas e tecnologias, seja na produção de calor, na fabricação de outros combustíveis, em veículos ou na produção de eletricidade na qual é onde se tem atualmente um grande interesse de aplicação (LOPES, 2009).

2.2. PROCESSOS DE OBTENÇÃO DO HIDROGÊNIO

O hidrogênio pode ser obtido tanto em grande escala, através de plantas especializadas, como também em pequena escala, como por exemplo, através da energia solar, energia elétrica, gás natural e outros meios. De acordo com Silva (2013), o hidrogênio pode ser produzido no local onde se faz necessário sua obtenção. A produção em grande quantidade é benéfica para o seu valor em escala e a localização industrial pode ser nas proximidades de áreas com grande oferta de água, necessário para que seja possível sua produção. Processos a partir de biomassa e carvão só podem ser empregados em larga escala.

Atualmente, devido o grande uso de máquinas para ocorrer à produção de hidrogênio, acaba encarecendo bastante a sua produção, tornando-o inviável comparado a combustíveis usados atualmente.

Diante do fato do hidrogênio não ser comumente encontrado separadamente sob condições de temperatura e pressão normal, é necessário à aplicação de métodos para a extração desta substância, como podemos ver alguns destes métodos na Tabela 2.

Tabela 2: Principais fontes de hidrogênio, tipo de energia usada para sua obtenção, e os seus respectivos processos.

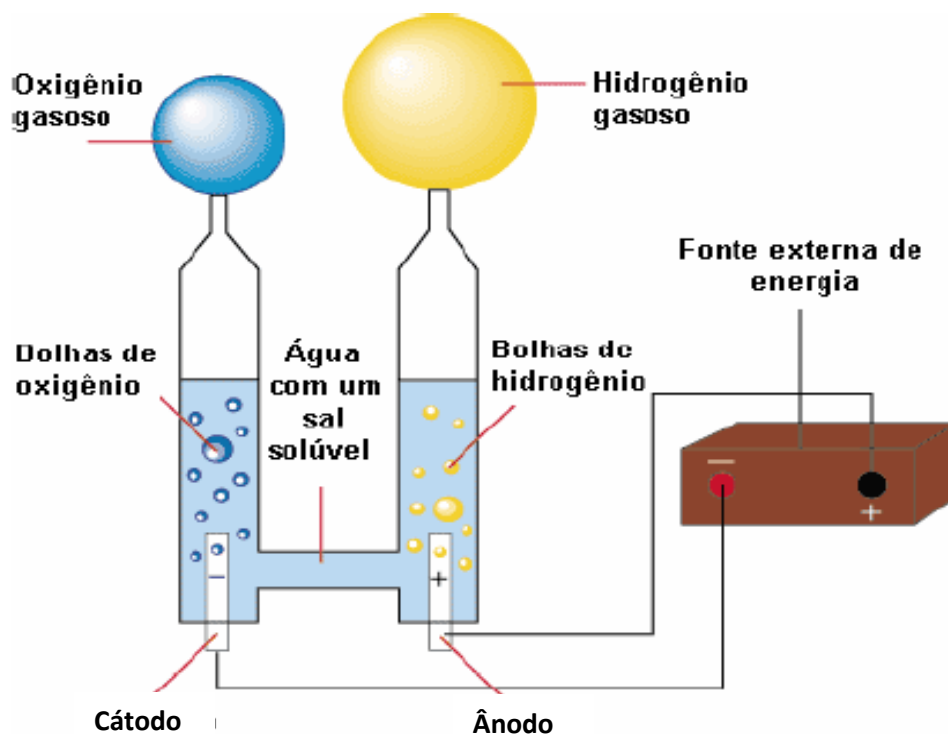
Fonte de H ₂	Energia	Processo
Água	Eletricidade	Eletrólise, Fotólise, Eletrólise do vapor, Decomposição Termoquímica ou Processo Fotoeletroquímico
Gás natural (rico em CH ₄)	Gás natural	Reforma catalítica ou craqueamento térmico
Petróleo	Petróleo	Reforma ou gaseificação do Petróleo
Carvão	Carvão	Reforma ou gaseificação do carvão
Etanol	Etanol	Reforma do etanol
Metanol	Metanol	Reforma do metanol
Biomassa	Biomassa	Gaseificação da biomassa
Biomassa ou lixo urbano	Calor	Biológico(biogás)
Bactérias fermentativas	Bactérias fermentativas	Fermentação de compostos orgânicos
Bactérias fotossintetizantes	Energia solar	Biofotólise
Hidrocarbonetos pesados	Hidrocarbonetos	Oxidação parcial

Fonte: adaptado PARIZZI (2008).

Dentre estas formas de obtenção de hidrogênio, a mais conhecida é a eletrólise.

2.2.1. Eletrólise

De acordo com Scalabrin (2015), a eletrólise da água consiste na passagem de uma determinada corrente elétrica para a quebra da molécula convertendo a água em oxigênio e hidrogênio, entretanto o processo de eletrólise é um processo considerado caro, levando em consideração a necessidade de uma grande quantidade de energia para quebrar a ligação da água, pois é considerada uma ligação forte, pode-se verificar tal processo na Figura 1.

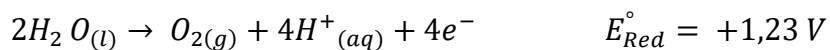
Figura 1: Eletrólise da água

Fonte: Adaptada Medeiros (2017).

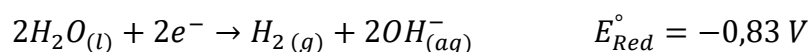
A eletrólise é uma reação de oxirredução não espontânea, na qual precisa da energia elétrica para dissociação dos compostos. Segundo Gomes. et. Al. (2012), a eletrólise é um processo eletroquímico, no qual foi descoberto pelo físico e químico Michael Faraday, e ocorre pela aplicação de uma tensão a um par de eletrodos imersos numa solução condutora.

