



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA  
LABORATÓRIO DE REFERÊNCIA EM DESSALINIZAÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**AVALIAÇÃO DE UM REATOR CONSTITUÍDO POR ELETRODOS  
POROSOS DE NÍQUEL PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO  
ELETROLÍTICO**

**DEYDEBY ILLAN DOS SANTOS PEREIRA**

**ORIENTADOR: PROF. KEPLER B. FRANÇA (PH.D)**

**CAMPINA GRANDE – PB  
MARÇO DE 2015**

**DEYDEBY ILLAN DOS SANTOS PEREIRA**

**AVALIAÇÃO DE UM REATOR CONSTITUÍDO POR ELETRODOS  
POROSOS DE NÍQUEL PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO  
ELETROLÍTICO**

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

**Área de Concentração: Recursos Regionais e Meio Ambiente**

**Orientador: Prof. Kepler B. França (Ph.D)**

**CAMPINA GRANDE – PB  
MARÇO DE 2015**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

P436a      Pereira, Deydeby Illan dos Santos.  
Avaliação de um reator constituído por eletrodos porosos de níquel para a produção de hidrogênio eletrolítico / Deydeby Illan dos Santos Pereira. – Campina Grande, 2015.  
90 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2015.

"Orientação: Prof. Dr. Kepler B. França".

Referências.

1. Hidrogênio. 2. Reator Eletrolítico. 3. Eletrodos Porosos.  
I. França, Kepler B. II. Título.

CDU 661.96(043)

DEYDEBY ILLAN DOS SANTOS PEREIRA

**AVALIAÇÃO DE UM REATOR CONSTITUÍDO POR ELETRODOS  
POROSOS DE NÍQUEL PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO  
ELETROLÍTICO**

**BANCA EXAMINADORA**



Prof. Kepler B. França (Ph. D) – UFCG/UAEQ  
Orientador



Prof. Dr. Severino de Farias Neto – UFCG/UAEQ  
Examinador Interno



Prof. Dr. Hervé Michel Laborde – UFCG/UAEQ  
Examinador Interno



Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira – UEPB/DESA  
Examinador Externo

Campina Grande, 17 de março de 2015.

***DEDICO** este trabalho a toda a minha família, em especial aos meus pais Maria da Penha e José Pereira Firmino pela educação e força que me deram até hoje e a minha querida esposa Maria Aparecida pelo amor e companheirismo de todos os dias.*

## *AGRADECIMENTOS*

*Agradeço:*

*A Deus por sempre estar no comando de forma a me guiar durante toda a minha vida e me fortalecer nos momentos difíceis.*

*Aos meus queridos pais, Maria da Penha e José Pereira, por me darem além do exemplo de vida, do amor e do carinho, o incentivo para realizar mais esta conquista na minha vida.*

*A minha amada esposa, Maria Aparecida, por estar comigo em todos os momentos de dedicação a este trabalho e por sempre me dar apoio nas minhas realizações.*

*A minha família por me apoiarem e estarem torcendo sempre pelo meu sucesso.*

*Ao meu orientador Kepler Borges França pela orientação, amizade, confiança, ensinamentos, paciência e, também, oportunidade de desenvolver este trabalho no Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES.*

*A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo financiamento por meio bolsa de estudos (Mestrado).*

*A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande (UFCCG) que contribuíram ao longo desses últimos anos na construção e desenvolvimento do meu conhecimento. Também agradeço aos funcionários da UFCCG pela presteza e atendimento quando foi necessário.*

*Aos amigos de sempre e também aos que fiz durante este momento. Muito obrigado por participarem efetivamente desse processo de formação que se concretiza neste momento.*

*Aos amigos que fazem e fizeram parte do LABDES: Maniza Fernandes; Rafael Macário; Robson Rogaciano e Valéria Kelly, pela descontração, assistência, apoio e companheirismo prestados durante a realização deste trabalho. A Tellys Lins; João Utemberg; Iago Lunardy e Sergio meu sincero obrigado pela contribuição valiosa de cada uma para a realização deste trabalho.*

*Por fim, agradeço a todos que passaram na minha vida e deixaram sua contribuição para que este momento de realização e felicidade fosse alcançado.*

*“Não sou nem otimista, nem pessimista. Os otimistas são ingênuos, e os pessimistas amargos. Sou um realista esperançoso. Sou um homem da esperança. Sei que é para um futuro muito longínquo. Sonho com o dia em que o sol de Deus vai espalhar justiça pelo mundo todo.”*

*Ariano Suassuna*

PEREIRA, D. I. S. *Avaliação de um reator constituído por eletrodos porosos de níquel para a produção de hidrogênio eletrolítico*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química. Unidade Acadêmica de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2015. 90 p.

## RESUMO

A produção de gases poluentes está ligada diretamente ao grande consumo dos combustíveis fósseis. O meio ambiente já vem dando sinais de desgaste, enquanto que eles continuam sendo de extrema importância para a economia global. Os danos causados pelo aquecimento global, juntamente com a crescente preocupação com a diminuição dos níveis das reservas mundiais de combustíveis fósseis e à crescente demanda global energética motivam os estudos sobre a produção de hidrogênio por ele apresentar-se com um grande vetor energético. Geralmente, os processos básicos para a produção de hidrogênio a partir de fontes primárias de energia são: a eletrólise da água; processos termoquímicos e também processos biológicos. A eletrólise, apesar de ser promissora, ainda precisa de uma quantidade considerável de energia. Por isso, pesquisas devem ser desenvolvidas para tornar o H<sub>2</sub>, de fato, um vetor energético. Foi seguindo esta perspectiva que o presente trabalho teve como objetivo avaliar um reator eletrolítico bipolar constituído por eletrodos porosos de níquel para produção de H<sub>2</sub>. No reator estudado foram utilizados eletrodos porosos compostos por placas de aço (1020 niqueladas) e esponjas porosas de níquel soldadas na área eletrolítica. Com a caracterização do reator foi constatado que ele teve um desempenho superior a um reator compostos por eletrodos de aço niquelado operando nas mesmas condições de tensão e concentração do eletrólito. O fluxo de H<sub>2</sub> produzido nos eletrodos lisos com solução de KOH a (20 e 25) % foram (0,042 e 0,043) L/(h.cm<sup>2</sup>), respectivamente. Já o fluxo de H<sub>2</sub> dos eletrodos porosos de níquel com solução de KOH a (20 e 25) % foram (0,087 e 0,122) L/(h.cm<sup>2</sup>), respectivamente. Com este fato foi constatado que com a mesma área eletrolítica produziu-se mais que o dobro e, praticamente, o triplo de H<sub>2</sub> com os eletrodos porosos de níquel operando com solução de KOH a (20 e 25) %, respectivamente, em massa, como eletrólito. Este desempenho provocou uma economia de até 46,69 % na energia consumida para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>. Diante dos resultados obtidos com o reator, o eletrodo poroso de níquel mostrou ser excelente para ser empregado no processo de produção de hidrogênio por torná-lo mais eficaz e viável.

**Palavras-chaves:** Hidrogênio; Reator Eletrolítico; Eletrodos Porosos.

PEREIRA, D. I. S. *Evaluation of an reactor constituted by electrodes porous to Nickel for production Hydrogen Electrolytic*. Dissertation in Chemical Engineering. Academic Unit of Chemical Engineering, Federal University of Campina Grande – UFCG, 2015. 90 p.

## ABSTRACT

The production of gaseous pollutants is linked directly to the large consumption of fossil fuels. The environment is already showing signs of wear, while they are still being extremely important for the global economy. The damage caused by global warming, along with the growing concern about the decreased levels of world reserves of fossil fuels and the growing demand energetic global, motivate studies on the production of hydrogen by him introduce yourself how with a large energy vector. Generally, the basic processes for producing hydrogen from the primary energy sources are: the electrolysis of water; thermochemical processes and also biological processes. The electrolysis; despite being promising; still needs a considerable amount of energy. That is why; researches should be developed to make the H<sub>2</sub>, indeed, an energy vector. Was following this perspective that the present work aimed to evaluate a bipolar electrolytic reactor composed by electrodes porous the nickel for H<sub>2</sub> production. On the reactor studied were used porous electrodes compounds steel of plates (nickel-1020) and sponges porous of nickel welded in the electrolyte area. With the characterization of the reactor was found that he had a superior performance at a reactor composed of steel electrodes nickel plated operating under the same conditions of tension and concentration of the electrolyte. The H<sub>2</sub> flow produced in flat electrodes with KOH solution (20 and 25) % were (0,042 and 0,043) L/(h.cm<sup>2</sup>), respectively. Already the H<sub>2</sub> flow of the nickel porous electrode with solution of KOH (20 and 25) % were (0,087 and 0,122) L/(h.cm<sup>2</sup>), respectively. With this fact it was found that with the same electrolytic area was produced more than the dobro and, practically; triple the H<sub>2</sub> with electrodes porous of nickel operating with KOH solution (20 and 25) %; respectively; by mass; as electrolyte. This performance led to savings of up to 46,69 % in energy consumed to produce 1,0 m<sup>3</sup> of H<sub>2</sub>. Based on the results with the reactor, the electrode porous of nickel was shown to be excellent to be employed in the hydrogen production process by making it more effective and viable.

**Keywords:** Hydrogen; Electrolytic Reactor; Porous Electrodes.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> – Métodos de Produção de Hidrogênio .....	26
<b>FIGURA 2</b> – Curvas de voltagem em função da temperatura para a eletrólise da água...	31
<b>FIGURA 3</b> – Esquema simplificado de um reator eletrolítico .....	35
<b>FIGURA 4</b> – Configuração unipolar (1) e configuração bipolar (2) para um reator eletrolítico.....	36
<b>FIGURA 5</b> – Mapa do potencial eólico do Brasil .....	40
<b>FIGURA 6</b> – Principais componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal.....	43
<b>FIGURA 7</b> – Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar .....	44
<b>FIGURA 8</b> – RR montando (a e b) e Suporte de bancada construído (c) .....	48
<b>FIGURA 9</b> – Corte das esponjas porosas de níquel (a) e esponjas porosas de níquel cortadas (b) .....	49
<b>FIGURA 10</b> – Molde construído (a e b) e conjunto esponja porosa de níquel e placa niquelada no molde (c e d) .....	50
<b>FIGURA 11</b> – Eletrodos porosos de níquel construídos neste trabalho.....	50
<b>FIGURA 12</b> – Aerogerador VERNE555 instalado nas dependências do LABDES.....	52
<b>FIGURA 13</b> – Representação esquemática da metodologia utilizada na caracterização dos reatores.....	53
<b>FIGURA 14</b> – Comportamento da corrente (i) em função da tensão (U) no RR com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes .....	55
<b>FIGURA 15</b> – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes. ....	56
<b>FIGURA 16</b> – Comportamento da potência (P) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.....	57
<b>FIGURA 17</b> – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir 1,0 m <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.....	57
<b>FIGURA 18</b> – Comportamento da corrente (i) em função da tensão (U) no RR com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes .....	58
<b>FIGURA 19</b> – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR com KOH a 25% e fontes de energia diferentes ...	59
<b>FIGURA 20</b> – Comportamento da potência (P) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.....	60

<b>FIGURA 21</b> – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir 1,0 m <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.....	60
<b>FIGURA 22</b> – Comportamento da corrente (i) em função da tensão (U) no RM com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes .....	62
<b>FIGURA 23</b> – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RM com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes	62
<b>FIGURA 24</b> – Comportamento da potência (P) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RM com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.....	63
<b>FIGURA 25</b> – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir 1,0 m <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RM com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.....	64
<b>FIGURA 26</b> – Comportamento da corrente (i) em função da tensão (U) no RM com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes .....	65
<b>FIGURA 27</b> – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RM com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes	66
<b>FIGURA 28</b> – Comportamento da potência (P) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RM com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.....	67
<b>FIGURA 29</b> – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir 1,0 m <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RM com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.....	67
<b>FIGURA 30</b> – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR e no RM com [KOH] a 20% como eletrólito .....	69
<b>FIGURA 31</b> – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR e no RM com [KOH] a 25% como eletrólito .....	70
<b>FIGURA 32</b> – Micrografias eletrônicas de varredura da esponja porosa de níquel (a) x50; (b) x100 e (c e d) x1500 .....	72
<b>FIGURA 33</b> – Comportamento da potência (P) em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR e no RM com [KOH] a (20 e 25) % em massa como eletrólito .....	73
<b>FIGURA 34</b> – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir 1,0 m <sup>3</sup> de H <sub>2</sub> em função da vazão de H <sub>2</sub> (Q <sub>H2</sub> ) produzido no RR e no RM com [KOH] a (20 e 25) % em massa como eletrólito .....	74

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b>	– Comparativo das densidades de vapor e de líquido do hidrogênio e de outros combustíveis.....	22
<b>TABELA 2</b>	– Comparativo entre o poder calorífico do hidrogênio e o de outros combustíveis.....	22
<b>TABELA 3</b>	– Comparativo das características de inflamabilidade do hidrogênio e de outros combustíveis.....	23
<b>TABELA 4</b>	– Resultados obtidos com o RR e o RM operando com [KOH] a 20% e 25% e energia convencional.....	68
<b>TABELA 5</b>	– Propriedades físico-químicas da esponja porosa de níquel.....	70

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>ANEEL</b>	Agência Nacional de Energia Elétrica
<b>BIG</b>	Banco de Informações de Geração
<b>CCT</b>	Centro de Ciências e Tecnologia
<b>CNTP</b>	Condições Normais de Temperatura e Pressão
<b>DEQ</b>	Departamento de Engenharia Química
<b>IEA</b>	Agência Internacional de Energia
<b>LABDES</b>	Laboratório de Referência em Dessalinização
<b>LABFREN</b>	Laboratório de Fontes Renováveis de Energia
<b>LABNOV</b>	Laboratório de Desenvolvimento de Novos Materiais
<b>P&amp;D</b>	Pesquisa e Desenvolvimento
<b>RM</b>	Reator Modificado
<b>RR</b>	Reator Referência
<b>UAEQ</b>	Unidade Acadêmica de Engenharia Química
<b>UFMG</b>	Universidade Federal de Campina Grande
<b>UFPB</b>	Universidade Federal da Paraíba
<b>UFRJ</b>	Universidade Federal do Rio de Janeiro
<b>UFPE</b>	Universidade Federal de Pernambuco
<b>UFSC</b>	Universidade Federal de Santa Catarina
<b>UNICAMP</b>	Universidade Estadual de Campinas
<b>USP</b>	Universidade de São Paulo

## LISTA DE SIMBOLOS

<b>A</b>	Amperes
<b>A</b>	Área (m <sup>2</sup> )
<b>C</b>	Coulomb
<b>Cu<sub>2</sub>O</b>	Óxido de cobre
<b>CH<sub>4</sub></b>	Metano
<b>Cal/cm<sup>2</sup></b>	Calorias por centímetro quadrado
<b>E</b>	Tensão mínima para a eletrólise (V)
<b>F</b>	Constante de Faraday (96.489 C/equivalente)
<b>Ge</b>	Germânio
<b>GW</b>	Gigawatts
<b>H<sub>2</sub></b>	Hidrogênio
<b>H<sub>2</sub>O</b>	Água
<b>H<sub>3</sub>O<sup>+</sup></b>	Íons hidrônio
<b>i</b>	Corrente de operação (A)
<b>J</b>	densidade de corrente (A/m <sup>2</sup> )
<b>KOH</b>	Hidróxido de potássio
<b>[KOH]</b>	Concentração de hidróxido de potássio
<b>KW</b>	Quilowatts
<b>KJ/mol</b>	Quilo joule por mol
<b>mm</b>	Milímetros
<b>MJ/kg</b>	Mega joule por quilograma
<b>MJ/m<sup>3</sup></b>	Mega joule por metro cúbico
<b>MW</b>	Megawatts
<b>n</b>	Número de elétrons transferido na reação
<b>Ni</b>	Níquel
<b>OH<sup>-</sup></b>	Ânion hidroxila
<b>O<sub>2</sub></b>	Oxigênio
<b>pH</b>	Potencial Hidrogeniônico
<b>Q</b>	Carga elétrica transferida à reação
<b>R<sub>t</sub></b>	Rendimento térmico
<b>S<sub>i</sub></b>	Silício
<b>T</b>	Tensão real ou de operação (V)
<b>V</b>	Volts

<b>Zn</b>	Zinco
<b>°C</b>	Escala de temperatura Célsius
<b>μmol/mol</b>	Micro mol por mol
<b>η<sub>a</sub></b>	Sobretensão anódica
<b>η<sub>c</sub></b>	Sobretensão catódica
<b>η<sub>total</sub></b>	Sobretensão total
<b>η(%)</b>	Eficiência de uma célula eletrolítica
<b>ΔG</b>	Varição da energia livre de Gibbs da reação
<b>ΔH</b>	Varição da entalpia da reação
<b>IR<sub>0</sub></b>	Resistência elétrica da célula

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	17
<b>1.1</b>	<b>Objetivos</b> .....	19
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i> .....	19
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i> .....	19
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	20
<b>2.1</b>	<b>O Hidrogênio</b> .....	20
<i>2.1.1</i>	<i>Propriedades</i> .....	21
<i>2.1.2</i>	<i>A Economia do hidrogênio</i> .....	23
<i>2.1.3</i>	<i>Aplicações do hidrogênio</i> .....	24
<b>2.2</b>	<b>Produção de hidrogênio</b> .....	25
<i>2.2.1</i>	<i>Eletrólise da água</i> .....	27
<i>2.2.2</i>	<i>Reatores eletrolíticos</i> .....	34
<i>2.2.3</i>	<i>Eletrodos</i> .....	36
<b>2.3</b>	<b>Energias renováveis</b> .....	38
<i>2.3.1</i>	<i>Energia eólica</i> .....	39
<i>2.3.2</i>	<i>Conversão eólica</i> .....	41
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	46
<b>3.1</b>	<b>Materiais utilizados</b> .....	46
<b>3.2</b>	<b>Procedimentos metodológicos</b> .....	47
<i>3.2.1</i>	<i>Montagem do reator eletrolítico referência (RR)</i> .....	47
<i>3.2.2</i>	<i>Montagem do reator eletrolítico modificado (RM)</i> .....	49
<i>3.2.3</i>	<i>Caracterização dos reatores eletrolíticos referência (RR) e modificado (RM)</i> ....	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	54
<b>4.1</b>	<b>Caraterização do reator eletrolítico referência (RR)</b> .....	54
<i>4.1.1</i>	<i>RR utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e energias convencional e eólica...</i>	54
<i>4.1.2</i>	<i>RR utilizando [KOH] a 25% como eletrólito e energias convencional e eólica...</i>	58
<b>4.2</b>	<b>Caraterização do reator eletrolítico modificado (RM)</b> .....	61
<i>4.2.1</i>	<i>RM utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e energias convencional e eólica..</i>	61
<i>4.2.2</i>	<i>RM utilizando [KOH] a 25% como eletrólito e energias convencional e eólica..</i>	65

<b>4.3</b>	<b>Análise comparativa do desempenho dos reatores eletrolíticos referência (RR) e modificado (RM).....</b>	<b>68</b>
<b>4.4</b>	<b>Avaliação da utilização dos eletrodos porosos de níquel .....</b>	<b>70</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>75</b>
<b>6</b>	<b>PERSPECTIVAS.....</b>	<b>77</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>78</b>
	<b>APÊNDICE .....</b>	<b>82</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O panorama mundial está mudando rapidamente, por motivos ligados a três das grandes preocupações da humanidade nesse início de século: meio ambiente; energia e economia global. A produção dos gases poluentes está estritamente ligada a degradação do meio ambiente, à energia e a economia global; uma vez que os combustíveis fósseis são uma das principais fontes de energia e, dessa forma, um importante fator para a economia mundial.

