

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA INDUSTRIAL METALÚRGICA DE VOLTA REDONDA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL

ARMANDO TEIXEIRA NUNES

ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DE UM MAÇARICO  
OXI-HIDROGÊNIO UTILIZANDO ELETRÓLISE DA ÁGUA

VOLTA REDONDA

2019

ARMANDO TEIXEIRA NUNES

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DE UM MAÇARICO  
OXI-HIDROGÊNIO UTILIZANDO ELETRÓLISE DA ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ramos Stradiotto

Co-Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Patrícia Alves Carneiro

Co-Orientador: Prof. Dr. Afonso Aurélio de Carvalho Peres

Volta Redonda, RJ

2019

N972e

Nunes, Armando Teixeira, - ,

Estudo sobre a viabilidade técnico-econômica de um maçarico oxí-hidrogênio utilizando a eletrólise da água / Armando Teixeira Nunes. – Volta Redonda, RJ: 2019.

93 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Nelson Ramos Stradiotto

Co-orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Patrícia Alves Carneiro

Co-orientador: Prof. Dr. Afonso Aurélio de Carvalho Peres

Dissertação (Mestrado) – UFF, EEIMVR, PPGTA.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PGTA.2019.m.0463964770>

1. Produção de hidrogênio por eletrólise 2. Maçarico oxí-hidrogênio  
3. Análise de viabilidade 4. Produção intelectual I. Título II. Stradiotto,  
Nelson Ramos III. Carneiro, Patrícia Alves IV. Peres, Afonso Aurélio  
de Carvalho

CDD 665.81

Bibliotecária responsável: Roberta Campos – CRB7/6067

ARMANDO TEIXEIRA NUNES

**ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE TÉCNICA-ECONÔMICA DE UM MAÇARICO  
OXI-HIDROGÊNIO UTILIZANDO ELETRÓLISE DA ÁGUA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologia Ambiental.

Aprovada em 20 de março de 2019.

BANCA EXAMINADORA



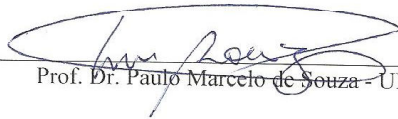
---

Prof. Dr. Nelson Ramos Stradiotto – UFF  
Orientador



---

Prof. Dr. Elivelton Alves Ferreira - UFF



---

Prof. Dr. Paulo Marcelo de Souza - UENF

Volta Redonda  
2019

Dedico este trabalho aos meus amados pais e irmãs em especial a minha Mãe, D. Eleuza, pois esta nunca se mostrou avessa a nada que me fizesse bem e sempre me incentivou em tudo na vida

## AGRADECIMENTOS

À minha família e em especial a minha Mãe, D. Eleuza Helena Remígio Teixeira Nunes, que sempre me apoiou e me incentivou nos estudos e em tudo que fiz na minha vida pessoal e profissional, assim como ao meu Pai, Paulo Afonso Cardozo de Carvalho Nunes (in Memoriam) que nunca poupou esforços financeiros e pessoais para me educar. Agradeço as minhas irmãs Lucila Maria Teixeira Nunes e Ivana Maria Teixeira Nunes. Obrigado Tatyanna Assumpção de Macedo, Saulo de Macedo Vernin, Isabela de Macedo Vernin e Dante Dias Nunes pela paciência e ajuda nos momentos difíceis.

Gostaria de agradecer imensamente ao meu Orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Nelson Ramos Stradiotto, minha Co-Orientadora Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Patrícia Alves Carneiro por terem acreditado no meu projeto e me incentivado muito na busca por novos dados científicos, pois esta dissertação foi sem dúvida alguma um desafio enorme e sem vocês nada disso teria acontecido. A orientação de vocês foi maravilhosa. Agradeço ainda ao meu outro Co-Orientador Prof<sup>o</sup> Dr. Afonso Aurélio de Carvalho Peres pelas imensas colaborações e ensinamentos financeiros que muito enriqueceram esta pesquisa e a deixaram mais completa ainda, dando a ela um toque especial.

Obrigado aos amigos Tereza Colombiano e Renan Colombiano pela assessoria técnica e pelo empréstimo de equipamentos que foram fundamentais para o estudo das temperaturas das chamas alcançadas pelo equipamento estudado.

Agradeço ainda a todos os Professores da PGTA que muito me ensinaram e ser uma pessoa mais completa. Agradeço a todos os técnicos da Universidade Federal Fluminense – UFF que me ajudaram muito, em especial aos técnicos de laboratório Celinho, Paralovo, Bonifácio e a graduanda e bolsista de Iniciação Científica Priscila Martini.

Quero agradecer aos amigos que fiz na turma da pós-graduação e no Laboratório de Química – T05 do Campus Atterrado.

“Quem não respeita a natureza  
Não dá força pra beleza  
Não considera a vida  
É pedra, não é gente ainda”

Pepeu Gomes

## RESUMO

Os maçaricos usualmente empregados desde o início do século XX na indústria e no comércio utilizam como elemento combustível e comburente, os gases acetileno ( $C_2H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ), respectivamente. Estes dois gases são adquiridos no mercado já processados para o seu uso imediato, principalmente para a realização de processos de soldagem, corte, aquecimento e fundição. O presente estudo apresenta a viabilidade técnica e econômica da utilização de um maçarico que emprega os gases hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ), obtidos via o processo de eletrólise da água, sendo que os gases gerados são utilizados imediatamente, sem a necessidade de armazenamento em vasos de pressão. Na indústria e no comércio, os maçaricos comumente utilizados são robustos e precisam periodicamente serem recarregados e o proprietário precisa armazenar o equipamento contendo os gases. O gás acetileno por ser um hidrocarboneto, quando queimado libera grandes quantidades de dióxido de carbono ( $CO_2$ ), gás este causador do efeito estufa e ao mesmo tempo o acetileno por ser altamente tóxico, exige um cuidado maior do operador do equipamento com relação a sua exposição aos gases, principalmente quando o mesmo é utilizado em espaços confinados e/ou reduzidos. Este estudo também visa analisar a viabilidade econômica do equipamento, usando para isso a comparação entre a aquisição de um equipamento tradicional e o equipamento construído e pesquisado. O estudo econômico ainda faz uma comparação entre o custo da produção dos gases via eletrólise e a compra dos gases  $C_2H_2$  e  $O_2$  em fornecedores locais, finalizando com a simulação dos custos operacionais de uma suposta empresa com o uso de ambos os equipamentos. O uso do maçarico com chama proveniente de gás oxi-hidrogênio gerado a partir da eletrólise da água, tem ainda como finalidade proporcionar uma sustentabilidade em nível ambiental e social devido às características inerentes do processo. Os resultados desta pesquisa mostram que o uso de volume de 1,5 litros de KOH como eletrólito suporte na concentração de  $20\text{ g L}^{-1}$  e com corrente de 15A foi a configuração entre todas as 12 pesquisadas que apresentou maior eficiência térmica, tendo atingido uma média de  $990^\circ\text{C}$  para a chama, sendo ainda observado que nestas condições as temperaturas dos reservatórios de hidrogênio e oxigênio foram também as mais elevadas. Foi possível observar que a concentração de eletrólito de suporte quando aumentada para  $40\text{ g L}^{-1}$  de KOH promove uma maior dissipação de calor na célula eletrolítica e nos reservatórios, ocasionando menores temperaturas na operação do maçarico. Pode-se concluir também que a variação da corrente e da concentração do eletrólito suporte influencia diretamente a produção dos gases formados no ânodo (oxigênio) e no cátodo (hidrogênio), decorrente do aquecimento da célula eletrolítica, promovendo uma variação na velocidade de circulação do eletrólito dentro da célula eletrolítica e conseqüentemente nos reservatórios dos gases. O melhor resultado econômico-financeiro obtido foi aquele onde se utilizou na produção de chamas a combinação de 1,5 litros de eletrólito, a uma corrente de 15 A e concentração de eletrólito suporte de  $20\text{ g L}^{-1}$  de KOH, quando comparado a produção de chamas do maçarico convencional, em mesmas condições de temperaturas e vazão dos gases combustível e comburente.

**Palavras-chave:** Análise de viabilidade. Maçarico oxi-hidrogênio. Produção de hidrogênio por eletrólise.



## ABSTRACT

The torches usually used since the beginning of the 20th century in industry and commerce, use as combustible and oxidizing element the acetylene ( $C_2H_2$ ) and oxygen ( $O_2$ ), respectively. These two gases are acquired in the market already processed for their immediate use, mainly for the realization of processes of welding, cutting, heating and casting. The present study presents the technical and economical feasibility of the use of a torch using the hydrogen ( $H_2$ ) and oxygen ( $O_2$ ) gases, obtained through a process of electrolysis of the water, with the generated gases being used immediately, without the need for storage in vessels pressure. In industry and trade in services, commonly used torches are robust and need to be periodically recharged and the owner needs to store the stocked equipment. Acetylene gas, as a hydrocarbon, when burned, releases considerable amounts of carbon dioxide ( $CO_2$ ), which is a greenhouse gas and at the same time highly toxic, which also requires greater exposure to gases, especially when it is used in confined and/ or reduced spaces. This study also aims to analyze the technical feasibility of the equipment, using for this the comparison between the acquisition of traditional equipment and the equipment constructed and researched. The economic study also makes a comparison between the cost of producing the gases by electrolysis and the purchase of the  $C_2H_2$  and  $O_2$  gases in local suppliers, ending with the simulation of the operational costs of a supposed company with the use of both equipment. The use of the flame torch from oxy-hydrogen gas generated from the electrolysis of water also has the purpose of providing environmental and social sustainability due to the inherent characteristics of the process. The results of this research show that the use of a 1.5 liter volume of KOH as a support electrolyte in  $20\text{ g L}^{-1}$  and with a current of 15A was the configuration among all 12 surveyed, presenting greater thermal efficiency when using the digital temperature recorder, reaching the average of  $990^\circ\text{ C}$  for the flame, where it was still observed that the temperatures of the hydrogen and oxygen reservoirs were the highest as well. It was possible to observe that the support electrolyte concentration, when elevated to  $40\text{ g L}^{-1}$ , promotes heat dissipation in the electrolytic cell and in the reservoirs and, therefore, registering lower temperatures in the experiments. It can also be concluded that the variation of the current and the concentration of the electrolyte (KOH) directly influence the formation of bubbles (generated gases) in the anode (oxygen) and the cathode (hydrogen), resulting from the heating of the electrolytic cell entails a greater or lesser velocity of circulation of the electrolyte inside the electrolytic cell and consequently in the reservoirs of both. The study also shows that the use of the equipment constructed and studied has greater economic viability compared to conventional equipment, when they are compared in equal conditions of obtained temperatures and gas flow. The best economic-financial result obtained was the one where the combination of 1.5 liters of electrolyte was used in the production of flames, at a current of 15 A and support electrolyte concentration of  $20\text{ g L}^{-1}$  of KOH, when compared to the production of conventional torch flames, under the same conditions of temperature and flow of combustible and oxidizing gases.

**Keywords:** Feasibility analysis. Oxyhydrogen torch. Production of hydrogen by electrolysis.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1A - Maçarico comercial de 1 kg de gás acetileno e 1m<sup>3</sup> de gás oxigênio, p. 21
- Figura 1B - Maçarico comercial descartável - acetileno e gás oxigênio (400g cada), p. 21
- Figura 2A - Chama acetilênica, p. 24
- Figura 2B - Chama redutora ou carburante, p. 24
- Figura 2C - Chama neutra, p. 24
- Figura 2D - Chama oxidante, p. 24
- Figura 3 - Aspecto da chama proveniente da combustão do hidrogênio e oxigênio, p. 26
- Figura 4 - Visão interna de um tubo onde ocorre a vazão dos gases, p. 28
- Figura 5 - Processos utilizados para produção de gás H<sub>2</sub> e suas matérias primas, p. 29
- Figura 6 - Produção biológica de hidrogênio através de processo microbiano, p. 33
- Figura 7 - Célula unipolar tipo tanque sem membrana separadora de gases, p. 38
- Figura 8 - Célula unipolar selada com membrana separadora de gases, p. 38
- Figura 9 - Bancada de teste com maçarico e eletrolisador, p. 43
- Figura 10 - Imagens do catodo com a superfície recoberta com óxidos de ferro (10A e 10B) e do anodo (10C) sem processos corrosivos visíveis, p. 55
- Figura 11 - Avaliação da variação da temperatura do eletrolisador durante processo de eletrólise considerando a variação da concentração do eletrólito suporte (KOH) em 20 g L<sup>-1</sup> para as correntes aplicadas (A) I = 10A e (B) I = 15A, p. 56
- Figura 12 - Análise da variação de temperatura do eletrolisador para a comparação de diferentes valores de corrente aplicada (A) frente a concentração de eletrólito suporte de 20 g L<sup>-1</sup> e (B) em função da concentração de KOH de 40 g L<sup>-1</sup>, p. 58
- Figura 13 - Estudo da variação temperatura do reservatório de hidrogênio durante processo de eletrólise considerando a variação da concentração do eletrólito suporte (KOH) para as correntes aplicadas (A) I = 10A e (B), I = 15A, p. 60
- Figura 14 - Variação de temperatura do reservatório de hidrogênio para a comparação de diferentes valores de corrente aplicada (A) frente a concentração de eletrólito suporte de 20 g L<sup>-1</sup> e (B) em função da concentração de KOH de 40 g L<sup>-1</sup>, p. 61 e 62
- Figura 15 - Avaliação da variação da temperatura do reservatório de oxigênio durante processo de eletrólise considerando a variação da concentração do eletrólito suporte (KOH) para as correntes aplicadas (A) I = 10 A e (B) I = 15 A, p. 64

- Figura 16 - Vazão do gás hidrogênio em relação a capacidade dos reservatórios, utilizando correntes aplicadas de 10A e 15A nas concentrações de eletrólito suporte de 20g L<sup>-1</sup> e 40g L<sup>-1</sup>, p. 71
- Figura 17 - Vazão do gás oxigênio em relação a capacidade dos reservatórios, utilizando correntes aplicadas de 10A e 15A nas concentrações de eletrólito suporte de 20g L<sup>-1</sup> e 40g L<sup>-1</sup>, p. 71
- Figura 18 - Temperatura da chama do maçarico sem a presença do gás oxigênio, p. 74
- Figura 19 - Variação da temperatura da chama do maçarico em relação a concentração do eletrólito suporte (KOH) para as correntes aplicadas (A) I = 10 A e (B) I = 15 A, p. 75

## LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 - Cores das chamas referentes às misturas do gás oxi-acetileno, p. 25
- Quadro 2 - Temperaturas das chamas de alguns gases combustíveis comumente utilizados em processos industriais com a mistura de gás oxigênio (O<sub>2</sub>) e sem a mistura de gás oxigênio, p. 26
- Quadro 3 - Preços em Reais (R\$) e Dólar (US\$) de cada componente do maçarico comercialmente utilizado, p. 50
- Quadro 4 - Componentes utilizados na fabricação do maçarico a partir da eletrólise da água, p. 50
- Quadro 5 - Preços fracionados dos gases utilizados no maçarico e do eletrólito suporte KOH, p. 51

## LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 - Tecnologias utilizadas para a obtenção de hidrogênio, p. 30
- Tabela 2 - Custos dos equipamentos e insumos para a operação dos maçaricos, p. 49
- Tabela 3 - Temperaturas médias do eletrolisador em diferentes condições experimentais em diversos volumes de eletrólito suporte (KOH), p. 59
- Tabela 4 - Temperaturas médias do reservatório de hidrogênio (H<sub>2</sub>) para diferentes condições experimentais em diferentes volumes de eletrólito suporte (KOH), p. 62
- Tabela 5 - Temperaturas médias do reservatório de oxigênio (O<sub>2</sub>) para diferentes condições experimentais em diferentes volumes de eletrólito suporte (KOH), p. 65
- Tabela 6 - Vazão dos gases gerados em função da corrente aplicada e da concentração de eletrólito suporte utilizando reservatório de 1 litro, p. 67
- Tabela 7 - Vazão dos gases gerados em função da corrente aplicada e da concentração de eletrólito suporte utilizando reservatório de 1,5 litros, p. 68
- Tabela 8 - Vazão dos gases gerados em função da corrente aplicada e da concentração de eletrólito suporte utilizando reservatório de 2 litros, p. 69
- Tabela 9 - Temperatura da chama do maçarico desenvolvido para diversas condições experimentais em diferentes reservatórios de eletrólito suporte (KOH) com uma chama composta apenas pela presença do gás hidrogênio (H<sub>2</sub>), p. 72
- Tabela 10 - Temperatura da chama do maçarico para diversas condições experimentais em reservatórios com diferentes volumes de eletrólito suporte (KOH), p. 76
- Tabela 11 - Custo operacional por hora, em reais, da chama produzida no maçarico comercial e no maçarico a partir da eletrólise da água sob as mesmas condições de vazão de hidrogênio e oxigênio, p. 79
- Tabela 12 - Valores monetários líquidos, em Reais, obtidos pela técnica da orçamentação parcial, considerando a receita e os custos operacionais envolvidos no uso do maçarico comercial e no uso do maçarico a partir da eletrólise da água, p. 80

## LISTA DE ABREVEATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

GEE	gases do efeito estufa
BEAMR	reatores microbianos auxiliados bioeletroquimicamente
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono
CO	monóxido de carbono
NO <sub>x</sub>	óxidos nitrosos
HC	hidrocarboneto
GLP	gás liquefeito de petróleo
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	butano
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	propeno (propileno)
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	propano
CH <sub>4</sub>	metano
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	acetileno
C <sub>3</sub> H <sub>4</sub>	metilacetileno
H <sub>2</sub>	hidrogênio
O <sub>2</sub>	oxigênio
g L <sup>-1</sup>	gramas por litro
L/min	litros por minutos
Psi	pressão (per square inch - força por polegada quadrada)
R\$	Reais – Moeda corrente oficial da República Federativa do Brasil
kWh	Kilowatts hora
PEM	proton exchange membrane (membrana de troca de prótons)
PEC	photo electrochemical cell (célula fotoeletroquímica)

## SUMÁRIO

- 1 INTRODUÇÃO, p. 17
- 2 OBJETIVOS, p. 19
  - 2.1 OBJETIVO GERAL, p. 19
  - 2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO, p. 19
- 3 REVISÃO DE LITERATURA, p. 20
  - 3.1 TIPOS DE MAÇARICOS, p. 20
  - 3.2 GASES UTILIZADOS NO PROCESSO DE OXICOMBUSTÃO, p. 21
    - 3.2.1 Uso da norma regulatória 18 (NR 18): Condições de utilização do maçarico, o ambiente de trabalho e do operador na indústria da construção, p. 22
  - 3.3 CHAMAS UTILIZADAS NO PROCESSO DE OXICOMBUSTÃO, p. 23
  - 3.4 CARACTERÍSTICAS DA CHAMA QUANDO HÁ A PRESENÇA DO GÁS OXIGÊNIO NA COMBUSTÃO DO GÁS HIDROGÊNIO, p. 26
    - 3.4.1 Influência da vazão dos gases na temperatura da chama, p. 27
  - 3.5 TECNOLOGIAS PARA A OBTENÇÃO DO HIDROGÊNIO, p. 28
    - 3.5.1 Reforma a vapor do metano, p. 30
    - 3.5.2 Produção de bio-hidrogênio, p. 32
    - 3.5.3 Decomposição da água, p. 33
      - 3.5.3.1 Termólise, p. 33
      - 3.5.3.2 Foeletrólise, p. 34
      - 3.5.3.3 Eletrólise da água, p. 35
  - 3.6 TECNOLOGIAS PARA A OBTENÇÃO DO OXIGÊNIO, p. 39
  - 3.7 INFLUÊNCIA DO GÁS OXIGÊNIO NA TEMPERATURA DA CHAMA, p. 39
  - 3.8 ELETRODOS DE AÇO INOXIDÁVEL 316L - COMPOSIÇÃO DA LIGA E CORROSÃO, p. 40
  - 3.9 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DE PROJETOS DE INVESTIMENTO, p. 41
- 4 MATERIAL E MÉTODOS, p. 42
  - 4.1 COMPONENTES UTILIZADOS NA BANCADA DE TESTE, p. 42
  - 4.2 ELETROLISADOR, p. 44
  - 4.3 ELETRODOS, p. 44
  - 4.4 ELETRÓLITO SUPORTE, p. 44
  - 4.5 TENSÃO E CORRENTE APLICADA, p. 45
  - 4.6 APLICABILIDADES DO MAÇARICO, p. 45

4.7	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL,	p. 45
4.8	ANÁLISE FINANCEIRA DO MAÇARICO A PARTIR DA ELETRÓLISE DA ÁGUA EM COMPARAÇÃO AO MAÇARICO CONVENCIONAL,	p. 48
4.8.1	<u>Custos dos insumos para a geração dos gases e compra dos maçaricos,</u>	p. 49
4.8.1.1	Custo operacional do maçarico a partir da produção das chamas,	p. 51
5	<u>RESULTADOS E DISCUSSÃO,</u>	p. 52
5.1	OTIMIZAÇÃO DO ELETROLISADOR, SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE GASES PARA USO EM MAÇARICO PORTÁTIL,	p. 52
5.2	PROCESSO DE CORROSÃO NO AÇO 316L,	p. 54
5.3	TEMPERATURA DO ELETROLISADOR,	p. 56
5.4	TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO DE HIDROGÊNIO,	p. 59
5.5	TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO DE OXIGÊNIO,	p. 64
5.6	VAZÃO DOS GASES HIDROGÊNIO E OXIGÊNIO,	p. 66
5.6.1	<u>Vazão dos Gases Utilizando Reservatório com Capacidade de 1,0 Litro,</u>	p. 66
5.6.2	<u>Vazão dos Gases Utilizando Reservatório com Capacidade de 1,5 Litros,</u>	p. 68
5.6.3	<u>Vazão dos Gases Utilizando Reservatório com Capacidade de 2,0 Litros,</u>	p. 69
5.7	TEMPERATURA DA CHAMA DO MAÇARICO NA AUSENCIA DO GÁS COMBURENTE OXIGÊNIO,	p. 72
5.8	TEMPERATURA DA CHAMA DO MAÇARICO COM A MISTURA DE GASES H <sub>2</sub> E O <sub>2</sub> ,	p. 74
5.9	CUSTOS OPERACIONAIS NA PRODUÇÃO DOS MAÇARICOS,	p. 77
5.10	CUSTOS OPERACIONAIS NA PRODUÇÃO DE CHAMAS DOS MAÇARICOS,	p. 78
5.11	ANÁLISE DA RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO,	p. 79
6	<u>CONCLUSÃO,</u>	p. 82
	<u>REFERÊNCIAS,</u>	p. 85
	ANEXO I,	p. 91
	ANEXO II,	p. 92
	ANEXO III,	p. 93



## 1 INTRODUÇÃO

A combustão e conseqüentemente a obtenção de energia térmica para se utilizar nos mais devidos fins tem sido objeto de estudo de cientistas e pesquisadores em diversos países. A busca por energias térmicas fez povos dispersos pelo planeta buscarem o domínio do fogo, e com o avançar das tecnologias desenvolveram a arte da fundição de metais. Historicamente, os processos de soldagem de metais, encontrados nas civilizações antigas, datam de 4000 a.C. Um pingente de ouro fabricado na Pérsia e exposto no Museu do Louvre em Paris na França, indica que tal procedimento já era utilizado nesta época (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2009).

Já no início do século XIX, mais precisamente em 1801, o químico e cientista americano Robert Hare comunicou a Sociedade de Química da Filadélfia, nos Estados Unidos da América, a invenção de um equipamento chamado maçarico (WALKER e TARN, 1990). Àquela época o invento já produzia chamas de elevado poder calorífico utilizando a combustão do gás oxi-hidrogênio (HABASHI, 2003). Em 1850 Henri Saint Celaine de Ville aperfeiçoou o equipamento transformando-o praticamente no que hoje conhecemos, utilizando como gás combustível o hidrogênio e como gás comburente o oxigênio em misturas adequadas (ALMQVIST, 2003). Nesta época este maçarico já atingia 2800 °C, no entanto em 1920, Irwin Langnuir criou o maçarico de hidrogênio atômico, que consistia na dissociação das moléculas de hidrogênio ( $H_2$ ) em hidrogênio atômico ( $H + H$ ), atingindo a temperatura de 4200 °C (WALKER e TARN, 1990).

Com a entrada definitiva do petróleo no desenvolvimento da humanidade, em 1836, o pesquisador Edmund Davy descobriu um hidrocarboneto a qual deu o nome de acetileno (RUSSELL, 1953). A facilidade com que era produzido em larga escala, somado à crescente demanda da indústria, e também devido as propriedades mecânicas dos metais na pós-solda, fizeram com que o acetileno substituísse comercialmente o hidrogênio (HARING, 2008). Por se tratar de um hidrocarboneto ( $C_2H_2$ ), esta substância em combustão juntamente com o oxigênio, em operação ideal, acaba por liberar dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e água como resultado da queima, sendo que o  $CO_2$  é um dos gases que provocam o efeito estufa (PINESCHI, 2013). É importante salientar que normalmente sua combustão não é ideal e há produção também de óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) não queimados, sendo alguns deles tóxicos (HARING, 2008). A utilização deste gás combustível pode comprometer a saúde e segurança do operador do maçarico dependendo do local que este for utilizado, inclusive há uma norma regulatória que

orienta tais e quais condições o operador deva observar e cuidar para o manuseio do equipamento.

Atualmente, devido ao aquecimento global e o esgotamento futuro das fontes de petróleo, a busca por energias limpas e renováveis visa uma melhoria da qualidade de vida, contribuindo plenamente com um futuro mais sustentável. Em termos energéticos via combustão, o hidrogênio pode ser classificado como um combustível ideal, pois quando queimado com oxigênio puro, tem como único produto a água (PINESCHI, 2013). Em razão disso, este trabalho busca explorar os recursos oferecidos pelo uso do maçarico oxicomustível tendo como gás combustível o hidrogênio e como gás comburente o oxigênio, obtidos a partir da eletrólise da água.

Na atualidade são necessárias pesquisas de novas formas de produção de energia térmica proveniente de fontes renováveis, assim como se deseja que estas ao final do processo não emitam resíduos gasosos tóxicos, principalmente evitando a exposição do operador a estes resíduos (VILLULLAS, TICIANELLI e GONZALEZ, 2002).