A produção de hidrogênio por meio da eletrólise é bastante utilizada na indústria química para produção de diversos componentes bastante úteis, como os metais, onde temos o sódio, magnésio, potássio e o alumínio. Entretanto o uso da eletrolise não se restringe somente para produção dos metais, ela também é utilizada na produção dos ametais, como cloro e o flúor, e também para substâncias como o hidróxido de sódio (soda cáustica) e peróxido de hidrogênio (água oxigenada), onde é bastante usada a eletrólise.

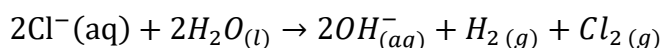
De acordo com Brady e Humiston (2012), a reação deste processo no anodo (oxidação) pode ocorrer das duas seguintes formas:



E no catodo, no qual reduz, é possível acontecer das seguintes formas:



Onde iremos obter a seguinte reação global,



Onde podemos notar que existe a produção do Hidróxido de sódio (NaOH), mais conhecido como soda caustica.

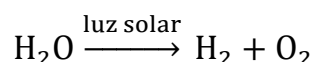
A eletrólise de alta temperatura é outra forma de se realizar a eletrólise. Quando operada na faixa de 800 a 1000°C proporciona a vantagem de uma menor necessidade de energia específica (aproximadamente 35% inferior), apresentando uma variação de taxa de 2,6 a 3kWh/Nm³ de hidrogênio produzido. Ao contrário da eletrólise comum, que utiliza somente a corrente elétrica para obtenção do hidrogênio a partir da água, a eletrólise de alta temperatura aumenta a eficiência do processo por conter uma fonte de calor externa (LIBERATO NETO, 2007).

2.2.2. Biofotólise

A biofotólise define-se como o processo que diante da incidência da luminosidade sobre um sistema biológico resulta na dissociação de um substrato, geralmente água, para produzir hidrogênio. Existem dois tipos de biofotólise, a direta e a indireta. (GOMES. et. Al. 2012). Uma das grandes desvantagens deste método é que tanto na biofotólise direta quanto na indireta, necessita de iluminação a todo o momento.

2.2.2.1. Biofotólise direta

Conforme Gomes. et. Al. (2012), a biofotólise direta para a obtenção de hidrogénio nada mais é que um processo biológico no qual utiliza sistemas de microalgas fotossintetizantes para conversão de energia solar em energia química na forma de hidrogénio, onde a grande vantagem desta produção é a fácil disponibilidade de energia solar, permitindo que a água, seja convertida em oxigénio e hidrogénio. A reação química ocorre da seguinte forma:



2.2.2.2. Biofotólise indireta

Este processo ocorre em duas etapas separadas. Primeiramente o CO_2 é fixado em hidratos de carbono de armazenamento pelo microrganismo, crescendo em tanques abertos de baixo custo. O hidrato de carbono acumulado é então convertido para H_2 numa segunda etapa anaeróbia à luz em fotobiorreatores ou na fermentação escura em tanques (GOMES, C. et. Al. 2012).

2.2.3. Reforma-vapor

Segundo Lopes (2009) atualmente, a produção de hidrogênio é feita principalmente pela reforma de combustíveis, destacando-se a reforma-vapor do gás natural.

Na reforma-vapor, processo utilizado em grande escala nas indústrias, a fonte de hidrogênio são os próprios combustíveis utilizados (a princípio, qualquer hidrocarboneto pode ser processado para a produção de hidrogênio: etanol, Diesel, querosene, gasolina, etc.), (LOPES, 2009).

A produção de hidrogênio por meio da reforma se faz necessário um sistema separador de gases e um sistema de purificação do gás, o que acaba elevando bastante o custo deste meio de produção (BOTTON, 2007).

2.3. ARMAZENAMENTO DO HIDROGÊNIO

O maior desafio no projeto de tanques de hidrogênio é o de se poder armazenar a maior quantidade de hidrogênio possível em um tanque de combustível que ocupe o menor espaço, peso e custo (BACH, 2013).

Atualmente ainda se tem o pensamento de que o hidrogênio é perigoso, visto que se dispersa facilmente no ar, e possui um alto poder calorífico e baixa densidade, comparado a outros combustíveis. De fato, características como as suas são o suficiente para tornar seu manuseio e armazenamento bastante complicado, requerendo grandes cuidados.

Em temperatura e pressão ambiente, o hidrogênio apresenta-se na forma de um gás incolor, inodoro, e muito mais leve que o ar. Ele pode ser armazenado de diferentes formas, entretanto em seu estado gasoso ocupa muito espaço, com perigo de vazamentos e explosão, mas, de acordo com Conelheiro e Luciano (2012), ele também pode estar no estado líquido, ocupando um espaço 700 vezes menor do que se estivesse em forma de gás, mas para isto ele tem que estar armazenado numa temperatura de $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$, em sistemas de armazenamento conhecidos como “sistemas criogênicos”. Acima desta temperatura, o hidrogênio não pode ser liquefeito, mas pode ser armazenado em forma de gás comprimido em cilindros de alta pressão, o que acaba dificultando bastante a sua utilização, pois o torna um processo caro.

O hidrogênio líquido é bem mais denso que o gasoso, porém ainda é muito mais volumoso que a gasolina. Sistemas com as mesmas quantidades de energia podem ser 4 a 10 vezes mais pesados do que um tanque de gasolina (SANTOS e SANTOS, 2004).

O hidrogênio armazenado na forma de gás comprimido pode ser fornecido às indústrias e estabelecimentos de investigações, podendo estes cilindros ou tanques serem facilmente adquiridos em várias dimensões, como também para pequenos equipamentos como pilhas de células de combustível. Para o hidrogênio nestas condições, pode ser utilizada a mesma tecnologia usada para o armazenamento do gás natural (SANTOS e SANTOS, 2004).

Atualmente têm-se como uma das principais formas de armazenamento as seguintes formas:

- Reservatórios de Gás Hidrogênio Comprimido;
- Reservatórios para Hidrogênio Líquido;
- Hidretos Metálicos;

2.3.1. Reservatório de Gás Hidrogênio Comprimido

De acordo com LAMTEC (2017) o armazenamento por este método de gás comprimido requer tanques de altíssimas pressões, atualmente existem, e são utilizados tanques que suportam altas pressões que variam entre 35 e 70MPa.