Percebe-se a completa dependência dos combustíveis fósseis e não renováveis, na matriz energética mundial atual, o que consolida a combustão destes combustíveis como sendo a principal fonte emissora de gases de efeito estufa. Já em 2001 a UNEP estimou que os danos causados pelo aquecimento global consumissem 300 bilhões de dólares por ano em 2050. Além disso, adiciona-se a esta preocupação a diminuição dos níveis das reservas mundiais de combustíveis fósseis, mesmo que, de acordo com Santos (2013), no momento esteja em segundo plano devido ao descobrimento de novas jazidas e do desenvolvimento de técnicas de prospecção do petróleo que anteriormente eram inviáveis, como é o caso da exploração do pré-sal brasileiro em águas profundas.

Outro fator que deve ser considerado é o constante aumento da demanda energética mundial associada, principalmente, aos países em desenvolvimento. Ao se tomar por base as projeções realizadas pela Agência Internacional de Energia (IEA) sobre o aumento da demanda energética até 2030, que conferem um acréscimo no consumo de energia da ordem de 60%, pode se inferir que, em um futuro próximo, o aquecimento global e a escassez de recursos energéticos fósseis se agravarão se outras fontes e formas de produção de energia não forem aplicadas. Essas duas questões interligadas encontram solução na utilização de fontes renováveis de energia.

Com a crise do petróleo na década de 1970, um forte aporte de recursos de programas governamentais com interesse em fontes de energia renovável foi retomado. Países europeus, Canadá, Estados Unidos e Japão desenvolveram programas para a produção de hidrogênio em grande escala (SANTOS, 2013). A partir de então se passou a considerar o hidrogênio como uma possível fonte de energia por meio da conversão eletroquímica, usando células de combustível que até então tinham como grande aplicação prática a utilização em missões espaciais.

De acordo com Lay et al. (1999), o hidrogênio como fonte renovável de energia é uma alternativa bastante promissora, pois apresenta potencial energético de  $122 \text{ kJ.g}^{-1}$ , 2,75 vezes

---

maior que a energia obtida a partir de hidrocarbonetos. Além disso, a sua utilização não gera gases causadores do efeito estufa e também nenhum outro dano ao meio ambiente.

Geralmente, são três os processos básicos para a produção de hidrogênio a partir de fontes primárias de energia não fósseis: a eletrólise da água; processos termoquímicos; e, também, processos biológicos. Essas formas de produção de hidrogênio apresentam balanço energético desfavorável, uma vez que para a geração de hidrogênio ainda consome uma quantidade considerável de energia. A eletrólise, por exemplo, apesar de ser a mais promissora necessita de uma quantidade de energia que faz com que o hidrogênio produzido não seja uma das alternativas mais viáveis para a necessidade de energia. Todavia, esforços vêm sendo desenvolvidos na utilização do hidrogênio como um vetor energético e uma excelente opção para a substituição dos combustíveis fósseis. Esta substituição está se saindo mais vantajosa se o hidrogênio for produzido a partir de fontes renováveis de energia, por exemplo, energias fotovoltaica e eólica.

No Brasil os estudos sobre a produção de hidrogênio eletrolítico vêm ganhando atenção desde a criação do Laboratório de Hidrogênio na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) em 1984. Este laboratório foi criado para se dedicar a pesquisas, aos estudos e aplicações do hidrogênio. Particularmente, em Campina Grande – PB os estudos com hidrogênio também se iniciaram na década de 1980, gerando uma patente (MU7401372-6 em 21/07/1994), depositada por Júlio Goldfarb, professor da então UFPB – Campus II e agora UFCG. Nesta patente é apresentado um modelo de um eletrolisador bipolar com múltiplas funções, que consiste em um reator eletrolítico bipolar com elementos periféricos para gerar separadamente, conduzir e condicionar os gases hidrogênio e oxigênio (GOLDFARB, 1994).

Outros trabalhos foram produzidos na UFCG, principalmente no âmbito do Laboratório de Referência em Dessalinização – LABDES – da Unidade Acadêmica de Engenharia Química. Nos trabalhos produzidos mais recentemente, o interesse se concentrou na caracterização de eletrolisadores alcalinos; controle e automação do sistema de geração; produção de hidrogênio e aplicação em células a combustível e na aplicação de energias renováveis para produção de hidrogênio eletrolítico.

---

---

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 *Objetivo Geral*

Avaliar um reator eletrolítico bipolar constituído por eletrodos porosos de níquel para produção de hidrogênio.

### 1.1.2 *Objetivos Específicos*

- Montar dois reatores eletrolíticos bipolares para produção de hidrogênio; um com eletrodos de placa niquelada e outro com eletrodos porosos de níquel;
  - Caracterizar os reatores eletrolíticos bipolares por meio da variação da tensão aplicada, corrente, potência, concentração do eletrólito, quantidade de energia consumida por metro cúbico de H<sub>2</sub> produzido, fonte de energia convencional e eólica, fluxo de H<sub>2</sub> produzido por área eletrolítica e eficiências farádica e térmica;
  - Comparar os resultados obtidos nas caracterizações dos reatores eletrolíticos.
-

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 O Hidrogênio

A descoberta do gás hidrogênio surgiu das dúvidas dos cientistas e dos filósofos de que a água e o oxigênio eram elementos básicos. O hidrogênio foi inicialmente identificado pelo cientista britânico Henry Cavendish que mostrou à Sociedade Real de Londres em 1766 que havia diferentes tipos de ar: o “ar estável”, ou gás carbônico e o “ar inflamável”. Ele também demonstrou que o hidrogênio era muito mais leve do que o ar e foi o primeiro a produzir água a partir de hidrogênio e oxigênio por meio de uma faísca elétrica.

O químico francês Antoine Laurent Lavoisier repetiu os experimentos de Cavendish, e depois de várias tentativas conseguiu combinar hidrogênio e oxigênio para formar água. Os seus experimentos de 1785 foram considerados definitivos em provar que o hidrogênio e o oxigênio eram os elementos básicos da água. Lavoisier foi o primeiro a consignar estes nomes para os dois elementos.

O hidrogênio, um dos elementos básicos da natureza, é o mais abundante e mais leve no Universo, sendo também o mais simples da tabela periódica (PEREDO, 2012). Segundo Lee (1996) e Amos (1998), mais de 30% da massa do sol é hidrogênio atômico. Sendo cada átomo de hidrogênio constituído de apenas um próton e um elétron.

Apesar do hidrogênio está presente em qualquer lugar, é difícil encontrá-lo na atmosfera da na crosta terrestre como um elemento isolado. O hidrogênio não está livre, na Terra o encontramos sempre associado a outros elementos. Isso porque o campo gravitacional da Terra é pequeno demais para segurar um elemento tão leve, embora algum hidrogênio seja encontrado em gases vulcânicos (FILHO, 2008).

Como o hidrogênio não é encontrado em minas ou jazida, nem muito menos produzido, em grandes quantidades, através de processos naturais e espontâneos, de acordo com Peredo (2012), para que seja obtido hidrogênio “puro” é necessário gastar energia na dissociação de uma fonte primária. Essas fontes primárias são substâncias compostas nas quais ele encontra-se combinado, por exemplo, com oxigênio (água), com carbono em hidrocarbonetos (combustíveis tais como carvão, petróleo e gás natural) e na constituição de plantas, animais e outras formas de vida.

Nos últimos anos o hidrogênio tornou-se muito popular devido a inúmeras razões.

---

Nomeadamente, é considerado um combustível limpo emitindo apenas água na sua utilização, podendo ser produzido utilizando inúmeras fontes de energia, com particular interesse nas energias renováveis (PEREDO, 2012). Além disso, o hidrogênio funciona com células de combustível e pode ser uma das soluções para um desenvolvimento energético sustentável.

### **2.1.1 Propriedades**

O hidrogênio encontra-se na forma molecular de gás diatômico ( $H_2$ ) e/ou na forma de compostos químicos tais como hidrocarbonetos e água nas condições CNTP (Condições Normais de Temperatura e Pressão). Uma vez extraído, o hidrogênio é um gás sem cor, sem odor e sem sabor; além disso, torna-se um elemento útil para uma grande variedade de atividades industriais por ser um combustível bastante reativo e queimar no ar formando água, sendo, desta forma, potencialmente suficiente para alimentar energeticamente muitos setores da sociedade.

O átomo de hidrogênio é formado por apenas um próton e um elétron, não possuindo nêutrons na sua estrutura atômica. O hidrogênio apresenta três isótopos: monotério ( $^1H$ ), o deutério ( $^2H$ ) e o trítio ( $^3H$ ). Em laboratório foi sintetizados, no ano de 2001, o isótopo  $^4H$  e, a partir de 2003, os isótopos  $^5H$  até  $^7H$ .

Segundo Santos (2013), do ponto de vista do teor energético o hidrogênio é o melhor combustível, pois ele tem o maior conteúdo de energia por unidade de massa. Ele é altamente inflamável, com um poder de queima em concentração de 4% ou mais de  $H_2$  no ar (CARCASSI; FINESCHI, 2005). Segundo Gupta (2009), ao ser comparado com a gasolina o hidrogênio apresenta aproximadamente o triplo de conteúdo energético por unidade de massa, ou seja, 140,4 MJ/kg versus 48,6 MJ/kg. Quando líquido, o hidrogênio possui o segundo mais baixo ponto de ebulição de todas as substâncias (abaixo de  $-259\text{ }^\circ\text{C}$ ).

A densidade do hidrogênio é medida como a quantidade de massa de  $H_2$  contida por unidade de volume, sendo 14 vezes menor que a do ar (SOUSA, 2013). A Tabela 1 apresenta uma comparação da densidade do hidrogênio com a densidade de outras substâncias combustíveis.

---

**Tabela 1** – Comparativo das densidades de vapor e de líquido do hidrogênio e de outros combustíveis.

Combustível	Densidade do vapor a 20 °C (kg/m <sup>3</sup> )	Densidade do líquido a 20 °C (kg/m <sup>3</sup> )
Hidrogênio	0,08376	70,8
Metano	0,65	422,8
Gasolina	4,4	700,0

Fonte: COLLEGE OF THE DESERT, 2001 – Modulo 1.

Para Santos (2013), esta baixa densidade volumétrica constitui um problema em aplicações móveis, principalmente pelas características que o cilindro necessita para acondicionar o hidrogênio e dos equipamentos associados. Os sistemas de armazenamento feitos para aplicações móveis são consideravelmente mais volumosos ou mais pesados que os utilizados para combustíveis líquidos como a gasolina.

Outra característica importante é que o hidrogênio tem a mais alta densidade energética por unidade de peso. Ele possui poder calorífico superior aos combustíveis mais empregados na matriz energética mundial. Se comparado com estes, observa-se que necessitaria de uma quantidade em massa consideravelmente menor do que a consumida nos atuais processos de geração de energia (PEREIRA, 2005). A Tabela 2 apresenta um comparativo do poder calorífico do hidrogênio e dos principais combustíveis utilizados na matriz energética mundial.

**Tabela 2** – Comparativo entre o poder calorífico do hidrogênio e o de outros combustíveis.

Fontes de Energia	Poder Calorífico (kcal/kg)
Petróleo	10.195
Óleo diesel	10.221
Gasolina	10.377
Álcool	6.437
Querosene	10.292
Gás Natural	11.259
Carvão vegetal	7.365
Bagaço de cana	4.700
Lenha	2.500
Hidrogênio	28.712

Fonte: GERAÇÃO TÉRMICA, 2014.

Essa característica que o hidrogênio tem em apresentar alta densidade energética por unidade de peso é muito atraente porque possibilita a sua utilização em célula a combustível e, assim, se tornar uma fonte de energia alternativa.

Segundo Sousa (2013), diante das propriedades químicas citadas o hidrogênio pode ser

visto como perigoso na medida em que representa um risco de incêndio, pois se misturando com o ar possui flamabilidade que se dispersa rapidamente. Flamabilidade é uma faixa de temperatura na qual o combustível produz vapores suficientes para formar uma mistura inflamável com o ar. Combustíveis gasosos como o hidrogênio em CNTP vaporizam-se mais facilmente para formar uma mistura inflamável com o ar. Nas condições atmosféricas, quando a concentração de H<sub>2</sub> no ar encontra-se na faixa de 4 a 75% a mistura é potencialmente inflamável, mas só entre 15 e 59% ela pode explodir (RIBEIRO, 2006). A Tabela 3 apresenta um comparativo da flamabilidade do hidrogênio e de alguns combustíveis.

**Tabela 3** – Comparativo das características de flamabilidade do hidrogênio e de outros combustíveis.

Combustível	Faixa de Flamabilidade (%)	Temperatura de autoignição (°C)
Hidrogênio	4 a 75	585
Metano	5,3 a 15	540
Gasolina	1 a 7,6	230 a 480

**Fonte:** RIBEIRO, 2006.

Em resumo as propriedades do hidrogênio configuram como um desafio tecnológico para a sua abordagem como uma alternativa energética viável. É preciso aprofundar os estudos a cerca das suas características físicas e químicas.

### 2.1.2 A Economia do hidrogênio

Nos últimos anos, as mudanças climáticas têm provocado catástrofes que estão abalando a sociedade e forçando o Mundo a repensar sobre o consumo de energia. A maior contribuinte destas mudanças é devido à utilização de combustíveis fósseis que ao serem queimados liberam elevado nível de CO<sub>2</sub>. Ademais, segundo muito especialistas, os combustíveis fósseis estão em fase de esgotando e, com isso, há uma necessidade da busca por novas alternativas energéticas (DANTE et al. 2002; CHERRY; IEA, 2004).

A economia do hidrogênio é um conceito que se refere a uma energia ecológica e limpa, mostrando assim, a consciência da comunidade científica para impedir desastres ambientais (SOUSA, 2013). Na verdade, a economia do hidrogênio trata-se do termo empregado para caracterizar o regime energético que estaria fundamentado no hidrogênio e na célula a combustível, sendo uma expressão referente ao sistema desenvolvido para armazenar, distribuir e usar o hidrogênio como matriz energética. Na atualidade as células a combustível H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> são operacionais e disponíveis com uma eficiência de 50-60% e uma vida útil de até

3000 horas (SANTOS, 2013).

A economia do hidrogênio parte da sua geração por meio de fontes renováveis e não renováveis até a sua utilização como um combustível por possuir um potencial energético que pode suprir a demanda energética mundial de vários setores. Entretanto as infraestruturas necessárias ainda são pouco desenvolvidas, e o hidrogênio ainda é basicamente produzido a partir de fontes de energia primárias, que são, em sua maioria, poluentes. Para Sousa (2013), na geração de energia o hidrogênio produzindo contém grande parte da energia química, térmica e/ou elétrica empregada, a qual poderá ser recuperada quase em sua totalidade por meio de processos adequados.