Uma justificativa muito importante para a substituição do acetileno pelo hidrogênio como gás combustível é a eliminação das emissões de gases de efeito estufa (GEE), uma vez que a queima do hidrogênio e do oxigênio resultam em água (WANG, WAN e WANG, 2009). Outra justificativa seria a possibilidade do próprio equipamento ser o produtor dos gases necessários aos processos de soldagem/corte, fundição e aquecimento, através da decomposição da molécula da água via processo de eletrólise, fornecendo estes gases sem a necessidade de reabastecimento e compra constante dos gases. Ainda, a produção *in situ* evitaria o armazenamento em cilindros e a estocagem, levando o equipamento a ser seguro do ponto de vista de vazamentos e evitando acidentes. Outro fator importante é a comodidade do maçarico portátil, uma vez que o mesmo pode ser construído em escala reduzida e autônomo na produção dos seus próprios gases.

Ressalta-se ainda a segurança da saúde do operador do equipamento, que nunca ficaria exposto a este tipo de contaminação atmosférica causada pela queima do acetileno, principalmente se estiver em espaço confinado ou reduzido. A exposição do operador ao acetileno causa sérios danos a saúde, além da intoxicação, podendo levar inclusive a morte (ANTOSSON et al., 2013).

Devido aos valores de produção do equipamento e dos gases, associada a segurança do operador com relação a exposição aos gases provenientes da queima do hidrogênio (emissões zero de GEE) pode-se esperar que o equipamento a ser estudado, deverá possuir um

viés de sustentabilidade maior, além de ser muito mais leve e compacto em relação aos existentes no mercado, possibilitando uma portabilidade maior.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a viabilidade de utilização dos gases oxigênio e hidrogênio (oxi-hidrogênio), produzidos via eletrólise da água, em maçaricos para processos de soldagens e corte, sem a emissão de gases poluentes e sem a utilização de combustível de origem fóssil, abordando os aspectos econômicos e técnicos deste equipamento.

### 2.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Como parte desse trabalho pretende-se ainda avaliar:

- A produção quantitativa dos gases hidrogênio e oxigênio, mediante a separação por membrana;
- A temperatura da chama produzida mediante esta separação;
- Os parâmetros técnicos como temperatura do eletrolisador e dos reservatórios dos gases, vazão dos gases e demais parâmetros inerentes ao processo, como eventuais processos de corrosão, volume do eletrólito e concentração do eletrólito suporte;
- A análise econômica levando-se em conta os custos do processo de geração de chama via eletrólise da água e o comparar com os equipamentos comerciais que usam a combustão oxi-acetileno.

### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 TIPOS DE MAÇARICOS

Em geral existem dois tipos de maçaricos utilizados na indústria e no comércio. O primeiro utiliza gases (um comburente e outro combustível) para a realização de processos de fundição, corte, soldagem, pré-aquecimento, pós-aquecimento, dobramentos, deposição superficial, brasagem, têmpera por chama e conformação a quente. O segundo tipo é o que utiliza a eletricidade para a realização de alguns destes processos, mas que tem no processo de soldagem sua maior utilização. Por outro lado, os maçaricos que possibilitam o corte de placas, tarugos, vigas de metal, em sua grande parte compostos de aço-carbono, em geral são os maçaricos oxcombustíveis. Apesar disto, estes maçaricos algumas vezes são utilizados para soldagens, porém são mais adequados a consertos e soldas de metais com espessura e diâmetro reduzidos (MARQUES, MODENESI e BACARENSE, 2009).

Com preços acessíveis e tendo a capacidade de realizarem diversas operações, os maçaricos oxcombustíveis são equipamentos que possibilitam o corte e soldagem de metais. O funcionamento técnico de tal equipamento é baseado na produção de chamas de altíssima temperatura, composta pela queima de gases facilmente encontrados para comercialização em lojas especializadas, sendo o acetileno ( $C_2H_2$ ), juntamente com o oxigênio ( $O_2$ ), os gases mais usados nos maçaricos comerciais (MODENESI, 2011).

Os maçaricos são extremamente importantes para todos os processos que constituem a transformação de metais. Anos de desenvolvimento tecnológico foram ganhos com a entrada dos processos de soldagem e corte de metais devido a descoberta e uso industrial de equipamentos que utilizam chamas oxcombustíveis.

Abaixo seguem modelos de equipamentos de soldagem que possuem maior portabilidade e que custam em média U\$ 457,50 (Figura 1A) e U\$ 206,45 (Figura 1B) e que podem ser encontrados no site na [www.casadosoldador.com.br](http://www.casadosoldador.com.br).

Figura 1 - Maçaricos comerciais. (1A) Maçarico comercial de 1Kg de gás acetileno e 1 m<sup>3</sup> de gás oxigênio; (1B). Maçarico comercial descartável de gás acetileno e de gás oxigênio com cartuchos de 400g cada.



(1A)

(1B)

Fonte: Loja Casa do Soldador - [www.casadosoldador.com.br](http://www.casadosoldador.com.br)

### 3.2 GASES UTILIZADOS NOS PROCESSOS DE OXICOMBUSTÃO

Diversos gases podem ser utilizados como gás combustível, no entanto, o gás oxigênio e o ar são os gases comburentes mais utilizados na indústria devido à facilidade com que são obtidos (ANP, 2004).

Nos processos de fabricação e manutenção de equipamentos o uso de maçaricos oxicom bustível é quase que uma constante, sendo que estes se utilizam de diversos tipos de gases combustíveis para poderem ser aplicados na função ao qual se destinam. Dentre os gases combustíveis que compõem o processo oxicom bustível e que são comercialmente usados nas indústrias, encontram-se os seguintes gases: butano (GLP – C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), propeno (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>), propano (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), gás natural (metano - CH<sub>4</sub>), acetileno (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) e metilacetileno (C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>), ou seja, empregam-se gases em que a sua composição básica são hidrocarbonetos. A rara exceção existente no processo oxi-com bustível se dá pela utilização de monóxido de carbono (CO) e o hidrogênio puro (H<sub>2</sub>) (ANP, 2004).

O butano é um gás liquefeito de petróleo (GLP), sendo o gás mais comercializado no país. É composto de uma mistura de hidrocarbonetos que possuem predominantemente propano e/ou propeno e butano e /ou buteno. Já o propano especial, que também é um gás

liquefeito de petróleo, contém no mínimo 90 % de propano e no máximo 5 % de propeno (ANP, 2004).

O acetileno é produzido pela reação de carbureto de cálcio com água, sendo vendido comercialmente com algumas partes de sulfeto de hidrogênio, amônia e fosfina. O hidrogênio é um gás que pode ser produzido via eletrólise da água, reforma a vapor do metano ou a partir da oxidação parcial do carvão, mas que também pode ser obtido por outros tipos de processos (COSTA, MONTEIRO e PALMIERI, 2011).

### 3.2.1 Uso da norma regulatória 18 (NR 18): Condições de utilização do maçarico, o ambiente de trabalho e do operador na indústria da construção

No Brasil a operação de equipamentos de corte a quente exige que sejam seguidas normas específicas, e a que regulamenta e orienta os profissionais quanto ao uso, armazenamento e cuidados com estes equipamentos é a Norma NR 18. Esta norma abrange uma gama muito maior de itens, mas esta é a norma que contém as regras para o uso de maçaricos oxicomustíveis. Para se realizar operações de corte a quente, os itens 18.11 e 18.26 e seus subitens devam ser rigorosamente respeitados. A Norma NR 18 ainda prevê que o trabalhador e o meio ambiente sejam observados para que ambos não sejam prejudicados no processo de corte a quente, soldagem, fundição e aquecimento.

Abaixo é possível observar os itens da Norma NR 18 que dizem respeito ao corte a quente.

“A portaria n.º 208 de 08 de dezembro de 2015, do Ministério do Trabalho e da Previdência Social (MTPS), publicada no Diário Oficial da União de 09/12/2015, editou a Norma Regulamentária – NR 18 - CONDIÇÕES E MEIO AMBIENTE DE TRABALHO NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO.

O item 18.11 desta Norma trata dos cuidados nas Operações de Soldagem e Corte a Quente, os quais estão descritos a seguir:

- 18.11.1 As operações de soldagem e corte a quente somente podem ser realizadas por trabalhadores qualificados.
- 18.11.2 Quando forem executadas operações de soldagem e corte a quente em chumbo, zinco ou materiais revestidos de cádmio, será obrigatória a remoção por ventilação local exaustora dos fumos originados no processo de solda e corte, bem como na utilização de eletrodos revestidos.
- 18.11.4 Nas operações de soldagem e corte a quente, é obrigatória a utilização

de anteparo eficaz para a proteção dos trabalhadores circunvizinhos. O material utilizado nesta proteção deve ser do tipo incombustível.

- 18.11.5 Nas operações de soldagem ou corte a quente de vasilhame, recipiente, tanque ou similar, que envolvam geração de gases confinados ou semiconfinados, é obrigatória a adoção de medidas preventivas adicionais para eliminar riscos de explosão e intoxicação do trabalhador, conforme mencionado no item 18.20 - Locais confinados.
- 18.11.6 As mangueiras devem possuir mecanismos contra o retrocesso das chamas na saída do cilindro e chegada do maçarico.
- 18.11.7 É proibida a presença de substâncias inflamáveis e/ou explosivas próximo às garrafas de O<sub>2</sub> (oxigênio).

O item 18.26 desta Norma trata da Proteção contra Incêndio. Os itens que dizem respeito ao corte a quente, estão citados abaixo.

- 18.26.1 É obrigatória a adoção de medidas que atendam, de forma eficaz, às necessidades de prevenção e combate a incêndio para os diversos setores, atividades, máquinas e equipamentos do canteiro de obras.
- 18.26.2 Deve haver um sistema de alarme capaz de dar sinais perceptíveis em todos os locais da construção.
- 18.26.3 É proibida a execução de serviços de soldagem e corte a quente nos locais onde estejam depositadas, ainda que temporariamente, substâncias combustíveis, inflamáveis e explosivas.

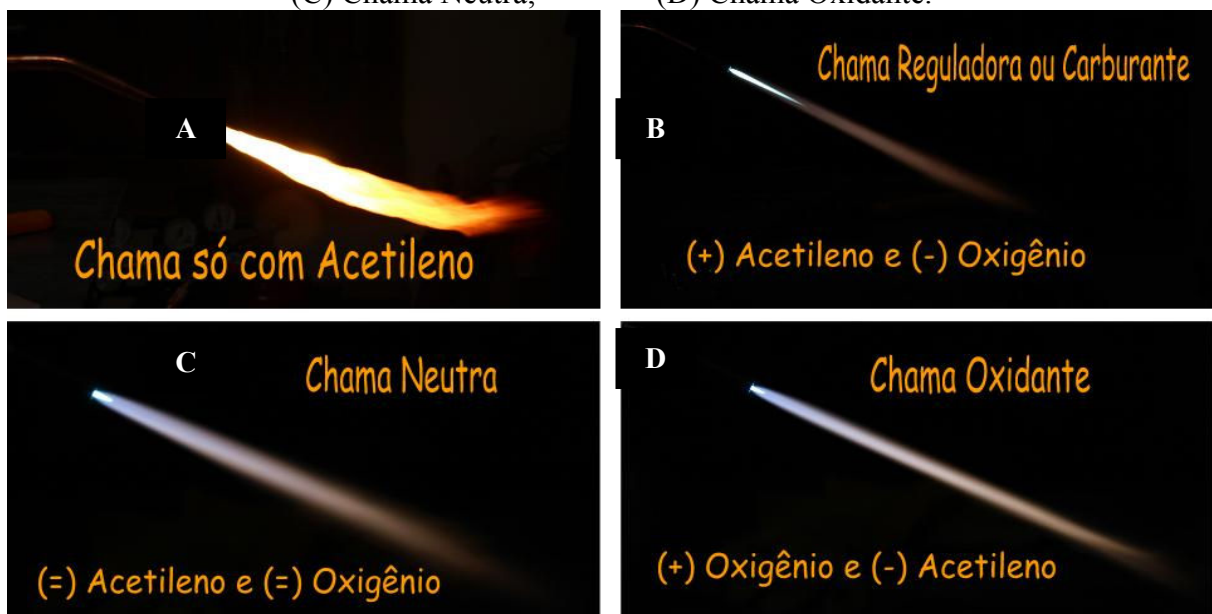
### 3.3 CHAMAS UTILIZADAS NOS PROCESSOS DE OXICOMBUSTÃO

As temperaturas das chamas produzidas nos processos oxicomustíveis dependem da quantidade de oxigênio queimado juntamente com o gás combustível, além da pureza deste. O desempenho da chama é sempre o de conseguir atingir ao máximo a sua temperatura até alcançar o ponto de fusão do metal de base a ser trabalhado. O fluxo de gases liberados no bico do maçarico possui uma grande importância no processo. A queima dos gases forma um cone (chama) e esta por sua vez possui algumas características específicas de acordo com a mistura dos gases combustível e comburente. Existem 3 tipos de chamas nos maçaricos oxicomustíveis, a chama neutra, a chama oxidante e a chama redutora e estas são ajustadas mediante a injeção de oxigênio junto ao gás combustível. (CARVALHO, 2000).

A chama neutra é consequência da mistura em igualdade de partes entre os gases combustíveis e o oxigênio, tendo assim a queima estequiométrica equivalente entre estes gases. Esse nome se dá, pois não há excesso de nenhum dos gases. Sua chama tem duas zonas bem delimitadas. A chama neutra possui grande importância, já que é a partir dela que o operador passa a determinar os parâmetros para regular o maçarico e assim obter a chama mais adequada a realização do procedimento desejado. Esta chama é utilizada em processos de soldagem. A chama redutora ou carburante também deriva da mistura dos gases e possui este nome devido ao excesso de gás combustível, possuindo 3 zonas distintas e é utilizada principalmente em processos de soldagem de tubulações. Já a chama oxidante, possui este nome devido as misturas dos gases apresentarem maior quantidade de oxigênio fazendo com que a chama possua também duas zonas distintas, e assim sendo apresenta um poder calorífico mais elevado que as demais. A temperatura da chama sempre varia, mas esta encontra o seu ponto de maior calor em uma zona intermediária entre o cone interno e o envoltório da chama (parte mais externa). Via de regra, a chama oxidante possui o cone da chama com o tamanho ideal sendo a medida da metade do tamanho do cone de quando ela está em estado de chama do tipo neutra (CARVALHO, 2000).

Abaixo seguem os quatro tipos de chamas existentes na operação de maçaricos oxicomustíveis, ou seja, a chama acetilênica, a chama redutora, a chama neutra e a chama oxidante (Figura 2), sendo que a chama acetilênica não é utilizada nos processos de soldagem.

Figura 2 - Tipos de chamas: (A) Chama acetilênica; (B) Redutora ou Carburante; (C) Chama Neutra; (D) Chama Oxidante.



Fonte: adaptado do site [www.brazilweldsdicasparasoldagem.com](http://www.brazilweldsdicasparasoldagem.com)



Devido à mistura entre o gás combustível e o gás comburente são obtidas as seguintes colorações das chamas (Quadro 1).

Quadro 1 - Cores das chamas referentes às misturas do gás oxi-acetileno.

<b>CHAMA AMARELA</b>	<b>CHAMA AZUL</b>
Obtenção devido à pequena quantidade de ar (janela fechada)	Obtenção devido à regulagem adequada da mistura gás-ar
Forma irregular	Forma regular
Presença de carbono (incandescente)	Consiste basicamente de duas cores: na parte interna de azul claro e na parte externa de azul escuro
Produção de fuligem (carvão)	Há uma parte onde o gás não é queimado

Fonte: adaptado FOGAÇA, 2018.

Segundo Fogaça (2018),

“As reações incompletas produzem menor energia que a combustão completa. Isso explica a diferença entre as cores das chamas, pois a chama amarela, característica da combustão incompleta, é de menor energia. Já a chama azul é característica de uma combustão completa, com maior energia”.

Em virtude das desvantagens acima mencionadas, com relação as chamas oxicomcombustíveis, torna-se fundamental a busca por alternativas mais eficientes e energéticas para gases empregados em combustão, e dentre essas novas possibilidades destacam-se as chamas oriundas da combinação de  $H_2/O_2$ .

A respeito das características de combustão dos bipropolentes  $H_2/O_2$ , a morfologia da chama produzida difere-se as das chamas derivadas da combustão de combustíveis fósseis. Mesmo com uma combustão turbulenta, é observada uma coloração azul na parte inferior da chama e uma tonalidade avermelhada na parte superior desta, embora os comprimentos da proporção de azul e vermelho dependam da condição de vazão e mistura dos gases (KIM et al., 2018). Ignorando o efeito de impurezas sabe-se que a chama azul está relacionada a reações entre radicais OH e H presentes na chama. Já a chama vermelha está relacionada com a excitação vibracional da  $H_2O$  formada durante a queima dos gases. Nota-se também que há um aumento da chama vermelha diante do aumento de oxigênio liberado. O uso de  $O_2$  puro ao invés de ar parece resultar em chamas com aparência mais intensificada pela cor, uma vez que a concentração de radicais e a excitação vibracional da  $H_2O$  são aumentadas (KIM et al. 2018).

Figura 3 - Aspecto da chama proveniente da combustão do hidrogênio e oxigênio



Fonte: Disponível em: <https://hypescience.com>

As temperaturas obtidas a partir da mistura  $H_2/O_2$  (puro) e  $H_2/ar$  apresentam temperaturas elevadas e muito próximas as esperadas com a mistura oxi-acetileno (Quadro 2), apontando como uma tecnologia promissora para substituição da queima tradicionalmente empregada nos sistemas comerciais.

Quadro 2 - Temperaturas das chamas de alguns gases combustíveis comumente utilizados em processos industriais com a mistura de gás oxigênio ( $O_2$ ) e sem a mistura de gás oxigênio.

Gás Combustível	Combustão com $O_2$ (°C)	Combustão sem gás $O_2$ (°C)
Acetileno	3480	2500
Butano	---	1970
Monóxido de Carbono	---	2121
Etano	---	1955
Hidrogênio	3200	2210
Metano	---	1950
Gás Natural	---	1960
Propano	2526	1967
Propano + Butano	---	1970

Fonte: Adaptado de [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com)

### 3.4 CARACTERÍSTICAS DA CHAMA QUANDO HÁ A PRESENÇA DO GÁS OXIGÊNIO NA COMBUSTÃO DO GÁS HIDROGÊNIO

A medida que se aumenta o fluxo de oxigênio no processo de combustão, aumentam-se as chamas avermelhadas que estão relacionadas diretamente a  $H_2O$  formada pela queima de hidrogênio, ou seja, há uma queima e um aproveitamento maior do hidrogênio fornecido evitando a formação de radicais. A utilização do gás oxigênio puro no lugar de ar atmosférico

intensifica a coloração da chama, visto que há um aumento na excitação vibracional da H<sub>2</sub>O. Estudos da queima de hidrogênio e oxigênio de chamas de jato coaxial em um combustor de elemento único mostram que durante sua queima, próximo ao lábio injetor das chamas é observada uma região escura, onde há formação de radicais e têm-se chamas muito fracas, essa região é estendida com o aumento do fluido de combustível, visto que há um enrugamento da chama devido a deformação através da maior diferença de velocidade de injeção entre os gases combustíveis e comburente, isso aumenta a taxa de dissipação da chama (KIM et al., 2018).

A presença de ar atmosférico ou oxigênio é necessário para a combustão, sendo necessária ao processo oxi-combustível, no entanto em excesso o processo se torna prejudicado quanto a quantidade de calor gerado, por outro lado a falta de oxigênio causa transtornos pela carência do elemento comburente, ocasionando em uma combustão incompleta e nota-se que a temperatura decresce com a utilização excessiva de ar atmosférico ou oxigênio (GUNGOR, 2009).

A estabilidade da chama se estende quando temos uma diminuição da razão entre comburente e combustível em câmaras de combustão quando há aumento da pressão do sistema, em comparação com chamas de hidrocarbonetos, é notável uma estabilidade estendida (CHOI, 2017).

### 3.4.1 Influência da vazão dos gases na temperatura da chama

A vazão (Q) e a pressão dos gases são propriedades de suma importância para haver a concepção do equipamento maçarico. Sendo a terceira grandeza a ser medida em processos industriais, a vazão vem a ser o volume de um determinado fluido, gasoso ou sólido, que passa por um determinado ponto da seção transversal de um tubo na unidade de tempo. As suas dimensões são dadas por L<sup>3</sup> T<sup>-1</sup> e suas unidades são m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, ml s<sup>-1</sup> ou cm<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (CASSIOLATO e ALVES, 2008).

Sendo a fórmula igual a:

$$Q = \frac{\text{volume}}{\text{tempo}} = \frac{V}{t}$$

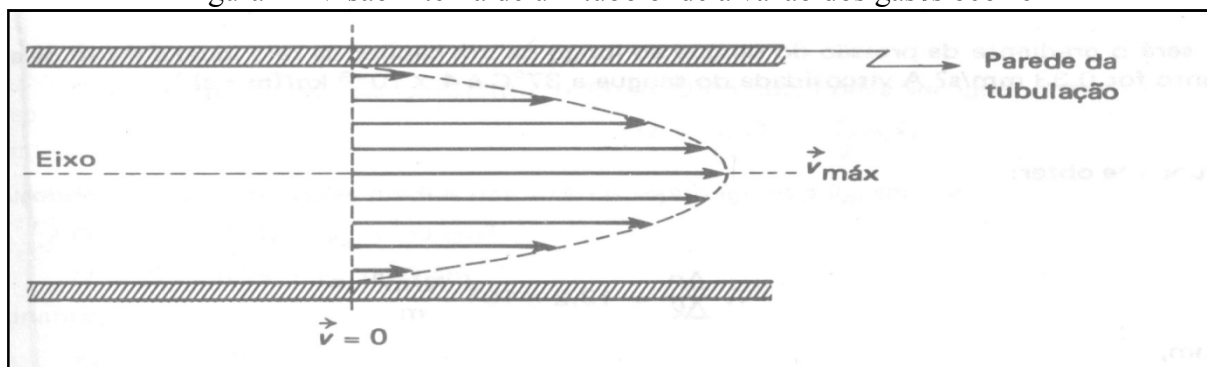
O aquecimento, a soldagem ou a fundição de um material, metálico ou não, dependem exclusivamente da temperatura da chama e também do calor de combustão, que é a velocidade de queima da mistura gasosa combustível, onde ambos atuam em função dos gases

utilizados. A velocidade de saída dos gases e a velocidade de combustão influenciam diretamente na capacidade da chama desenvolver seu trabalho a partir da temperatura (ALMEIDA, 2000).

Dependendo da vazão dos gases 3 situações podem acontecer no maçarico, o levando a eficiência ou simplesmente levando a chama ao apagamento da chama, sendo este por efeito do descolamento da chama ou engolimento da chama. No caso de utilização perfeita da vazão dos gases, ou seja, onde a velocidade de saída dos gases é igual a velocidade de combustão, a utilização do maçarico se dá de forma eficaz. Quando a velocidade de saída dos gases é maior que a velocidade de combustão, a chama se descola da ponta do maçarico e a queima é feita fora dos padrões, sua queima é realizada longe do bico de corte/soldagem. No entanto se a velocidade de saída dos gases for menor que a velocidade de combustão, aí a queima se dará no interior do maçarico, havendo um aquecimento da temperatura. Esta chama irá consumir os gases cada vez mais para dentro do equipamento, inclusive fazendo um ruído característico, e chegando a parte do maçarico responsável pela mistura ou injeção dos gases, a esse fenômeno se dá o nome de retrocesso da chama e o mesmo pode levar a fundição do metal responsável pela mistura dos gases e em casos mais graves se este equipamento não possuir válvulas anti-retorno de chamas, o mesmo pode vir a explodir (ALMEIDA, 2000).

Na Figura 4 é possível observar as paredes internas de uma tubulação e o formato adquirido pelos gases mediante a sua vazão e pressão exercidas.

Figura 4 - Visão interna de um tubo onde a vazão dos gases ocorre



Fonte: Adaptado do site [http://www.bertolo.pro.br/Biofisica/Fluidos/mec\\_flu.htm](http://www.bertolo.pro.br/Biofisica/Fluidos/mec_flu.htm)

### 3.5 TECNOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO GÁS HIDROGÊNIO

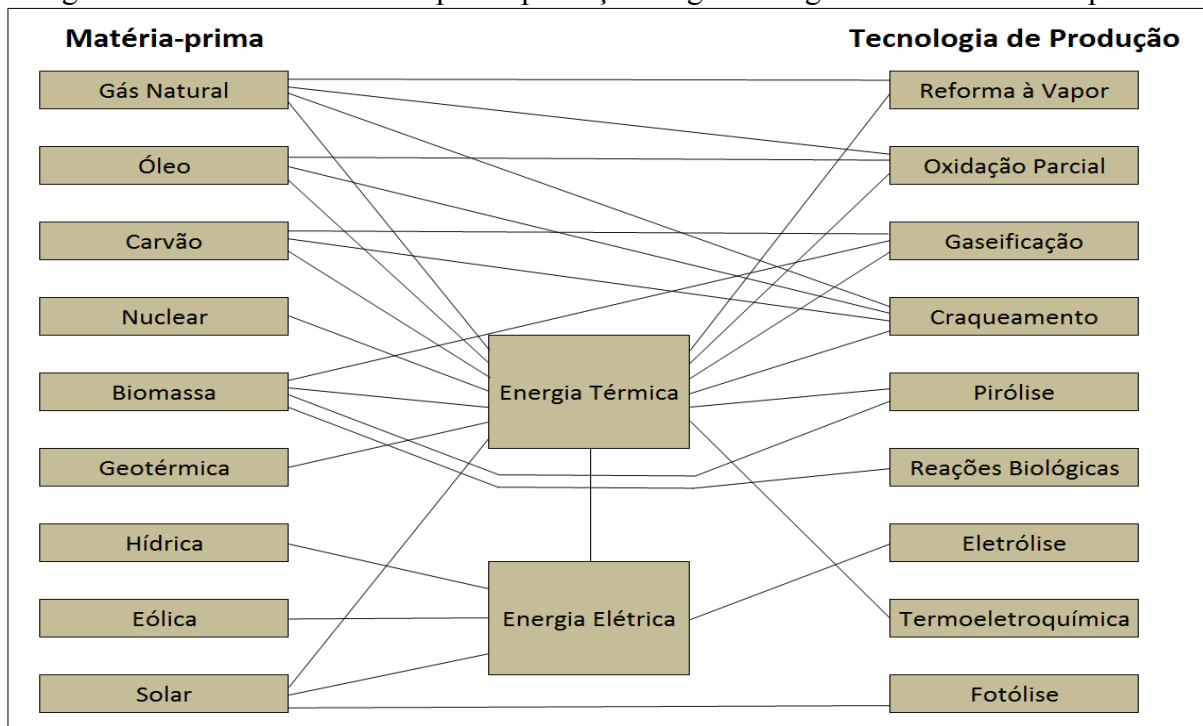
Hoje é possível se obter de forma bastante eficaz e em escala industrial e contínua o gás hidrogênio ( $H_2$ ). São várias as fontes existentes e são várias as tecnologias disponíveis. No cenário global temos uma predominância da produção de hidrogênio a partir de

combustíveis fósseis, sendo a reforma do gás metano a mais utilizada globalmente. Outros processos estão sendo estudados, sendo os processos biológicos do tratamento de biomassa e a decomposição da água via eletrólise alguns dos tipos investigados no momento (OLIVEIRA, RIBEIRO e PASSOS, 2014).