Sistemas de armazenamento como este, de gás hidrogênio comprimido a alta pressão, são os mais utilizados para o armazenamento (Figura 2). A grande maioria dos automóveis movidos por células a combustível são a partir desta forma de armazenamento, no qual é feito em cilindros (GOMES NETO , 2017).

O hidrogênio pode ser armazenado nos tanques de duas formas, pode ser pressurizado por compressão ou ser gerado logo sob pressão e armazenado após ser obtido. A quantidade de energia que se é gasta para comprimir o hidrogênio é bastante significativa, pois corresponde a cerca de 10% da energia do hidrogênio em que se foi armazenado (LAMTEC, 2017).

Figura 2: Gás comprimido a alta pressão



Fonte: GOMES NETO (2017).

2.3.2. Reservatório de Hidrogênio Líquido

Este método de armazenamento otimiza bastante a forma de armazenamento, já que o hidrogênio no estado líquido ocupa bem menos espaço, reduzindo também o seu peso, fazendo com que vários problemas sejam resolvidos. Entretanto, por mais que resolva muitos outros problemas, ele gera outro grande, visto que para ele se encontrar no estado líquido o hidrogênio deve estar em temperaturas abaixo de $(-253\text{ }^{\circ}\text{C})$, em tanques extremamente isolados, como o da Figura 3. Esses tanques não precisam ser altamente resistentes, ao contrario dos cilindros de alta pressão (GOMES NETO, 2017).

Figura 3: Tanques de armazenamento



Fonte: GOMES NETO (2017).

Porém, todos esses tanques, por mais que possuam um excelente isolamento, eles ainda permitem a troca de calor com o ambiente, mesmo que esta transferência de calor seja mínima, ela ainda existe, isto faz com que parte do hidrogênio evapore, ocasionando percas, gerando assim um prejuízo (GOMES NETO, 2017).

Segundo LAMTEC (2017), esse método de armazenamento é, sobretudo, de grande importância quando o destino da energia é para grandes distâncias, como por exemplo em voos espaciais, na qual esta sendo bastante utilizada atualmente.

Juntamente com o gás hidrogênio comprimido, estas formas de armazenamento são as tecnologias mais usadas nos dias de hoje, também levando em consideração o baixo custo comparado a outras formas de armazenamento (LAMTEC, 2017).

2.3.3. Armazenamento através de hidretos metálicos

Nestes sistemas de armazenamento, por meio de hidretos metálicos, funcionam de maneira simples, onde alguns metais absorvem o hidrogênio no estado gasoso sob condições de alta pressão e temperaturas um pouco alta, para assim formar os hidretos metálicos (Figura 4). E então o hidrogênio passa a fazer parte da composição desse metal, e só é liberado após exposição a uma mais alta temperatura e uma baixa pressão (GOMES NETO, 2017).

Uma das grandes vantagens desse meio de armazenamento, se da pelo fato de que após o armazenamento do hidrogênio, onde ele passa a fazer parte da composição do material,

nada mais é preciso ser feito para controlar seu armazenamento, ao contrario do armazenamento do hidrogênio liquido, onde deve permanecer exposto a uma baixíssima temperatura (GOMES NETO, 2017).

Existem vários tipos de hidretos metálicos, alguns exemplos são metais como o magnésio, níquel, aço e titânio. Onde se diferenciam pela sua capacidade e custo de armazenamento, no qual se destacam os hidretos de alta temperatura, que são mais baratos e conseguem armazenar um maior volume de hidrogênio, porém exige uma alta temperatura para liberar o hidrogênio. E os hidretos de baixa temperatura, são mais caros, mas, necessitam de uma menor temperatura para liberar-se o hidrogênio, facilitando o processo, mas sendo inviável pelo alto custo (GOMES NETO, 2017).

Figura 4: Armazenamento em hidretos metálicos.



Fonte: GOMES NETO (2017).

2.4. APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO

De acordo com W.LEPECKI (2011), o uso do hidrogênio aplica-se tanto nas industriais, assim como também para combustível de foguetes e propulsão para cápsulas espaciais. Sem falar da aplicação em automóveis, onde está havendo grandes pesquisas para a futura implantação deste combustível limpo em automóveis.

O uso do hidrogênio para obtenção de outros materiais está cada vez mais presente na indústria, é utilizado na produção de amônia, de ácido clorídrico, na síntese do metanol e em balões-sonda para pesquisas na alta atmosfera. Também é usado na produção de

alimentos, como na hidrogenação de óleos vegetais para obtenção de margarinas (INFOSOLDA, 2017).

Atualmente temos como exemplo a bomba de hidrogênio da Coreia do Norte, na qual esta sendo bastante noticiada. Esta bomba nada mais é que uma arma termonuclear de dois estágios, visto que, quando atingida o seu segundo estágio pode causar explosão de uma enorme dimensão (CAPUTO, 2017).

Estes dois processos, ao qual a bomba esta submetida, são dois estágios nucleares diferentes: a fissão e a fusão. No estágio da fissão nuclear, temos como exemplo as duas bombas lançadas pelos Estados Unidos nos ataques às cidades de Hiroshima e Nagasaki. Entretanto, a bomba de hidrogênio é ainda mais potente, pois após a fissão, ocorre outra explosão ainda maior, que é a fusão nuclear (CAPUTO, 2017).

Na Tabela 3 pode-se ver algumas áreas de aplicações do hidrogênio.

Tabela 3: Aplicações do hidrogênio na indústria.