A viabilidade energética e econômica do hidrogênio depende de uma tecnologia que permita a transformação da energia primária em eletricidade, com um rendimento energético global superior ao da transformação direta numa máquina térmica convencional. É nesse sentido que muitos esforços têm sido desenvolvidos na utilização do hidrogênio como um vetor energético como uma excelente opção para a substituição dos combustíveis fósseis. Esta substituição é mais vantajosa se o hidrogênio for produzido a partir de fontes renováveis de energia, por exemplo, energia eólica (PATRICIO et al., 2012).

Segundo a Agência Internacional de Energia – IEA (2004), o caminho dominante e mais barato para a produção de hidrogênio é através do gás natural por meio de um processo chamado de reforma a vapor. Porém se esse processo não retirar CO<sub>2</sub> do ambiente não promove a descarbonização e, logo, não se torna uma fonte limpa de energia.

Existem varias vantagens relacionadas à produção de hidrogênio que abrangem tanto interesse industrial como governamentais. O hidrogênio será, talvez, o vetor que tomará a parte mais importante antes do final do século (LOPES, 2009). Os dois maiores vetores, eletricidade e hidrogênio, têm a propriedade de ser intercambiáveis através das tecnologias das células a combustível e da eletrolise da água.

### **2.1.3 Aplicações do hidrogênio**

Diversas formas de energias não convencionais estão sendo consideradas como possíveis fontes energéticas para suprir o aumento exagerado do consumo das fontes convencionais de energia que já se encontram com suas reservas diminuídas. Além disso, os problemas ambientais causados por essas fontes tais como o petróleo e o gás natural, aumentam a necessidade por essa busca de uma energia ecologicamente correta.

---

Dentre as energias não convencionais destacam-se a energia nuclear, a termonuclear, a solar, a eólica, a hidráulica e a geotérmica. Todavia algumas dessas fontes apresentam desvantagens. Por exemplo, as energias solar e eólica são intermitentes e as energias hidráulica, geotérmica estão em localidades fixas e todas não podem ser usadas diretamente como combustível de veículos usados para o transporte público e privado.

O hidrogênio atende muito bem as necessidades da atualidade, uma vez que ele pode ser armazenado, transportado, não é contaminante (independente da fonte primária utilizada), é renovável e também pode ser utilizado como combustível e outras formas (AVACA et al., 2002). A maior aplicação do hidrogênio é no programa espacial norte-americano, onde ele é usado como combustível primário dos foguetes e fonte de energia elétrica durante as missões através das células a combustível (FILHO, 2008).

Segundo Sousa (2013), o hidrogênio também pode ser aplicado na síntese da amônia e do metanol a partir do gás de síntese. Atualmente esforços para utilizar o hidrogênio como combustível em veículos estão sendo realizados em diversas partes do mundo por agregar valor devido à redução do crédito de carbono, sendo menos poluente e menos agressor ao meio ambiente.

De uma forma geral, o hidrogênio pode ser utilizado como fonte energética, veicular ou estacionária, como também fonte integrante da célula a combustível em substituição aos combustíveis fósseis.

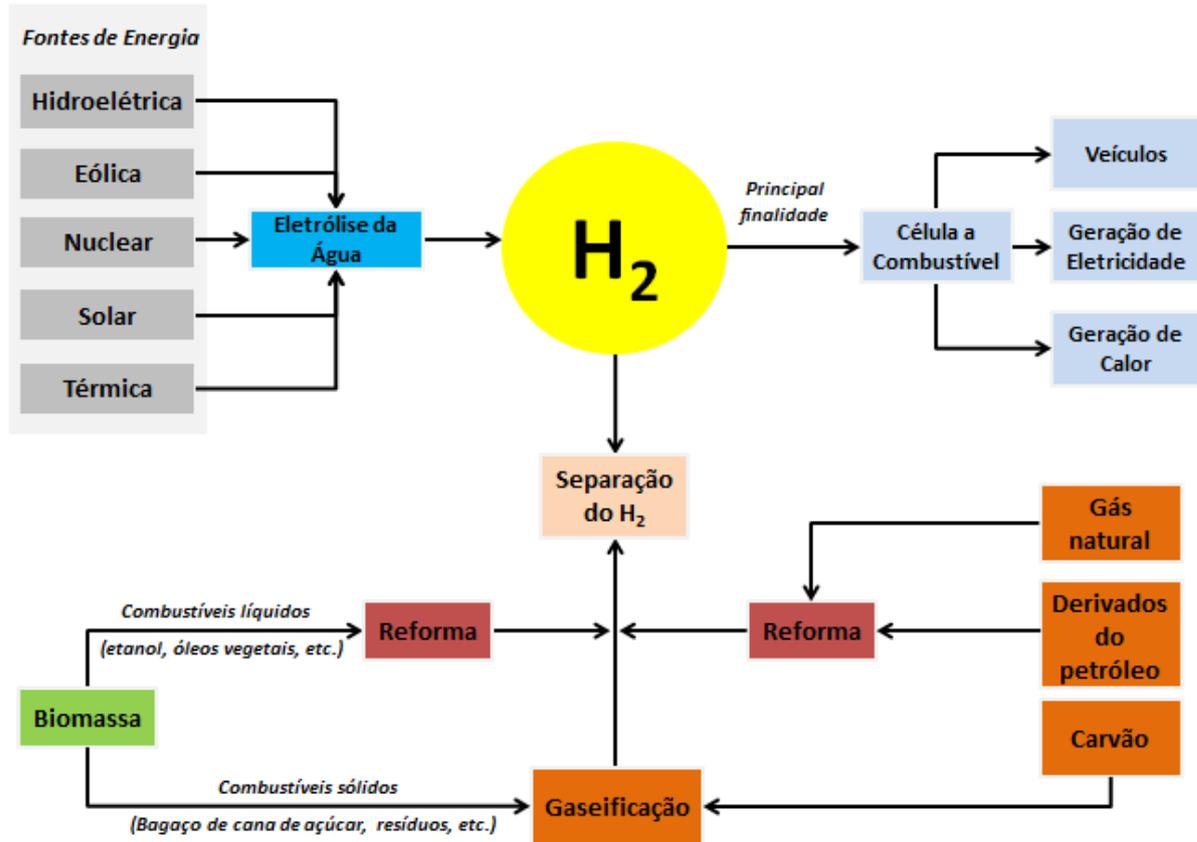
## **2.2 Produção de hidrogênio**

Apesar de o hidrogênio ser o elemento químico mais simples e também mais abundante no Universo, a sua concentração na atmosfera terrestre é da ordem de  $0,5 \mu\text{mol/mol}$  (SANTOS, 2013). Esse fato inviabiliza a captação direta deste gás do ar atmosférico de forma a fazer com que este vetor energético seja extraído de substâncias abundantes e com alto teor de hidrogênio.

O hidrogênio é usualmente consumido no lugar onde é produzido. É predominantemente usado como reagentes na refinação do petróleo, e na manufatura de fertilizante (amônia), plásticos, solventes, e outras mercadorias industriais. As principais formas de produção e utilidade do hidrogênio são mostradas na Figura 1.

---

Figura 1 – Métodos de Produção de Hidrogênio.



Fonte: Adaptado de SILVA e CAMARGO, 2002.

A escolha do melhor método de produção do hidrogênio depende da quantidade que queremos produzir e do seu grau de pureza. As tecnologias de produção de hidrogênio necessitam de energia de alguma forma para que se inicie o processo, por exemplo: calor, luz ou eletricidade. A energia elétrica poderá vir de fontes renováveis, como a energia eólica, tornando o processo de produção perfeitamente limpo.

O hidrogênio pode ser extraído do petróleo, da gasolina e do metanol mediante o processo de reforma. Este processo de oxidação parcial é um processo comercial que necessita do uso de oxigênio puro, sendo menos eficiente e mais emissor de gás carbônico do que a reforma a vapor do metano. A reforma a vapor do metano ( $CH_4$ ) é o método mais comum e mais barato para produzir hidrogênio hoje em dia. Segundo Santos (2013) é um método térmico de extração de hidrogênio que envolve a utilização de hidrocarbonetos como fonte, principalmente o metano. Durante o processo os hidrocarbonetos são postos a altas temperaturas em ambiente pressurizados para se obter o hidrogênio, além do monóxido de carbono e dióxido de carbono.

Outra forma de se obter o hidrogênio é a gaseificação. A gaseificação da biomassa não

é um processo recente, contudo, fatores ambientais desejáveis, como remoção de enxofre, tem renovado o interesse por este processo (SANTOS, 2013). Na gaseificação é comum a utilização de biomassa oriunda de diversas fontes, tais como: madeira, restos agrícolas, resíduos da indústria de açúcar e álcool, entre outros.

De acordo com Santos (2013), outros processos de produção são desenvolvidos atualmente, como o envolvimento de algas. Nestes métodos produzem o chamado ‘biohidrogênio’ e recebem notoriedade devido ao seu potencial como uma alternativa sustentável para os métodos convencionais, uma vez que neste processo não há emissão de gás carbônico. Para Chattanathan et al. (2012), estes processos produtivos se dividem basicamente em: processos fotossintéticos, processos fermentativos e processos híbridos.

De todos os métodos de produção de hidrogênio a eletrólise da água possui grande destaque. A eletrólise da água é um processo eletroquímico onde há a dissociação da água em hidrogênio e oxigênio moleculares (SANTOS, 2013). Nela, a obtenção de hidrogênio e oxigênio é possível por meio da aplicação de uma corrente elétrica na água.

Para produzir hidrogênio extremamente puro em pequenas quantidades a eletrólise é considerada um processo econômico. Mas, a eletrólise fica cara numa escala maior, devido principalmente à eletricidade que custa atualmente, em média, de 3 a 5 vezes mais do que um combustível fóssil. Mas quando se utiliza energias renováveis pode considerar-se sustentável. Por exemplo, os custos da eletrólise alimentada por painéis fotovoltaicos e/ou turbina eólica, apesar de serem considerados ainda altos (mas espera-se uma redução considerada nos próximos anos com o avanço da tecnologia), torna o uso da eletrólise muito atraente por ser uma alternativa totalmente limpa.

Além do mais, com o hidrogênio sendo produzido na demanda e no lugar de consumo, os custos de transporte e armazenamento são praticamente nulos, o que torna o hidrogênio eletrolítico mais competitivo do que o hidrogênio transportado. Os preços serão ainda melhores com a produção em massa de pequenos eletrolisadores e usando energia elétrica menos cara e tendo eficiências de produção consideráveis.

### ***2.2.1 Eletrólise da água***

A eletrólise é uma reação de decomposição de substâncias por efeito de uma corrente elétrica (PEREIRA, 2005). Quando se utiliza eletrodos em meio condutor ácido ou básico, em que os produtos das reações desenvolvidas são apenas hidrogênio e oxigênio, ou seja, cujo balanço das reações químicas resulta unicamente na decomposição da água, esse processo é

---

denominado eletrólise da água.

Embora possuindo vantagens de disponibilidade, flexibilidade e pureza elevada para alcançar aplicações generalizadas, a produção de hidrogênio pela eletrólise da água necessita de melhorias em eficiência, segurança, durabilidade, operabilidade e portabilidade energética, e acima de tudo, redução nos custos de operação. Estas necessidades podem criar oportunidades de pesquisa e desenvolvimento levando a avanços tecnológicos (KAI ZENG, 2010).

A produção de hidrogênio pela eletrólise da água é, em princípio, muito simples. Uma célula eletrolítica básica é constituída de um par de eletrodos imersos em um eletrólito condutor dissolvido em solução aquosa de um eletrólito. A corrente elétrica passa através da célula de um eletrodo para o outro e o hidrogênio é produzido em um eletrodo (cátodo) e o oxigênio no outro eletrodo (ânodo). A água consumida deve ser reposta continuamente.

Na prática, um eletrolisador é mais complicado, contendo vários componentes que lhe permitem trabalhar eficiente e economicamente. A reação de decomposição da água é uma reação endotérmica, representada na Equação (1) da seguinte forma:



Na água para produção do hidrogênio é preciso adicionar um eletrólito para dar condutividade elétrica. O eletrólito deve apresentar as seguintes características: ter alta condutividade iônica; resistente a altas tensões; não se decompor; não apresentar uma volatilidade alta e resistir a variações de pH, uma vez que a concentração de íons hidrogênio varia nos eletrodos.

De acordo com Pereira (2005), em qualquer solução aquosa, ocorre auto ionização da água fazendo com que exista a presença dos íons  $\text{H}_3\text{O}^+$  e  $\text{OH}^-$  segundo o equilíbrio a seguir mostrado na Equação (2):



A produção do hidrogênio eletrolítico é gerada, segundo Pereira (2005), a partir de uma diferença de potencial nos eletrodos, gerando assim um campo elétrico no meio eletrolítico. Desta forma é produzido um fluxo iônico direcionado onde os cátions se dirigem para o cátodo e os ânions para o ânodo. Segundo Silva (1991), para que as reações ocorram

nos eletrodos, se faz necessário atingir o potencial mínimo de eletrólise. Para os eletrólitos ácido, neutro ou alcalino, as reações estão apresentadas nas Equações (3) a (6):

- Reações catódicas:

- Em eletrólito ácido



- Em eletrólito neutro ou alcalino



- Reações anódicas:

- Em eletrólito ácido e neutro



- Em eletrólito alcalino



Na eletrólise da água é comum utilizar a solução de hidróxido de potássio (KOH) como o eletrólito. A concentração de KOH varia em função da temperatura e também das condições de operação o reator eletrolítico. Por exemplo, ela pode ser de 25% em massa para uma temperatura entre 80 e 90 °C; de 30 a 35% em massa a 120 °C e 40% em massa a 160 °C (PEREIRA, 2005). Considerando-se um processo reversível, com o balanço energético se obtém a Equação (7):

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Energia elétrica} \\ \text{fornecida ao sistema} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Variação da energia} \\ \text{química do sistema} \end{array} \right\}$$

Ou:

$$E_1 \cdot Q = -\Delta G \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

$T_1$  = a tensão mínima para a eletrólise,

$Q$  = a carga elétrica transferida à reação

$\Delta G$  = a variação da energia livre de Gibbs da reação

A aplicação da teoria termodinâmica ao processo conduz ao encontro de dois valores importantes, o da tensão mínima para o desenvolvimento das reações e o da tensão termoneutra quando se considera não haver troca de calor entre o sistema químico e o meio ambiente. A tensão mínima e a tensão termoneutra são representadas, respectivamente, pelas Equações (8) e (9) (PLETCHER, WALSH, 1993; BOCKRIS, CONWAY, 1975). Tanto  $T_1$  como  $T_2$  são funções diretas da temperatura em que se desenvolve o processo.

$$T_1 = \frac{-\Delta G}{n \cdot F} \quad \text{Equação (8)}$$

$$T_2 = \frac{\Delta H}{n \cdot F} \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

$n$  = número de elétrons transferido na reação

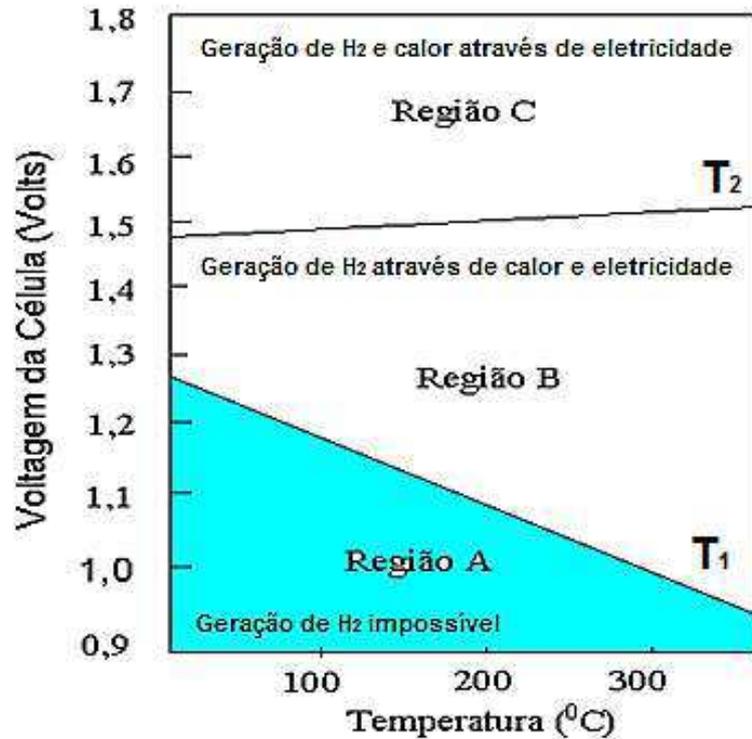
$F$  = constante de Faraday (96.489 Coulombs/equivalente)

$\Delta H$  = variação da entalpia da reação

A diferença entre variação da energia livre de Gibbs e da variação da entalpia da reação surge da entropia do processo global, devendo ser balanceada devido à absorção ou liberação de calor do sistema, não por conversão da eletricidade. Em condições normais de temperatura e pressão a eletrólise da água não ocorre com uma tensão mínima,  $T_1$ , de 1,23 V (curva  $T_1$  da Figura 3). Nas mesmas condições a tensão termoneutra,  $T_2$ , da eletrólise é 1,48 V.

Para tensões entre 1,23 e 1,48 V a eletrólise ocorre desde que o calor seja fornecido ao sistema, o que caracteriza um processo endotérmico. Para tensões acima de 1,48 V (curva  $T_2$  da Figura 3) o calor é transferido ao meio ambiente, sendo, desta forma, um processo exotérmico. Na Figura 3 essas observações podem ser realizadas a partir da análise das curvas de voltagem em função da temperatura para a eletrólise da água.