Em quase todas estas modalidades de obtenção de hidrogênio o uso de eletricidade é fundamental. Dentro deste aspecto algumas tecnologias se destacam devido serem provenientes de fontes de energias renováveis. A energia hidrelétrica é uma energia renovável, mas hoje a energia eólica, energia fotovoltaica e geotérmicas também já são fontes utilizadas comercialmente (SALIBA-SILVA e LINARD, 2009).

Na Figura 5 apresentam-se as principais matérias-primas e tecnologias disponíveis hoje para se produzir hidrogênio em escala comercial e de forma sustentável. É fundamental destacar que muitas tecnologias estão sendo pesquisadas e estão passando por aprimoramentos técnicos visando um aumento de sua produção e armazenamento, mitigando-se riscos, uma vez que o hidrogênio possui elevado potencial energético e de combustão.

Figura 5 - Processos utilizados para a produção de gás hidrogênio e suas matérias-primas



Fonte: Adaptado e traduzido de BALAT, 2008

Na Tabela 1 estão sendo apresentadas as tecnologias que são mais utilizadas hoje na produção de hidrogênio e também as tecnologias que estão sendo estudadas na atualidade para

se obter o gás hidrogênio de modo a aproveitar outras fontes de energia e matérias-primas orgânicas.

Tabela 1 - Tecnologias utilizadas para a obtenção de hidrogênio

<b>Forma de obtenção de H<sub>2</sub></b>	<b>Características</b>	<b>Referência</b>
Eletrólise da Água	Quebra da molécula da água via o uso de corrente contínua	Bicáková e Straka - 2012
Reforma a Vapor do Metano	Reação endotérmica e catalítica do metano com vapor d'água a uma temperatura entre 800 a 900 °C	Sordi - 2007
Produção de Bio-hidrogênio (BEAMR, fermentação escura e biofotólise e bio-reactores)	Uso de material biodegradável para a obtenção de hidrogênio	Bicáková e Straka - 2012

Fonte: Próprio Autor

A seguir serão reportadas as formas de obtenção de hidrogênio pelas tecnologias apontadas na Tabela 1.

### 3.5.1 Reforma a vapor do metano

O processo de reforma é bastante conhecido na indústria de modo geral. Segundo Sordi (2006), "... a produção de hidrogênio a partir do metano pode ser realizada através da tecnologia de reforma a vapor, a qual envolve uma reação endotérmica e catalítica do metano com vapor d'água a uma temperatura entre 800 a 900 °C".

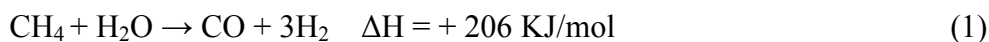
O gás natural provém da mistura de hidrocarbonetos gasosos, metano e hexano, no entanto o metano está em proporções mais elevada, sendo o principal componente, dependendo do tipo de reserva que o mesmo é extraído. O gás natural é um gás leve, mais leve que o ar (densidade 0,6 g/cm<sup>3</sup>), e gera entre 8000 e 10000 kcal/m<sup>3</sup> quando entra em combustão. É encontrado na natureza diluído em óleo (associado) ou em estado livre (não associado), chegando a possuir 78 % da composição no tipo associado (quando diluído em

óleo) e até 87 % no tipo não associado (estado livre) e é o principal gás existente na maioria das reservas de gás natural no planeta (VASCONCELOS, 2006).

O processo de reforma a vapor de metano que converte os hidrocarbonetos em uma mistura que contém hidrogênio, dióxido de carbono, monóxido de carbono e metano se chama conversão do metano em gás de síntese. Tal reação da reforma do vapor, ocorrendo a altas temperaturas, quebra o metano diretamente em gás de síntese, consistindo em uma mistura de hidrogênio e monóxido de carbono, sem haver a formação de produtos intermediários, onde posteriormente o hidrogênio é extraído e purificado para ser usado na indústria (VASCONCELOS, 2006).

Na reforma a vapor do gás natural há como fonte a energia térmica, havendo assim a separação dos átomos de hidrogênio dos átomos de carbono presentes no metano. No mesmo processo, posteriormente, extrai-se as moléculas de hidrogênio deixando o dióxido de carbono como subproduto, fato este que é desfavorável, já que o dióxido de carbono é liberado na atmosfera, sendo um gás poluente (MEDEIROS e BOTTON, 2007).

Duas reações são importantes para reforma a vapor do metano, sendo a primeira endotérmica, demandando calor para ocorrer (equação 1).



A segunda etapa trata-se do aumento de concentração do hidrogênio no gás liberado do primeiro reator, sendo essa reação um processo exotérmico (SORDI, 2006) (equação 2).



Existe como forma de produção de hidrogênio também a reforma a vapor de hidrocarbonetos e alcoóis, sendo que esta técnica tem sido amplamente estudada durante a última década. Neste processo o etanol obtido a partir da cana-de-açúcar no Brasil, que é uma matéria-prima renovável, apresenta vantagens em aspectos ambientais, uma vez que não contribui para o aumento das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera, já que este é consumido posteriormente na renovação da safra da cana-de-açúcar. Existem ganhos efetivos também ao se remover a dificuldade de estocagem e distribuição do hidrogênio (MAIA et al., 2007).

### 3.5.2 Produção de bio-hidrogênio

Os processos biológicos têm sido estudados pela proposta de diminuição de resíduos, tornando-se viáveis diante da redução de custo de energia e transporte, visto que podem ser feitos em localidades com fonte de biomassas acessíveis.

Seu maior objetivo é um rendimento maior de hidrogênio com um método economicamente aceitável. As tecnologias podem ser separadas em algumas categorias, alguns exemplos dessas categorias são a biofotólise direta, a fermentação escura e os reatores microbianos auxiliados bioeletroquimicamente (BEAMR).

A biofotólise direta utiliza um sistema fotossintético de microalgas que transformam energia solar em energia química para quebra da molécula de água. Sua vantagem está no uso da água, porém, em contrapartida tem uma eficiência que pode chegar a 15 % (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

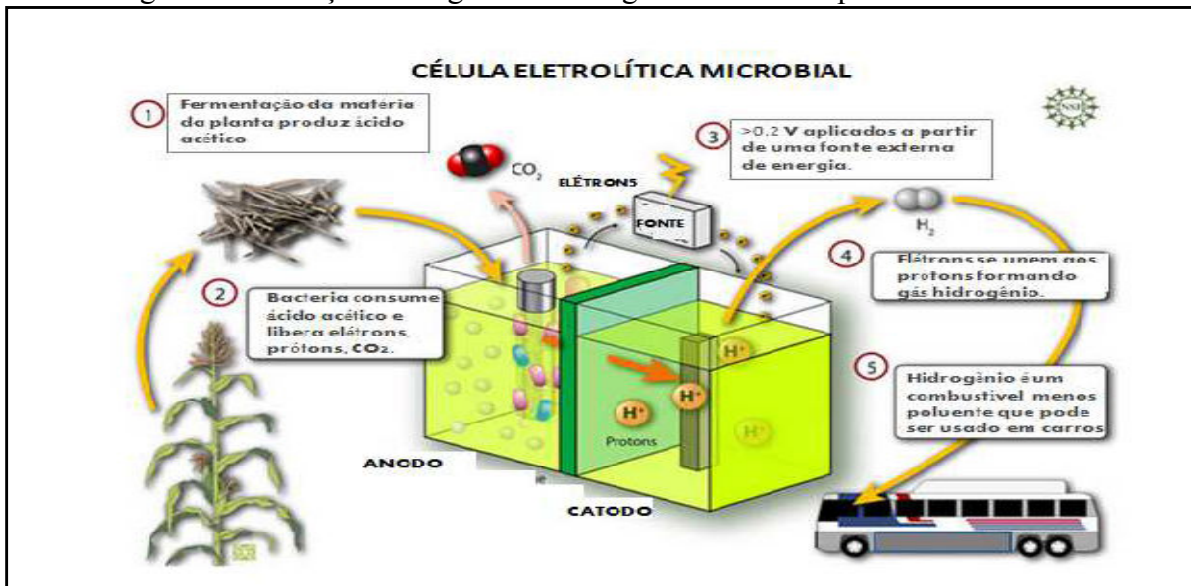
A fermentação escura faz uso de uma biomassa seca, barata e em grandes quantidades, em temperaturas relativamente baixas, entre 30 e 80 °C. Diferente do processo de biofotólise, há subprodutos na fermentação escura como o dióxido de carbono e metano e a composição dos gases dependerá do processo e do substrato utilizado. O rendimento também sofre interferência diante do processo utilizado e seu custo aumenta conforme a necessidade de tratamento adicional de águas residuais (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

Os BEAMR fazem uso da hidrogenação eletroquímica para transformação de matéria biodegradável em hidrogênio, e podem ser utilizados no tratamento de esgoto, fornecendo hidrogênio de grande pureza (> 99,5 %), porém apresentando uma baixa eficiência. Em termos de ecologia e energia, há uma grande aceitação dos processos biológicos, quando comparados entre si, e a alternativa com maior viabilidade no momento é a fermentação escura que tem uma boa eficiência variando entre 60 e 80 %, podendo ser comparada com métodos convencionais. Torna-se interessante por não necessitar de grandes áreas ou energia solar (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

Algumas recentes pesquisas (Figura 6) estudam também melhores condições para se adquirir hidrogênio de fontes renováveis via bio-reatores a partir da decomposição de material orgânico (biomassa), onde a fermentação da matéria produz ácido acético e este ao ser consumido por bactérias específicas liberam elétrons, prótons  $H_+$  e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e então esta energia é fornecida à célula e a reação formada produz hidrogênio devido as reações químicas ocorridas nos bio-reatores. (HALLENBECK, ABO-HASHESH e GHOSH, 2012).



Figura 6 - Produção Biológica de Hidrogênio através de processo microbiano



Fonte: Adaptação e tradução da imagem disponível em: <http://www.making-hydrogen.com/hydrogen-fuel-cell.html>.

### 3.5.3 Decomposição da água

A decomposição da água é um processo que vem sendo pesquisado sistematicamente nos últimos anos, principalmente para a obtenção de hidrogênio em sua forma pura, que pela natureza do processo também produz o oxigênio. Pode-se fazer um estudo da decomposição da água dividindo-o nas seguintes categorias: termólise, fotoeletrolise e eletrólise (SHEN et al. 2011).

#### 3.5.3.1 Termólise

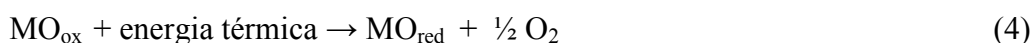
A decomposição direta da água é uma forma simplificada para obtenção de hidrogênio e oxigênio e segue a seguinte reação (equação 3):



Segundo Funk (2001) apud Ferreira (2011) esta reação se torna termodinamicamente viável sob temperaturas elevadas de até 4426,85 °C (4700 K), entretanto, esta condição dificulta a separação dos gases hidrogênio e oxigênio porque em tais temperaturas torna-se uma mistura explosiva e também não se sabe qual seria a interação do H<sub>2</sub> com o material do reator.

Diante desse impasse dos ciclos termoquímicos vem sendo desenvolvidas desde as décadas de 1970 e 1980 alternativas para fazer a decomposição térmica da água com produção indireta de hidrogênio em temperaturas menos elevadas, e neste sentido já existem mais de 300 ciclos descritos. (FERREIRA, 2011; BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012). Geralmente o ciclo termoquímico é fechado, ou seja, as substâncias químicas utilizadas são recicladas, e o ciclo também possui duas ou mais etapas, onde se faz uso de óxidos metálicos, formando um par redox que pode ser representado de forma simples pelas seguintes equações (eq. 4 e 5) (INOUE, 2004 apud FERREIRA, 2011; BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012):

Etapa 1



Etapa 2



Neste caso, há um processo endotérmico na primeira etapa, em que o óxido será reduzido gerando  $\text{O}_2$  no produto. Na etapa seguinte a água oxida o óxido anteriormente reduzido e forma-se  $\text{H}_2$ .

Na década de 1970, um ciclo que utilizava iodo e dióxido de enxofre foi desenvolvido na General Atomics, em San Diego, nos EUA, com uma eficiência de produção de hidrogênio de 40 a 52 %. Ao se fazer uma comparação notou-se uma eficiência maior desta decorrente da perda de energia elétrica que ocorre na eletrólise. Sua desvantagem está na temperatura elevada e nos ácidos produzidos que exigem uma resistência maior dos materiais utilizados (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

### 3.5.3.2 Fotoeletrólise

A fotoeletrólise é uma forma renovável de produção de hidrogênio com maior eficácia e menores custos, ainda em fase experimental de desenvolvimento, e que funciona absorvendo energia solar e transformando em energia necessária para a decomposição direta da molécula de água em oxigênio e hidrogênio (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

Há um sistema de coleta de luz fotoeletroquímica (PEC) para conduzir a eletrólise da água. O fotoeletrodo é o dispositivo semicondutor responsável pela absorção de energia solar e simultaneamente criação da energia necessária para a decomposição da molécula de água em oxigênio e hidrogênio quando este estiver submerso em um eletrólito aquoso exposto a radiação solar. O fotoeletrodo é formado por camadas fotovoltaicas catalíticas e protetoras, e cada camada influenciará na eficiência do sistema, e sua produção é a partir de materiais semicondutores absorvedores de luz (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

A reação dependerá de vários fatores, como o tipo de material semicondutor e da intensidade solar, que produz uma densidade de corrente de 10-30 mA/cm<sup>2</sup>, sendo necessária uma tensão de 1,35 V para a eletrólise ocorrer. A absorção de luz do material é diretamente proporcional ao desempenho do fotoeletrodo. As camadas catalíticas requerem catalisadores adequados para a decomposição da água. Outro componente importante é a camada encapsulada do fotoeletrodo que impedirá a corrosão do semicondutor (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

### 3.5.3.3 Eletrólise da água

No presente estudo sobre o uso de maçarico oxí-hidrogênio, a eletrólise da água é o objeto central dada a capacidade de se obter os gases hidrogênio e oxigênio para sua combustão imediata e sem a necessidade de armazenamento em vasos de pressão.

Cabe salientar que as tecnologias utilizadas para a produção comercial de hidrogênio via eletrólise da água datam das décadas de 1920 e 1930. Tal tecnologia foi muito utilizada em países como Noruega e Canadá, tendo seu principal uso na produção de amônia e na substituição de energia proveniente de hidrocarbonetos, mas por volta da década de 1940 a disponibilidade de grande quantidade de petróleo refinado por causa do seu uso em praticamente todos os processos industriais e comerciais, as pesquisas em eletrólise praticamente cessaram, sendo reiniciadas as pesquisadas somente na década de 1970 devido as já enormes preocupações nesta época com a preservação do meio ambiente e a busca por fontes renováveis de energia. França, Japão, Noruega, Bélgica e Estados Unidos da América passaram a investir novamente em pesquisas sobre a eletrólise da água nessa década. Hoje praticamente toda a produção de hidrogênio é derivada de fontes fósseis, sendo a reforma do gás metano a forma mais utilizada para a obtenção de hidrogênio (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998).

A eletrólise da água consiste em um processo que envolve a introdução de uma corrente elétrica gerada por uma fonte externa, produzindo assim uma reação de oxi-redução não espontânea, sendo que esta ocorre em uma célula eletrolítica obedecendo a equação global descrita abaixo (equação 5) (RIBEIRO e PARIZZI, 2011).



A eletrólise é feita em temperatura ambiente, e diante da má condutibilidade da água destilada é necessário o uso de um eletrólito suporte, que pode ser um sal, uma base ou um ácido, para que haja a decomposição eletrolítica. Do ponto de vista ambiental é uma tecnologia ecológica, pois nenhum gás do efeito estufa é liberado durante a produção. No entanto em comparação com as propostas já consideradas acima é uma tecnologia que exige a utilização constante de energia elétrica para decomposição da água e obtenção dos gases  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ . Sua eficiência na prática chega a atingir 70% (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012). A eletrólise pode ser feita de algumas formas diferentes, como a troca de prótons em um eletrolisador de membrana de eletrólito polímero (PEM), ou em células de eletrólise de óxido de sódio ou em um eletrolisador alcalino.

O PEM, que tem uma eficiência entre 55% e 70% de capacidade e funciona com eletrolisadores normalmente de negro de platina, irídio, rutênio e ródio como catalisadores de eletrodos, e com uma membrana de polímeros de Nafion que separam o gases (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012). A água entra na célula pelo ânodo, onde acontece a reação de oxidação da água e geração de oxigênio (Equação 6):



Já os íons hidrogênio passam através da membrana para o cátodo onde recebem elétrons para a formação de hidrogênio gasoso como apresentado na reação a seguir (Equação 7).



A eficiência global da eletrólise está na faixa dos 25%-35% ao considerar a eficiência da produção de energia elétrica, que varia entre 30% a 40% em recursos convencionais (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

As células de eletrólise de óxido de sódio são compostas essencialmente de óxidos sólidos de células a combustível, que fazem uso de um material sólido como eletrólito. Funciona como sistema alcalino, pois o íon de oxigênio passa pelo eletrólito enquanto o hidrogênio fica em um fluxo de vapor não reativo. É um eletrolisador que trabalha em altas temperaturas (500-800°C) em comparação com os outros tipos, e a temperatura pode ser utilizada como forma de reduzir a energia elétrica necessária para produção de hidrogênio (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012).

As tecnologias mais utilizadas são baseadas na eletrólise de soluções alcalinas, sendo este eletrolisador composto por eletrodos, um separador microporoso e uma solução alcalina de cerca de 30% em massa de NaOH ou KOH. Segundo Úrsua e colaboradores (2012) apud (PINESCHI, 2013) os eletrodos devem ser feitos de material que apresentem boa resistência à corrosão, alta condutividade elétrica, com propriedades catalíticas adequadas para a reação e que apresente também integridade estrutural conveniente para a aplicação em questão. Já o eletrólito deve manter-se inerte durante todas as etapas da reação, ou seja, não deve sofrer nenhum tipo de mudança química ou estrutural e principalmente não deve reagir com o material dos eletrodos, e o mesmo deverá ser continuamente completado devido à perda de outros sistemas, como a regeneração do hidrogênio (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012). A dissociação da molécula da água é feita através da aplicação de corrente elétrica direta que flui entre os eletrodos sem ligação física e imersos em solução aquosa. Os elétrons fluem para o cátodo, onde haverá uma reação de redução e a formação de hidrogênio gasoso. Já no ânodo haverá a reação de oxidação e a formação de oxigênio gasoso e água. (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012; PINESCHI, 2013).

Há uma grande diversidade de eletrolisadores atualmente e estes estão constantemente sendo otimizados. A eletrólise possui um grande consumo energético que a torna cara se a energia for oriunda de fontes não renováveis de energia (termoelétricas a diesel e carvão e gás), além de torná-la menos sustentável e mais cara, porém, ao se fazer uso de energias renováveis disponíveis no Brasil (energia solar, hidrelétrica e eólica), a eletrólise tende a ser viável em termos econômicos e ambientais. A eletrólise da água tornou-se uma possibilidade menos impactante quando bem estruturada a forma de obtenção de energia elétrica (BICÁKOVÁ e STRAKA, 2012; PINESCHI, 2013).

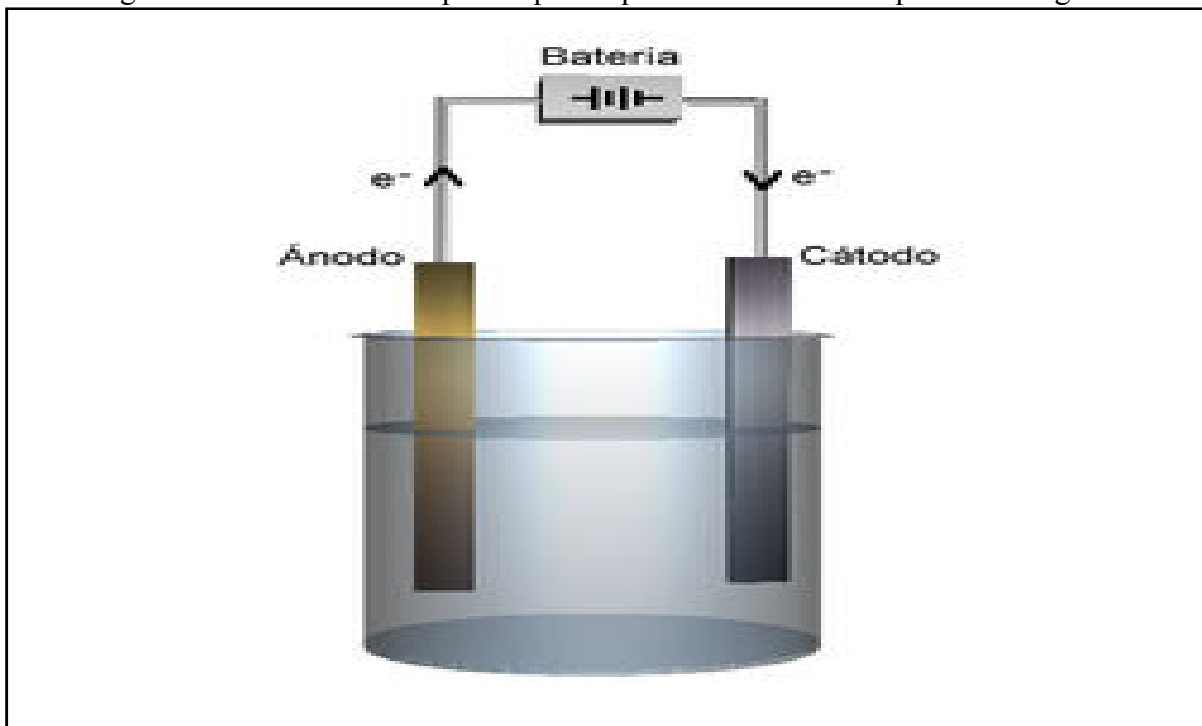
Nos eletrolisadores os eletrodos estão sob ação de corrente contínua, e um deles é carregado eletricamente com cargas negativas (cátodo) e o outro com cargas positivas (ânodo). A água (eletrólito) por sua vez precisa conter um eletrólito suporte para que lhe promova uma boa condutividade elétrica. A reação nos eletrodos, que estão em contato com a

água contendo o eletrólito suporte, faz com que haja a quebra da molécula, resultando na produção dos gases hidrogênio e oxigênio na proporção de 2 moléculas de hidrogênio para 1 molécula de oxigênio (NETO, 2007).

Há uma grande diferença entre os tipos de eletrolisadores existentes e pesquisados. Os eletrolisadores do tipo unipolar, tipo tanque, onde os eletrodos se encontram mergulhados na solução de água mais eletrólito suporte, acabam que produzem os gases hidrogênio e oxigênio misturados, onde acaba se denominando que este gás produzido não vem a ser um gás puro, mas sim um gás rico em hidrogênio (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998).

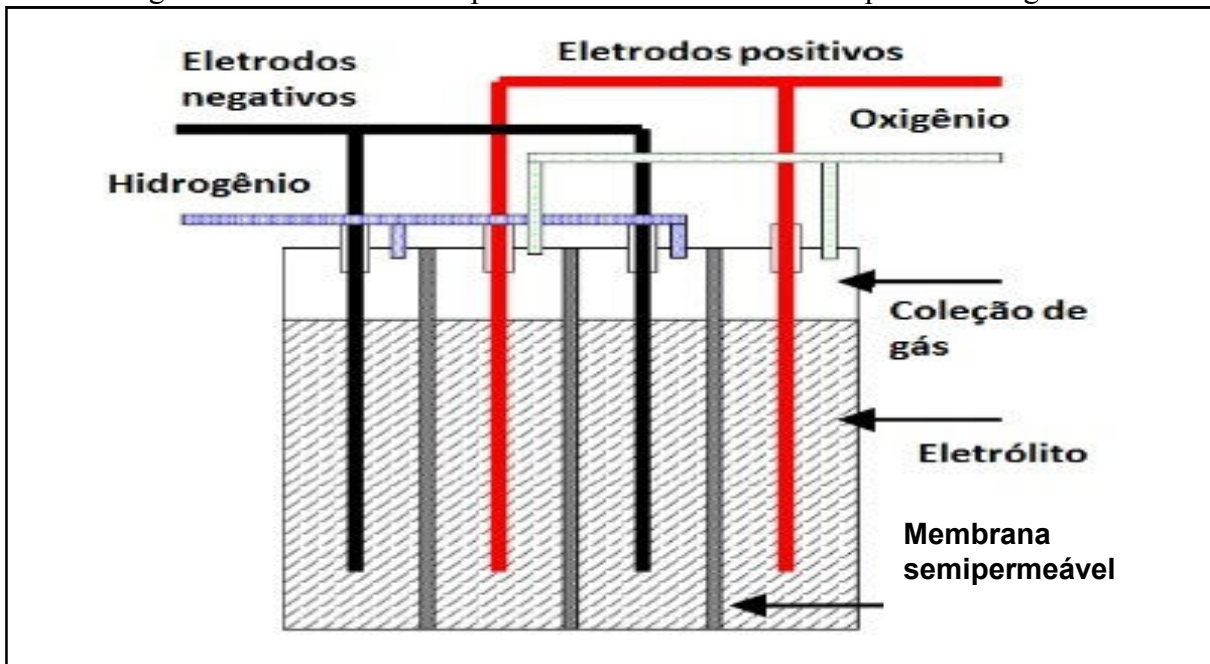
Na Figura 7 é possível observar um eletrolisador unipolar tipo tanque, onde a produção dos gases hidrogênio e oxigênio são produzidos pela decomposição da água via eletrólise, no entanto estes gases encontram-se misturados devido a não existência de membranas semipermeável separadoras de gases. Já, na Figura 8 é possível observar um eletrolisador unipolar selado, onde o mesmo possui membrana semipermeável, o que possibilita a separação dos gases hidrogênio e oxigênio.