SEGMENTO	APLICAÇÃO
Refino do petróleo	Remoção de enxofre de combustíveis (dessulfurização) e hidrocrackeamento.
Processos químicos	Fabricação de amônia, metanol, cloro e soda cáustica.
Indústria farmacêutica	Fabricação de sorbitol, utilizado em cosméticos, vitaminas, surfactantes e adesivos.
Indústria alimentícia	Utilizado na hidrogenação de óleos e no aumento da saturação de gorduras.
Processos metalúrgicos	Agente redutor de minérios metálicos.
Indústria eletrônica	Utilizado no processo de fabricação de semicondutores.
Geração de energia	Utilizado como fonte de energia térmica em queimadores ou como insumo de células a combustível.

Fonte: adaptada CRUZ (2010).

3. METODOLOGIA

3.1. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, será abordado a metodologia da pesquisa desenvolvida, mostrando os materiais e métodos utilizados, assim como, os procedimentos e análises realizados.

A metodologia usada foi à pesquisa bibliográfica e experimental. Os ensaios desta pesquisa foram realizados no laboratório de termo fluidos, da Universidade Federal Rural do semi-árido (UFERSA) da cidade de Caraúbas. Estes ensaios verificam a melhor tensão para se produzir o hidrogênio por meio da eletrólise.

Para desenvolver os ensaios desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais apresentados na Tabela 4:

Tabela 4: Materiais utilizados.

MATERIAIS	ESPECIFICAÇÕES
Bacia de vidro	Recipiente circular transparente de vidro, com capacidade de 1,5 L.
Dois eletrodos	Tipo inox, com dimensões de 100 x 30 x 3 mm
Dois recipientes de vidro	Foram utilizados recipientes de produtos de conserva.
Fios condutores	Fios flexíveis de 1,5 mm de diâmetro.
Fonte de tensão	Fonte da marca minipa, do tipo MPS-3503D
Mangueiras	Com diâmetro externo de 8 mm
Saco plástico	Reservatório padrão de polietileno
Engate rápido de alta pressão	Para mangueiras de 8 mm
Água	1,5 L
NaCl	100 g

Fonte: o autor.

Todos os materiais expostos na Tabela 4 compõe o aparato. Para fabricação e montagem do aparato, utilizou-se um método de corte nos recipientes de vidro, no qual é desenvolvido a partir da criação de uma resistência, que é feita com um fio de aço enrolado na

forma de espiral no recipiente e conectada a rede elétrica de 220 V, sendo desligada dentro de aproximadamente 3 segundos, em seguida liga novamente a rede elétrica e deixa um pouco mais de tempo (cerca de 5 segundos), e pela terceira vez repete-se o processo, deixando cerca de 7 segundos o circuito conectado. Após todo este procedimento cria-se a resistência para o corte dos recipientes.

Logo em seguida, os recipientes são girados sobre a resistência durante um pequeno intervalo de tempo para que ocorra o corte dos recipientes (Figura 5).

Figura 5: Corte dos recipientes.



Fonte: O autor.

Após este processo é adicionado e colado um suporte de madeira para fixar os recipientes, como se pode observar na Figura 6.

Figura 6: Recipientes de vidro cortados.



Fonte: O autor.

Os recipientes de vidro ficam inseridos internamente na bacia, onde, dentro de cada recipiente irá existir um eletrodo que se encontram anexados as tampas dos recipientes. Tais materiais podem ser observados na Figura 7 e na Figura 8.

Figura 7: Bacia de vidro.



Fonte: O autor.

Figura 8: Tampa dos recipientes e eletrodos.



Fonte: O autor.

O método para produção do hidrogênio a ser utilizado no experimento é a eletrólise. Todo o gás hidrogênio produzido parte dos eletrodos, sobe, e passa pelo furo do Engate rápido (Figura 9) que dão acesso às mangueiras (Figura 10), o gás percorre o interior da mangueira e armazena-se no Reservatório padrão de polietileno, ilustrado na Figura 11.

Figura 9: Engate rápido.



Fonte: O autor.

Figura 10: Mangueiras.



Fonte: O autor.

Figura 11: Reservatório padrão de polietileno.



Fonte: O autor.

Na Figura 12, encontra-se a fonte de tensão, na qual irá gerar a corrente elétrica e fazer com que aconteça a eletrólise.

Figura 12: Fonte de tensão.



Fonte: O autor.

Com todos estes materiais pôde-se montar o aparato para sequência do procedimento experimental, no qual é mostrado na Figura 13:

Figura 13: Aparato montado.



Fonte: o autor.

O procedimento experimental é feito de uma forma bem simplificada. Entretanto assim como qualquer outra pesquisa experimental é necessário vários testes para se obter total certeza da análise feita.

Determinam-se três tensões a serem utilizadas nos procedimentos, que são 13 V, 12 V e 10 V, para assim verificar qual a melhor tensão para se produzir um maior volume de hidrogênio em um menor intervalo de tempo. Para cada tensão será realizado três ensaios, e com isso diminuir os erros dos experimentos.

A prática experimental é feita da seguinte forma, primeiro preparamos todo o aparato, colocamos a medida de água em uma garrafa, pesamos o sal com massa fixada em 100 g, e despejamos na garrafa com água, e agitamos até se homogeneizar, em seguida colocamos a solução na bacia de vidro e ligamos a fonte de tensão, onde irá ocorrer à reação química devido à corrente elétrica, fazendo-se então formar o gás hidrogênio, que irá se armazenar no Reservatório padrão de polietileno.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O tempo de cada experimento foi medido até que se enchesse todo o saco plástico. Para se conhecer o volume do saco fez-se alguns cálculos. Primeiro pesou-se a massa do saco plástico, e em seguida a massa de água que coube no saco. Sabendo-se a densidade da água destilada, na qual segundo NCB (2017) a 21°C é 0,99702 g/ml e a massa da água já encontrada, pode-se encontrar o volume do saco plástico, que foi de 126cm³.

A solução após todo o processo da eletrólise é mau cheirosa, e detentora de uma cor forte, devido a oxidação do eletrodo, como pode-se observar na figura abaixo.

Figura 14: Solução final da eletrólise.



Fonte: o autor.