Dentro da realidade, os sistemas químicos conhecidos como células eletrolíticas operam todos na Região C da Figura 2 (região de geração de hidrogênio e calor através de eletricidade), com uma tensão aplicada acima do limite inferior determinada pela termodinâmica.

**Figura 2** – Curvas de voltagem em função da temperatura para a eletrólise da água.

Fonte: Adaptado de CASPER, 1978.

De acordo com Pereira (2005), a diferença entre a tensão necessária para a operação de uma célula e a tensão mínima estabelecida termodinamicamente para as mesmas condições de operação é denominada sobretensão da célula. A sobretensão pode ser encontrada com a Equação (10):

$$\eta_{\text{total}} = T_T - T \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$T_T$  = tensão teórica requerida (V)

$T$  = tensão real ou de operação (V)

Na eletrólise, os principais efeitos que geram a sobretensão são a queda da condutividade do meio condutor iônico causada pela concentração de íons junto aos eletrodos; o aparecimento de “nuvens” de moléculas em tornos dos íons reduzindo grandemente a mobilidade iônica; a cinética de reação lenta nos eletrodos e/ou o acúmulo de gases junto aos eletrodos (bolhas), reduzindo a área disponível de reação.

Para encontrar a tensão real de operação de uma célula eletroquímica basta somar as

sobretensões anódica ( $\eta_a$ ), catódica ( $\eta_c$ ) e também a resistência elétrica da célula ( $R_o$ ). A Equação (11) expressa à tensão real de uma célula eletroquímica:

$$T = T_T + \eta_a + \eta_c + R_o \quad \text{Equação (11)}$$

De acordo com estudos realizados por Goldfarb (1989), cada uma destas contribuições poderá ser maior ou menor dependendo do sistema eletroquímico que está sendo considerado. Dependendo da natureza desses fatores, o efeito produzido pela sobretensão na célula caracteriza-se por um processo irreversível, onde a energia necessária para vencer a sobretensão é dissipada na forma de calor.

Segundo Pereria (2005), o maior objetivo dos programas de desenvolvimento da eletrólise é a redução do valor dos termos  $\eta_a$ ,  $\eta_c$  e  $R_o$  com o propósito de obter elevada eficiência, uma vez que a tensão operacional diminui consideravelmente com o aumento da temperatura. Desta forma, qualquer aumento de rendimento dependerá de  $\eta_a$ ,  $\eta_c$  e  $R_o$  que estão diretamente ligados com o efeito da temperatura.

Existem várias maneiras de expressar a eficiência na eletrólise, dependendo de como o sistema eletrolítico é avaliado e comparado (SOUSA, 2013). A eficiência energética de um reator eletrolítico é definida como a razão entre a percentagem da energia na saída e a energia total na entrada do sistema eletrolítico. Eletroquimicamente, a eficiência de tensão de uma célula eletrolítica sempre pode ser calculada usando a Equação (12) (KIM et. al., 2006). Esta equação expressa à percentagem de eficácia da tensão para separar a água na tensão total aplicada ao conjunto de células do reator eletrolítico.

$$\% \text{eficiência de tensão} = \frac{(T_{\text{ânodo}} - T_{\text{cátodo}})}{T_{\text{cel}}} \cdot 100 \quad \text{Equação (12)}$$

Há outras duas eficiências que podem ser calculadas com base na mudança da energia envolvida na reação da eletrólise. A primeira é a eficiência farádica ( $\eta_{\text{farádica}}$ ) que é, na verdade, a percentagem da energia teórica necessária para forçar as moléculas de água na tensão real da célula. A outra se trata da eficiência térmica ( $\eta_{\text{térmica}}$ ) que consiste na tensão adicional a célula eletroquímica no momento da reação de eletrólise. Essa duas eficiências usam a modificação da energia livre de Gibbs e a variação de entalpia tanto na reação de decomposição da água como na energia de entrada, adotando como exigência as perdas de energia teórica e de entrada. As Equações (13) e (14) representam, respectivamente, a

eficiência farádica e a eficiência térmica conforme (ZEG and ZHANG, 2010).

$$\eta_{\text{farádica}} = \frac{\Delta G}{AG+\text{perdas}} = \frac{E_{\Delta G}}{T_{\text{cel}}} \cdot 100\% \quad \text{Equação (13)}$$

$$\eta_{\text{térmica}} = \frac{\Delta H}{AG+\text{perdas}} = \frac{E_{\Delta H}}{T_{\text{cel}}} \cdot 100\% \quad \text{Equação (14)}$$

Onde:

$E_{\Delta G}$  = potencial no equilíbrio

$E_{\Delta H}$  = potencial termoneutro

$T_{\text{cel}}$  = tensão da célula

Segundo Sousa (2013), as Equações (13) e (14) podem ser simplificadas utilizando a tensão da célula e a tensão da célula total conforme mostrado nas Equações (15) e (16).

$$\eta_{\text{farádica}} = \frac{1,23}{T_{\text{cel}}} \quad \text{Equação (15)}$$

$$\eta_{\text{térmica}} = \frac{1,48}{T_{\text{cel}}} \quad \text{Equação (16)}$$

Os valores da eficiência farádica são sempre menores que 100% devido as constantes perdas de energia pelo sistema. Por outro lado é possível que a eficiência térmica de uma célula eletrolítica possa ultrapassar 100% quando o sistema absorver o calor do ambiente operando em modo endotérmico desde que a eletrolise opere sob uma tensão mais baixa do que a tensão termoneutra.

Pereira (1999) constatado que a energia (E), em kWh/m<sup>3</sup>, necessária para se produzir um metro cúbico de hidrogênio, pode ser calculada multiplicando a tensão (T) por 2,393 conforme a Equação (17):

$$E = 2,393 \cdot T \quad \text{Equação (17)}$$

Posteriormente, Pereira (2005) relatou que teoricamente para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> e 0,5 m<sup>3</sup> de O<sub>2</sub> são necessários 806,3 g de água e 730,4 kJ de energia, ou seja, 3,55 kWh/m<sup>3</sup> de hidrogênio. Para encontrar a energia real (E<sub>R</sub>) que foi consumida por um eletrolisador para

produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> basta fazer uma relação entre a potência, P, (tensão vezes a corrente) e a vazão do gás (V<sub>H<sub>2</sub></sub>) (FILHO, 2008), conforme a Equação (18):

$$E_R = \frac{P}{V_{H_2}} \quad \text{Equação (18)}$$

Para uma eletrolisador operando em meio alcalino, a vazão da geração de hidrogênio é proporcional à corrente de operação (i). Com isso, para produzir um mol de hidrogênio (0,0224 m<sup>3</sup>) são necessários duas vezes a constante de Faraday (F), ou seja, 192.978 Coulombs (C). Sendo um ampere igual a um Coulomb por segundo, em uma hora temos 3600 C o que corresponde a um fator de 0,0373 F/h. De acordo com Sousa (2013), fazendo uma relação deste fator com a Equação (4) obtém-se a vazão de geração de hidrogênio relacionada com a corrente aplicada na célula. A Equação (19) expressa a vazão de hidrogênio (V<sub>H<sub>2</sub></sub>) gerado em m<sup>3</sup>/h em relação a corrente (i) aplicada na célula eletrolítica.



$$V_{H_2} = 4,5 \times 10^{-4} \cdot i \quad \text{Equação (19)}$$

Ao dividir a Equação (18) pela área (A), em cm<sup>2</sup>, das placas que constituem o reator eletrolítico encontra-se uma relação entre a vazão de hidrogênio e a densidade de corrente (J), em A/cm<sup>2</sup>. A densidade de corrente juntamente com a tensão da célula é importante para determinar a curva de polarização que consiste em uma forma de verificar a eficiência do reator eletrolítico. A Equação (20) apresenta a relação estabelecida pela vazão de hidrogênio e a densidade de corrente.

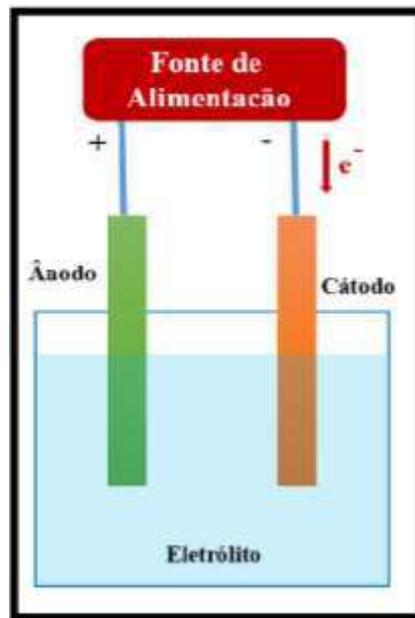
$$\frac{V_{H_2}}{A} = 4,2 \times 10^{-4} \cdot J \quad \text{Equação (20)}$$

### 2.2.2 Reatores eletrolíticos

O reator eletrolítico consiste em um recipiente cilíndrico onde ocorre uma reação de dissociação da água por meio da aplicação de corrente elétrica, produzindo oxigênio e hidrogênio, além de transferência de massa e de calor. Esta reação é chamada de eletrólise. A

Figura 3 apresenta um esquema simplificado de um reator eletrolítico.

**Figura 3** – Esquema simplificado de um reator eletrolítico.

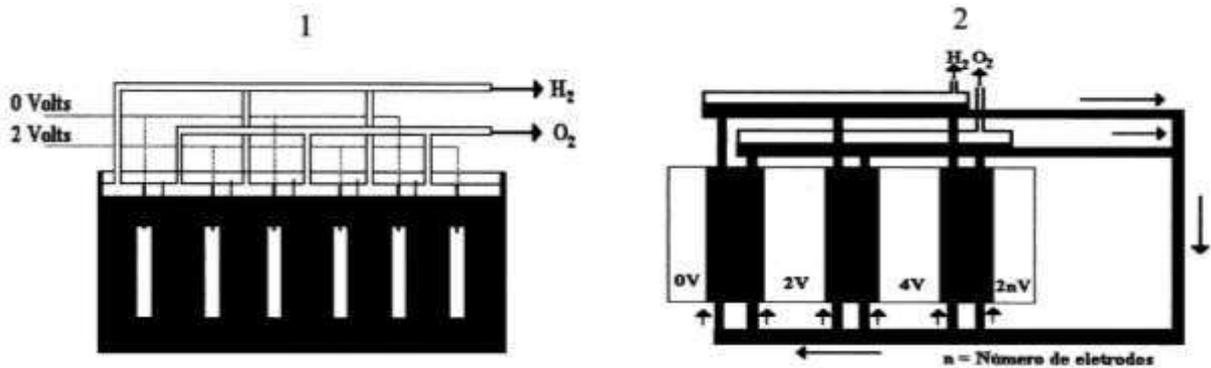


Fonte: SANTOS, 2013.

Existem basicamente dois tipos de reatores eletrolíticos; diferenciados na configuração em relação aos eletrodos: configuração unipolar e bipolar. Na configuração unipolar os eletrodos de mesma polaridade da célula eletrolítica são associados eletricamente em paralelo, fazendo com que a tensão total da célula seja a mesma de um par de células. Por outro lado, quando um reator eletrolítico é bipolar quer dizer que seus eletrodos são ligados eletricamente em série, fazendo com que a tensão total da célula seja igual ao número total de células vezes a tensão medida de uma célula.

No reator unipolar ocorre apenas uma única reação, ou seja, há evolução de hidrogênio ou oxigênio. De acordo com Sousa (2013), a maior desvantagem do reator unipolar é que cada célula requer altas amperagens e baixas tensões devido às células estarem conectadas em paralelo, o que eleva os custos do projeto. A principal vantagem dos reatores bipolares com relação aos reatores unipolares é justamente que com eles tem-se uma alta tensão ao mesmo tempo em que se tem uma amperagem baixa.

Além disso, os reatores bipolares apresentam a vantagem de menores custos com a fonte retificadora, apesar de o projeto ser mais complexo do que o do reator unipolar. Na Figura 4 é possível observar como um esquema das configurações de um reator unipolar (1) e um reator bipolar (2).

**Figura 4** – Configuração unipolar (1) e configuração bipolar (2) para um reator eletrolítico.

Fonte: PEREIRA, 2005.

Os reatores eletrolíticos convencionais utilizam a solução de hidróxido de potássio (KOH) como meio condutor iônico, eletrólito.

Os chamados reatores eletrolíticos avançados ou de última geração, são todos bipolares e utilizam eletrólito sólido, ou membrana separadora. Neles os eletrodos são de níquel esponjoso com grande atividade eletrocalítica, caracterizados basicamente por serem compactos e possuírem altas densidades de corrente com maior eficiência de conversão de energia elétrica em hidrogênio. Essas características se devem ao aumento da superfície de contato específica dos eletrodos, tornando-os porosos e rugosos; redução das perdas ôhmicas do eletrólito com a aproximação dos eletrodos; uso de catalizadores de metais nobres e ligas sobre os eletrodos para reduzir as sobretensões anódicas e catódicas e a melhora na remoção dos gases formados juntos aos eletrodos.

### 2.2.3 Eletrodos

O processo de eletrólise alcalina da água é o mais conhecido e empregado industrialmente, no entanto, apesar da alta eficiência do processo, o custo elevado da energia elétrica motiva a busca por aumentar ainda mais a eficiência, principalmente associada às sobretensões dos eletrodos (RAPELLI, 2012).

Os eletrodos merecem bastante atenção, eles devem ter superfície catalítica apropriada para a descarga dos íons hidrogênio e hidroxila; proverem uma grande área interfacial entre o catalisador e o eletrólito e apresentarem sítios adequados à nucleação de bolhas de um meio razoável para facilitar o desprendimento das bolhas de gás. Além disso, as características morfológicas e catalíticas dos eletrodos para uma dada reação são fatores importantes para a eficiência da eletrolise. Segundo Solmaz (2009), o material mais utilizado nos eletrodos em

eletrolise alcalina é o níquel fosco, também conhecido como “Níquel Watts”.

O “Níquel Watts” apresenta diversas vantagens, entre as quais o baixo custo quando comparado aos eletrodos de platina, por exemplo, que apresenta a maior atividade catalítica sendo utilizada como eletrodo. Dentre os demais materiais o níquel apresenta tendência catalítica similar à apresentada pela platina, por isso é o material com a melhor relação custo/benefício, se popularizando como eletrodo na reação de desprendimento de hidrogênio.

No passado os reatores eletrolíticos comerciais eram fabricados basicamente por quatro tipos de eletrodos: platina de elevada área superficial; dióxido de rutênio; níquel com estrutura porosa e ligas de níquel com outros metais. A adição de outros elementos químicos no banho de eletrodeposição do “Níquel Watts” altera as características da superfície do eletrodo de níquel, formando co-depósitos que modificam a morfologia e as propriedades catalíticas do eletrodo durante a eletrólise.

De acordo com Rapelli (2012) uma das estratégias para aumentar a eficiência dos eletrodos é utilizar materiais com maior área ativa, tornando sua superfície mais rugosa e por vezes, porosa. Os eletrodos porosos são fabricados por meio da eletrodeposição de filmes de ligas de níquel com zinco ou alumínio sobre substrato de aço ou cobre, seguido de imersão em solução alcalina que promove a remoção parcial do filme através da formação e dissolução de hidróxidos solúveis formando, então, os poros.

No estudo realizado por Solmaz (2007) foram aplicados eletrodos porosos, Ni-Zn depositado sobre latão. O eletrodo poroso estudado apresentou o menor sobrepotencial após 240 horas de eletrólise. Os autores atribuíram ao filme de níquel um efeito de proteção ao eletrodo, o que garantiu maior durabilidade contra a corrosão.

Rapelli (2012) também estudou eletrodos porosos de Ni-Zn, realizando a caracterização das suas propriedades eletroquímicas. Os resultados obtidos por Rapelli apontam que a reação de desprendimento de hidrogênio ocorre em um menor sobrepotencial com o eletrodo poroso de Ni-Zn, em comparação ao eletrodo de Ni. Além disso, foi constatado que o eletrodo poroso de Ni-Zn apresenta menor impedância que o eletrodo de Ni em toda a faixa de frequência analisada no estudo e que ele tem maior capacitância ou capacidade de armazenamento de carga por ter maior área superficial causada pelo filme.

A comparação realizada pela autora, entre os eletrodos, revelou que o eletrodo poroso de Ni-Zn tem maior densidade de corrente de troca e maior constante de transferência de carga, o que a fez concluir em seu trabalho que para manter uma dada produção de hidrogênio o eletrodo poroso de Ni-Zn deve apresentar menor gasto de energia que o eletrodo de Ni.

De um modo geral, o eletrodo poroso de Ni-Zn pode ser considerado um promissor

---

eletrodo para a produção de hidrogênio eletrolítico por permitir maior eficiência na produção, principalmente com a possível queda de energia consumida durante o processo de eletrólise.

### **2.3 Energias renováveis**

Energia renovável é a energia que, diferente das energias provenientes dos combustíveis fósseis, tem um ciclo curto da produção à transformação, sendo esta originada direta ou indiretamente do sol (SANTOS, 2013).