Figura 7 - Eletrolisador unipolar tipo tanque sem membrana separadora de gases



Fonte: Eletrolisador unipolar disponível em: [pt.wikipedia.org/wiki/célula\\_eletrolítica](http://pt.wikipedia.org/wiki/célula_eletrolítica)

Figura 8 - Eletrolisador unipolar selada com membrana separadora de gases



Fonte: Relatório Técnico - Electrolysis: Information and opportunities for electric power utilities

### 3.6 TECNOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DE OXIGÊNIO

Os maçaricos, assim como outros dispositivos que necessitam de chamas que atinjam altas temperaturas (até 5000 °C), precisam necessariamente receber um gás comburente, que pode até ser o ar atmosférico, mas que encontram no oxigênio de grau de pureza elevada chamas utilizáveis em processos industriais. No entanto, este gás está presente na atmosfera misturado com outros gases ( $N_2$  – 78 %,  $O_2$  – 21 % e outros gases 1%) e para se obter em grau de pureza elevado (acima de 99,5%), o mesmo deve ser separado dos demais se utilizando as técnicas de destilação fracionada e/ou dissociação eletrolítica da água (BOETTCHER, 2014), sendo esta técnica descrita anteriormente. Através da técnica da destilação fracionada, tem-se a captação do ar seco e este é convertido em ar liquefeito através de seu resfriamento a  $-200^\circ\text{C}$  (criogenia) e posteriormente submetido a coluna de fracionamento, separando assim o oxigênio dos demais gases existentes na atmosfera (HNYDIUK-STEFAN, SKLADZIEND - 2015).

### 3.7 INFLUÊNCIA DO GÁS OXIGÊNIO NA TEMPERATURA DA CHAMA

O gás comburente utilizado na indústria para se produzir chamas de calor elevado pode ser proveniente do ar atmosférico, mas quando no processo de combustão este ar

atmosférico apresenta-se enriquecido de oxigênio em elevado grau de pureza, a chama passa a apresentar maior temperatura, sendo mais eficiente em diversos processos, pois acaba por reduzir a utilização de quantidades excessivas de gás combustível, sendo muito comum tal advento nos processos da indústria metalúrgica e siderúrgica. Muitos fornos de industriais que utilizam gás natural em seus processos, acabam potencializando seus processos ao introduzir vazões elevadas e programadas de oxigênio, criando a chama denominada oxidante (ROSSI, 2014). Esta alternativa de se utilizar o ar enriquecido com oxigênio ou mesmo se aplicar o oxigênio com pureza elevada para se obter temperaturas elevadas se dá via algumas técnicas específicas, entre elas destacam-se a adsorção por pressões oscilantes em crivos moleculares e destilação criogênica, havendo ainda outras técnicas que estão sendo estudadas e utilizadas cada vez mais, sendo que podemos citar a técnica de separação por membranas. Os níveis de oxigênio podem chegar até mesmo a uma composição em que o mesmo seja usado em sua totalidade, ou seja, o gás comburente usado para se alcançar temperaturas elevadas pode chegar até mesmo a 100% de sua composição (CACUA-MADERO e HERRERA-MÚNERA, 2013).

Segundo Hess (2019), há uma vantagem muito grande na utilização de O<sub>2</sub> nos processos de combustão de oxi-combustíveis e como há um grau de liberdade para a adição de oxigênio no processo, há também assim uma chama com maior eficiência quando usado oxigênio em proporção estequiométrica, mas não se sabe ainda com total clareza e compreensão os fatores físicos e de composição química que influenciam os parâmetros de temperatura da chama.

### 3.8 ELETRODOS DE AÇO INOX 316L – COMPOSIÇÃO DA LIGA E CORROSÃO

Os aços inoxidáveis são aços com composição de ferro e cromo. O mesmo pode apresentar outros tipos de materiais em sua composição, mas precisa apresentar no mínimo 11% de cromo para que seja considerado um aço inoxidável e assim ganhe resistência contra a corrosão (DENNY, 1996). Os aços inoxidáveis existentes, de acordo com a sua metalografia, podem ser classificados como martensíticos, ferríticos ou austeníticos. O aço inox 316L é classificado como austenítico e sua liga compõem-se por ferro, cromo, níquel e molibdênio o que faz dele um ótimo produto resistente a corrosão e sem magnetismo, possuindo baixo teor de carbono, no máximo 0,03%. O fato do mesmo ter uma grande resistência a corrosão se deve a presença de cromo, que é formada de um camada passivadora de óxido de cromo na superfície do metal (PIRES, BIERHALZ e MORAES, 2015).



Segundo Gentil (2003), a corrosão é a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos.

Quando a corrosão dos metais ocorre por via de um processo eletroquímico, ou seja, devido ao estabelecimento de uma diferença de potencial elétrico entre dois ou mais metais ou partes de um mesmo metal, há então a formação de reações anódicas e catódicas (LOMBARDI, 1993).

Existem alguns tipos de corrosão, entre elas as corrosões uniformes, as corrosões de fenda, corrosão por pites, as de danos causados por hidrogênio, as corrosões por erosão e as corrosões galvânicas que são típicas dos processos eletroquímicos e que afetam os anodos e catodos, tendo como uma das características o acúmulo de óxidos de ferro na superfície do aço (DENNY, 1993).

### 3.9 ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICO-FINANCEIRA DE PROJETOS DE INVESTIMENTO

Historicamente a humanidade vem tendo dificuldades para lidar com os valores agregados aos materiais (quantidade física) e consecutivamente vem tendo dificuldade no seu desenvolvimento econômico. Para resolver isso, a humanidade vem buscando uma solução para aliar a sua tecnologia e a economia, buscando a chamada eficiência econômica. Da integração desses fatores acabou-se por surgir a chamada Engenharia Econômica, que busca as maneiras de satisfazer as necessidades e vontades humanas e o custo previsto para as realizações de suas necessidades (NAKANO, 1967).

No mercado, existem vários instrumentos para se planejar um investimento, e a orçamentação é uma delas e esta vem a ser o processo ao qual se atribui um valor monetário a uma decisão que se pretenda tomar, considerando o quanto vai custar essa decisão e quais resultados financeiros que serão alcançados no futuro. Em resumo, a transformação de quantidades físicas em valores monetários traduz a essência da orçamentação e todo o processo de análise econômica realizado envolve valores de receitas e despesas. Esses dados precisam ser conhecidos, tabulados e projetados para que se possa controlar economicamente a atividade fim desenvolvida (NORONHA, 1981). Segundo o autor, há ainda os orçamentos do tipo parcial, unitário, orçamentos de atividade, orçamentos de grupos de atividades, orçamento total e de grupos de empresas, sendo que na orçamentação parcial há a capacidade de se analisar modificações parciais na organização da empresa e tais decisões servem para se

optar se mantém a composição original da estratégia empregada na produção, assim como se há a possibilidade de se modificar ações que levem a empresa a obter vantagens (benefícios) ou ainda desvantagens (custos), ou seja, a orçamentação parcial objetiva avaliar uma mudança pontual no processo produtivo em que não se altera a tecnologia ou sistema de produção e sim algum item, nível, quantidade e a técnica mais indicada.

A chamada orçamentação parcial analisa mudanças que tendem a levar o administrador ou comerciante a realizar modificações parciais na empresa, levando o mesmo a poder comparar qual seria a melhor utilização de um equipamento e/ou produto em relação ao já empregado na produção da empresa ou comércio. A resultante desta análise expõe qual a melhor decisão em caráter financeiro a ser adotado para que os custos de produção sejam mitigados sem se perder a qualidade do produto final, ou seja, a orçamentação parcial indica qual o melhor custo benefício a ser adotado. O processo de análise leva em consideração os benefícios conquistados economicamente e o custo monetário desta decisão, onde os benefícios precisam ser maiores que os custos. Caso este não seja possível não se recomenda a substituição do processo e/ou produto pelo objeto comparado ao tradicionalmente utilizado, e caso a relação benefício *versus* custo seja de igualdade, a substituição de um processo/produto pelo outro se torna equivalente. Na orçamentação parcial deve-se correlacionar os custos variáveis e os custos fixos e o resultado desta avaliação pode vir a indicar que a produção e/ou comércio de algo possa ser totalmente substituído pelo produto em comparação, podendo também ser substituído em porcentagens, ou mesmo ser substituído totalmente pelo produto/serviço em comparado com o já utilizado (NORONHA, 1981).

#### 4 MATERIAL E MÉTODOS

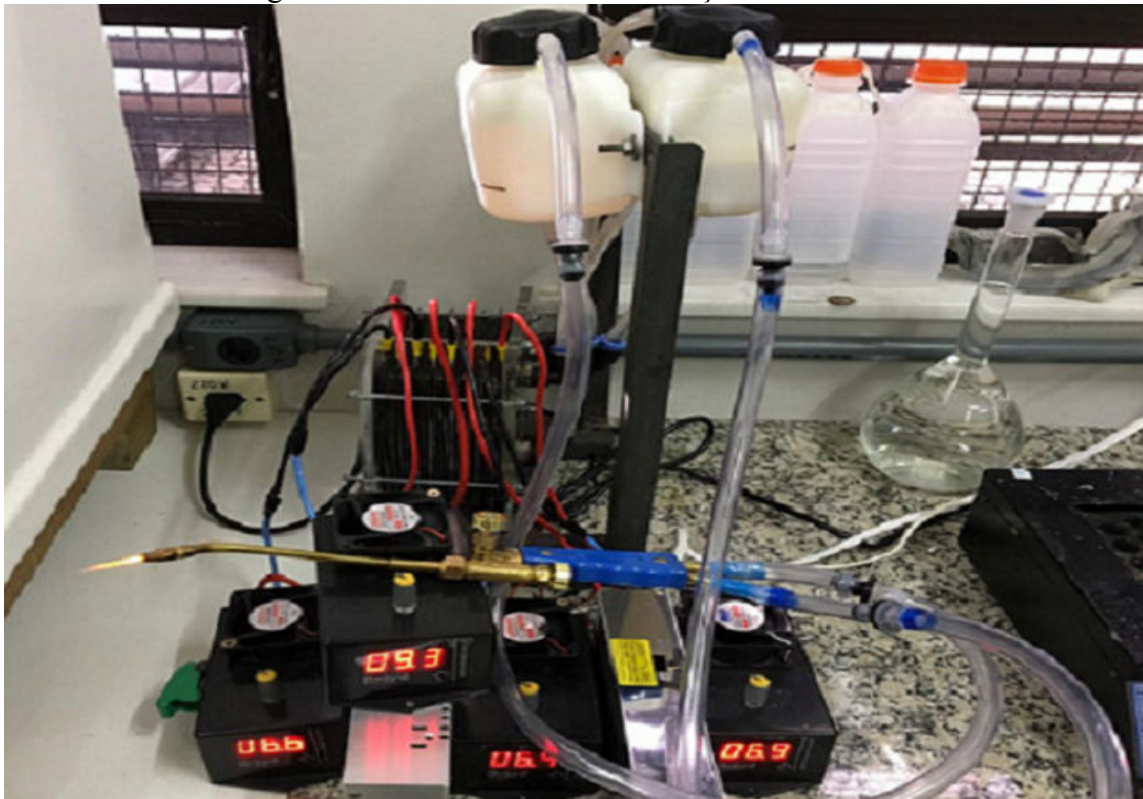
##### 4.1 COMPONENTES UTILIZADOS NA BANCADA DE TESTE

Os equipamentos utilizados para a realização da pesquisa foram formatados para se monitorar temperatura, vazão, corrente elétrica, voltagem e calor produzido pela chama. Deste modo, a bancada de testes utilizou os componentes citados a seguir (Figura 9):

- 02 Transformadores de voltagem (entrada)127 V/12 V (saída);
- 04 PWMs (Pulse Width Modulation) marca *Droyd* com display digital de 30 A;
- 02 reservatórios de solução (plástico) com capacidade de 1,5 litros marca *OGO*, com 03 saídas/entradas 3/8” e com tampa rosqueável;
- 01 célula eletrolítica do tipo seca (*drycell*);

- 01 suporte de ferro para fixação do eletrolisador e dos reservatórios;
- 01 alicate amperímetro/multímetro digital *Minipa Et3200*;
- 01 termômetro laser/infravermelho *UFREE GM300* com faixa de temperatura entre - 50° a 420 °, e com precisão de +/- 1,5 °C;
- 01 termopar “W” (suporta temperaturas de até 1000 °C);
- 01 registrador gráfico de temperatura com 6 canais, modelo Fugi PHE 9, com microprocessador e display digital;
- 01 maçarico de solda industrial 201 para utilização com gás oxi-acetileno;
- 01 extensor solda nº 02 – marca Vonder;
- 01 fluxômetro da marca *MORIYA* com escala de zero a 15 litros de gás oxigênio por minuto (L/min);
- 03 metros de tubo plástico flexível 3,8”;
- 02 metros de cabo rígido de cobre de 6 mm nas cores preto e vermelho;
- 04 válvulas anti-retorno de gases e chamas (flashback).

Figura 9 - Bancada de teste com maçarico e eletrolisador



Fonte: Próprio autor

## 4.2 ELETROLISADOR

O eletrolisador pesquisado e gerador dos gases hidrogênio e oxigênio é do tipo que produz os gases separadamente por meio de membranas semipermeáveis, sendo o mesmo desenhado e desenvolvido exclusivamente para este estudo. O mesmo é do tipo “*DryCell*” (célula seca) unipolar. A análise deste tipo de eletrolisador permitiu a investigação da eficiência do maçarico no exercício de sua função. Esta análise foi feita determinando-se a vazão dos gases (litros por minuto – L/min), temperatura do eletrolisador (°C), temperatura dos reservatórios do eletrólito (°C) e a temperatura da chama (°C) obtida pelo maçarico. Os materiais utilizados na construção da célula são os seguintes:

- 02 placas de acrílico transparente com dimensões de 220 x 154 mm;
- 22 placas de aço inox 316L;
- 08 parafusos de 250 mm de comprimento e 5 mm de diâmetro cada;
- 16 porcas de pressão nº 07;
- 16 arruelas de pressão com furo de 5 mm;
- 48 borrachas espaçadoras de látex puro na cor preta com espessura de 2 mm cada, desenhadas especificamente para o projeto, com diâmetro externo de 144 x 120 mm e com diâmetro interno de 100 x 100 mm cada;
- 23 membranas permeáveis com dimensão externa de 144 x 120 mm;
- 03 engates rápidos com dimensão de entrada de 10 mm.

## 4.3 ELETRODOS

Os eletrodos utilizados são constituídos de aço inoxidável 316L, com formato retangular e espessura de 0,9 mm, com as dimensões de 150 x 120 mm, contendo 03 orifícios com diâmetro de 10 milímetros cada. O conjunto de eletrodos utilizados na construção do eletrolisador foi de 22 eletrodos, sendo 04 eletrodos com carga positiva (ânodos) e 04 eletrodos com carga negativa (cátodo) e 14 placas desenergizadas, chamadas de placas neutras e que contribuem prioritariamente na dissipação do calor gerado na eletrólise, mas que também participam do processo eletrolítico.

## 4.4 ELETRÓLITO SUPORTE

A água possui baixa condutividade elétrica e por isso um eletrólito suporte foi utilizado na pesquisa, sendo escolhido hidróxido de potássio (KOH). O KOH foi adotado

devido o mesmo ser uma base forte, o que favorece a uma não corrosão espontânea dos eletrodos de aço inoxidável 316L empregados no eletrolisador, aumentando a vida útil do material. O mesmo foi utilizado nas concentrações de  $20 \text{ g L}^{-1}$  e  $40 \text{ g L}^{-1}$ . O eletrólito suporte foi preparado em água desmineralizada e deionizada em Sistema Millipore Direct-Q® 3W (Milli-Q), sendo aplicado nos volumes de 1,0, 1,5 e 2,0 litros.

#### 4.5 TENSÃO E CORRENTE APLICADA

O estudo da eletrólise da água para produção de gases utilizados no maçarico utilizou 02 transformadores de energia com entrada de 127 Volts e saída de 12 Volts, sendo tal tensão utilizada em cada par de eletrodos (6 Volts no cátodo e 6 Volts no ânodo), caracterizando assim o uso contínuo de 12 Volts no conjunto de cada par de eletrodos do eletrolisador. A corrente aplicada nos experimentos foi a de 10 e 15 Ampères, sendo a mesma escolhida após testes que mostraram que a tocha do maçarico veio a acender plenamente após a adoção da corrente de 10 A, passando a ter uma chama estabilizada e sem apagamentos devido a falta de vazão e pressão dos gases hidrogênio e oxigênio.

#### 4.6 APLICABILIDADE DO MAÇARICO

O maçarico foi utilizado em processos de soldagem de fios elétricos com deposição de estanho, no corte de hastes de aço inoxidável de pequena espessura (0,5 mm) e na fundição de chumbo. O maçarico também foi testado no corte e fundição de pequenos pregos e parafusos, e no corte de latas de alumínio de refrigerante.

#### 4.7 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O procedimento experimental foi realizado no Laboratório de Química Analítica e Ambiental (T-05) da Universidade Federal Fluminense, em Volta Redonda, RJ (Campus Atarrado), variando-se as configurações da célula e os parâmetros investigados para o levantamento de dados e tabulação dos resultados.

Os experimentos respeitaram os seguintes parâmetros, sendo estes observados e registrados:

- Volume do Eletrólito (1,0 litro; 1,5 litros; 2,0 litros);
- Concentração do Eletrólito ( $20 \text{ g L}^{-1}$  e  $40 \text{ g L}^{-1}$  de KOH);
- Voltagem (6 V e 12 V);

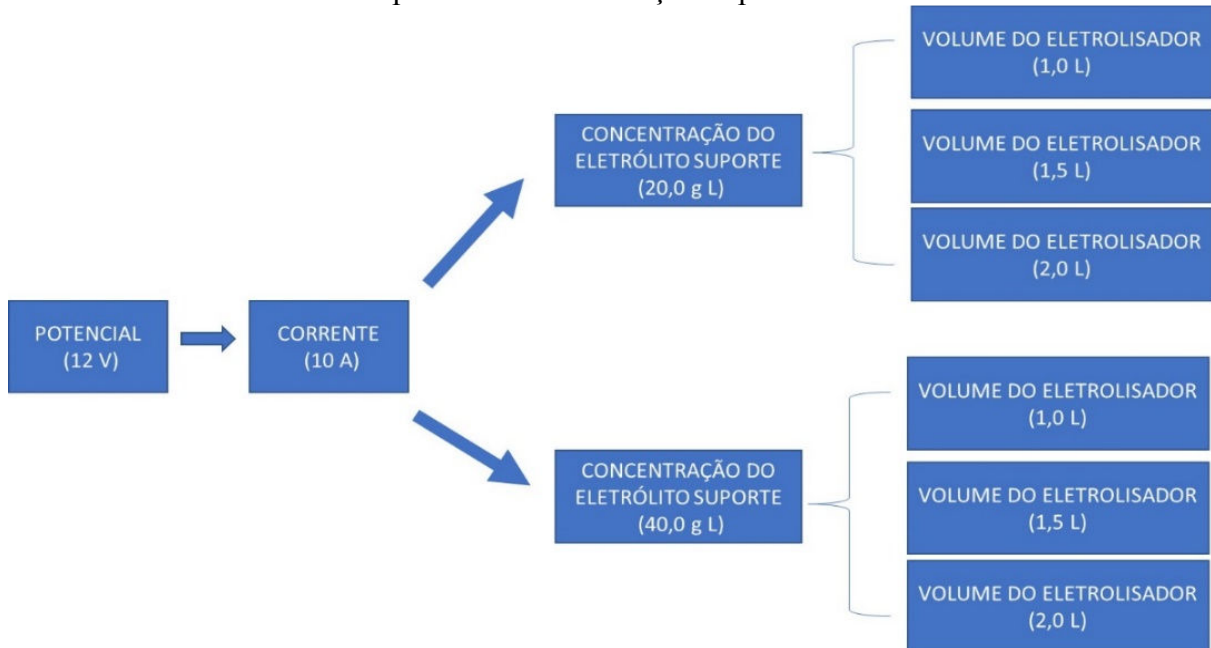
- Corrente (10 e 15 A);
- Temperatura dos Reservatórios de Hidrogênio e Oxigênio ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura da Célula Eletrolítica ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Temperatura da Chama do Maçarico ( $^{\circ}\text{C}$ );
- Vazão dos Gases Hidrogênio e Oxigênio produzidos.

Os experimentos partiram inicialmente da configuração que empregava a tensão 6 V por cada par de eletrodos (4 anodos e 4 catodos) e corrente de 5 A. No entanto, esta configuração resultou na não combustão dos gases produzidos. Devido a baixa vazão e pressão, o maçarico estava apresentando o processo de engolimento de chama, o que torna a utilização do maçarico inviável. Devido estes mesmos fatores técnicos, a mensuração da vazão dos gases não realizada.

Em função da situação inicialmente observada, adotou-se então para o início dos experimentos e para os pares de eletrodos a tensão de 12 Volts e a corrente de 10. Para a realização dos experimentos com o maçarico foi proposto a fixação inicial dos seguintes parâmetros: Tensão (12 V), Corrente (10 A), Volume de eletrólito (1,0 L) e Concentração do Eletrólito Suporte ( $20 \text{ g L}^{-1}$ ). A seguir, foram variados os volumes de eletrólito, a corrente e a concentração do eletrólito suporte, cada uma delas de maneira individual, fixando os demais parâmetros quando uma delas era investigada.

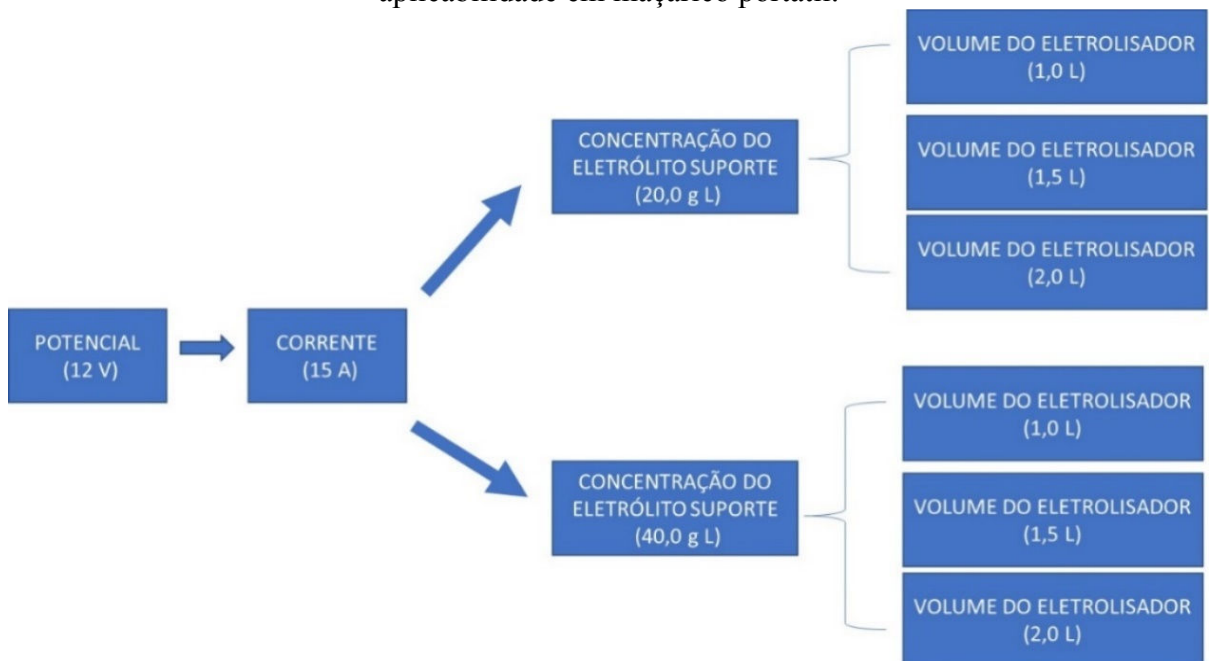
Os Esquemas 1 e 2 a seguir demonstram a sequência de experimentos que foi estabelecida. Para facilitar a compreensão de toda a pesquisa sobre o funcionamento do maçarico, os experimentos foram chamados nominalmente de acordo com a sequência de variáveis investigada. Um exemplo: 12V\_10A\_1,0L\_20g corresponde ao experimento conduzindo sob tensão de 12 V, aplicando uma corrente de 10 A, usando o volume máximo de eletrólito o em 1,0 L e com concentração de eletrólito suporte (KOH) em  $20,0 \text{ g L}^{-1}$ . Outro exemplo: 12V\_15A\_1,5L\_40g corresponde ao experimento conduzindo sob tensão de 12 V, aplicando uma corrente de 15 A, usando o volume máximo de eletrólito em 1,5 L e com concentração de eletrólito suporte (KOH) de  $40,0 \text{ g L}^{-1}$ . Essas nomenclaturas serão apresentadas para os resultados obtidos na forma de gráficos e tabelas, a serem apresentados no item “Resultados e Discussão”.

Esquema 1 - Sequência de experimentos para produção de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no eletrolisador para aplicabilidade em maçarico portátil.



Fonte: Próprio autor

Esquema 2 - Sequência de experimentos para produção de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no eletrolisador para aplicabilidade em maçarico portátil.



Fonte: Próprio autor

Todos os experimentos foram realizados em triplicata para cada uma das configurações acima citadas, tendo sido registrados todos os dados que foram julgados essenciais para o entendimento das características técnicas apresentadas pelo equipamento. Foram registradas as temperaturas dos reservatórios de hidrogênio (H<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>), a

temperatura do eletrolisador e a temperatura da chama, sendo esta relatada com a utilização da mistura de gases hidrogênio e gás oxigênio e sem a presença do gás oxigênio ( $O_2$ ) misturado, fixando ainda o tempo de observação de cada experimento em 30 minutos. Em todos os experimentos foram registradas as temperaturas iniciais e finais dos dispositivos que compõem o maçarico.

A realização dos experimentos em triplicata em cada uma das configurações possíveis e resultou na execução de 36 experimentos com duração de 30 minutos cada, totalizando 18 horas de funcionamento do equipamento em períodos intercalados. Devido à necessidade de se observar e catalogar as temperaturas máximas das chamas utilizando-se apenas o gás hidrogênio entende-se que o equipamento tenha sido utilizado por aproximadamente 22 horas.