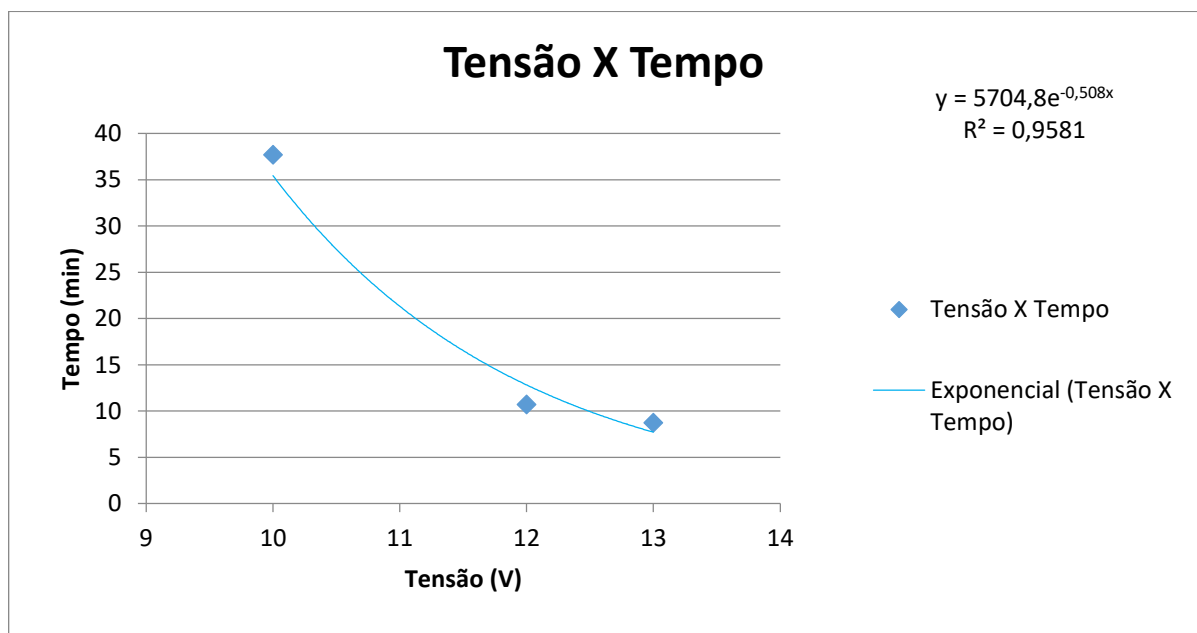
Inicialmente, nos testes do funcionamento do aparato como, vedação, e análise da produção, havia sido usado um eletrodo com dimensões menores do que o utilizado nos experimentos deste trabalho, e foi notado que a produção com o eletrodo maior foi bem mais satisfatória.

4.1. RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E TEMPO

A relação entre tensão e tempo é inversamente proporcional, ou seja, na medida em que aumenta a tensão, menor será o tempo de produção do gás hidrogênio, diminuindo assim os custos de produção.

Levando em consideração os três ensaios realizados para cada tensão estabelecida, que foram 13 V, 12 V e 10 V, um tempo médio respectivamente de 8,72 min, 10,66 min, 37,66 min. Tais resultados podem ser verificados na Figura 15.

Figura 15: Relação tensão e tempo.



Fonte: o autor.

4.2. RELAÇÃO ENTRE TENSÃO E AMPERAGEM.

A relação entre tensão e amperagem pode ser explicada a partir da primeira lei de Ohm, mostrada abaixo.

$$V = i \cdot R$$

Onde:

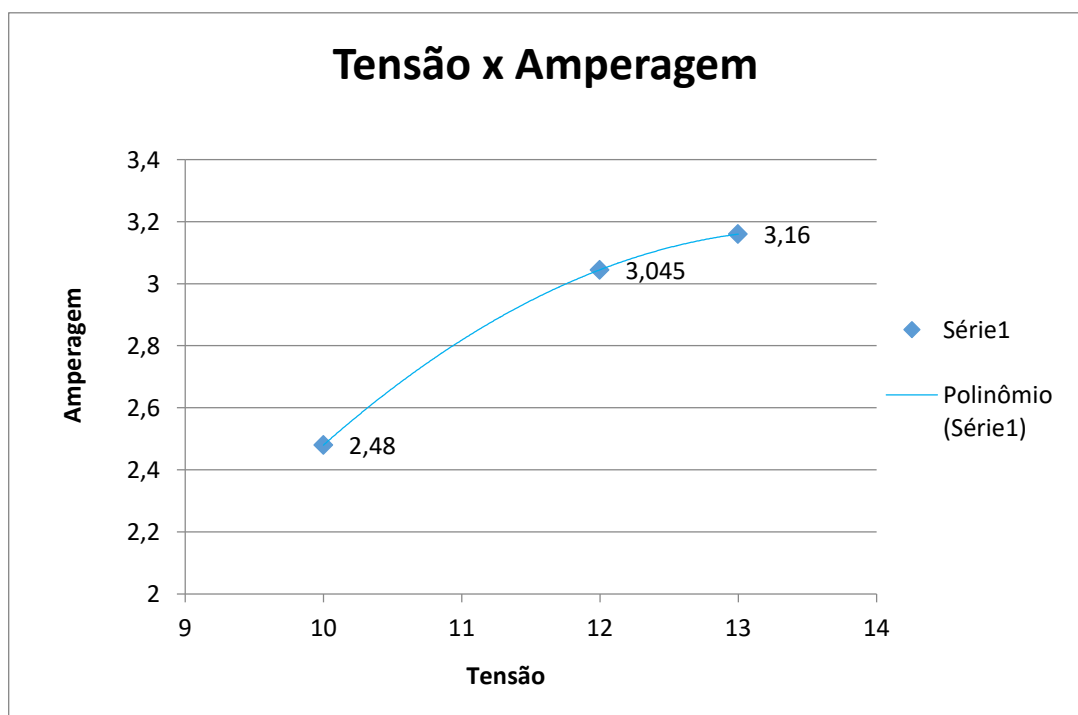
V = Tensão (dada em Volts “V”)

i = Corrente (dada em Amperes “A”)

R = Resistência (dada em Ohms “Ω”)

Pode-se observar tanto na equação anterior, como na Figura 16, que na medida na qual aumenta-se a corrente (i), aumenta também a tensão (V), pois estas são grandezas diretamente proporcionais. Tais fatos foram observados no experimento, seguindo a teoria de Ohm.