A energia eólica, ou seja, a oriunda da força dos ventos, primeiramente, é originada do calor solar que gera as correntes de convecção pelo aquecimento da terra ou das águas. As precipitações de chuvas que formam os reservatórios das usinas hidrelétricas tem origem na evaporação das águas provocadas pelo calor do Sol. Já a energia solar é considerada uma fonte inesgotável, limpa e sem impactos ambientais negativos, visto que tem o Sol como a fonte de energia e não produz nenhum tipo de poluição durante a sua utilização.

Para Santos (2013), outras fontes que requerem um tempo considerável, como a biomassa, também são classificadas como fontes de energia renovável. Esta biomassa pode ser de origem animal ou vegetal como o bagaço de cana, o cavaco de madeira, o etanol e o biodiesel, além do gás de aterros sanitários utilizados para a geração de eletricidade (GOLDEMBERG e LUCON, 2013).

O Brasil, em 2003, implantou o Proinfa, maior programa nacional para estímulo à produção de energia elétrica por meio das fontes renováveis, com base na Lei no 10.438, de abril de 2002 (ANEEL, 2008). Atualmente, o programa é gerenciado pela Eletrobrás, empresa constituída pelo Governo Federal em 1962 para investir na expansão do sistema elétrico nacional. Na primeira fase do programa, previa-se a instalação de uma capacidade total de 3,3 mil MW. Esta energia produzida pelo Proinfa tem garantia de contratação por 20 anos pela Eletrobrás.

O mercado brasileiro de energias renováveis vem financiando cada vez mais projetos para o desenvolvimento de energias limpas. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética, o governo precisará contratar 19,4 GW de potência até 2020, dado o crescimento da atividade econômica do país, com isso o objetivo é utilizar uma solução ambientalmente vantajosa para o país. Pensando nisto, o governo projeta que este acréscimo energético seja produzido apenas por fontes renováveis como hidrelétricas e outras fontes alternativas, entre

---

elas usinas eólicas, termelétricas a partir de biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (EPE, 2012).

Com o maior aproveitamento de energia renovável haverá a necessidade da criação de novas tecnologias e, também, do gerenciamento de sistemas de distribuição, transporte/transmissão e armazenamento. Além disso, de acordo com o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE, 2008), a conversão de fontes tradicionalmente mais poluentes em fontes secundárias ditas "mais limpas" também deve direcionar os esforços de P&D.

Desta forma, fica claro que energia renovável é aquela originária de fontes naturais que possuem a infinita capacidade de se renovar. É importante deixar claro que a fonte de energia renovável não é necessariamente uma fonte completamente limpa, uma vez que algumas delas podem ter grande liberação de gases de efeito estufa, oriundos da sua queima, como por exemplo, a queima de biomassa em caldeiras (bagaço de cana).

### **2.3.1 Energia eólica**

Uma das fontes da existência do vento é o resultado direto da ação da luz solar em virtude dos gradientes horizontais de energia que se interceptam. Isto ocasiona movimentos nas camadas de ar quente e frio, que se revezam, gerando um fluxo de energia cinética considerável que pode ser aproveitada através de máquinas eólicas (BEZERRA, 2001).

As primeiras máquinas eólicas tinham velas de tecido e eixo vertical, colocada de forma a estarem expostas ao vento durante parte da rotação e deixarem o vento escapar-se durante a outra parte de cada giro. Com o eixo vertical não havia necessidade de orientar a exposição das pás ou velas para as mudanças de direção do vento.

A energia eólica é uma abundante fonte de energia renovável, limpa e disponível em todos os lugares. Para Santos (2013), a geração eólica é uma excelente alternativa quando se procura uma fonte de energia renovável. Ao contrário da energia fotovoltaica, esta fonte renovável não sofre limitação de horário, pois a existência dos ventos independe de ser dia ou noite.

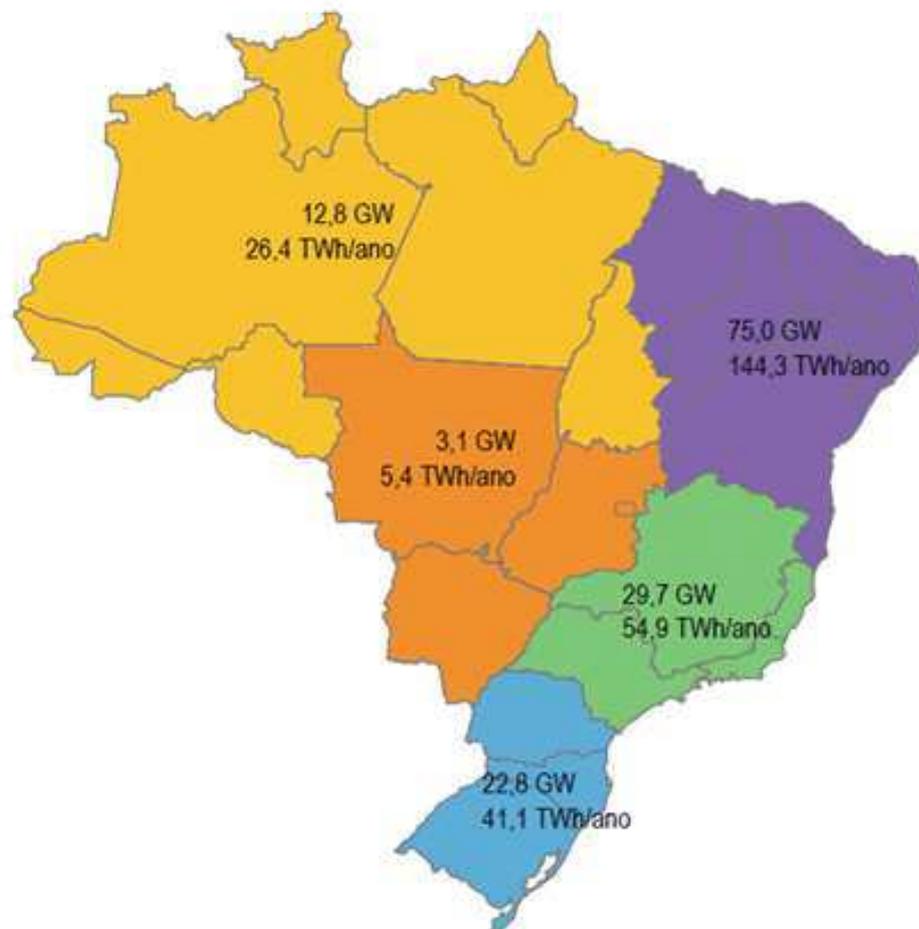
No Brasil, embora o aproveitamento dos recursos eólicos tenha sido feito tradicionalmente com a utilização de cata-ventos multipás para bombeamento de água, algumas medidas precisas de vento, realizadas recentemente em diversos pontos do território nacional, indicam a existência de um imenso potencial eólico ainda não explorado. Em comparação com a média mundial, o país apresenta ventos com o dobro da presença mundial

---

com velocidade oscilando em apenas 5%, fatores este, que dá maior previsibilidade na estimativa de produção (SANTOS, 2013). Além disso, a velocidade dos ventos brasileiros é, normalmente, maior nos períodos de estiagem, o que permite realizar a operação do parque eólico em complementariedade ao hidrelétrico (ANEEL, 2008). A utilização dessa fonte de energia possibilita a manutenção dos níveis dos reservatórios nestes períodos de estiagem e, com isso, evita o racionamento de energia.

Segundo a Aneel (2008), o Brasil tem potencial de geração de energia eólica de 143 mil MW, um volume superior à potência instalada total no país no final de 2008 – 105 mil MW. A Figura 5 mostra estimativas apresentadas no Atlas do Potencial Eólico do Brasil que foi realizado em 2001. As regiões com maior potencial medido são Nordeste, principalmente no litoral (75 GW); Sudeste, particularmente no Vale do Jequitinhonha (29,7 GW) e Sul (22,8 GW), região em que está instalado o maior parque eólico do país, o de Osório, no Rio Grande do Sul, com 150 MW de potência.

**Figura 5** – Mapa do potencial eólico do Brasil.



**Fonte:** ANEEL, 2008.

O estado do Ceará vem se destacando por este ter sido um dos primeiros locais a realizar um programa de levantamento do potencial eólico através de medidas de vento com modernos anemógrafos computadorizados. Entretanto, não foi apenas na costa do Nordeste que áreas de grande potencial eólico foram identificadas. Em Minas Gerais, por exemplo, uma central eólica está em funcionamento, desde 1994, em um local (afastado mais de 1000 km da costa) com excelentes condições de vento.

A capacidade instalada mundial da energia eólica aumentou 1.155% entre 1997 e 2007, passando de 7,5 mil para 93,8 mil MW, como registra a Associação Mundial de Energia Eólica – WWEA (ANEEL, 2008). De acordo com o Banco de Informações de Geração – BIG, da Aneel, as 17 usinas eólicas em operação em novembro de 2008 apresentavam capacidade instalada de 273 MW. Este quadro é resultado tanto da forma como esses parques se desenvolveram quanto da adesão do país à tendência de expansão das eólicas.

### **2.3.2 Conversão eólica**

No início do século XIV, em vários locais da Europa desenvolveu-se o moinho tradicional de eixo horizontal movido por cata-vento. É uma máquina mais eficiente que o eixo vertical e era principalmente usado para moer cereal. O seu uso expandiu-se até meados do século XIX, época em que o desenvolvimento da máquina a vapor se tornou uma fonte de energia mais econômica. Nas zonas rurais dos Estados Unidos verificou-se uma evolução semelhante no início do século XX. Milhares de quintais estavam equipados com cata-ventos de aço para bombear água e, em alguns casos, gerar energia elétrica. Mas nos cinquenta anos seguintes o esquema de eletrificação rural levou com que a maioria destes moinhos fosse caindo em desuso.

A geração eólica ocorre pelo contato do vento com as pás do cata-vento. Ao girar, essas pás dão origem à energia mecânica que aciona o rotor do aerogerador e, assim, produz a eletricidade. De acordo com a ANEEL (2008), um aerogerador consiste num gerador elétrico movido por uma hélice, que por sua vez é movida pela força do vento. Desta forma, a hélice pode ser vista como um motor a vento, cujo único combustível é o vento. Em sistemas eólicos a energia produzida provém de um gerador que é ligado através de um conjunto acionado a um rotor constituído de um cubo de duas ou três pás. O vento aciona o rotor por meio das pás que fazem girar o gerador e produz eletricidade.

Um sistema eólico, ou turbina eólica ou aerogerador, é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia, de forma a propiciar um maior rendimento

---

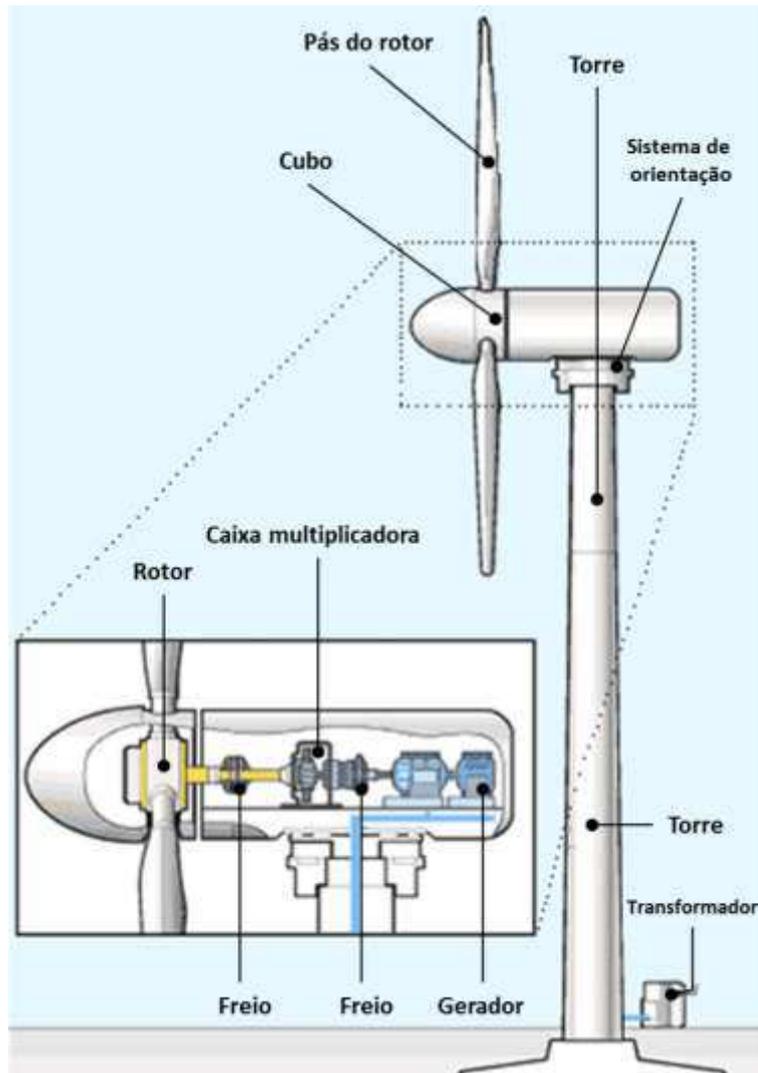
final. Para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes de um aerogerador:

- Vento: disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico;
- Rotor: responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação;
- Transmissão e caixa multiplicadora: responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até à carga. Alguns geradores não utilizam este componente, neste caso o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga;
- Gerador elétrico: responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica. Atualmente, existem várias alternativas de conjuntos moto-geradores, entre eles: geradores de corrente contínua, geradores síncronos, geradores assíncronos, geradores de comutador de corrente alternada. Cada uma delas apresenta vantagens e desvantagens que devem ser analisadas com cuidado na sua incorporação a sistemas de conversão de energia eólica;
- Mecanismo de controle: responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc.;
- Torre: as torres são necessárias para sustentar e posicionar o rotor a uma altura conveniente para o seu funcionamento. É um item estrutural de grande porte e de elevada contribuição no custo inicial do sistema. Em geral, são fabricadas de metal (treliça ou tubular) ou de concreto e podem ser ou não sustentadas por cabos tensores;
- Sistema de armazenamento: como o comportamento do vento muda ao longo do tempo, é necessária a utilização de um sistema de armazenamento de energia, que garanta o fornecimento adequado à demanda;
- Transformador: responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica;
- Acessórios: os acessórios englobam todos os itens de apoio necessários ao funcionamento do sistema eólico. Incluem-se transmissões, freios, embreagens, eixos, acoplamentos e mancais que não apresentam nenhum problema tecnológico aos sistemas eólicos.

A Figura 6 apresenta a ilustração de um aerogerador enfatizando seus principais componentes.

---

**Figura 6** – Principais componentes de uma turbina eólica de eixo horizontal.

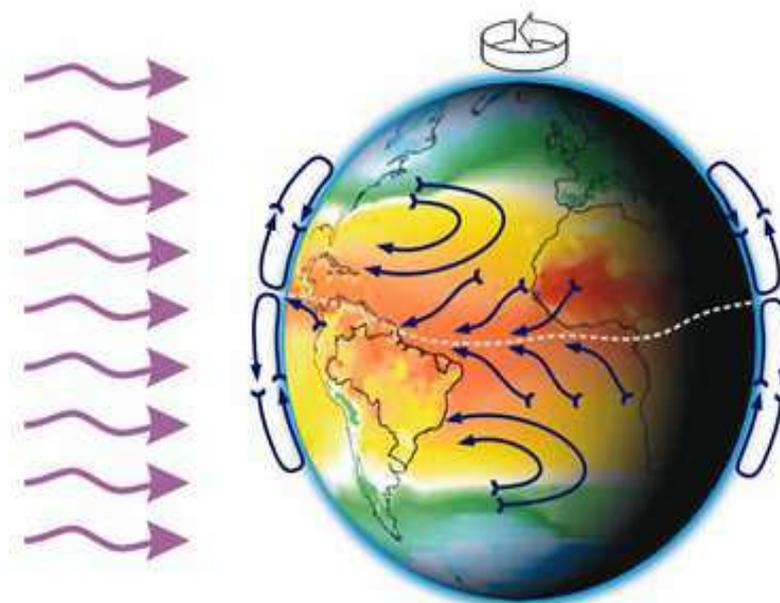


As regiões tropicais, que recebem os raios solares quase que perpendicularmente, são mais aquecidas do que as regiões polares. Conseqüentemente, o ar quente que se encontra nas baixas altitudes das regiões tropicais tende a subir, sendo substituído por uma massa de ar mais frio que se desloca das regiões polares. O deslocamento dessas massas de ar determina a formação dos ventos. Na Figura 7 é possível observar o processo de formação dos ventos no globo terrestre a partir das do deslocamento de massa de ar quente.

Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra são convertidas em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes à potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo. Os ventos que sopram em escala global e aqueles que se manifestam em pequena escala são influenciados por diferentes aspectos entre os quais se destacam a altura, a rugosidade, os

obstáculos e o relevo.

**Figura 7** – Formação dos ventos devido ao deslocamento das massas de ar.



**Fonte:** CRESESB, 2014.

As mais importantes manifestações locais dos ventos são verificadas em regiões costeiras, em vales e em montanhas. A primeira origina a formação das brisas marítimas e terrestres. A brisa marítima manifesta-se durante o dia, devido à formação de correntes de ar que sopram do mar para a terra, conseqüentes da maior capacidade da terra em absorver os raios solares e, com isso, aumentar a temperatura do ar.