Em todos os experimentos e em todas as configurações possíveis a temperatura dos reservatórios ( $H_2$  e  $O_2$ ), a temperatura do eletrolisador e a temperatura da chama eram aferidos no momento zero e as informações foram coletadas a cada 5 minutos. A medição da vazão dos gases hidrogênio e oxigênio (L/min), também foi realizada, totalizando 06 indicadores a serem monitorados a cada novo experimento.

#### 4.8 ANÁLISE FINANCEIRA DO MAÇARICO A PARTIR ELETRÓLISE DA ÁGUA EM COMPARAÇÃO AO MAÇARICO CONVENCIONAL

Para a realização da análise econômica, o estudo contou com a utilização de técnicas de administração financeira. Foram construídas planilhas no programa Microsoft Office Excel<sup>®</sup>, empregando a metodologia da Orçamentação Parcial, servindo esta para se analisar as melhores decisões a serem tomadas e que envolvem modificações marginais no processo que relaciona o consumo dos gases hidrogênio e oxigênio se estes tivessem sido adquiridos no mercado formal em comparação aos custos da utilização do maçarico a partir da eletrólise da água. O método da Orçamentação Parcial, que incluem cálculos que consideram os custos fixos, custos variáveis e as receitas, foi utilizado para que fosse possível investigar e comparar a utilização no mercado dos dois maçaricos e se poder analisar qual possui a maior viabilidade economicamente quanto ao preço, insumos para geração das chamas e quando comparados serviços executados por estes, levando-se em conta o consumo dos gases.



#### 4.8.1 Custos dos insumos para a geração dos gases e compra dos maçaricos

Para comparar os valores dos insumos utilizados na produção das chamas dos maçaricos, considerando a compra dos dois equipamentos, pesquisaram-se os preços dos gases acetileno, oxigênio e dos equipamentos completos (maçaricos). Esses preços foram cotados junto às empresas fornecedoras de insumos, equipamentos de soldagem e gases instaladas em Volta Redonda, RJ, bem como em sites especializados disponíveis na rede mundial de computadores. Foram considerados todos os insumos (Tabela 2) necessários para acender o maçarico e produzir a chama, a partir da eletrólise da água, quanto para o acendimento do maçarico comercial. Os preços foram pesquisados em diferentes fontes de consulta, tendo como referência o mês de janeiro do ano de 2019.

Tabela 2 - Custos dos equipamentos e insumos para a operação dos maçaricos

INVESTIMENTO	MAÇARICO (R\$)	MAÇARICO H <sub>2</sub> O (R\$)
EQUIPAMENTO	2.248,00	1.633,80
ACETILENO	45,00	-----
OXIGÊNIO	18,00	-----
HIDROGÊNIO	132,00	-----
ÁGUA DESTILADA (L)	-----	4,50
KOH (Kg)	-----	33,00
ENERGIA ELÉTRICA (kWh)	-----	0,83
MÃO-DE-OBRA (montagem)	-----	100,00

US\$ 1.00 = R\$ 3,741 – Dia, mês e ano de referência: 25 de fevereiro de 2019 (Banco Central do Brasil, 2019)

Para efeito comparativo o maçarico comercial precisou ter a sua apresentação e precificação feita a partir do valor unitário de cada componente, assim como o maçarico a partir da eletrólise da água, garantindo ao estudo o caráter de igualdade ao se comparar os preços dos equipamentos.

Todo o conjunto de peças que compõem o maçarico comercial (Quadro 3) se comprados em lojas especializadas, item por item, separadamente, apresentaram o valor total de R\$ 2.248,00 (US\$ 600.91), considerando o valor do dólar comercial de R\$ 3,741 (25 de fevereiro de 2019).

Quadro 3 - Preços em Reais (R\$) de cada componente do maçarico comercial

COMPONENTES	QUANTIDADE	PREÇO	TOTAL R\$
Mangueira Dupla - O <sub>2</sub> e Acetileno	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
Válvulas Anti-Chamas	2	R\$ 35,00	R\$ 70,00
Maçarico 201 (tocha)	1	R\$ 135,00	R\$ 135,00
Extensão de solda - nº 2	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
Regulador de pressão com manômetro O <sub>2</sub>	1	R\$ 141,00	R\$ 141,00
Regulador de pressão com manômetro C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	R\$ 141,00	R\$ 141,00
Cilindro de Oxigênio 1m <sup>3</sup>	1	R\$ 674,00	R\$ 674,00
Cilindro de acetileno 1m <sup>3</sup>	1	R\$ 674,00	R\$ 674,00
Válvula de topo de cilindro de O <sub>2</sub>	1	R\$ 94,00	R\$ 94,00
Válvula de topo de cilindro de C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1	R\$ 94,00	R\$ 94,00
Carrinho de transporte	1	R\$ 165,00	R\$ 165,00
Total Geral			R\$ 2.248,00

US\$ 1.00 = R\$ 3,741 – Dia, mês e ano de referência: 25 de fevereiro de 2019 (Banco Central do Brasil, 2019)

Quadro 4 - Componentes utilizados na fabricação do maçarico a partir da eletrólise da água

COMPONENTES	QUANTIDADE	PREÇO	TOTAL (R\$)
Fonte Elétrica 110/12 V	2	R\$ 42,00	R\$ 84,00
Borracha Tapete 2 mm (m <sup>2</sup> )	1,5	R\$ 25,00	R\$ 37,50
Placas de Acrílico	2	R\$ 47,00	R\$ 94,00
Eletrodos Aço 316L	22	R\$ 15,00	R\$ 330,00
Membrana semipermeável (m <sup>2</sup> )	0,8	R\$ 72,00	R\$ 57,60
Porcas de Pressão	16	R\$ 0,40	R\$ 6,40
Parafuso galvanizado 200 mm	8	R\$ 1,25	R\$ 10,00
Arruelas de Pressão	16	R\$ 0,25	R\$ 4,00
Gabinete (reservatórios/eletrolisador)	1	R\$ 75,00	R\$ 75,00
Válvulas Anti-Chamas	4	R\$ 20,00	R\$ 80,00
Maçarico 201 (tocha)	1	R\$ 185,00	R\$ 185,00
Extensão de solda - nº 2	1	R\$ 35,00	R\$ 35,00
Fio elétrico 6mm	3	R\$ 2,85	R\$ 8,55
Tomada Elétrica	1	R\$ 5,75	R\$ 5,75
Reservatório de Eletrólito - 1,2L	2	R\$ 110,00	R\$ 220,00
PWM 30 Amperes com Display	4	R\$ 75,00	R\$ 300,00
Engate Rápido em "Y"	1	R\$ 25,00	R\$ 25,00
Engate Rápido	3	R\$ 20,00	R\$ 60,00
Tubos de cola de Silicone	2	R\$ 6,00	R\$ 12,00
Conexões Elétricas	8	R\$ 0,50	R\$ 4,00
Total Geral			R\$ 1.633,80

US\$ 1.00 = R\$ 3,741 – Dia, mês e ano de referência: 25 de fevereiro de 2019  
(Banco Central do Brasil, 2019)

O maçarico, a partir da eletrólise da água (Quadro 4) teve suas peças compradas separadamente em lojas comerciais localizadas no município de Volta Redonda, RJ. Neste

equipamento foram investidos R\$ 1.633,80 em peças (US\$ 436.73), adicionado o valor de R\$ 100,00 (US\$ 26.73) referentes ao pagamento de mão de obra especializada e treinada para montagem, totalizando R\$ 1.733,80 (US\$ 463,46). Os custos operacionais com os insumos (gases) não foram apresentados nos Quadros 3 e 4, uma vez que este custo operacional será considerado na análise da orçamentação parcial, proposta por Noronha (1981).

Estes equipamentos precisam, logicamente, de insumos para a sua utilização. Para o funcionamento do maçarico comercial, é necessária a compra de acetileno e oxigênio. Os preços pesquisados no comércio da cidade de Volta Redonda, RJ foram de R\$ 45,00, o kg do gás acetileno e de R\$ 18,00, o metro cúbico do gás oxigênio que juntos totalizaram R\$ 63,00. Para o funcionamento do maçarico a partir da eletrólise da água, os insumos necessários custaram respectivamente R\$ 4,50, para um (01) litro de água destilada e R\$ 33,00, para um kg de hidróxido de potássio (KOH). No preparo de cada litro de eletrólitos foram necessários entre 20g e 80g de eletrólito suporte KOH. Os valores fracionados dos gases acetileno e oxigênio, bem como os valores fracionados de KOH, em gramas (eletrólito suporte) foram necessários para realização da análise e importantes para a criação da solução que sofrerá eletrólise (Quadro 5).

Quadro 5 - Preços fracionados dos gases utilizados no maçarico e do eletrólito suporte KOH

GASES	PREÇO	QUANTIDADE (Kg - m <sup>3</sup> )	PREÇO por g - m
ACETILENO	R\$ 45,00	1000 g	R\$ 0,045
OXIGÊNIO	R\$ 18,00	1000 m	R\$ 0,018
KOH	R\$ 33,00	1000 g	R\$ 0,033

Fonte: Próprio Autor

#### 4.8.1.1 Custo operacional dos maçaricos a partir da produção das chamas

O cálculo para a vazão dos gases e precificação obedeceu a uma determinada fórmula, sendo esta adotada nos processos de custos de processos de soldagem e que é usualmente utilizada em projetos que envolvem o detalhamento de custos operacionais de uma determinada obra. A expressão adotada para determinar o custo de gás foi:

$$C_g = V_g \times T_{arc} \times C_{gu}, \text{ onde:}$$

$C_g$  = Cálculo do custo de gás (R\$);

$V_g$  = Vazão do gás (L/min);

$T_{arc}$  = Tempo de Soldagem (min.);

$C_{gu}$  = Custo do gás (R\$).

Para se chegar ao cálculo de custos dos gases gerados a partir da eletrólise da água, além de se inserir na formação do preço final dos gases o valor dos insumos, foi inserido também o valor da energia elétrica cobrada a cada kWh utilizado, sendo que tais valores tiveram como base o tempo de uma hora de funcionamento, ao custo de R\$ 0,83 para cada kWh utilizado, sob as correntes de 10A e 15A.

Na determinação das receitas envolvidas no uso dos maçaricos para a produção de chamas foi considerada a prestação de serviços de soldagem, corte e fundição de metais, durante um mês de atividade, totalizando 108 horas, ao custo de R\$ 60,00 por hora trabalhada.

Para as despesas envolvidas na prestação de serviços com o uso dos diferentes maçaricos considerou-se para o maçarico comercial, o investimento de R\$ 2.248,80 referente a compra do equipamento. No custo operacional necessário para o funcionamento do maçarico comercial foram consideradas as despesas incorridas na aquisição dos gases acetileno e oxigênio, adicionadas a manutenção do equipamento. Já, no maçarico a partir da eletrólise da água, o investimento inicial foi na ordem de R\$ 1.633,80 e, para o custo operacional deste novo maçarico foi considerado o dispêndio de capital financeiro para a compra de água destilada, eletrólito suporte (KOH), consumo de energia elétrica e manutenção do equipamento.

Todos os valores monetários considerados foram obtidos junto ao comércio de Volta Redonda, RJ, bem como profissionais que atuam no setor.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 OTIMIZAÇÃO DO ELETROLISADOR, SISTEMA DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE GASES PARA USO EM MAÇARICO PORTÁTIL

As atividades iniciais consistiram de experimentos realizados para corrigir possíveis vazamentos em todo o conjunto construído para uso do maçarico portátil. A separação dos gases também foi investigada, a fim de corrigir possíveis falhas de vazamentos e controlar a temperatura da chama a ser empregada para este estudo. Uma série de experimentos foi realizada de modo a estabelecer os materiais e equipamentos necessários, e que foram anteriormente descritos em Materiais e Métodos.

Para o sistema de eletrólise proposto neste trabalho ocorre a geração de  $H_2$  e  $O_2$  em um eletrolisador do tipo unipolar selado. Neste caso, o arranjo compacto de muitos eletrodos, explicitado na parte experimental, garante a geração de hidrogênio nos cátodos em meio de

KOH e geração de oxigênio nos ânodos (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998) e (SANTOS, SEQUEIRA e FIGUEIREDO, 2013).

Em meio alcalino há desprendimento catódico de hidrogênio (equação 7), porém a reação pode ser convenientemente desmembrada em mais etapas, iniciada pela reação de descarga, ou reação de Volmer, onde as moléculas de água são descarregadas na superfície dos eletrodos formando átomos de hidrogênio adsorvidos (equação 8) seguida da etapa de dessorção (equação 9), segundo Ticianelli e Gonzalez (1998).



onde M representa o material eletródico, neste caso aço 316L.

Diante disso, a etapa de dessorção em meio básico, como o deste estudo (KOH), ocorre em uma etapa eletroquímica conhecida como reação átomo-íon, ou reação de Heyrovsky, na qual moléculas de água são descarregadas sobre átomos de hidrogênios adsorvidos com desprendimento de hidrogênio gasoso (equação 9) (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998; GARCIA, 2012).

O mecanismo de produção de oxigênio em meio alcalino pode também ser desdobrado em 15 mecanismos, cada um válido sob determinadas condições experimentais e sob determinados materiais eletródicos (TICIANELLI e GONZALEZ, 1998). Independentemente do tipo de mecanismo de geração dos gases requeridos, nesta proposta procurou-se estabelecer a otimização dos parâmetros que atuam diretamente sobre a resistência elétrica e sobre o transporte de massa da solução, para permitir um melhor funcionamento do maçarico.

A seguir, parâmetros inerentes à técnica eletroquímica como corrente aplicada, concentração do eletrólito suporte e volume do eletrólito suporte foram estudados, comparando essas variáveis aos resultados obtidos, dentre os quais foram selecionados os seguintes dados para acompanhamento: temperatura da célula eletrolítica, temperatura dos reservatórios de armazenamento do gás hidrogênio (H<sub>2</sub>) e do gás oxigênio (O<sub>2</sub>) e a temperatura da chama. Simultaneamente, foi avaliado o monitoramento da vazão dos gases individualmente (Litros/minuto), da corrente utilizada, assim como o potencial distribuído entre os quatro pares de ânodos e cátodos.

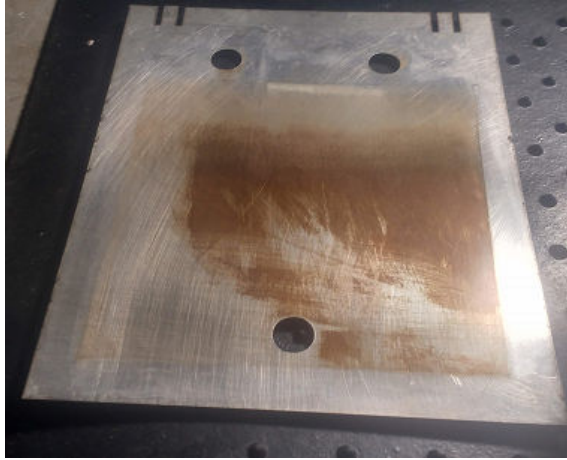
Os experimentos seguiram a sequência experimental (Esquemas 1 e 2), onde a partir das configurações estabelecidas foi possível observar que as temperaturas do conjunto do equipamento durante todo o processo (30 minutos), foram se modificando e apresentando características particulares a cada novo experimento.

## 5.2. PROCESSO DE CORROSÃO DO AÇO 316L DOS ANODOS E CATODOS

Os experimentos realizados expuseram os anodos e catodos a mais de 18 horas de trabalho em processo eletroquímico, pois foram realizados 36 experimentos de 30 minutos cada. No entanto o equipamento permaneceu ligado por pelo menos mais 5 horas extras, pois foram feitos vários ajustes e outras medições que não participaram da contabilização de tempo.

Como os eletrodos são de aço inoxidável 316L, ou seja, com baixo teor de carbono e feito de uma liga de ferro-cromo-níquel-molibdênio, os mesmos se tornam resistentes a corrosão. A corrosão ocorre sempre em materiais metálicos ativos, que é o caso dos anodos submetidos ao processo eletroquímico em meio alcalino desta pesquisa. Pode-se observar, mesmo com uso de lentes de aumento, que os anodos não apresentaram corrosões em sua superfície ou nas zonas perfuradas para circulação do eletrólito (Figuras 10A e 10B). Observou-se que os catodos ficaram recobertos por óxidos metálicos, característicos do processo de corrosão galvânica. Estes resíduos óxidos de ferro são provenientes da oxidação do aço inox dos anodos. No anodo não foi possível visualizar processos de corrosão (Figura 10C). Mesmo sendo a corrosão dos anodos uma propriedade específica quando utilizado metais ativos na função de anodos em processos eletroquímicos, não foi possível se averiguar imagens de corrosão. Tais imagens só poderiam ser obtidas a partir de um ensaio metalográfico, e estes não foram realizados nesta pesquisa.

Figura 10 - Imagens dos catodos com a superfície recoberta com óxidos de ferro (10A e 10B) e do anodo (10C) sem processos corrosivos visíveis.



10A

Fonte: Próprio autor



10B

Fonte: Próprio autor



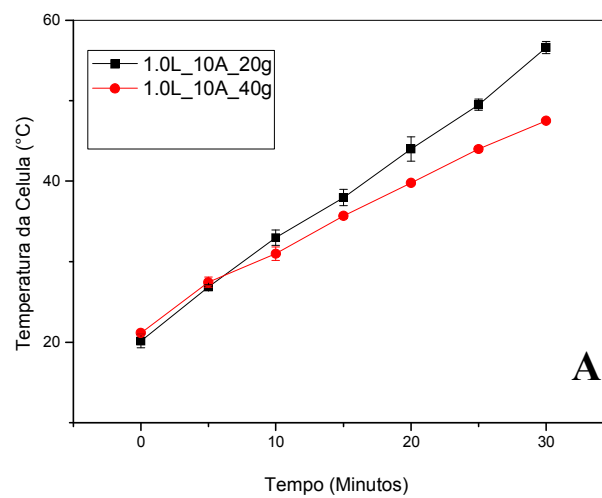
10C

Fonte: Próprio autor

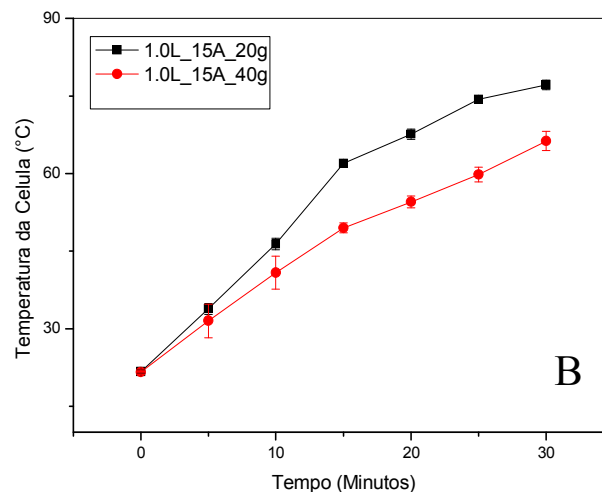
### 5.3. TEMPERATURA DO ELETROLISADOR

Um dos parâmetros investigados foi a temperatura do eletrolisador em função da variação de corrente aplicada, volume de eletrólito e também da concentração do eletrólito suporte (KOH) utilizado (Figuras 11A e 11B).

Figura 11 - Avaliação da variação da temperatura do eletrolisador durante processo de eletrólise considerando a variação da concentração do eletrólito suporte (KOH) para as correntes aplicadas (A)  $I = 10$  A e (B)  $I = 15$  A.



Fonte: Próprio autor



Fonte: Próprio autor

Ao se comparar a temperatura da célula eletrolítica (eletrolisador) utilizando-se as mesmas correntes observa-se que, os experimentos que empregam maior concentração de



eletrólito de suporte (KOH) são o que apresentam variações de temperatura menores no processo eletrolítico.

É possível notar que para o volume 1,0 litro a célula registrou maior temperatura no experimento que utilizou  $20 \text{ g L}^{-1}$ , empregando corrente de 15A. Neste caso, a temperatura alcançou  $77,1^\circ\text{C}$  quando utilizado  $20 \text{ g L}^{-1}$  de KOH frente a  $66,3^\circ\text{C}$  quando empregado  $40 \text{ g L}^{-1}$  do mesmo eletrólito, ou seja, uma diferença de  $10,8^\circ\text{C}$ .

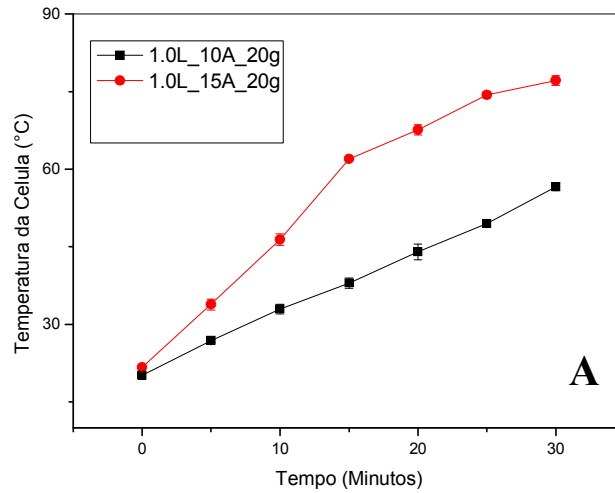
Similarmente, quando utilizada a corrente de 10A, a temperatura da célula alcançou  $56,6^\circ\text{C}$  e a  $47,5^\circ\text{C}$  quando utilizados as concentrações de eletrólito suporte de  $20 \text{ g L}^{-1}$  e  $40 \text{ g L}^{-1}$ , respectivamente. Neste caso, foi registrada uma diferença de  $9,1^\circ\text{C}$  entre uma concentração e outra para a mesma corrente aplicada.

Isso decorre de alguns fatores, dentro os quais se destacam o aumento da condutividade elétrica do sistema e diminuição da resistência da solução, através da diminuição de queda ôhmica, sendo esta regida pela Lei de Ohm (SANTOS, SEQUEIRA e FIGUEIREDO, 2013).

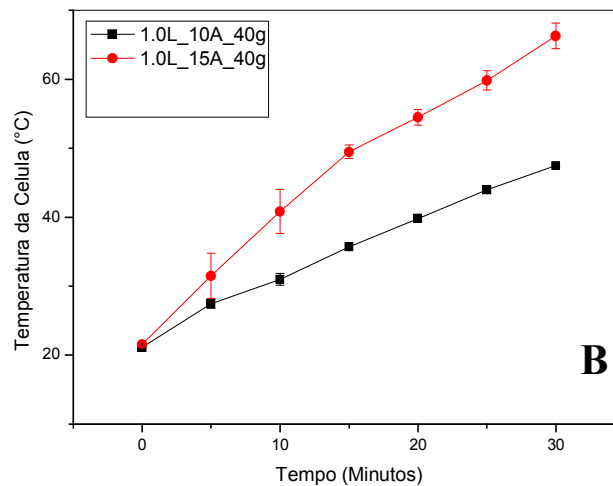
Segundo Figueiredo e colaboradores (2013) o aumento da temperatura do sistema pode ser atribuído ao aumento da resistência elétrica e a resistência ao transporte de massa no meio, que por sua vez causam geração de calor, de acordo com a Lei de Joule e fenômenos de transporte (SANTOS, SEQUEIRA e FIGUEIREDO, 2013). Esse efeito pode ser minimizado com o aumento da concentração do eletrólito suporte, uma vez que o aumento dessa espécie contribui para o aumento da condutividade da solução e, portanto contribuindo para diminuição da resistência do meio, de acordo com a Lei de Ohm, além de melhorar o transporte de massa da solução iônica (AGOSTINHO et al., 2004).

Outras informações importantes são observadas quando comparados os diferentes valores de corrente aplicada sob a mesma concentração do eletrólito suporte. Quando usada a mesma concentração de eletrólito de suporte (KOH) para o volume de 1,0 litro, observou-se que o ensaio que utilizou a maior corrente registrou a maior temperatura na célula eletrolítica. Foi observada uma variação de temperatura de  $20,5^\circ\text{C}$  entre a utilização de 10A em comparação com a utilização de 15A para a concentração  $20 \text{ g L}^{-1}$  de KOH (Figura 12A). Para o ensaio empregando a concentração de  $40 \text{ g L}^{-1}$  foi observada uma diferença de  $18,8^\circ\text{C}$  para as diferentes correntes aplicadas (Figura 12B). Deste modo, prevalece sempre a maior temperatura no experimento que utilizou a maior corrente.

Figura 12 - Estudo da variação de temperatura do eletrolisador em diferentes valores de corrente aplicada (A) em relação a concentração de eletrólito suporte de  $20 \text{ g L}^{-1}$  e (B) em função da concentração de KOH de  $40 \text{ g L}^{-1}$



Fonte: Próprio autor



Fonte: Próprio autor

Para efeito de comparação, esse estudo foi também realizado com base em três volumes diferentes de eletrólito a serem utilizados no equipamento, volume este distribuído entre o eletrolisador e os reservatórios dos eletrólitos, sendo utilizados os volumes de 1,0 litro, 1,5 litros e 2,0 litros. O objetivo foi avaliar como o aumento do volume do eletrólito influenciaria nas temperaturas alcançadas (Tabela 3) pelos componentes que pertencem ao dispositivo, possibilitando uma maior descrição de dados e análises de comportamentos ocorridos.

Tabela 3 - Temperaturas médias do eletrolisador em diferentes condições experimentais e em diversos volumes de eletrólito suporte (KOH)

VOLUME ELETRÓLITO (L)	TEMPERATURA INICIAL (°C)	TEMPERATURA ALCANÇADA (°C)		CONCENTRAÇÃO ELETRÓLITO (g L <sup>-1</sup> )
		10 (A)	15 (A)	
1,0	20,9	56,6	77,1	20,0
	21,3	47,5	66,3	40,0
1,5	21,1	56,2	75,6	20,0
	20,5	47,4	62,5	40,0
2,0	21,6	54,6	71,5	20,0
	21,5	51,2	66,7	40,0

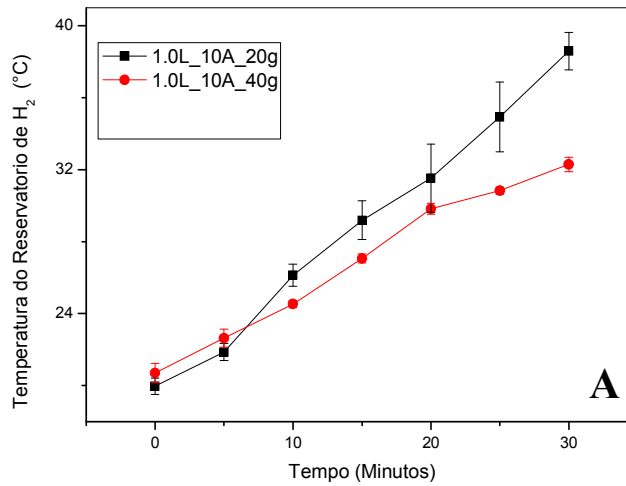
Fonte: Próprio Autor

Foi observado que quanto maior o volume de eletrólito, menor foi a temperatura alcançada pelo eletrolisador quando utilizadas as correntes de 15A e 10A para a concentração de 20 g L<sup>-1</sup>. Observa-se também que quando utilizadas essas mesmas correntes, porém comparando-se as concentrações de 20 g L<sup>-1</sup> e 40 g L<sup>-1</sup> de KOH, a solução que com maior concentração de eletrólito suporte apresentou menor temperatura no eletrolisador.