Figura 16: Relação Tensão e Amperagem.



Fonte: o autor.

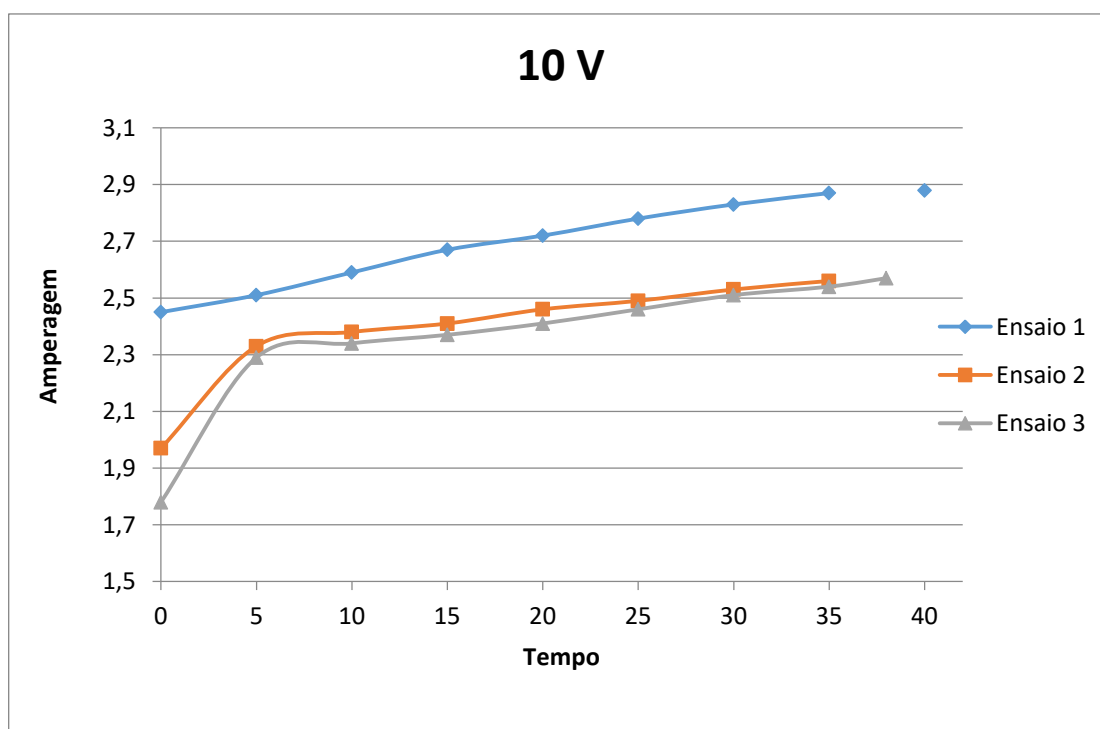
4.3. PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO

4.3.1. Tensão de 10 V

Na produção de hidrogênio sob a tensão de 10 V, observou-se o maior tempo médio de produção (37,66 min), para encher um saco plástico de volume $1,26376 \times 10^{-4} \text{ m}^3$.

Consequentemente eleva-se bastante o custo desta produção devido o maior tempo de energia utilizada, tornando esta tensão inviável para produção. Os resultados experimentais podem ser vistos na Figura 17 abaixo.

Figura 17: Produção de hidrogênio na tensão de 10 V.



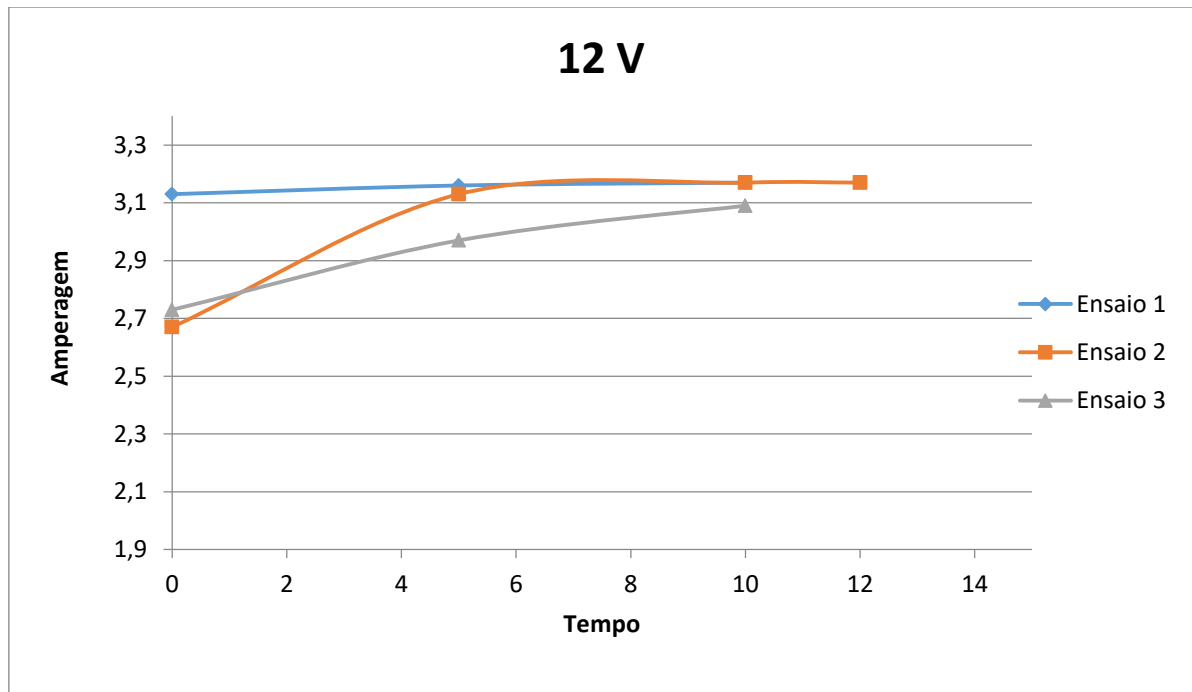
Fonte: o autor.