Para projetar um sistema eólico é necessário um conhecimento mais detalhado possível do regime do vento no local de implantação do sistema. Esta etapa é realizada pelo tratamento estatístico dos dados medidos no local, sobre a velocidade e a direção do vento ao longo do período de medição. Outro aspecto a considerar, refere-se à variação da velocidade do vento com a altura a partir da superfície da Terra, característica esta conhecida como perfil vertical do vento.

Devido ao atrito maior próximo à superfície, os registros de velocidades de vento a alturas mais baixas, tendem a apresentar valores menores. É esperado, portanto, que a velocidade do vento cresça com o aumento da altura. Esta é uma razão pela qual, existe uma altura mínima para instalação das turbinas eólicas, de modo a garantir um nível de geração satisfatório sem submeter o rotor à fadiga excessiva, em consequência da carga variável que o perfil vertical do vento exerce sobre as pás em rotação. Mesmo para rotores de diâmetro

pequeno é usual que se tenha uma altura de pelo menos 10 metros (DIOCELINO, 1998).

Para os sistemas eólicos, a velocidade de rotação ótima do rotor varia com a velocidade do vento. Um sistema eólico tem o seu rendimento máximo a uma dada velocidade do vento chamada de velocidade de projeto ou velocidade nominal. Projetar um sistema eólico, para um determinado tamanho de rotor e para uma carga pré-fixada supõe trabalhar no intervalo ótimo de rendimento do sistema com relação à curva de potência disponível do vento local. Isto requer encontrar uma relação de multiplicação, de maneira que se tenha um bom acoplamento rotor/carga. É necessário também ter mecanismos de controle apropriados para melhorar o rendimento em outras velocidades de vento e aumentar o intervalo de funcionamento do sistema eólico.

Quando a energia eólica é utilizada como fonte primária de energia, uma forma de armazenamento se faz necessária para adaptar o perfil aleatório de produção energética ao perfil de consumo, guardando o excesso de energia durante os períodos de ventos de alta velocidade para usá-la quando o consumo não puder ser atendido por insuficiência de vento.

---

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 Materiais utilizados

O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Química do Centro de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande (UEAQ/CCT/UFCG). Para a obtenção dos resultados referentes ao estudo realizado foram utilizados os seguintes equipamentos, instrumentos e reagentes:

- Equipamentos e Instrumentos
    - Bécker (250,0 mL e 2000,0 mL);
    - Proveta de 1000,0 mL;
    - Bastão de vidro;
    - Balança analítica HR-200;
    - Reservatórios de eletrólito;
    - Retificador de corrente elétrica;
    - Fonte de alimentação que corresponde ao transformador monofásico de 220,0 V;
    - Aerogerador VERNE555 da Enersul;
    - Multímetro Digital LCD 3" NT DT-9205<sup>a</sup> (1 x 9V G6F22S);
    - Unidade de aquisição, comutação e registro de dados Data Acquisition 34970A;
    - Notebook;
    - Software Agilent Connection Expert versão 16.2.15823.0;
    - Software BenchLink Data Logger 3 versão 4.3;
    - Software Excel da Microsoft;
    - Fluxômetro Dwyer RMA-26-SSV.
  
  - Reagentes e materiais
    - Água deionizada;
-

- Hidróxido de Potássio (KOH) tipo escama, 85% de pureza, da Synth;
- Espuma porosa de Níquel da Xiamen Tob New Energy Technology Company, Ltd.

## 3.2 Procedimentos metodológicos

Os procedimentos metodológicos adotados foram divididos em duas etapas. A primeira etapa foi referente à montagem dos reatores eletrolíticos bipolares. O primeiro reator a ser montado foi composto por eletrodos de aço (niquelado), denominado como sendo o Reator Referência (RR). O segundo reator a ser montado foi composto por eletrodos porosos de níquel, denominado como Reator Modificado (RM). A segunda etapa consistiu na caracterização dos dois reatores montados. Após as caracterizações, por meio dos resultados obtidos, foi realizada uma análise comparativa do desempenho dos reatores e uma avaliação a cerca da utilização dos eletrodos porosos de níquel em um reator eletrolítico bipolar para a produção de hidrogênio.

### 3.2.1 Montagem do reator eletrolítico referência (RR)

O reator eletrolítico bipolar denominado de RR foi montado após uma revisão bibliográfica dos trabalhos realizados anteriormente e também de acordo com as adaptações necessárias para o desenvolvimento do trabalho proposto.

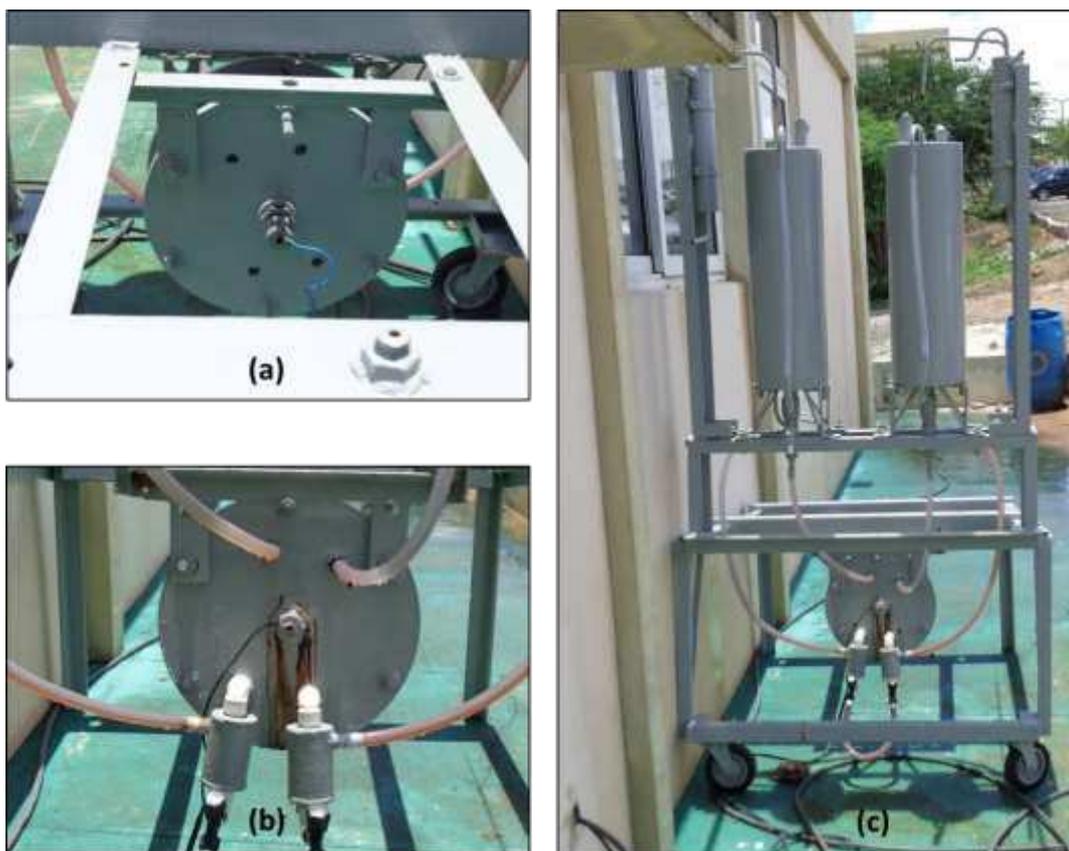
O RR foi composto por 10,0 células ligadas em série e com extremidades constituídas por 2,0 cabeçotes de 300,0 mm de diâmetro, cada, fixadas por 6,0 parafusos. Os dois cabeçotes possuem um orifício central para a instalação dos terminais positivo e negativo. No cabeçote posicionado na parte frontal também existem mais quatro orifícios, dois na parte inferior para a entrada do eletrólito e mais dois na superior para a saída dos gases gerados mais o eletrólito arrastado. Entre os cabeçotes estão às células, eletrodos feitos com placas de aço (1020 niqueladas) de 1,0 mm de espessura e 200,0 mm de diâmetro, sendo separados por anéis de PVC de 2,0 mm de espessura com 260,0 mm de diâmetro.

Para construir os eletrodos foi necessário realizar o corte das placas niqueladas no formato de circunferências com uma área de 314 cm<sup>2</sup> cada. Este corte foi realizado na Indústria Laboremus localizada na cidade de Campina Grande – PB. Após o corte todas as placas passaram por um processo de limpeza e retirada das rebarbas.

---

Um suporte de bancada foi construído para acoplar o RR. No suporte também foi acoplado os reservatórios do eletrólito. Os coletores foram adaptados junto ao cabeçote de saída dos gases. Nos polos foram utilizadas escovas de carvão para melhorar a condução de baixas correntes. Na Figura 8 observa-se o RR montado e acoplado no suporte de bancada.

**Figura 8** – RR montado (a e b) e Suporte de bancada construído (c).



Como eletrólito foi utilizado solução de hidróxido de potássio, KOH. O eletrólito foi transportado do reservatório até o reator eletrolítico por gravidade para ocorrer à eletrólise, produzindo os gases  $H_2$  e  $O_2$ . Após a reação acontecer, os gases foram transportados para o reservatório eletrolítico deixando traços do eletrólito até saírem pela parte superior do reservatório, passarem pelo fluxômetro e serem liberado na atmosfera. A fim de evitar perdas no circuito o RR foi inclinado em  $10^\circ$  em relação a horizontal para permitir a alimentação adequada do eletrólito e a saída direcionada e separada das bolhas de  $H_2$  e  $O_2$  em cada fase do eletrodo bipolar (fase anódica e fase catódica).

### 3.2.2 Montagem do reator eletrolítico modificado (RM)

Outro reator eletrolítico bipolar foi montado com eletrodos porosos de níquel. Devido esta diferença com relação ao RR ele foi denominado como RM.

O RM teve as demais características de montagem idênticas a do RR. Dez células ligadas em série e com extremidades constituídas por 2,0 cabeçotes. Entre os cabeçotes foram colocados os eletrodos porosos de níquel construídos com placas de aço (1020 niqueladas) também com 1,0 mm de espessura, 200 mm de diâmetro e 314 cm<sup>2</sup> de área. Os eletrodos foram separados por anéis de PVC de 2,0 mm de espessura com 260 mm de diâmetro da mesma forma que no RR. Em cada placa utilizada para construir o eletrodo poroso de níquel foram soldados eletricamente, em cada lado, 132,25 cm<sup>2</sup> de esponja porosa de níquel de forma centralizada.

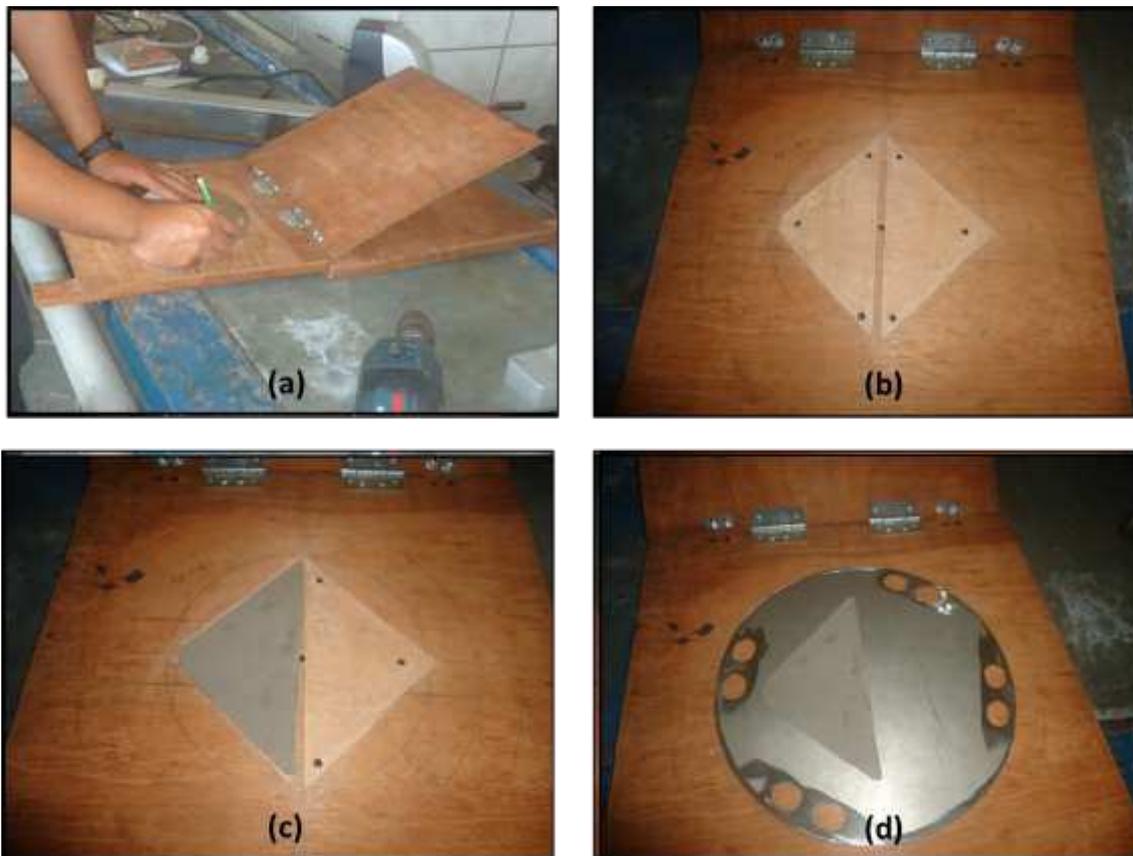
Para adaptar as esponjas porosas de níquel nas placas niqueladas, primeiramente, a esponja foi cortada de acordo com o dimensionamento das placas, de modo a ocupar a maior área possível. Na Figura 9 observa-se o processo de corte da esponja porosa de níquel.

**Figura 9** – Corte das esponjas porosas de níquel (a) e esponjas porosas de níquel cortadas (b).



Como a solda elétrica tinha que acontecer nas duas faces da placa de forma simultânea e a quantidade de pontos de solda deveriam ser o suficiente para prender efetivamente a esponja, foi projetado e construído um molde em madeira composto por três plataformas para encaixar e prender o conjunto formado pela placa e a esponja porosa de níquel. Na Figura 10 é apresentado o molde utilizado para realizar a soldagem da esponja porosa de níquel nas placas niqueladas.

**Figura 10** – Molde construído (a e b) e conjunto esponja porosa de níquel e placa niquelada no molde (c e d).



A solda elétrica também foi realizada na Indústria Laboremus. Na Figura 11 observam-se os eletrodos porosos de níquel construídos neste trabalho.

**Figura 11** – Eletrodos porosos de níquel construídos neste trabalho.



Logo após a montagem dos eletrodos o RM foi finalizado e em seguida acoplado no suporte de bancada. Ele também foi inclinado em 10° em relação a horizontal da mesma forma que o RR e foram utilizados polos iguais e solução de KOH como eletrólito.

### **3.2.3 Caracterização dos reatores eletrolíticos referência (RR) e modificado (RM)**

Os Reatores Eletrolíticos Referência e Modificado foram caracterizados por meio da variação da tensão aplicada; da corrente; da potência; da concentração do eletrólito; da energia consumida por metro cúbico de H<sub>2</sub> produzido; do fluxo de H<sub>2</sub> produzido por área eletrolítica e das eficiências farádica e térmica. A caracterização aconteceu em duas etapas onde cada reator foi submetido à mesma metodologia empregada.

Na primeira etapa foi utilizada energia convencional. O eletrólito utilizado foi solução de hidróxido de potássio, KOH, com dois valores de concentração. O primeiro valor da concentração de KOH utilizado foi de 20% em massa e o segundo de 25% em massa. Foram feitos testes com cada concentração utilizando variações de tensão (0,0 a 40,0 V) por meio de uma fonte de alimentação com saída variável de tensão.

Aplicando-se as tensões ao reator eletrolítico foram coletados valores instantâneos da tensão aplicada pela fonte e da corrente dissipada no reator por meio da utilização de uma resistência elétrica. Esses valores foram coletados por meio de uma unidade de aquisição, comutação e registro de dados Data Acquisition 34970A interligado a um notebook.

Com a coleta destes dados foi possível encontrar o desempenho elétrico dos reatores por meio do comportamento gráfico da corrente elétrica com a tensão aplicada; a potência fornecida e a densidade de corrente, importantes para caracterizar o comportamento da eletrólise por meio da apresentação gráfica da curva de polarização.

A determinação da eficiência dos reatores eletrolíticos também fez parte da caracterização realizada. Para isso foram encontradas a eficiência farádica, a eficiência térmica e a quantidade de energia utilizada para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de hidrogênio eletrolítico a partir das medidas de vazão de hidrogênio produzido. A vazão do hidrogênio produzido foi medida com por meio da utilização de um fluxômetro Dwyer RMA-26-SSV.

Na segunda etapa os Reatores Eletrolíticos Referência e Modificado foram caracterizados utilizando energia renovável. A energia utilizada foi a eólica oriunda de um aerogerador VERNE555 da Enersul instalado nas dependências do Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Unidade Acadêmica de Engenharia Química pertencente ao

---

Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande. O aerogerador utilizado possui um alto rendimento aerodinâmico e alcança até 6,0 KW de potência quando atinge velocidade igual a 12,0 m/s. Pesando apenas 190,0 Kg e com 5,55 m de diâmetro, o VERNE555 foi projetado para captar energia a baixíssimas velocidades de vento, a partir de 2,2 m/s. Na Figura 12 observa-se o aerogerador VERNE555 que foi utilizado.