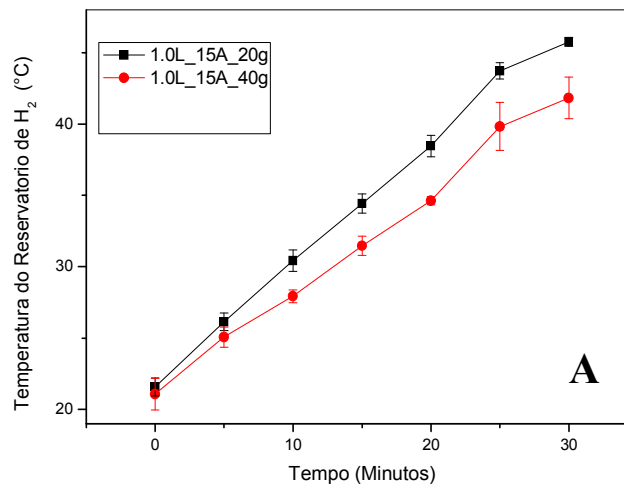
#### 5.4. TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO DE HIDROGÊNIO (H<sub>2</sub>)

Outro parâmetro investigado neste estudo foram as temperaturas dos reservatórios dos gases gerados durante o processo eletrolítico. Neste item é discutida a variação de temperatura do reservatório de hidrogênio (H<sub>2</sub>) em função da variação de corrente aplicada e da concentração do eletrólito suporte (KOH) (Figuras 13A e 13B).

Figura 13 - Variação da temperatura do reservatório de hidrogênio durante processo de eletrólise considerando a variação da concentração do eletrólito suporte (KOH) para as correntes aplicadas (A)  $I = 10 \text{ A}$  e (B)  $I = 15 \text{ A}$ .



Fonte: Próprio autor



Fonte: Próprio autor

Ao se comparar a temperatura do reservatório de  $\text{H}_2$  utilizando-se as mesmas correntes observa-se que, os experimentos que empregam maior concentração de eletrólito suporte (KOH) são o que apresentam variações de temperatura menores no sistema eletrolítico.

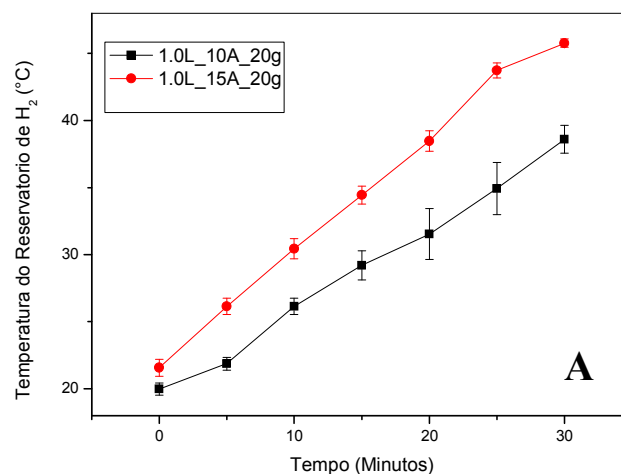
É possível notar que para o volume 1,0 litro a célula registrou maior temperatura no experimento que utilizou  $20 \text{ g L}^{-1}$ , empregando corrente de 15A. Neste caso, a temperatura

alcançou 45,8°C quando utilizado 20 g L<sup>-1</sup> de KOH em relação a 41,8°C quando empregado 40 g L<sup>-1</sup> do mesmo eletrólito, ou seja, uma diferença de 4,0°C.

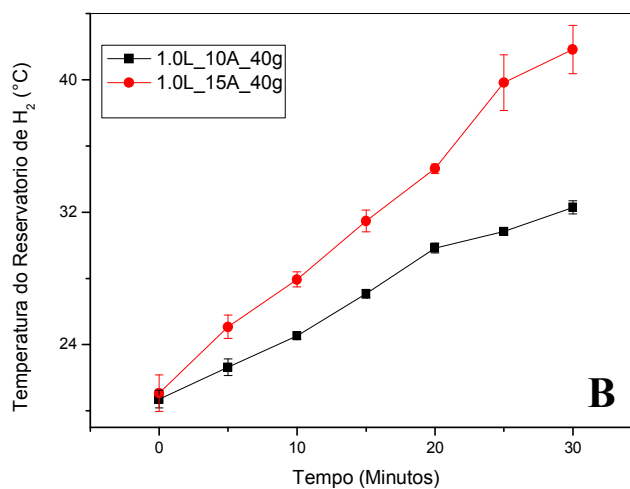
Similarmente, quando utilizada a corrente de 10A, a temperatura do reservatório alcançou 38,6°C e a 32,3°C quando utilizadas as concentrações de eletrólito suporte de 20 g L<sup>-1</sup> e 40 g L<sup>-1</sup>, respectivamente. Neste caso, foi registrada uma diferença de 6,3°C entre uma concentração e outra para a mesma corrente aplicada.

Outras observações importantes podem ser vistas quando comparados os diferentes valores de corrente aplicada sob a mesma concentração do eletrólito suporte para a variação da temperatura do reservatório do gás hidrogênio. Quando usada a mesma concentração de eletrólito de suporte (KOH) para o volume de 1,0 litro, observou-se que o ensaio que utilizou a maior corrente apresentou a maior temperatura do reservatório de H<sub>2</sub>. Foi observada uma variação de temperatura de 7,2°C na utilização de 10A em comparação com a utilização de 15A para a concentração 20 g L<sup>-1</sup> de KOH (Figura 14A). Para o ensaio empregando a concentração de 40 g L<sup>-1</sup> foi observada uma diferença de 9,5°C para as diferentes correntes aplicadas (Figura 14B). Deste modo, prevalece sempre a maior temperatura nos experimentos que utilizaram a maior corrente e menor concentração de eletrólito suporte. As razões previamente discutidas para a variação da temperatura do eletrolisador são similares também para o entendimento dos resultados obtidos para o reservatório de gás hidrogênio.

Figura 14 - Variação de temperatura do reservatório de H<sub>2</sub> em diferentes valores de corrente aplicada (A) em relação a concentração de eletrólito suporte de 20 g L<sup>-1</sup> e (B) em função da concentração de KOH de 40 g L<sup>-1</sup>.



Fonte: Próprio autor



Fonte: Próprio autor

Para efeito de comparação esse estudo foi também realizado para volumes maiores de eletrólito suporte no eletrolisador. O objetivo foi avaliar como o aumento do volume de água influenciaria nas temperaturas do reservatório de H<sub>2</sub> (Tabela 4).

Tabela 4 - Temperaturas médias do reservatório de hidrogênio (H<sub>2</sub>) para diferentes condições experimentais em diversos volumes de eletrólito suporte (KOH)

VOLUME ELETRÓLITO (L)	TEMPERATURA RESERVATORIO (°C)		CONCENTRAÇÃO ELETRÓLITO (g L <sup>-1</sup> )	
	INICIAL	10 (A)		15 (A)
1,0	20,8	38,6	45,8	20,0
	20,9	32,3	41,8	40,0
1,5	20,8	38,7	54,8	20,0
	20,5	29,2	38,2	40,0
2,0	21,8	33,4	41,7	20,0
	21,2	28,2	36,1	40,0

Fonte: Próprio Autor

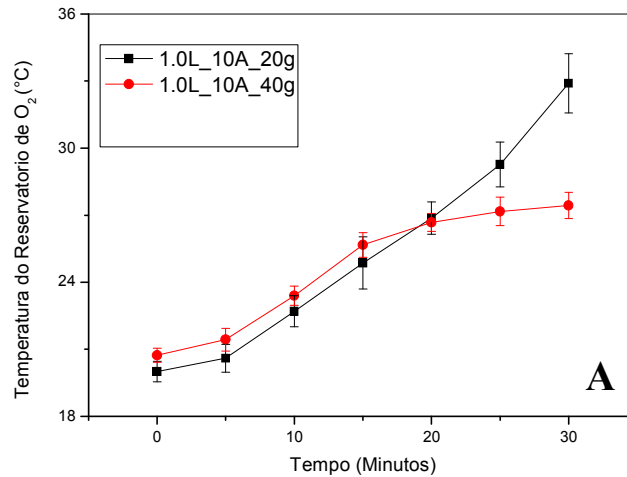
Nos experimentos envolvendo o reservatório de hidrogênio ( $H_2$ ) foi possível observar que a temperatura média mais elevada aconteceu com o uso do volume de 1,5 litros com  $20 \text{ g L}^{-1}$  de eletrólito suporte e corrente aplicada de 15A, superando em mais de  $13^\circ\text{C}$  a temperatura média registrada no reservatório com o uso de 2,0 litros e em  $9,0^\circ\text{C}$  a mais para o reservatório de  $H_2$  com volume de 1,0 litro. Observa-se ainda que, excetuando-se o registro de temperatura nas condições de 1,5 L de KOH, à 15A e  $20,0 \text{ g L}^{-1}$ , de maneira geral o aumento do volume de eletrólito e o aumento da concentração de eletrólito de suporte deste, corroboram com a diminuição da temperatura do reservatório de hidrogênio para correntes de 10A e 15A. Tudo indica que esse fato ocorra devido a melhor dissipação do calor com o aumento do volume de eletrólito (água) e também com o aumento da concentração de eletrólito suporte que contribuiria para a diminuição da resistência do transporte de massa e da resistência elétrica, como anteriormente discutido.

#### 5.5. TEMPERATURA DO RESERVATÓRIO DE OXIGÊNIO ( $O_2$ )

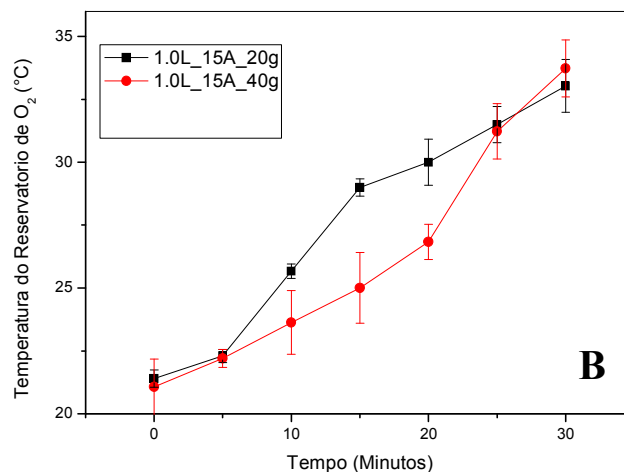
Outro parâmetro avaliado neste trabalho foi a temperatura do reservatório de oxigênio ( $O_2$ ). O intuito foi observar se a diferença entre o volume de gás gerado no processo anódico e recolhido neste compartimento, em comparação ao de hidrogênio afetaria de maneira significativa a temperatura do mesmo (Figuras 15A e 15B).

De modo similar foram construídos gráficos comparativos para verificar a variação de temperatura no reservatório de oxigênio, considerando as diferentes correntes aplicadas e os diversos valores de concentração de eletrólito suporte empregados no eletrolisador.

Figura 15 - Avaliação da variação da temperatura do reservatório de oxigênio durante processo de eletrólise em diferentes concentrações do eletrólito suporte (KOH) para as correntes aplicadas (A)  $I = 10 \text{ A}$  e (B)  $I = 15 \text{ A}$ .



Fonte: Próprio autor



Fonte: Próprio autor

A partir da análise das Figuras 15A e 15B pode ser observada uma diminuição da temperatura deste reservatório com o aumento da concentração do eletrólito suporte (KOH) para experimentos conduzidos em correntes menores (10 A) utilizando o volume de 1,0 L de eletrólito na célula eletrolítica, especialmente após longo tempo de eletrólise, atingindo um patamar de temperatura após 20 minutos de ensaio.

É importante salientar a observação experimental verificada durante a eletrogeração dos gases do maçarico, que foi a perda de volume deste reservatório ( $\text{O}_2$ ), o que possivelmente ocorreu em função das pressões exercidas em ambos os reservatórios de hidrogênio e oxigênio e decorrentes da estequiometria da reação de eletrólise da água



(Equação 5), que determina que o volume gerado de gás  $O_2$  é a metade do volume gerado de gás  $H_2$ . Neste caso, o reservatório em destaque diminuía em quase a sua totalidade o volume necessário para a avaliação adequada de sua temperatura, visto que este reservatório em grande parte do experimento esteve quase vazio ou completamente vazio, sendo necessária a leitura de sua temperatura nos poucos mililitros restantes na mangueira de recirculação do equipamento e proveniente deste reservatório.

Neste caso, um volume menor em uma área superficial maior ratificou a dissipação de calor do sistema, fazendo com que as temperaturas registradas para esse reservatório fossem inferiores às medidas no reservatório de hidrogênio. Este fato ocorre também quando uma corrente superior é aplicada (15A), para concentrações de eletrólito suporte de 20 e 40 g  $L^{-1}$  (Figura 15B).

Quando comparada a temperatura do reservatório de oxigênio (Tabela 5) com relação a outros volumes de eletrólito empregados (1,5 e 2,0 L) observa-se que, de maneira geral, há uma diminuição da temperatura desse reservatório com o aumento do volume de solução no sistema, e este fato decorre da dissipação do calor com o aumento do volume do eletrólito, mesmo para correntes elevadas (15A).

Tabela 5 - Temperaturas do reservatório de oxigênio ( $O_2$ ) em diversas condições experimentais em diferentes volumes de eletrólito suporte (KOH).

VOLUME ELETRÓLITO (L)	TEMPERATURA RESERVATORIO (°C)	TEMPERATURA RESERVATORIO (°C)	CONCENTRAÇÃO ELETRÓLITO (g $L^{-1}$ )
	INICIAL	10 (A)	15 (A)
1,0	20,7	32,9	20,0
	20,9	27,4	40,0
1,5	20,6	33,4	20,0
	20,6	25,5	40,0
2,0	21,9	27,3	20,0
	21,2	24,4	40,0

Fonte: Próprio Autor

Observou-se nestes experimentos que a temperatura do reservatório de oxigênio, em todos os volumes estudados, apresentou sempre valores menores do que a média apresentada pelo reservatório de hidrogênio. Foi possível deduzir que tal fenômeno acontece devido a este reservatório ser alimentado pela recirculação do eletrólito advindo dos compartimentos que contém os ânodos do eletrolisador. Em contrapartida o reservatório de H<sub>2</sub> acaba sendo mais aquecido, pois o mesmo acontece, com o eletrólito vindo dos compartimentos que compõem os catodos da célula, com maior produção de hidrogênio. Tal diferença de temperatura se justifica devido a maior atividade eletrolítica que ocorre nos catodos, uma vez que a dissociação da molécula H<sub>2</sub>O em gases hidrogênio e oxigênio acabam fazendo com que haja o dobro das reações ocorridas nos anodos, registrando maiores resistências elétricas, resistências das reações e resistências de transporte de massa (ZENG e ZHANG, 2010).

O acompanhamento da temperatura dos reservatórios é importante no sentido de verificar as temperaturas máximas atingidas e como isso pode atuar de forma negativa no material do reservatório (plástico), no sentido de não provocar futuramente desgaste do material, rachaduras e, conseqüentemente, vazamentos. Futuramente pretende-se verificar a resistência desse material por técnicas de análise térmica para averiguar a resistência do material a estas temperaturas alcançadas em ambos os reservatórios.

## 5.6. VAZÃO DOS GASES HIDROGÊNIO E OXIGÊNIO

A vazão dos gases gerados foi também mensurada, assegurando desta maneira que os principais parâmetros que determinam o desempenho do maçarico fossem devidamente estudados, uma vez que a temperatura da chama depende intensamente da avaliação deste parâmetro (AGOSTINHO et al., 2004).

### 5.6.1. Vazão dos gases utilizando reservatório com capacidade de 1,0 Litro

A discussão destes resultados foi baseada na variação dos volumes de gases hidrogênio e oxigênio, produzidos em função das correntes aplicadas (10A e 15A), dos volumes e das concentrações (20 g L<sup>-1</sup> e 40 g L<sup>-1</sup>) do eletrólito suporte KOH (Tabelas 6, 7 e 8).

Tabela 6 - Vazão dos gases gerados em função da corrente aplicada e da concentração de eletrólito suporte utilizando reservatório de 1 litro.

GASES GERADOS (L)	VAZÃO DO GAS (L/min)		CONCENTRAÇÃO DO ELETRÓLITO (g L <sup>-1</sup> )
	10 (A)	15 (A)	
H <sub>2</sub>	0,91	1,48	20,0
	0,88	1,52	40,0
O <sub>2</sub>	0,47	0,89	20,0
	0,43	0,95	40,0
H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,38	2,37	20,0
	1,31	2,47	40,0

Fonte: Próprio Autor

Na utilização da célula eletrolítica com volume de 1,0 litro, pode ser observado que o experimento que utilizou 20 g L<sup>-1</sup> e corrente igual a 15A, produziu 1,48 L/min de gás hidrogênio e 0,89 L/min de gás oxigênio, apresentando uma vazão total de 2,37 L/min de gases. Com a concentração de eletrólito suporte de 40 g L<sup>-1</sup>, a vazão foi de 1,52 L/min de gás hidrogênio e 0,95 L/min de gás oxigênio, apresentando uma vazão total de 2,47 L/min, ou seja, apresentou 0,1 L/min a mais de produção de gases para esta configuração.

A vazão de gases com corrente igual a 10A e concentração de eletrólito suporte de 20 g L<sup>-1</sup> apresentou um valor de 0,91 L/min de gás hidrogênio e 0,47 L/min de gás oxigênio, totalizando 1,38 L/min de gases gerados. Com a concentração de 40 g L<sup>-1</sup> de eletrólito suporte a vazão dos gases foi de 0,88 L/min e 0,43 L/min respectivamente, apresentando um total de 1,31 L/min. A diferença apresentada foi de 0,07 L/min entre as duas configurações utilizadas.

Na comparação entre a utilização de corrente de 10A e 15A, com as mesmas concentrações de eletrólito suporte, pode ser observado que a vazão apresentada foi 0,99 L/min com a utilização de 20 g L<sup>-1</sup> e de 1,16 L/min com concentração 40 g L<sup>-1</sup>. Assim, pode ser concluído que existe uma prevalência maior da produção dos gases hidrogênio e oxigênio

com o uso de uma maior corrente (15A) e de uma maior concentração de eletrólito suporte ( $40\text{g L}^{-1}$ )

### 5.6.2. Vazão dos gases utilizando reservatório com capacidade de 1,5 Litros

Tabela 7 - Vazão dos gases gerados em função da corrente aplicada e da concentração de eletrólito suporte utilizando reservatório de 1,5 litros

GASES GERADOS (L)	VAZÃO DO GAS (L/min)		CONCENTRAÇÃO DO ELETRÓLITO (g L <sup>-1</sup> )
	10 (A)	15 (A)	
H <sub>2</sub>	0,72	1,68	20,0
	0,63	1,33	40,0
O <sub>2</sub>	0,42	1,00	20,0
	0,41	0,87	40,0
H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,14	2,68	20,0
	1,04	2,20	40,0

Fonte: Próprio Autor

As produções de gases na utilização da célula eletrolítica com volume de reservatório de eletrólito de 1,5 litros, usando  $20\text{ g L}^{-1}$  de KOH e corrente igual a 15A foram:  $1,68\text{ L/min}$  de gás hidrogênio e  $1\text{ L/min}$  de gás oxigênio, apresentando uma vazão total de  $2,68\text{ L/min}$  de gases. Já com a concentração de eletrólito suporte de  $40\text{ g L}^{-1}$ , a vazão foi de  $1,33\text{ L/min}$  de hidrogênio e  $0,86\text{ L/min}$  de oxigênio, apresentando uma vazão total de  $2,19\text{ L/min}$ , havendo uma maior produção ( $0,49\text{ L/min}$ ) com a configuração que utilizou  $20\text{ g L}^{-1}$  de eletrólito suporte.

Quanto à vazão de gases com uma corrente igual a 10A e uma concentração de eletrólito suporte de  $20\text{ g L}^{-1}$  a produção de hidrogênio foi de  $0,72\text{ L/min}$  e a de oxigênio foi de  $0,42\text{ L/min}$ , totalizando  $1,14\text{ L/min}$  de vazão total de gases gerados. Com uma

concentração de  $40 \text{ g L}^{-1}$  de eletrólito suporte, a vazão dos gases foi de  $0,63 \text{ L/min}$  e  $0,40 \text{ L/min}$ , resultando um total de  $1,03 \text{ L/min}$  de gases gerados. A diferença da produção de gases entre as configurações foi  $0,11 \text{ L/min}$ , sendo que a de eletrólito suporte igual  $20 \text{ g L}^{-1}$  produziu um maior valor de gases gerados.

Na comparação entre a utilização de corrente de  $10\text{A}$  e  $15\text{A}$ , com as mesmas concentrações de eletrólito suporte, pode ser observada uma maior vazão ( $1,54 \text{ L/min}$ ), com a utilização de  $20 \text{ g L}^{-1}$  e de  $1,16 \text{ L/min}$  com a concentração  $40 \text{ g L}^{-1}$ . Por outro lado, foi observado uma maior produção dos gases hidrogênio e oxigênio quando da utilização da corrente maior ( $15\text{A}$ ).

### 5.6.3. Vazão dos gases utilizando reservatório com capacidade de 2,0 Litros

Tabela 8 - Vazão dos gases gerados em função da corrente aplicada e da concentração de eletrólito suporte utilizando reservatório de 2,0 litros

GASES GERADOS (L)	VAZÃO DO GAS (L/min)		CONCENTRAÇÃO DO ELETRÓLITO ( $\text{g L}^{-1}$ )
	10 (A)	15 (A)	
H <sub>2</sub>	0,92	1,42	20,0
	0,82	1,28	40,0
O <sub>2</sub>	0,48	0,88	20,0
	0,42	0,82	40,0
H <sub>2</sub> + O <sub>2</sub>	1,40	2,30	20,0
	1,24	2,10	40,0

Fonte: Próprio Autor

Com volume de reservatório de eletrólito suporte de 2 litros, foi observado que a utilização de  $20 \text{ g L}^{-1}$  e corrente igual a  $15\text{A}$ , produz  $1,42 \text{ L/min}$  de gás hidrogênio e  $1,0 \text{ L/min}$  de gás oxigênio, apresentando uma vazão total de  $2,42 \text{ L/min}$  dos gases gerados. Com a

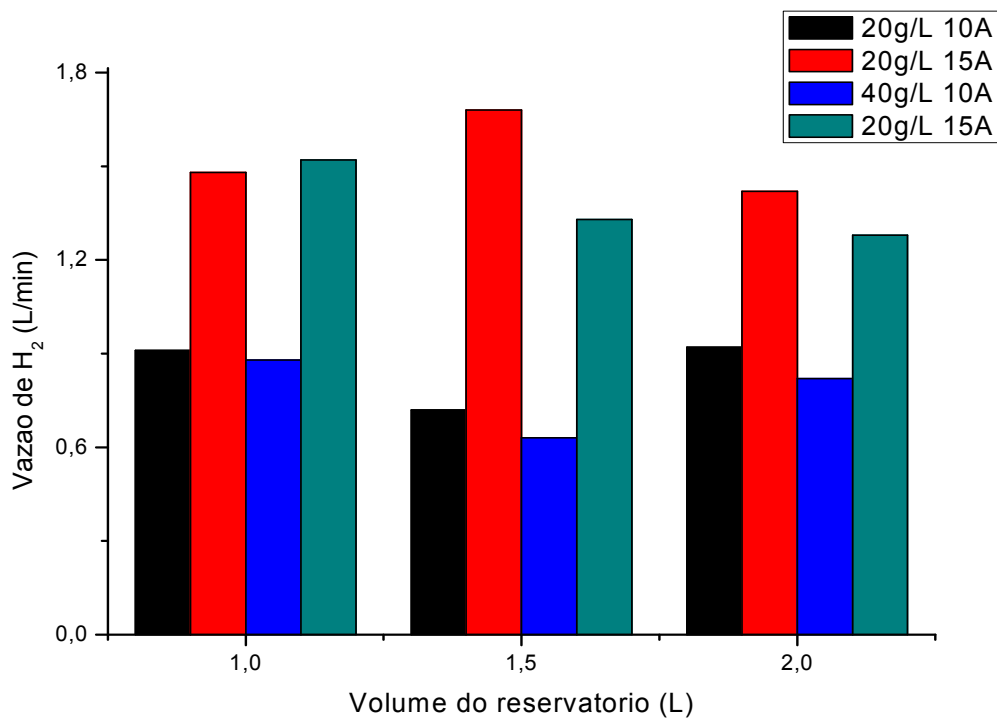
concentração de eletrólito suporte de  $40 \text{ g L}^{-1}$ , a vazão de gás produzida foi de  $1,28 \text{ L/min}$  de hidrogênio e  $0,82 \text{ L/min}$  de oxigênio, apresentando uma vazão total de  $2,10 \text{ L/min}$ , ou seja, houve uma maior produção ( $0,32 \text{ L/min}$ ) de gases gerados para a configuração que utilizou  $20 \text{ g L}^{-1}$  de eletrólito suporte.

Quanto à vazão de gases gerados com corrente igual a  $10\text{A}$  e concentração de eletrólito suporte de  $20 \text{ g L}^{-1}$  a produção de hidrogênio foi de  $0,92 \text{ L/min}$  e a de oxigênio foi de  $0,48 \text{ L/min}$ , totalizando  $1,40 \text{ L/min}$  de gases produzidos. Com concentração de  $40 \text{ g L}^{-1}$  de eletrólito suporte, a vazão dos gases foi de  $0,82 \text{ L/min}$  de hidrogênio e de  $0,42 \text{ L/min}$  de oxigênio, um total de  $1,24 \text{ L/min}$ . A diferença na produção de gases entre as configurações foi  $0,16 \text{ L/min}$ , sendo que a que utiliza uma concentração de eletrólito suporte igual  $20 \text{ g L}^{-1}$  produziu uma maior quantidade de gases.