4.3.2. Tensão de 12 V

Já na tensão de 12 V, constatou-se um tempo médio de produção (10,66 min) consideravelmente menor comparado ao de 10 V (37,66 min). Fazendo com que diminua os custos de produção, tornando esta tensão mais propícia para produção dentre as duas até aqui analisadas.

Na Figura 18 pode-se ver os três ensaios realizados, para obter-se o tempo médio, fazendo-se com que diminua o erro.

Figura 18: Produção de hidrogênio na tensão de 12 V.



Fonte: o autor.

4.3.3. Tensão de 13 V

Na tensão de 13 V foi onde se obteve o resultado mais satisfatório, o saco plástico de volume já mencionado anteriormente, encheu em um tempo médio de 8,72 min, tornando esta tensão a ideal dentre as três tensões analisadas, pois produz o hidrogênio mais rapidamente e consome menos energia.

Através da equação $Q = i \cdot t$, onde;

Q = carga elétrica, sendo sua unidade coulomb (C)

i = corrente elétrica, sendo sua unidade o ampère (A)

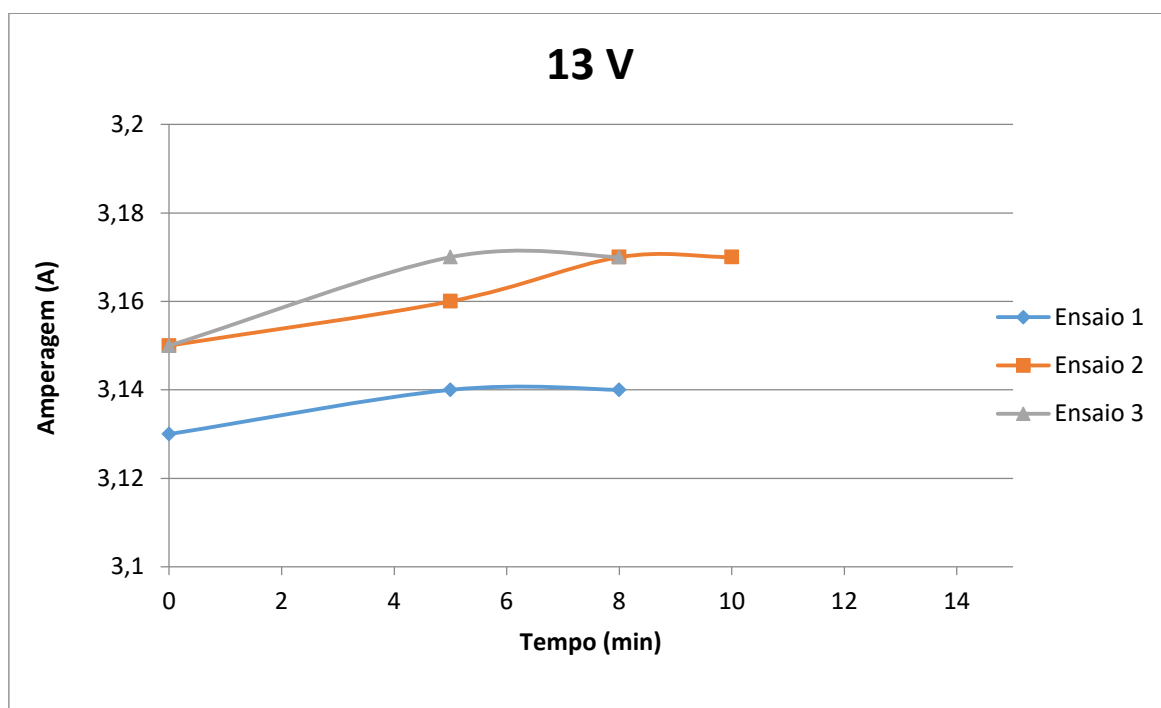
t = tempo de passagem da corrente em segundos (s)

Pode-se perceber que quanto maior a corrente, maior a quantidade de carga, então, consequentemente terá uma produção mais rápida, devido o estímulo das cargas.

Durante os experimentos sob as três tensões, notou-se uma alta variação na corrente (i), entretanto a que se obteve uma menor variação foi à tensão de 13 V, embora tenha tido um menor tempo. A massa de hidrogênio obtida sob esta tensão foi de $2,83 \times 10^{-4}$ g.

Na Figura 19 se pode observar os três ensaios realizados, como também os seus respectivos tempos.

Figura 19: Produção de hidrogênio na tensão de 13 V.



Fonte: o autor.

4.4. CORROSÃO NOS MATERIAIS

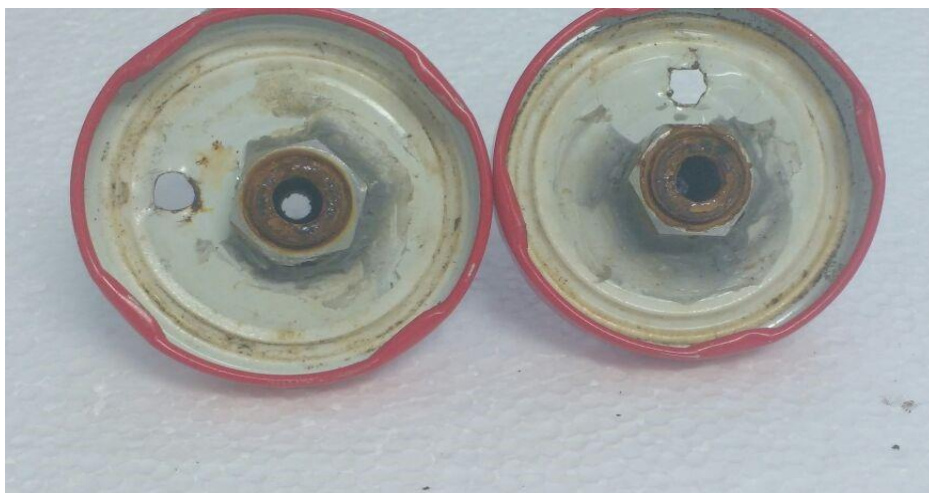
Ao fim dos experimentos, foi notada uma alta corrosão em alguns materiais utilizados, devido ao elevado teor corrosivo da substância salina, como também a tensão, afinal é uma eletrólise. Nas Figuras 20 e 21, pode observar tal corrosão.