**Figura 12** – Aerogerador VERNE555 instalado nas dependências do LABDES.



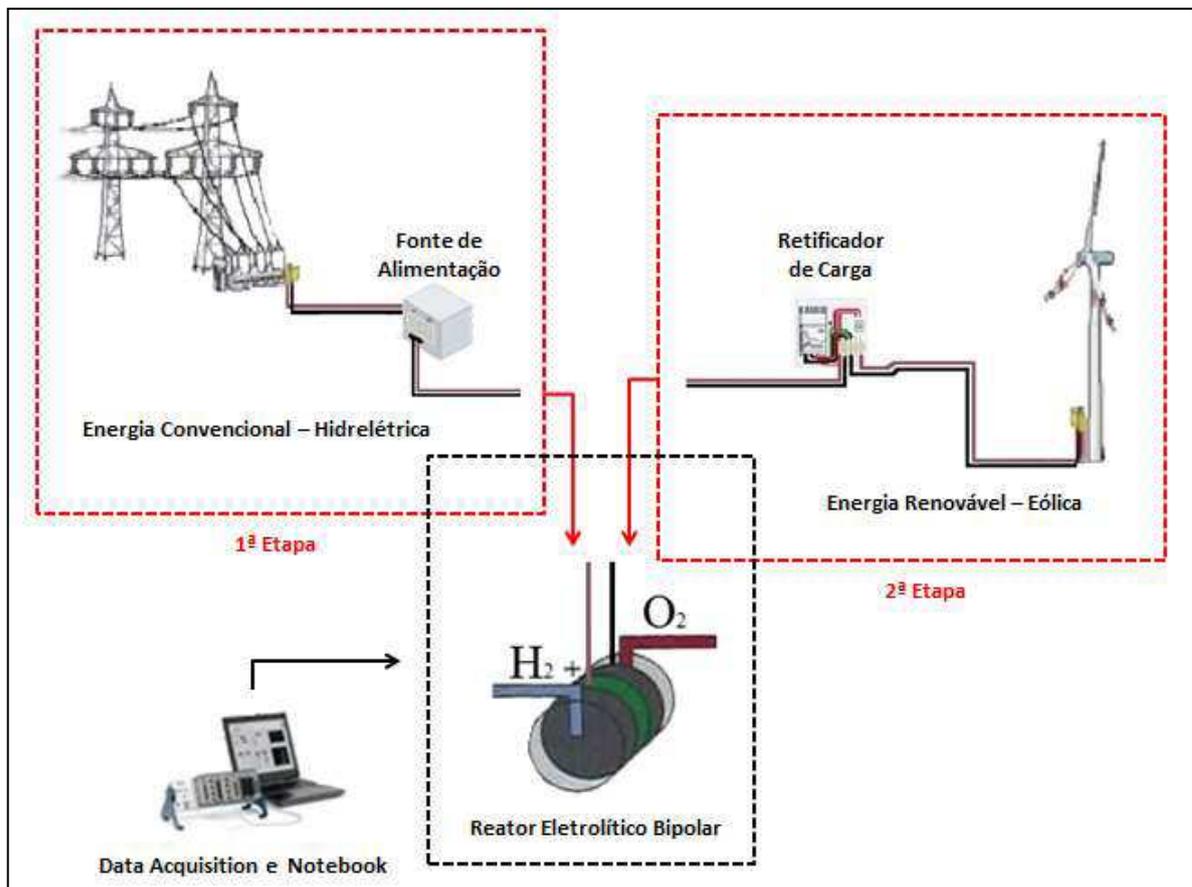
Os mesmos resultados encontrados na primeira etapa para caracterizar os reatores eletrolíticos também foram encontrados na segunda etapa:

---

- A tensão e a corrente elétrica dissipada nos reatores;
- A potência e a densidade de corrente;
- A curva de polarização;
- A eficiência dos reatores (eficiências farádica e térmica e quantidade de energia necessária para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de hidrogênio eletrolítico).

A Figura 13 apresenta o esquema alusivo à metodologia utilizada para caracterizar os Reatores Eletrolíticos Referência e Modificado.

**Figura 13** – Representação esquemática da metodologia utilizada na caracterização dos reatores.



Os resultados obtidos nas caracterizações dos reatores eletrolíticos foram armazenados e usados no software Excel da Microsoft, gerando um conjunto de dados e gráficos que permitiram realizar uma análise comparativa entre os Reatores Referência e Modificado de modo a obter conclusões a cerca da utilização dos eletrodos porosos de níquel e da energia eólica no processo de produção de hidrogênio eletrolítico. Os resultados, as discussões e conclusões obtidas neste trabalho estão apresentados nos próximos capítulos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados neste capítulo foram avaliados e discutidos quanto ao comportamento da corrente, potência, densidade de corrente e eficiência dois reatores eletrolíticos montados da concentração do eletrólito e da tensão aplicada. Com isso, a influência da utilização de eletrodos porosos de níquel no reator eletrolítico bipolar também foi analisada por meio da comparação direta com os resultados obtidos com os Reatores Eletrolíticos Referência e Modificado.

### 4.1 Caracterização do reator eletrolítico referência (RR)

#### 4.1.1 RR utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e energias convencional e eólica

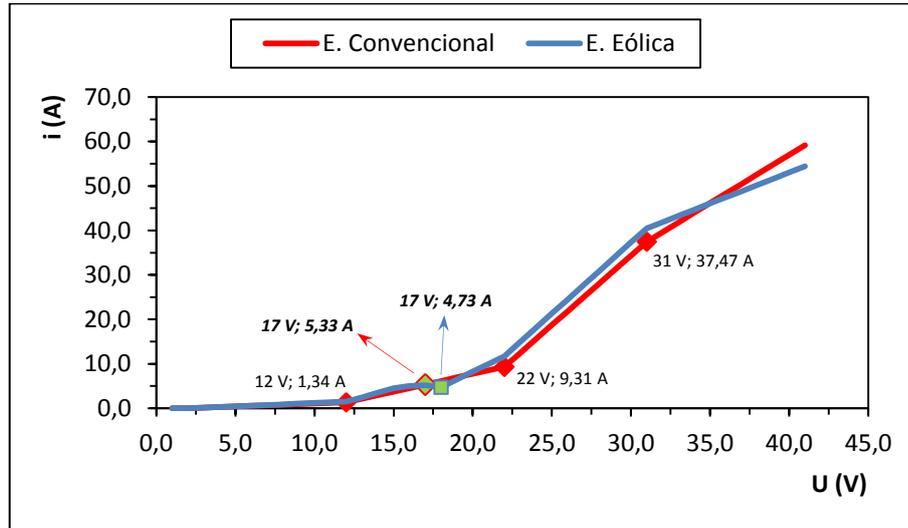
Após a montagem do RR e a sua instalação no suporte de bancada, foram aplicadas tensões variáveis. Os primeiros dados foram obtidos utilizando como eletrólito a solução de KOH a 20% em massa ( $C = 236,61 \text{ g/L}$ ) e as energias convencional e eólica. Com isso foram encontrados os comportamentos da corrente em função da tensão aplicada no reator. A Figura 15 apresenta o comportamento da corrente em função da tensão aplicada no RR utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica.

Na Figura 14 é constatado que os comportamentos da corrente em função da tensão aplicada utilizando energia convencional e energia eólica é praticamente o mesmo como já esperado. Como o aerogerador depende da velocidade do vento, a energia fornecida sofre algumas variações que provocam alterações no comportamento da corrente. Desta forma o comportamento da corrente em função da tensão oriunda da energia convencional apresenta maior fidelidade para realizar observações a cerca do processo. Por esse motivo, foram considerados os comportamentos obtidos com a utilização da energia convencional para realizar as caracterizações dos reatores.

De acordo com a Figura 14, é a partir de 12,0 V que a corrente começa a ter um aumento considerável à medida que o valor da tensão aplicada aumenta até atingir 9,31 A para uma tensão de 22,0 V.

---

**Figura 14** – Comportamento da corrente ( $i$ ) em função da tensão ( $U$ ) no RR com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.

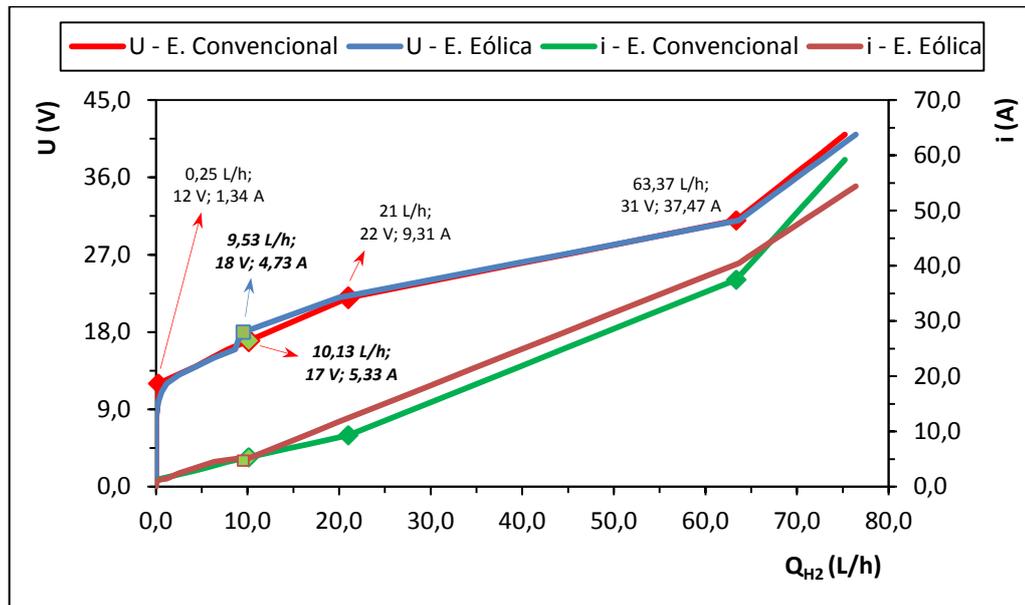


Entre (22,0 e 31,0) V a corrente sofreu um aumento mais acentuado até atingir 37,47 A. Após 31,0 V a corrente dissipada no RR continuou aumentando com o aumento da tensão, porém em proporção menor. Os valores da intensidade da corrente obtidos com o RR utilizando [KOH] a 20% e energia convencional variaram de (0,0 – 59,0) A.

O comportamento da tensão e da corrente aplicada no RR em função da vazão de hidrogênio produzido (utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e as diferentes fontes de energia) também foi analisado com o auxílio da Figura 15. Até atingir a tensão de 12,0 V a vazão de  $H_2$  produzido foi praticamente zero. Ela passou a ocorrer de forma significativa justamente quando a tensão aplicada foi suficiente para dissipar corrente no RR, ou seja, 1,2 V por célula do RR. De 12,0 a 22,0 V a corrente aumentou de forma linear com o aumento da tensão aplicada e a vazão de  $H_2$  seguiu o mesmo comportamento da corrente até atingir um valor 21,0 L/h para uma corrente de 9,31 A.

A partir de 22,0 V e até 31,0 V, quando a corrente passa a aumentar mais acentuadamente que a tensão aplicada no RR, a vazão aumenta em proporção menor, ou seja, é preciso aumentar mais o valor da corrente para aumentar a vazão de  $H_2$ . Depois de 31,0 V a corrente voltou a aumentar mais acentuadamente com o aumento da tensão aplicada no RR. Os valores da vazão de  $H_2$  produzido com o RR utilizando [KOH] a 20% e energia convencional variaram de (0,0 – 75,23) L/h.

**Figura 15** – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de  $H_2$  ( $Q_{H_2}$ ) produzido no RR com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.

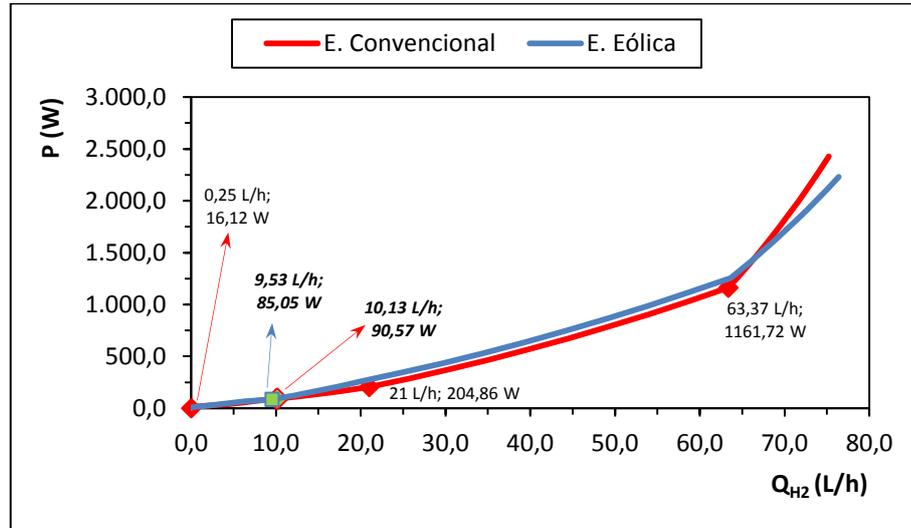


Diante dessas observações é possível dizer que o processo de produção de hidrogênio no RR, utilizando solução de KOH a 20% como eletrólito, ocorreu com maior eficiência aplicando-se uma tensão compreendida entre (12,0 e 22,0) V; o que leva a uma produção de hidrogênio de até 21,0 L/h. Pois o fato da vazão de  $H_2$  aumentar com o aumento da corrente não indica que o processo seja em sua totalidade eficiente, uma vez que a quantidade de energia consumida também aumenta porque também será produzido calor de acordo com as Curvas de voltagem em função da temperatura para a eletrólise da água (Figura 2).

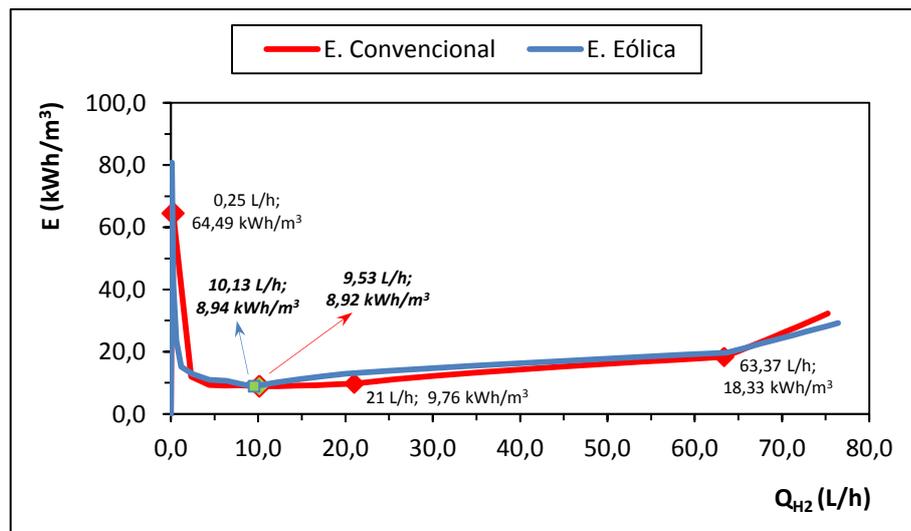
A Figura 16 apresenta o comportamento da potência do RR em função da vazão de  $H_2$  produzido utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica. Considerando uma tensão de (12,0 a 22,0) V para que o processo tenha uma eficiência considerável, pode-se dizer que a potência máxima do RR com [KOH] a 20% está compreendida entre (16,12 e 204,86) W conforme é observado na Figura 16. Sabendo-se disso foi encontrada a eficiência do RR por meio da quantidade de energia necessária para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de hidrogênio e das eficiências farádica e térmica (Equações 15 e 16 respectivamente).

Na Figura 17 está representada a quantidade de energia em função da vazão de hidrogênio produzido no RR com solução de KOH a 20% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica.

**Figura 16** – Comportamento da potência (P) em função da vazão de  $H_2$  ( $Q_{H_2}$ ) produzido no RR com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.



**Figura 17** – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir  $1,0 m^3$  de  $H_2$  em função da vazão de  $H_2$  ( $Q_{H_2}$ ) produzido no RR com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.



De acordo com a Figura 17 foram necessários, no mínimo, 8,94 kWh para produzir  $1,0 m^3$  de  $H_2$  com o RR utilizando solução de KOH a 20% e energia convencional. Esse valor foi correspondente à aplicação de 17,0 V (1,7 V por célula) para que a intensidade de corrente dissipada no RR fosse 5,33 A resultando uma potência de 90,57 W capaz de produzir 10,13 L/h de  $H_2$  conforme é observado nas Figuras 14, 15, 16 e 17. Para esta situação as eficiências farádica e térmica do RR com solução de KOH a 20%, como eletrólito, foram 72,35% e 87,06%, respectivamente.