Na comparação entre a utilização de corrente de  $10\text{A}$  e  $15\text{A}$ , com as mesmas concentrações de eletrólito suporte, foi observada uma vazão de  $1,54 \text{ L/min}$ , maior daquela que utiliza uma concentração de  $20 \text{ g L}^{-1}$  e uma vazão de  $1,16 \text{ L/min}$ , maior do que aquela que utiliza uma concentração  $40 \text{ g L}^{-1}$ . Assim, uma maior produção dos gases hidrogênio e oxigênio foram obtidos com a utilização da corrente aplicada de  $15\text{A}$ .

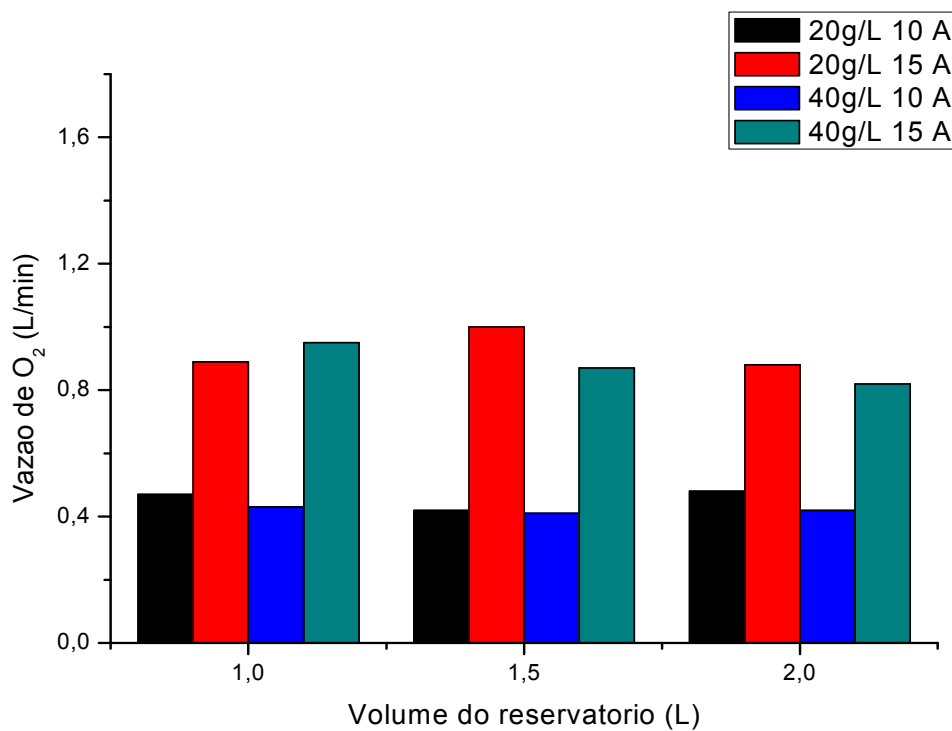
A vazão dos gases gerados foi significativamente maior quando utilizada a corrente de  $15\text{A}$  em comparação com a utilização da corrente de  $10\text{A}$  (Figuras 16 e 17). Foi possível observar também que quando são utilizadas concentrações maiores de eletrólito suporte, ou seja,  $40 \text{ g L}^{-1}$  para o reservatório de  $1,5$  litros e  $2,0$  litros, a produção dos gases foi menor do que em relação a utilização de  $20 \text{ g L}^{-1}$ . No entanto com a utilização de reservatório igual a  $1$  litro, a produção de gás hidrogênio foi maior do que com a utilização de eletrólito suporte com concentração de eletrólito suporte de  $40 \text{ g L}^{-1}$ .

Figura 16 - Vazão do gás hidrogênio em relação a capacidade dos reservatórios, utilizando correntes aplicadas de 10A e 15A, nas concentrações de eletrólito suporte de 20 g<sup>L-1</sup> e 40 g<sup>L-1</sup>



Fonte: Próprio autor

Figura 17 - Vazão do gás oxigênio em relação a capacidade dos reservatórios, utilizando correntes aplicadas de 10A e 15A, nas concentrações de eletrólito suporte de 20 g<sup>L-1</sup> e 40 g<sup>L-1</sup>



Fonte: Próprio autor

## 5.7. TEMPERATURA DA CHAMA DO MAÇARICO NA AUSÊNCIA DO GÁS COMBURENTE OXIGÊNIO

O oxigênio, mesmo que vindo do ar atmosférico, representa-se como uma variável muito importante na composição final da temperatura alcançada pela chama do maçarico, pois este além de ser o gás comburente da chama oxicombustível, também vem a contribuir para a velocidade de combustão dos gases mediante a mistura feita entre os gases, ou seja, a participação ou não do oxigênio no processo oxicombustível é fundamental para se ter temperaturas elevadas. Foi possível realizar a medição das temperaturas pelo maçarico operando apenas com a presença do gás hidrogênio, ou seja, somente com o gás combustível (Tabela 9).

Tabela 9 - Temperaturas da chama do maçarico desenvolvido para diversas condições experimentais em diferentes reservatórios de eletrólito suporte (KOH), com uma chama composta apenas pela presença do gás Hidrogênio (H<sub>2</sub>)

VOLUME ELETRÓLITO (L)	TEMPERATURA DA CHAMA (°C)		CONCENTRAÇÃO DO ELETRÓLITO (g L <sup>-1</sup> )
	10 (A)	15 (A)	
1,0	485,6	676,4	20,0
	526,9	642,5	40,0
1,5	484,3	735,0	20,0
	411,1	686,9	40,0
2,0	507,5	667,9	20,0
	418,6	534,1	40,0

Fonte: Próprio Autor

Os experimentos realizados com a utilização de volume de 1 litro de eletrólito, corrente igual a 10A e concentração de eletrólito suporte de 20 g L<sup>-1</sup> e 40 g L<sup>-1</sup> mostraram



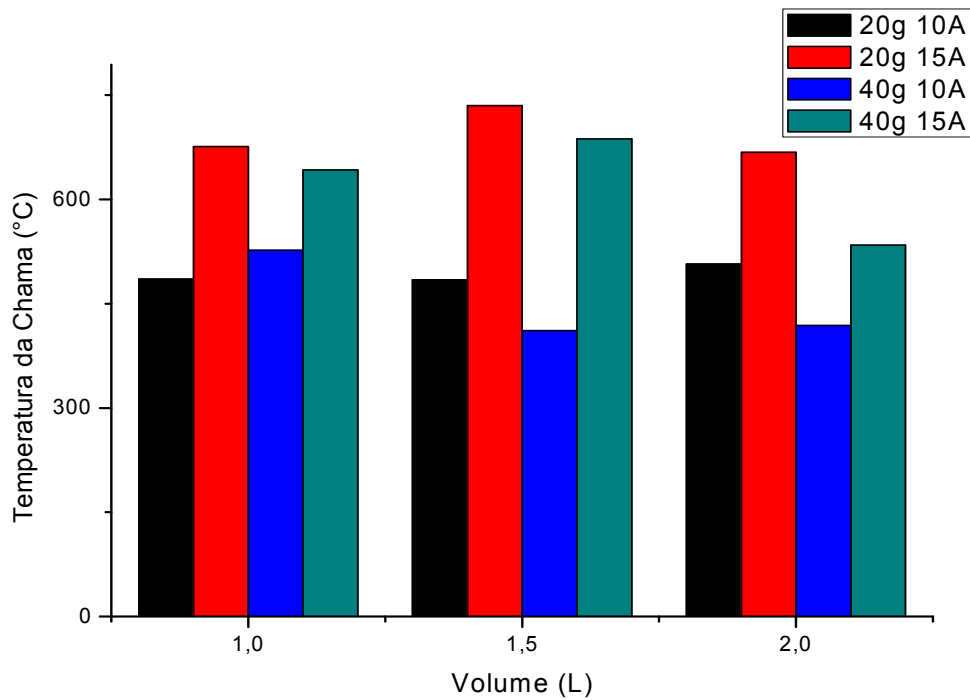
temperaturas da chama de 485,6°C e 526,9°C respectivamente, ou seja, uma diferença de 41,3°C. Na utilização de mesmo volume de eletrólito e concentração de eletrólito suporte, porém com corrente de 15A, as temperaturas alcançadas foram de 676,4°C e 642,5°C respectivamente, apresentando uma diferença de temperatura de 31,9°C. Pode ser observado que sob a corrente de 10A, as diferenças de temperaturas produzidas por diferentes concentrações mostram que a de maior concentração de eletrólito suporte apresenta uma diferença maior entre as temperaturas. Nas experiências realizadas com 15A, as temperaturas mais elevadas se deram com eletrólito suporte de menor concentração. No entanto, comparando-se mesmas concentrações e em correntes diferentes, as diferenças temperaturas obtidas foram superiores a 100°C. Na concentração de 20 g L<sup>-1</sup> e uma corrente 10A foram obtidas diferenças de 191,8°C, e para concentração de 40 g L<sup>-1</sup> as diferenças foram de 115,6°C.

Nos experimentos com volume de eletrólito igual a 1,5 litros e corrente de 10A e concentração de eletrólito suporte de 20 g L<sup>-1</sup> e 40 g L<sup>-1</sup> respectivamente as temperaturas foram de 483,3°C e 411,1°C, apresentando uma diferença de 73,2°C. Com a utilização de corrente de 15A e eletrólito suporte com concentração de 20 g L<sup>-1</sup> e 40 g L<sup>-1</sup> as temperaturas atingiram os valores de 735,0°C e 686,9°C, mostrando uma diferença de 48,1°C. No entanto, comparando-se, as mesmas concentrações de eletrólito suporte, mas com correntes de 10A e 15A pode ser observado que nas temperaturas das chamas existe para 20 g L<sup>-1</sup> uma diferença de 250°C e para a concentração de 40 g L<sup>-1</sup> esta diferença foi de 275,8°C.

Na utilização 2,0 litros de volume de eletrólito e corrente de 10A e concentração de eletrólito suporte de 20 g L<sup>-1</sup>, obteve-se a temperatura de 507,5°C. Com eletrólito suporte com concentração 40g L<sup>-1</sup> a temperatura obtida foi de 418,6°C, apresentando uma diferença de 88,9°C. No uso de corrente de 15A e 20 g L<sup>-1</sup> a temperatura alcançada pelo maçarico foi de 667,9°C e com concentração de 40 g L<sup>-1</sup> de concentração a temperatura atingida foi de 534,1°C, mostrando uma diferença de 133,8°C. Fazendo-se a comparação entre as mesmas comparações de eletrólito suporte e correntes diferentes, obteve-se para 10A a temperatura de 507,5°C e para 15A a temperatura de 667,9°C, apresentando uma diferença de 160,4°C. Para a concentração de eletrólito suporte de 40 g L<sup>-1</sup> a temperatura alcançada para 10A foi de 418,6°C e para a corrente 15A a temperatura obtida foi de 534,1°C, com uma diferença entre as temperaturas de 115,5°C.

Foi observado que as maiores temperaturas da chama sem a presença do gás oxigênio foram obtidas na configuração 1,5L-15A-20g (Figura 18), sendo esta a chama originária da maior vazão de gás hidrogênio conforme mostrado anteriormente.

Figura 18 - Temperatura da chama do maçarico na ausência do gás oxigênio

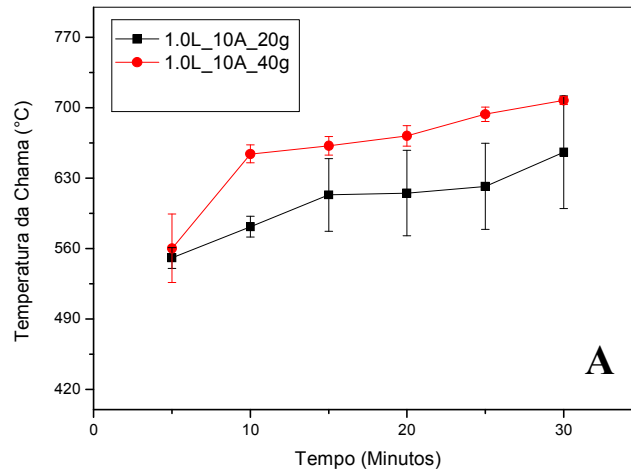


Fonte: Próprio autor

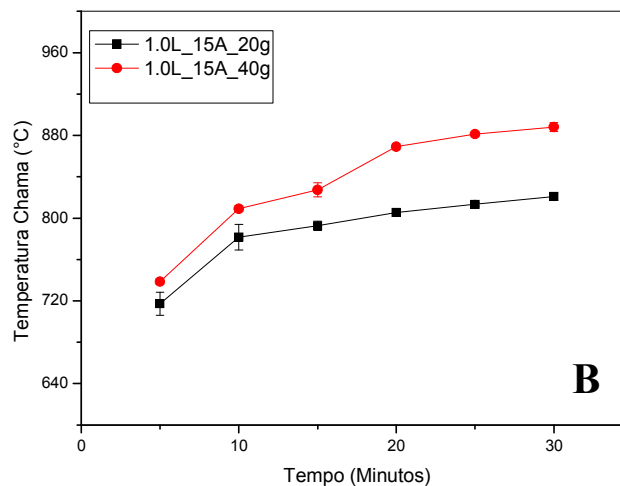
## 5.8. TEMPERATURA DA CHAMA DO MAÇARICO COM A MISTURA DE GASES $H_2$ e $O_2$

Para a avaliação do desempenho do maçarico desenvolvido neste trabalho, a partir da eletrólise da água, foram investigadas as temperaturas da chama quando mantidas as misturas dos gases gerados e as vazões de hidrogênio e oxigênio. Assim, foi medida a temperatura de combustão (temperatura da chama do maçarico) com relação a corrente aplicada ao sistema para geração dos gases combustível e comburente, bem como, em relação a concentração do eletrólito suporte empregado no eletrolisador (Figuras 19A e 19B).

Figura 19 - Variação da temperatura da chama do maçarico em relação a concentração do eletrólito suporte (KOH) para as correntes aplicadas (A)  $I = 10\text{ A}$  e (B)  $I = 15\text{ A}$ .



Fonte: Próprio autor



Fonte: Próprio autor

Nestes experimentos foram observados que a utilização da corrente elétrica de 10A e da concentração do eletrólito de  $20\text{ g L}^{-1}$  e  $40\text{ g L}^{-1}$  produz temperaturas máximas das chamas de  $720,2^{\circ}\text{C}$  e  $707^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, apresentando uma diferença de  $13^{\circ}\text{C}$ . Contudo, quando foi utilizada uma corrente de 15A e as concentrações de  $20\text{ g L}^{-1}$  e  $40\text{ g L}^{-1}$  de eletrólito suporte foram obtidas temperaturas da chama do maçarico de  $867,9^{\circ}\text{C}$  e  $888,4^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, apresentando uma diferença de  $20,5^{\circ}\text{C}$  entre as concentrações de KOH quando foi usada uma maior corrente. Portanto, o emprego de variações de correntes aplicadas e concentrações de eletrólito permite a obtenção de uma melhoria na desempenho do maçarico, uma vez que provoca uma variação na produção dos gases gerados em

decorrência do aumento do processo faradaico, ocasionado pela melhoria do transporte de massa no meio, provocado pelo aumento dos fenômenos de migração e difusão, e também pela diminuição da resistência do meio (BARD e FAULKNER, 2001).

Observou-se que após 20 minutos de eletrólise houve pouca variabilidade na temperatura da chama em todas as condições analisadas, o que indica uma grande reprodutibilidade na temperatura do maçarico, garantindo uma grande eficiência para o processo de solda/corte do instrumento desenvolvido.

Foi também avaliada a temperatura da chama do maçarico em relação ao volume do reservatório de eletrólito suporte (Tabela 10).

Tabela 10 - Temperaturas da chama do maçarico para diversas condições experimentais em reservatórios com diferentes volumes de eletrólito suporte (KOH)

VOLUME ELETROLITO (L)	TEMPERATURA DA CHAMA (°C)		CONCENTRAÇÃO DO ELETRÓLITO (g L <sup>-1</sup> )
	10 (A)	15 (A)	
1,0	720,2	867,9	20,0
	707,2	888,4	40,0
1,5	638,0	990,8	20,0
	620,0	884,2	40,0
2,0	720,3	867,9	20,0
	559,6	716,8	40,0

Fonte: Próprio Autor

É possível observar que o aumento de volume de eletrólito utilizado pelo equipamento provoca uma diminuição da temperatura da chama do maçarico, independente da corrente aplicada e da concentração de KOH utilizado (Tabela 9). O aumento do volume de eletrólito provocou diminuição das temperaturas registradas no eletrolisador, principalmente quando utilizada a corrente de 10A e 15A na concentração de eletrólito

suporte igual a  $20 \text{ g L}^{-1}$ , (Tabela 2), e nos reservatórios de hidrogênio e oxigênio (Tabelas 3 e 4), com exceção da configuração 1,5L-15A-20g, sendo que este fato pode ser explicado pela Lei de Henry, que diz que a solubilidade de um gás (neste caso  $\text{H}_2$  e  $\text{O}_2$ ) depende da pressão parcial do gás exercida sobre o líquido, e a constante de proporcionalidade utilizada nessa Lei varia com o gás e com a temperatura. Deste modo, quanto maior a pressão e menor a temperatura, maior a solubilidade dos gases do eletrólito suporte e menor sua disponibilidade para emprego na combustão da chama do maçarico. Com os resultados obtidos é possível notar que há uma diminuição das temperaturas investigadas com o aumento do eletrólito suporte, o que poderia justificar a diminuição da temperatura registrada na combustão dos gases na chama do maçarico com o aumento do volume do eletrólito suporte.

O volume do eletrólito é uma variável importante, pois é uma das maneiras de controlar a temperatura do sistema para evitar danos aos materiais empregados e também vazamentos, além de assegurar um uso mais constante sem a necessidade de reposição do mesmo, devido às perdas decorrentes do aumento da temperatura e da eletrogeração dos gases.

## 5.9 CUSTOS OPERACIONAIS NA PRODUÇÃO DOS MAÇARICOS

A compra dos insumos necessários para o acendimento do maçarico comercial ficou na ordem de R\$ 45,00 para se adquirir 1kg de gás acetileno e de R\$ 18,00 para a compra de  $1\text{m}^3$  de gás oxigênio, resultando no investimento total de R\$ 63,00. Ao se comprar os insumos para se viabilizar o acendimento do maçarico a partir da eletrólise da água foi necessário o investimento de R\$ 5,87 sendo estes valores referentes a aquisição de 1 litro água destilada (R\$ 4,50), mais 20g de eletrólito suporte KOH (R\$ 0,66) e ainda, o valor de R\$ 0,83 referentes ao custo 01 kWh, sendo que estes insumos conseguem manter o maçarico a partir da eletrólise da água aceso pelo tempo de aproximadamente 5 horas ininterruptas, valor este superior ao tempo de duração dos gases comprados dependendo da vazão utilizada, dando assim uma vantagem econômica de R\$ 57,13 ao maçarico a partir da eletrólise da água.

Comparando-se a aquisição dos maçaricos, o maçarico a partir da eletrólise da água apresentou melhor investimento, pois foi necessário um montante de R\$ 1.733,80 para sua montagem, já considerando a mão de obra especializada, quando comparado com a aquisição do maçarico comercial que foi na ordem de R\$ 2.248,00. Tal fato demonstrou que o maçarico a partir da eletrólise apresentou uma vantagem financeira na sua aquisição na ordem de R\$ 514,20, sendo assim mais vantajosa a sua compra.

## 5.10 CUSTOS OPERACIONAIS NA PRODUÇÃO DE CHAMA DOS MAÇARICOS

Na determinação dos custos operacionais necessários para a produção de chamas foram consideradas as vazões dos gases hidrogênio e oxigênio, produzidas no maçarico a partir da eletrólise da água. De posse desses resultados, estimaram-se os custos com os gases acetileno e oxigênio necessários para o funcionamento do maçarico comercial, nas diferentes configurações analisadas.

Na configuração 1L-10A-20g, a vazão de hidrogênio foi na ordem de 0,91 L/min e a vazão de oxigênio foi de 0,47 L/min (Tabela 11). Considerando a fórmula  $C_g = V_g \times T_{arc} \times C_{gu}$ , proposta por Modenesi (2001), foi possível a obtenção dos custos operacionais com acetileno e oxigênio no maçarico comercial. A partir do consumo de gases em ambos os maçaricos foi possível realizar a comparação entre os custos operacionais na aquisição dos gases, observando a relação custo-benefício de ambos os maçaricos utilizados na produção de chamas, onde foram identificadas as vantagens (benefícios) e desvantagens (custos) para comparar a substituição do maçarico comercial pelo maçarico a partir da eletrólise da água. Exemplificando, apresentam-se os valores calculados para a configuração 1L-10A-20g:

$$C_g = V_g \times T_{arc} \times C_{gu}$$

$$C_g (C_2H_2) = (0,91 \times 60) \times 0,045 = R\$ 2,46$$

$$C_g (O_2) = (0,47 \times 60) \times 0,018 = R\$ 0,51$$

Considerando os custos operacionais dos gases acetileno (R\$ 2,46) e oxigênio (R\$ 0,51) determinados pela equação proposta por Modenesi (2001), referente a configuração 1L-10A-20g foi obtido o valor total do custeio dos gases na ordem de R\$ 2,97, necessários para o funcionamento do maçarico comercial na produção de chamas, pelo período de uma hora. Quando analisado o maçarico, a partir da eletrólise da água para a configuração 1L-10A-20g foi obtido o valor total do custeio para o seu funcionamento e produção da chama na ordem de R\$ 1,43, custo este referente a aquisição de água destilada, eletrólito suporte (KOH) e a energia elétrica.

O custo dos gases produzidos pelo maçarico a partir da eletrólise da água foi menor quando comparado com o custo dos gases necessários para o funcionamento do maçarico comercial (Tabela 11).

Com base nos resultados econômicos obtidos para o funcionamento dos maçaricos na produção de chamas em todas as configurações analisadas (volume, amperagem e eletrólito suporte), observou-se que o maçarico a partir da eletrólise da água apresentou melhor

resultado econômico (Tabela 11), frente ao maçarico comercial, nas configurações 1,5L-15A-20g (R\$ 3,47), seguida pela configuração 1,0L-15A-20g (R\$ 3,33).

Tabela 11 - Custo operacional por hora, em reais, da chama produzida no maçarico comercial e no maçarico a partir da eletrólise da água sob as mesmas condições de vazão de hidrogênio e oxigênio

CONFIGURAÇÃO DA ELETRÓLISE	VAZÃO		MAÇARICO		
	H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	COMERCIAL	H <sub>2</sub> O	DIFERENÇA
	(L/min)	(L/min)	(R\$)	(R\$)	R\$
1L-10A-20g	0,91	0,47	2,97	1,43	1,54
1L-10A-40g	0,88	0,43	2,84	1,56	1,28
1L-15A-20g	1,48	0,89	4,96	1,63	3,33
1L-15A-40g	1,52	0,95	5,13	1,76	0,64
1,5L-10A-20g	0,72	0,42	2,40	1,95	0,45
1,5L-10A-40g	0,63	0,41	2,14	2,15	-0,01
1,5L-15A-20g	1,68	1,00	5,62	2,15	3,47
1,5L-15A-40g	1,33	0,87	4,53	2,35	2,18
2L-10A-20g	0,92	0,48	3,00	2,46	0,54
2L-10A-40g	0,82	0,42	2,67	2,73	-0,06
2L-15A-20g	1,42	0,88	4,78	2,66	2,12
2L-15A-40g	1,28	0,82	4,34	2,93	1,41

L = litros de água; A = corrente elétrica; g = gramas de eletrólito suporte KOH

Quando correlacionado o resultado econômico (R\$ 3,47) observado para a configuração 1,5L-15A-20g com a maior temperatura alcançada pela chama produzida (Tabela 9) concluiu-se que a configuração analisada apresentou o melhor resultado técnico e econômico, quando comparada com as demais configurações.

#### 5.11 ANÁLISE DA RELAÇÃO CUSTO-BENEFÍCIO

Na análise da relação custo-benefício em substituição do uso do maçarico comercial pelo maçarico a partir da eletrólise da água foi utilizada a metodologia da Orçamentação Parcial, proposta por Noronha (1981), onde se compararam as vantagens (benefícios) e as desvantagens (custos). Segundo o autor, esta análise visa comparar o uso de um determinado equipamento ou insumo em comparação a sua substituição parcial ou total daquele equipamento/insumo por um novo equipamento/insumo, buscando identificar os resultados

econômicos que determinam a substituição ou não deste equipamento/insumo (NORONHA, 1981).

Na técnica da orçamentação parcial foram identificadas as receitas e as despesas envolvidas na utilização de cada maçarico testado para a produção de chamas (Anexo I, II e III), e a partir destes dados, aplicou-se a metodologia para a obtenção dos resultados econômicos, onde foi possível a geração dos valores utilizados para a tomada de decisão que identificou qual foi a configuração.

Tabela 12 - Valores monetários líquidos, em Reais, obtidos pela técnica da orçamentação parcial, considerando a receita e os custos operacionais envolvidos no uso do maçarico comercial e no uso do maçarico a partir da eletrólise da água

<b>CONFIGURAÇÃO DA ELETRÓLISE</b>	<b>VALOR</b>
1L-10A-20g	R\$ 648,85
1L-10A-40g	R\$ 621,85
1L-15A-20g	R\$ 780,44
1L-15A-40g	R\$ 785,84
1,5L-10A-20g	R\$ 537,61
1,5L-10A-40g	R\$ 497,65
1,5L-15A-20g	R\$ 803,12
1,5L-15A-40g	R\$ 672,44
2L-10A-20g	R\$ 554,89
2L-10A-40g	R\$ 505,21
2L-15A-20g	R\$ 663,80
2L-15A-40g	R\$ 604,40

Fonte: Próprio Autor

O melhor resultado econômico (R\$ 803,12) obtido pela técnica da orçamentação parcial proposta por Noronha (1981) foi aquele onde se utilizou para a produção de chama, a configuração 1,5L-15A-20g (Tabela 12). Por apresentarem valores positivos, o estudo indicou que a substituição do maçarico convencional pelo maçarico a partir da eletrólise da água foi vantajosa, sendo recomendada a adoção da configuração da eletrólise, aquela que apresentou o maior valor financeiro positivo, fato este observado na configuração 1,5L-15A-20g. O resultado financeiro obtido foi decorrente da diferença entre os benefícios (B) e os custos (C) inerentes a substituição do maçarico convencional sobre o maçarico a partir da eletrólise da água. Dentre os benefícios (B) foram considerados, a receita obtida com a prestação de serviços de soldagem, corte e fundição utilizando o maçarico a partir da eletrólise da água e a



redução dos custos financeiros com o investimento necessário para a compra do maçarico convencional e as despesas para a sua operacionalização. Para os custos (C) foram consideradas as receitas obtidas com o uso do maçarico convencional na prestação dos serviços de soldagem, corte e fundição que não seriam mais recebidas pelo prestador, adicionadas as despesas necessárias para a compra do maçarico a partir da eletrólise da água e aquelas necessárias para a operacionalização deste novo equipamento.