Figura 20: Corrosão no eletrodo.



Fonte: o autor.

Figura 21: corrosão no engate rápido.



Fonte: o autor.

5. CONCLUSÕES

De acordo com as análises feitas, foi possível obter informações importantes diante dos resultados encontrados. Os resultados apresentados e as discussões conduziram às seguintes conclusões:

- Foi constatado que a tensão máxima analisada (13 V), onde se encontra a maior amperagem média (3,16 A), dentre as tensões analisadas é a melhor para se produzir a maior quantidade de gás hidrogênio.
- A tensão na qual obteve uma menor variação de corrente (i) foi 13 V.
- O eletrodo com maior dimensão produz mais rapidamente o hidrogênio, devido a maior passagem de cargas, pois quanto mais elétrons maior a redução.
- A menor tensão utilizada (10 V) foi a que variou mais a corrente, e obteve uma produção menos efetiva.

REFERÊNCIAS

BACH, Vanessa Rossato. **Dimensionamento da capacidade de produção de hidrogênio a partir da energia vertida turbinável de itaipu e sua utilização em veículos automotivos**. Universidade Federal do Paraná. Trabalho de conclusão de curso (Graduação). 2013.

BOTTON, Janine Padilha. **Líquidos iônicos como eletrólitos para reações eletroquímicas**. 2007. 191 f. Tese (Doutorado) - Curso de Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

BRADY, J. E.; HUMISTON, G. E. **Química Geral**. 2.ed. vol.2 Rio de Janeiro: LTC, 2012, 662p.

CAPUTO, Victor. **Coreia do Norte diz ter a Bomba H. Por que isso é apavorante**. Disponível em: <<https://exame.abril.com.br/ciencia/o-que-e-e-como-funciona-uma-bomba-de-hidrogenio/>>. Acesso em: 27 set. 2017.

ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A.. **Termodinâmica**. 7. Ed, Amgh, 2013.

CONELHEIRO, Luis Thiago Panage; LUCIANO, Arquimedes. **Desenvolvimento de um sistema gerador de hidrogênio gasoso para utilização como combustível alternativo em veículos automotores**. Disponível em: <http://www.cesumar.br/prppge/pesquisa/mostras/vi_mostra/luis_thiago_panage_conelheiro.pdf>. Acesso em: 13 maio 2017.

CRUZ, Flávio Eduardo da. **Produção de hidrogênio em refinarias de petróleo: avaliação exergética e custo de produção**. 2010. 184 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GOMES NETO, Emilio Hoffmann. **Armazenamento de Hidrogênio**. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/celula_combustivel/armazenamento_de_hidrogenio.html>. Acesso em: 26 set. 2017.

GOMES, Carolina et al. **Vias renováveis de produção de Hidrogênio**. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~projfeup/cd_2012_13/files/REL_Q1Q2_01.PDF>. Acesso em: 29 set. 2017.

LAMTEC. **Energias renováveis**. Disponível em: <<http://www.lamtec-id.com/energias/hidrogenio.php>>. Acesso em: 20 set. 2017.

LIBERATO NETO, Roberto. **Geração e combustão do hidrogênio obtido através do processo de eletrólise da água**. 2007. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pme2600/2007/Artigos/Art_TCC_018_2007.pdf>. Acesso em: 24 set. 2017.

LOPES, Daniel Gabriel. **Análise Técnica e Econômica da Inserção da Tecnologia de Produção de Hidrogênio a Partir da Reforma de Etanol para Geração de Energia Elétrica com Células a Combustível**. 2009. 107 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2009.

MEDEIROS, William B.. **Métodos e Eletrólitos Utilizados na Produção de Hidrogênio**. Disponível em: <[https://unila.edu.br/sites/default/files/files/William Bartolomeu de Medeiros.pdf](https://unila.edu.br/sites/default/files/files/William%20Bartolomeu%20de%20Medeiros.pdf)>. Acesso em: 26 set. 2017.

NCB. **Densidade da água em diversas temperaturas**. 2017. Disponível em: <<http://www.newtoncbraga.com.br/index.php/almanaque/421-densidadeda-agua-em-diversas-temperaturas.html>>. Acesso em: 07 out. 2017.

PARIZZI, Jocemar Biasi. **Utilização avançada para capacidade excedente de sistemas de transmissão ccat para produção de oxigênio e hidrogênio**. 2008. 208 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

SANTOS, Fernando Miguel Soares Mamede dos; SANTOS, Fernando António Castilho Mamede dos. **O COMBUSTÍVEL “HIDROGÉNIO”**. 2004. Disponível em: <<http://www.ipv.pt/millennium/millennium31/15.pdf>>. Acesso em: 26 set. 2017.

SCALABRIN, Rafael Basso. **Viabilidade do uso do hidrogênio em grupo-geradores a etanol**. 2015. 41 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Fator - Faculdade Horizontina, Horizontina, 2015.

SILVA, Fernando Henrique G. Da. **Obtenção e uso de hidrogênio em célula de combustível para geração de energia limpa de fontes renováveis**. USP. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) - Curso de Engenharia Industrial Química. 2013.

W.LEPECKI. **A energia nuclear e a economia do hidrogênio**. 2011. Disponível em: <http://www.inee.org.br/download/eficiencia/Economia_Hidrogenio_Lepecki.pdf>. Acesso em: 27 set. 2017.