Considerando a temperatura da chama (Tabela 9), a configuração mencionada (1,5L-15A-20g) também apresentou a melhor temperatura média (990,8°C), tendo variado entre 979,5°C e 1009°C. Correlacionando os resultados, econômico e técnico, conclui-se que a configuração 1,5L-15A-20g foi aquela dentre as analisadas, a mais indicada para o funcionamento do maçarico a partir da eletrólise da água.

A segunda melhor configuração para o funcionamento do maçarico a partir da eletrólise da água, na produção de chamas, considerando os aspectos, técnico e econômico, foi a 1,0L-15A-40g, onde apresentou a temperatura média de 888,4°C e o resultado econômico na ordem de R\$ 785,84.

## 6 CONCLUSÃO

No estudo foi construído um maçarico, utilizando a eletrólise da água para a geração dos gases combustível (hidrogênio) e comburente (oxigênio) e analisada a viabilidade técnica e econômica deste novo equipamento. Os resultados obtidos demonstram que ao se utilizar um volume de 1,5 litros de água destilada (eletrólito), em uma concentração de  $20 \text{ g L}^{-1}$  de KOH (eletrólito suporte), sob uma corrente de 15A, foi possível a obtenção de uma temperatura média para a chama do maçarico na ordem de  $990,8^{\circ}\text{C}$ . Os parâmetros avaliados no estudo (volume de eletrólito, corrente aplicada, concentração do eletrólito suporte e vazão dos gases) mostraram que há uma diminuição da temperatura da célula e dos reservatórios com o aumento da concentração de eletrólito suporte, mesmo quando é aplicada uma maior corrente (15A), pois o aumento da concentração do eletrólito suporte leva a uma melhoria do processo de transporte de massa em solução, e conseqüente há a diminuição da resistência elétrica da mesma. Estes fatos, somado a recirculação do eletrólito e o aumento da velocidade do mesmo promove a remoção das bolhas de gases gerados nos eletrodos (catodo e anodo), proporcionando uma distribuição uniforme de calor através do aumento da transferência iônica no meio reacional. Assim pode-se concluir que a concentração do eletrólito de suporte no processo de eletrólise da água para geração dos gases combustível e comburente é determinante para a obtenção de um maior valor da temperatura da chama do maçarico, uma vez que ficou caracterizado que há uma maior vazão de gases devido a uma maior formação de bolhas na superfície dos catodos e anodos. A utilização da concentração do eletrólito suporte de  $20 \text{ g L}^{-1}$ , nos volumes de 1,5 litros e 2,0 litros proporcionou uma chama de maior temperatura do que com o emprego da concentração de  $40 \text{ g L}^{-1}$  fato este que só ocorreu com o volume de eletrólito de 1 litro. Pode-se concluir ainda, que no emprego de maior corrente no processo eletrolítico, a produção dos gases hidrogênio e oxigênio foi maior e que a vazão maior dos gases está diretamente relacionada a obtenção de uma maior temperatura da chama. Quando a temperatura dos reservatórios de hidrogênio e oxigênio foi maior na (configuração 1,5L-15A-20g), obteve-se uma maior temperatura da chama, indicativo este de que a temperatura do eletrólito também é fator determinante para a geração dos gases para o maçarico.

Adicionalmente, foi possível observar a não existência de nenhuma emissão de fuligem e  $\text{CO}_2$ , quando utilizado o maçarico para corte ou fundição, independente do objeto ensaiado, principalmente metais, obtendo-se como resíduo da queima do gás oxi-hidrogênio apenas uma pequena quantidade visível de água.

Na análise econômica, pode-se averiguar que o investimento na aquisição do maçarico a partir da eletrólise da água foi inferior aquele necessário para a aquisição do maçarico comercial, havendo uma viabilidade econômica neste quesito, sendo que em termos monetários a vantagem se deu na ordem de R\$ 514,20 (US\$ 137,45). Quanto a aquisição dos insumos necessários para a produção das chamas, mesmo havendo a adição do preço da energia elétrica gasta para a realização da eletrólise, ficou demonstrada a viabilidade econômica do equipamento estudado, pois ao se adquirir a quantidade mínima vendida de gases para o funcionamento do maçarico comercial ( $1\text{m}^3$  de oxigênio e 1Kg de acetileno), a quantia investida é de R\$ 63,00 quanto que para se acender a chama do maçarico a partir da eletrólise da água são necessários apenas R\$ 5,87, e em ambos os casos o insumos possibilitam que as chamas do maçarico permaneçam acesas por aproximadamente 12 horas na maior vazão obtida pelo maçarico estudado (2,68 L/ min na configuração 1,5L-15A-20g), e mesmo que se avalie o consumo em uma fração de tempo reduzido (minutos), a vantagem para o maçarico a partir da eletrólise também é grande.

A análise financeira realizada a partir da técnica da orçamentação parcial mostrou que a configuração 1,5L-15A-20g foi aquela que apresentou o maior valor positivo (relação entre receitas e despesas). É apontada que a substituição do maçarico comercial pelo maçarico a partir da eletrólise da água no emprego em atividades profissionais é mais viável em todos os casos comparados (ver Tabela 12), sendo que foi obtido o saldo positivo de R\$ 803,12 para esta configuração, indicando que a substituição do maçarico comercial pelo maçarico estudado se torna viável, pois a diferença entre os benefícios (B) e os custos (C) do processo de geração de chamas foi superior economicamente, proporcionando um resultado financeiro maior, caso fossem prestados serviços de soldagem, corte e fundição.

Em termos de gasto de insumos a partir da vazão dos gases produzidos, é visto que a economia gerada quando comparados os dois tipos de maçaricos acontece em 10 (dez) dos 12 experimentos realizados, não sendo o uso do maçarico estudado viável em apenas duas configurações, onde o gasto com insumos, mais energia elétrica, superou o gasto realizado pelo consumo dos gases acetileno e oxigênio adquiridos (ver Tabela 11).

Finalizando o estudo, ainda foi possível observar que as temperaturas médias alcançadas na configuração 1,5L-15A-20g ( $990,8^{\circ}\text{C}$ ), ainda permitem que sejam fundidos alguns metais, permitindo que trabalhos sejam realizados com prata, alumínio, zinco, estanho e ligas destes metais que venham a ter ponto de fusão igual ou abaixo da temperatura média alcançada pelo equipamento. Foi possível ainda observar que sem a presença do oxigênio produzido pela eletrólise da água a ser usado no maçarico, a temperatura média da chama

ficou em 735°C, ou seja, a temperatura ficou 225°C menos quente quando se tem apenas a participação do hidrogênio gerado a partir da eletrólise, ficando claro que há uma importante participação do oxigênio no aumento das temperaturas da chama a partir da mistura entre os dois gases. Mediante esta grande variação de temperaturas foi possível averiguar que houve uma produção em separado dos gases hidrogênio e oxigênio. Foi demonstrado e observado que há uma viabilidade técnica e econômica na utilização dos gases oxi-hidrogênio em um maçarico que utiliza a eletrólise da água.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, S. M. L. *et al.* O eletrólito suporte e suas múltiplas funções em processos de eletrodo. **Nova Química**, São Paulo, v. 27, n. 5, p. 813-817. 2004. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422004000500022>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422004000500022](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422004000500022). Acesso em: 17 mar. 2018.
- ALMEIDA, M. B. Q. **Oxicorte**. Coleção Soldagem 2000. Centro de Tecnologia da Solda SENAI – RJ. Rio de Janeiro, RJ. SENAI. v. 1, p. 31-32. 2000.
- ALMQVIST, E. **History of industrial gases**. New York, NY. Kluwer Academic/Plenum Publishers. 2003. 48 p.
- AGÊNCIA NACIONAL DE PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP: Resolução ANP nº 18 de 02 de setembro de 2004. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: <http://www.liquigas.com.br/wps/wcm/connect/b860d6004c2b781ba1e7b397d73c277b/RESOLU%C3%87%C3%83O+ANP+N%C2%BA+18.pdf?MOD=AJPERES>. DOU 6.9.2004. Acesso em: 13 set. 2018.
- ANTONSSON, A. B. *et al.* Fatal Carbon Monoxide Intoxication After Acetylene Gas Welding of Pipes. Oxford. **Annual Occupational Hygiene Society**, v. 57, p. 662-666. 2013. Disponível em: [https://www.researchgate.net/publication/234105907\\_Fatal\\_Carbon\\_Monoxide\\_Intoxication\\_After\\_Acetylene\\_Gas\\_Welding\\_of\\_Pipes](https://www.researchgate.net/publication/234105907_Fatal_Carbon_Monoxide_Intoxication_After_Acetylene_Gas_Welding_of_Pipes). Acesso em: 20 jul. 2018.
- BALAT, M. Potential importance of hydrogen as a future solution to environmental and transportation problems. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 33, p. 4013-4029. 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.05.047>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319908005272>. Acesso em: 26 out. 2018.
- BARD, A. J.; FAULKNER, L. R. **Electrochemical methods: fundamentals and applications**. 2. ed. JOHN WILEY & SONS, INC. 1994.
- BICAKOVÁ, O.; STRAKA, P. Production of hydrogen from renewable resources and its effectiveness. **International Journal of hydrogen energy**, v. 37, n.16, p. 11563-11578, ago. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.05.047>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319912011901>. Acesso em: 01 ago. 2018.
- BOETTCHER, M. **Gases Industriais**. Joinville, SC. abr. 2014. Universidade Estadual de Santa Catarina. Disponível em: <https://docplayer.com.br/46561182-Gases-industriais-universidade-do-estado-de-santa-catarina-academica-mayara-boettcher-prof-sivaldo-leite-correia-disciplina-quimica-aplicada.html>. Acesso em: 27 jul. 2017.

CASSIOLATO, C.; ALVES, E. O. Medição de Vazão. **Revista Controle & Instrumentação**, v. 138, p. 1-13. 2008. Disponível em: [http://www.profibus.org.br/files/artigos/Artigo\\_Vazao\\_CI\\_2008.pdf](http://www.profibus.org.br/files/artigos/Artigo_Vazao_CI_2008.pdf). Acesso em: 12 jan. 2019.

CACUA-MADERO, K. P.; HERRERA-MÚNERA, B. G. Revisión de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética. **Ingeniería y universidad**, v.17, n. 2, p. 463-482, jul./dez. 2013. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47728826012>. Acesso em: 04 dez. 2018.

CARVALHO, J. M. **Treinamentos em Processos Oxi-Combustível**: Fundamentos. 2000. Disponível em: <http://www.infosolda.com.br/biblioteca-digital/livros-senai/processos/149-processo-oxicombustivel-fundamentos.html>. Acesso em: 11 jul. 2017.

CHOI, S. *et al.* Combustion stability of gaseous CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> coaxial jet flame in a single-element combustor. **Revista Energy**, v. 132, p. 57-64, ago. 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.057>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360544217308137>. Acesso em: 05 out. 2018.

COSTA, F. C.; MONTEIRO, D. P.; PALMIERI, M. C. **Prêmio GLP de Inovação e Tecnologia**: Misturas GLP + Hidrogênio. 2011. Disponível em: [http://www.gasescombustiveis.com.br/premioglp/cases2011/APLICACOES\\_DO\\_GLP/MISTURAS\\_GLP\\_HIDROGENIO\\_PURO.pdf](http://www.gasescombustiveis.com.br/premioglp/cases2011/APLICACOES_DO_GLP/MISTURAS_GLP_HIDROGENIO_PURO.pdf). Acesso em: 13 jul. 2017.

DENNY, A. J. **Principles and prevention of corrosion**. 2. ed. Prentice Hall, Inc. 1996. 515 p.

FERREIRA, C. A. **Produção de hidrogênio a partir da decomposição termoquímica da água**. 2011. 09 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal de Uberlândia. 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/15183/1/d.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2018.

FOGAÇA, J. R. V. **Combustão e chamas de cores diferentes**. **Brasil Escola**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/combustao-chamas-cores-diferentes.htm>. Acesso em: 02 out. 2018.

GARCIA, D. C. S. **Estudo da correlação entre corrosão sob tensão e permeação de hidrogênio em aço carbono utilizando técnicas eletroquímicas para a verificação da incidência do meio H<sub>2</sub>S no aço utilizado**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Faculdade de Engenharia Química. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, MG, 2012.

GENTIL, V. **Corrosão**. 4. ed. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. 2003.

GUNGOR, A. Prediction of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> emissions for low-grade Turkish lignites in CFB combustors. **Chemical Engineering Journal**, v. 146, n. 3, p. 388-400, fev. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2008.06.019>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894708003720>. Acesso em: 03 set. 2018.

HALLENBECK, P.; ABO-HASHESH, M.; GHOSH, D. Strategies for improving biological hydrogen production. **Journal Bioresource Technology**, v. 110, p. 1-9, abr. 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.103>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852412001277>. Acesso em: 08 dez. 2017.

HABASHI, F. **Two hundred years platinum group metals**. Metall-Magazin. 2003. 735 p.

HARING, H. W. **Industrial gases processing**. Weinheim. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. ISBN: 978-3-527-31685-4. 2008. 239 p.

HESS, J. *et al.* Experimental Investigation into influence of the oxygen concentration on a pulverized coal swirl flame in oxi-fuel atmosphere. **Revista FUEL**, v. 240, p. 64-74. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.11.111>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236118320076>. Acesso em: 26 jan. 2019.

HNYDIUK-STEFAN, A.; SKLADZIEND, J. The Analysis of Parameters of the Cryogenic Oxygen Unit Cooperating with Power Plant to Realize Oxy-fuel Combustion. **Archives of Thermodynamics**, v. 36, n. 1, p. 39-54. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1515/aoter-2015-0003>. Disponível em: <https://content.sciendo.com/view/journals/aoter/36/1/article-p39.xml?rskey=gABcYB&result=6>. Acesso em: 19 ago. 2018.

KIM, T. Y. *et al.* Combustion characteristics of gaseous inverse O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> coaxial jet flames in a single-element model combustor. **Revista Energy**, v. 155, p. 262-271, jul. 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.05.031>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036054421830851X>. Acesso em: 02 set. 2018.

LOMBARDI, C. C. M. **Estudo da Influência da fase Ferrítica sobre o Comportamento de Corrosão de Aços Inoxidáveis Austeníticos**. 1993. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de reatores nucleares de potencial e tecnologia do combustível nuclear) – Universidade de São Paulo, SP, 1993.

MAIA, T. A. *et al.* Produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor de etanol utilizando catalisadores Cu/Ni/g-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. **Revista Nova Química**, São Carlos, v. 30, n. 2, mar./abril. 2007. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422007000200019>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422007000200019](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422007000200019). Acesso em: 08 dez. 2017.

MAKING HYDROGEN. [www.making-hydrogen.com/hydrogen-fuel-cell.html](http://www.making-hydrogen.com/hydrogen-fuel-cell.html) - 2013. - Acessado em: 17 jan. 2019.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e Tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte, MG. UFMG. 2009. p. 17-25.

MEDEIROS, W. B.; BOTTON, J. P. **Métodos e eletrólitos utilizados na produção de hidrogênio**. Foz do Iguaçu, PR. 03 jul. 2013. Repositório Institucional. UNILA. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/874>. Acesso em: 14 jun. 2017.

MODENESI, P. J. **Soldabilidade de Algumas Ligas Metálicas**. Belo Horizonte, MG. UFMG, 2011. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Disponível em: <http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/soldabilidade.pdf>. Acesso em: 19 jul. 2017.

MODENESI, P. J. **Estimativa de Custos de Soldagem: Custos de Soldagem I**. 2001. Disponível em: [http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/custo\\_em\\_soldagem.pdf](http://demet.eng.ufmg.br/wp-content/uploads/2012/10/custo_em_soldagem.pdf). Acesso em: 23 jan. 2019.

NETO, R. L. **Geração e Combustão do Hidrogênio Obtido Através do Processo de Eletrólise da Água**. 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). Acesso em: 19 jul. 2017.

NAKANO, Y. Engenharia Econômica e Desenvolvimento. **Revista Administração de Empresa**, v. 7, n. 22. 1967. Disponível em: <http://bibliotecadigital.fgv.br/ojs/index.php/rae/article/view/40637/39364>. Acesso em: 02 fev. 2019.

NORMA REGULAMENTÓRIA - **NR 18 - Condições e Meio Ambiente de Trabalho na Indústria da Construção**. Disponível em: [http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/b/b1/NR18\\_norma.pdf](http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/b/b1/NR18_norma.pdf). Acesso em: 22 out. 2018.

NORONHA, J. F. **Projetos Agropecuários: Administração financeira, orçamentação e avaliação econômica**. 2. ed. Atlas. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz. São Paulo, 1981. 274 p.

OLIVEIRA, R. L.; RIBEIRO, V. M.; PASSOS, F. B. Potenciais tecnologias de produção de hidrogênio a partir da biomassa. **Revista Científica Perspectiva OnLine**, v. 4, n. 10, p. 12-25, set./dez. 2014. Disponível em: [https://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas\\_e\\_engenharia/article/view/523/499](https://www.seer.perspectivasonline.com.br/index.php/exatas_e_engenharia/article/view/523/499). Acesso em: 01 ago. 2017.

PIRES, A. N.; BIERHALZ, A. C. K.; MORAES, A. M. Biomateriais: Tipos, Aplicações e Mercado. **Química Nova**, v. 38, n. 7. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/0100-4042.20150094>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-40422015000700957](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422015000700957). Acesso em: 20 out. 2017.

PINESCHI, S. A. A. **Desenvolvimento de sistema compacto de produção de gás rico em hidrogênio**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia) – Faculdade de Engenharia de Energia, Universidade Federal de Itajubá, Minas Gerais, 2013.

RIBEIRO, C. G.; PARIZZI, J. B. Produção de hidrogênio via eletrólise da água, gaseificação do carvão e reforma a vapor do gás natural. **Anais do Salão Internacional de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 3, n. 2. 2011. Disponível em: <http://seer.unipampa.edu.br/index.php/siepe/article/view/3921>. Acesso em: 06 mai. 2018.



ROSSI, D. **Influência da proporção entre as vazões de oxigênio e gás natural do sistema de injeção na eficiência energética de um forno elétrico a arco**. 2014. 43 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS. 2014.

RUSSELL, J. E. D. **Journal of Chemical Education**. 30. ed. 1953. DOI: <https://doi.org/10.1021/ed030p302>. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed030p302?rand=oussxjxs>. Acesso em: 23 set. 2018.

SALIBA-SILVA, A. M.; LINARD, A. **Hidrogênio Nuclear: Possibilidades para o Brasil**. São Paulo, SP. Brasil. p. 2. 2009. Disponível em: <https://www.ipen.br/biblioteca/2008/eventos/13426.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2017.

SANTOS, D. M. F.; SEQUEIRA, C. A. C.; FIGUEIREDO, J. L. Hydrogen production by alkaline water electrolysis (Revisão). **Nova Química**, v. 36, n. 8. São Paulo. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-40422013000800017>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-0422013000800017&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0100-0422013000800017&script=sci_arttext). Acesso em: 30 nov. 2017.

SHEN, M. *et al.* A concise model for evaluating water electrolysis. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 22, p. 14335-14341, nov. 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.12.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319910023712>. Acesso em: 09 out. 2017.

SORDI, A. *et al.* Análise termodinâmica de um ciclo de potência com célula a combustível SOFC e turbina a vapor. **Acta Scientiarum**, v. 28, n. 1, p. 65-71, mar. 2006. DOI: 10.4025/actascitechnol.v28i1.1287. Disponível em: <http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/view/1287>. Acesso em: 20 dez. 2018.

SORDI, A. *et al.* **Gaseificação de biomassa e célula a combustível: Sistema com célula tipo PEMFC**. 11º Congresso Brasileiro de Ciências Termais e Engenharia. Curitiba. PR. Brasil. agosto. 2006. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/066.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2018.

TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. **Eletroquímica: Processos e Aplicações**. São Paulo: EdUSP, 1998. 191-224 p.

VASCONCELOS, N. **Reforma a vapor do metano em catalisadores à base de níquel promovidos com nióbia**. 2006. Dissertação (Mestrado em Química) – Faculdade de Química, Universidade Federal Fluminense. Niterói, RJ. 2006, f. 17. Disponível em: <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp021020.pdf>. Acesso em: 09 mar. 2018.

VILLULAS, H. M.; TICIANELLI, E. A.; GONZALEZ, E. R. Células a combustível: Energia limpa a partir de fontes renováveis. **Química Nova na Escola**, n. 15, p. 28-34. 2002. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/qnesc15/v15a06.pdf>. Acesso em: 22 nov. 2018.

ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 36, n. 3, p. 307-326, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360128509000598>. Acesso em: 04 jun. 2017.

WALKER, P.; TARN, W. H. **Handbook of metal etchants**. Boca Raton, FL. CRC Press LLC. 1991. 1415 p.

WANG, B.; WAN, W.; WANG, J. Effect of ammonia concentration on fermentative hydrogen production by mixed cultures. **Bioresource Technology**, v.100, p.1211-1213, fev. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.08.018>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852408007177>. Acesso em: 28 nov. 2018.

## Anexo I

ORÇAMENTAÇÃO PARCIAL - Maçarico Comercial X Maçarico a partir da Eletrólise da Água - Reservatório com 01 Litro de Eletrólito									
CONFIGURAÇÕES	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 1: 1 L 10 A 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 330,76	R\$ 3.900,44		R\$ 6.480,00	R\$ 2.579,56		R\$ 672,96
M.E.A: 1 L + 10 A + 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 272,80	R\$ 4.573,40	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 1.906,60		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 2: 1 L 10 A 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 316,72	R\$ 3.914,48		R\$ 6.480,00	R\$ 2.565,52		R\$ 645,96
M.E.A: 1 L + 10 A + 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 285,76	R\$ 4.560,44	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 1.919,56		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 3: 1 L 15 A 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 545,68	R\$ 3.685,52		R\$ 6.480,00	R\$ 2.794,48		R\$ 816,60
M.E.A: 1 L + 15 A + 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 344,08	R\$ 4.502,12	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 1.977,88		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 4: 1 L 15 A 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 564,04	R\$ 3.667,16		R\$ 6.480,00	R\$ 2.812,84		R\$ 822,00
M.E.A: 1 L + 15 A + 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 357,04	R\$ 4.489,16	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 1.990,84		

COM = Maçarico Comercial; M.E.A = Maçarico a partir da Eletrólise da Água; C = Custo; B = Benefícios; Inv = Investimento; Desp = Despesa

## Anexo II

ORÇAMENTAÇÃO PARCIAL - Maçarico Comercial X Maçarico a partir da Eletrólise da Água - Reservatório com 1,5 Litros de Eletrólito									
CONFIGURAÇÕES	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 5: 1,5 L 10 A 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 268,12	R\$ 3.963,08		R\$ 6.480,00	R\$ 2.516,92		
M.E.A: 1,5 L + 10 A + 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 321,40	R\$ 4.524,80	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 1.955,20		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 6: 1,5 L 10 A 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 241,12	R\$ 3.990,08		R\$ 6.480,00	R\$ 2.489,92		
M.E.A: 1,5 L + 10 A + 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 334,36	R\$ 4.511,84	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 1.968,16		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 7: 1,5 L 15 A 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 616,96	R\$ 3.614,24		R\$ 6.480,00	R\$ 2.865,76		
M.E.A: 1,5 L + 15 A + 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 392,68	R\$ 4.453,52	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 2.026,48		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 8: 1,5 L 15 A 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 499,24	R\$ 3.731,96		R\$ 6.480,00	R\$ 2.748,04		
M.E.A: 1,5 L + 15 A + 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 405,64	R\$ 4.440,56	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 2.039,44		

COM = Maçarico Comercial; M.E.A = Maçarico a partir da Eletrólise da Água; C = Custo; B = Benefícios; Inv = Investimento; Desp = Despesa

## Anexo III

ORÇAMENTAÇÃO PARCIAL - Maçarico Comercial X Maçarico a partir da Eletrólise da Água - Reservatório com 2,0 Litros de Eletrólito									
CONFIGURAÇÕES	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 9: 2 L 10 A 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 334,00	R\$ 3.897,20		R\$ 6.480,00	R\$ 2.582,80		
M.E.A: 2 L + 10 A + 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 370,00	R\$ 4.476,20	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 2.003,80		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 10: 2 L 10 A 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 297,28	R\$ 3.933,92		R\$ 6.480,00	R\$ 2.546,08		
M.E.A: 2 L + 10 A + 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 382,96	R\$ 4.463,24	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 2.016,76		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 11: 2 L 15 A 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 526,24	R\$ 3.704,96		R\$ 6.480,00	R\$ 2.775,04		
M.E.A: 2 L + 15 A + 20 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 441,28	R\$ 4.404,92	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 2.075,08		
	RECEITA	INVESTIMENTO	DESPESA	SALDO	Benefícios	B1 (Receita M.E.A)	B2 (Despesa COM: Inv. + Desp.)	B - C	R\$
COM 12: 2 L 15 A 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 2.248,00	R\$ 479,80	R\$ 3.751,40		R\$ 6.480,00	R\$ 2.728,60		
M.E.A: 2 L + 15 A + 40 G	R\$ 6.480,00	R\$ 1.633,80	R\$ 454,24	R\$ 4.391,96	Custos	C1 (Receita COM)	C2 (Despesa M.E.A: Inv. + Desp.)		
						R\$ 6.480,00	R\$ 2.088,04		

COM = Maçarico Comercial; M.E.A = Maçarico a partir da Eletrólise da Água; C = Custo; B = Benefícios; Inv = Investimento; Desp = Despesa