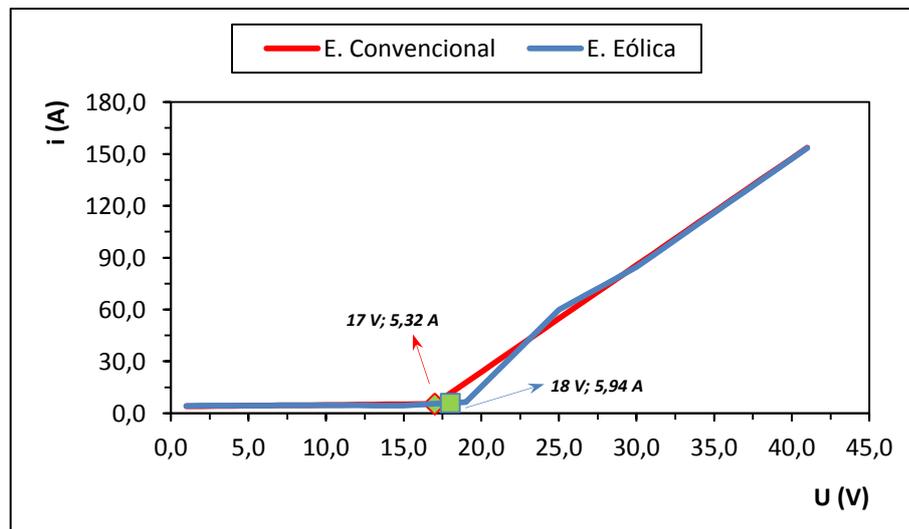
Resultados semelhantes foram obtidos quando foi utilizada a energia eólica para fornecer tensão ao RR com [KOH] a 20%. Neste caso foram necessários, no mínimo, 8,92 kWh para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  quando o aerogerador forneceu 18,0 V (1,8 V por célula). A corrente dissipada foi 4,73 A, logo a potência foi 85,05 W; uma potencia capaz de produzir 9,53 L/h de  $\text{H}_2$ . Estes resultados também podem ser observados nas Figuras 14, 15, 16 e 17. As eficiências farádica e térmica do RR utilizando solução de KOH a 20% para uma tensão de 18,0 V foram 68,33% e 82,22%, respectivamente.

#### 4.1.2 RR utilizando [KOH] a 25% como eletrólito e energias convencional e eólica

Ao utilizar a solução de KOH a 25% em massa ( $C = 295,77 \text{ g/L}$ ) como eletrólito no RR foram observados comportamentos diferentes para a corrente, em função da tensão aplicada, quando comparados como os obtidos quando foi utilizada solução de KOH a 20% como eletrólito.

Na Figura 18 estão apresentados os comportamentos da corrente em função da tensão aplicada no RR utilizando [KOH] a 25% como eletrólito e as energias convencional e eólica.

**Figura 18** – Comportamento da corrente ( $i$ ) em função da tensão ( $U$ ) no RR com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.

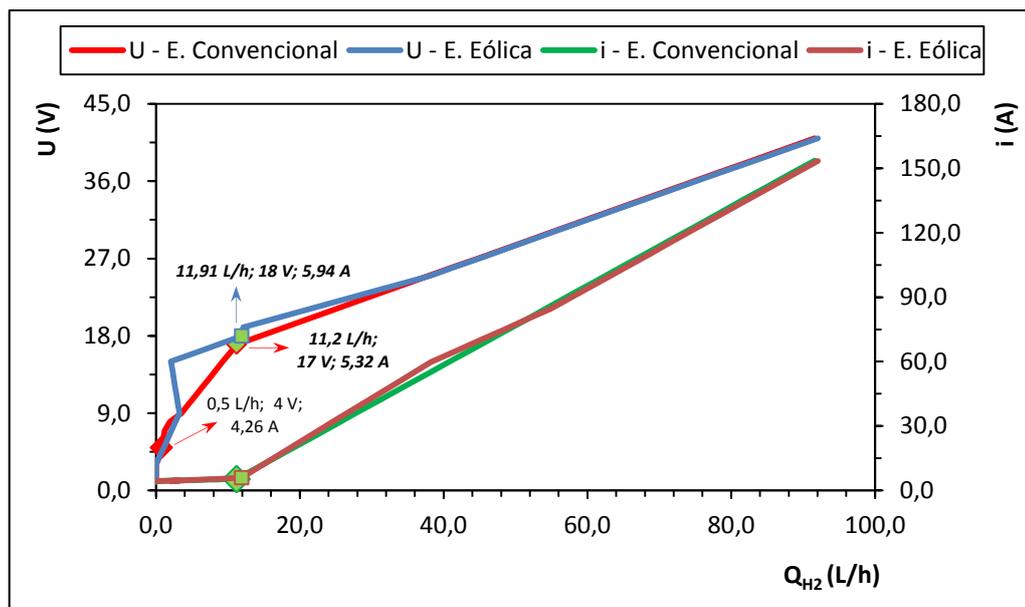


Os comportamentos da corrente em função da tensão aplicada quando se utiliza energia convencional e eólica são semelhantes apesar da instabilidade da energia fornecida pelo aerogerador. Sendo assim, foram mais enfatizadas as observações do comportamento gerado com o emprego da energia convencional por ele ser mais estável.

Na Figura 18 pode-se constatar que a variação da corrente foi muito pequena à medida que o valor da tensão aplicada no reator aumentou até atingir 17,0 V, momento que foi igual a 5,32 A. Depois de 17,0 V a corrente passou a aumentar de forma acentuada e linear conforme a tensão aplicada aumentou. Os valores da corrente obtidos com o RR utilizando [KOH] a 25% e energia convencional variaram de (4,0 – 153,0) A.

O comportamento da tensão e da corrente aplicada em função da vazão de hidrogênio produzido no RR utilizando [KOH] a 25% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica também foram analisados. A Figura 19 apresenta este comportamento. Nela observa-se que até atingir a tensão de 4,0 V (4,26 A) a vazão de H<sub>2</sub> foi igual à zero. Após 4,0 V a vazão de H<sub>2</sub> aumentou consideravelmente até 17,0 V, apesar da corrente não ter se comportado da mesma forma que a variação da tensão aplicada no reator.

**Figura 19** – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H<sub>2</sub> (Q<sub>H2</sub>) produzido no RR com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.

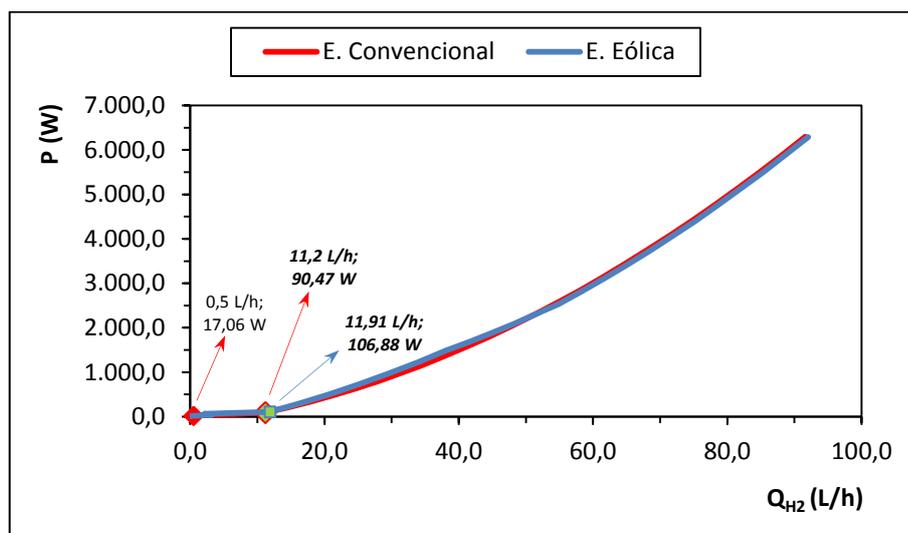


A partir desta tensão a corrente passou a ter desempenho cada vez mais semelhante ao da tensão, logo a vazão passou a aumentar também praticamente na mesma proporção que a tensão aplicada no reator. Como citado anteriormente, este culmina em um maior gasto de energia para valores maiores de vazão de H<sub>2</sub> porque parte da energia que era apenas para produzi-lo passou a produzir calor. Os valores da vazão de H<sub>2</sub> produzido com o RR utilizando [KOH] a 25% e energia convencional variaram de (0,0 – 91,6) L/h.

A partir dessas observações é possível dizer que o processo de produção de hidrogênio no RR, utilizando [KOH] a 25% como eletrólito, ocorre com maior eficiência aplicando-se

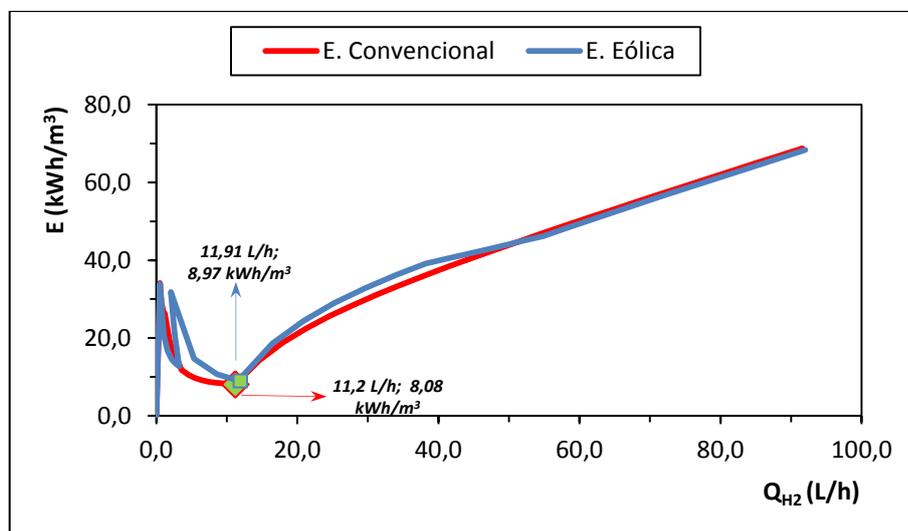
uma tensão de (4,0 a 17,0) V; o que leva a uma produção de  $H_2$  de até 11,2 L/h. Considerando estas observações e analisando a Figura 20 que apresenta o comportamento da potência do RR em função da vazão de  $H_2$ , pode-se dizer que a potência máxima do RR, utilizando solução de KOH a 25% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica está compreendida entre (17,06 – 90,47) W.

**Figura 20** – Comportamento da potência (P) em função da vazão de  $H_2$  ( $Q_{H_2}$ ) produzido no RR com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.



Na Figura 21 observa-se o comportamento da quantidade de energia necessária para produzir  $1,0\text{ m}^3$  de  $H_2$  em função da vazão de  $H_2$  produzido no RR com [KOH] a 25% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica.

**Figura 21** – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir  $1,0\text{ m}^3$  de  $H_2$  em função da vazão de  $H_2$  ( $Q_{H_2}$ ) produzido no RR com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.



A partir destas observações foi encontrada a eficiência do RR utilizando [KOH] a 25% por meio da quantidade de energia necessária para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de hidrogênio e das eficiências farádica e térmica. De acordo com a Figura 22 foram necessários, no mínimo, 8,08 kWh para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  com o RR utilizando solução de KOH a 25% como eletrólito. Esse valor é correspondeu à aplicação de 17,0 V (1,7 V por célula) para que uma corrente igual a 5,32 A e, conseqüentemente, uma potência de 90,47 W capaz de produzir 11,2 L/h de  $\text{H}_2$  conforme pode ser observado nas Figuras 18, 19, 20 e 21.

As eficiências farádica e térmica do RR utilizando solução de KOH a 25% foram 72,35% e 87,06%, respectivamente.

Os resultados obtidos quando foi utilizada a energia eólica para fornecer tensão ao RR com [KOH] a 25% são semelhantes. Neste caso foram necessários, no mínimo, 8,97 kWh para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  quando o aerogerador forneceu uma tensão igual a 18,0 V (1,8 V por célula) para uma corrente de 5,94 A e uma potência de 106,88 W capaz de produzir 11,91 L/h de  $\text{H}_2$ . Estes resultados também podem ser observados nas Figuras 18, 19, 20 e 21. As eficiências farádica e térmica do RR, utilizando solução de KOH a 20%, para uma tensão de 18,0 V foram 68,33% e 82,22%, respectivamente.

## **4.2 Caracterização do reator eletrolítico modificado (RM)**

### ***4.2.1 RM utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e energias convencional e eólica***

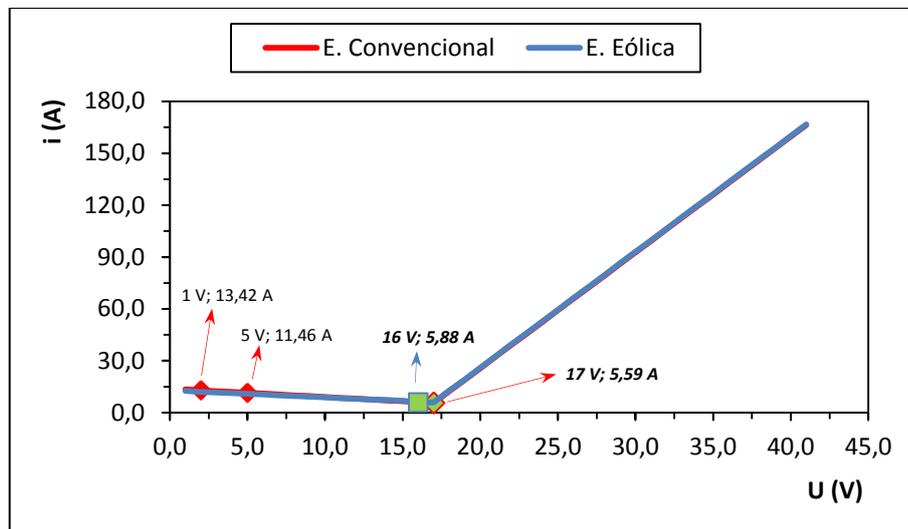
Com os eletrodos porosos de níquel confeccionados o RM foi montado e em seguida acoplado no suporte de bancada. No primeiro momento foram aplicadas tensões variáveis no RM utilizando solução de KOH a 20% em massa ( $C = 236,61 \text{ g/L}$ ) como eletrolítico e as diferentes fontes de energia. Com isso foram obtidos os comportamentos da corrente em função da tensão aplicada no RM apresentados na Figura 23. Os comportamentos para as diferentes fontes de energia são praticamente iguais como o esperado.

De acordo com a Figura 22, ao aplicar uma tensão de 1,0 V no RM a corrente dissipada foi 13,45 A. À medida que a tensão aplicada foi aumentando o comportamento da corrente foi o inverso; a corrente passou a diminuir até que a tensão aplicada fosse 17,0 V e sua intensidade 5,59 A. Após 17,0 V a corrente no RM passou a aumentar linearmente de

---

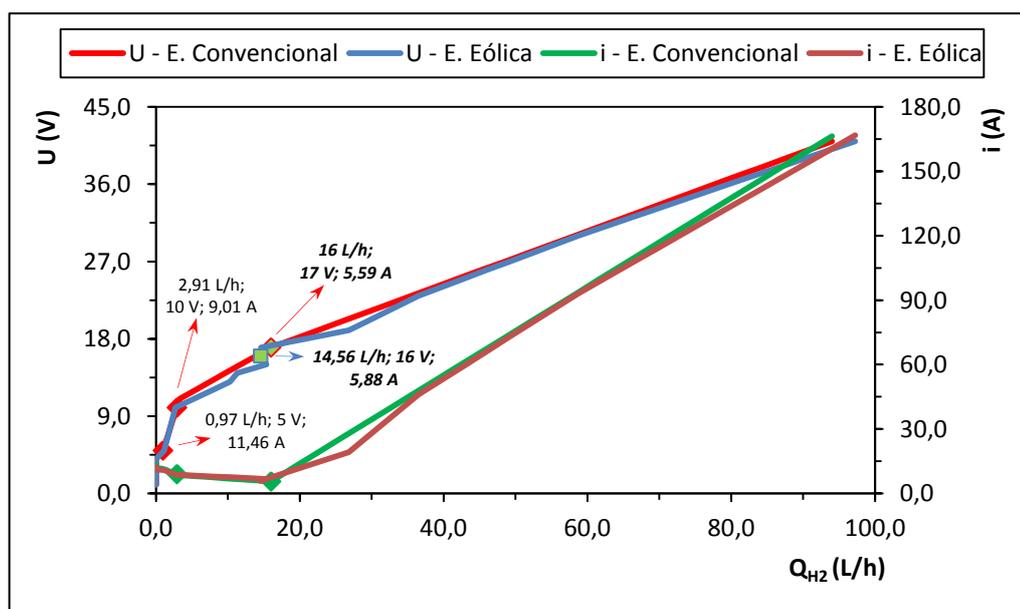
forma expressiva com o aumento da tensão. Os valores da corrente obtidos com o RM utilizando [KOH] a 20% e energia convencional variaram de (0,0 – 166,0) A.

**Figura 22** – Comportamento da corrente ( $i$ ) em função da tensão ( $U$ ) no RM com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.



O comportamento da tensão e da corrente aplicada no RM em função da vazão de hidrogênio produzido (utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e as diferentes fontes de energia) também foi analisado por meio da Figura 23.

**Figura 23** – Comportamento da tensão ( $U$ ) e da corrente ( $i$ ) em função da vazão de  $H_2$  ( $Q_{H_2}$ ) produzido no RM com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.



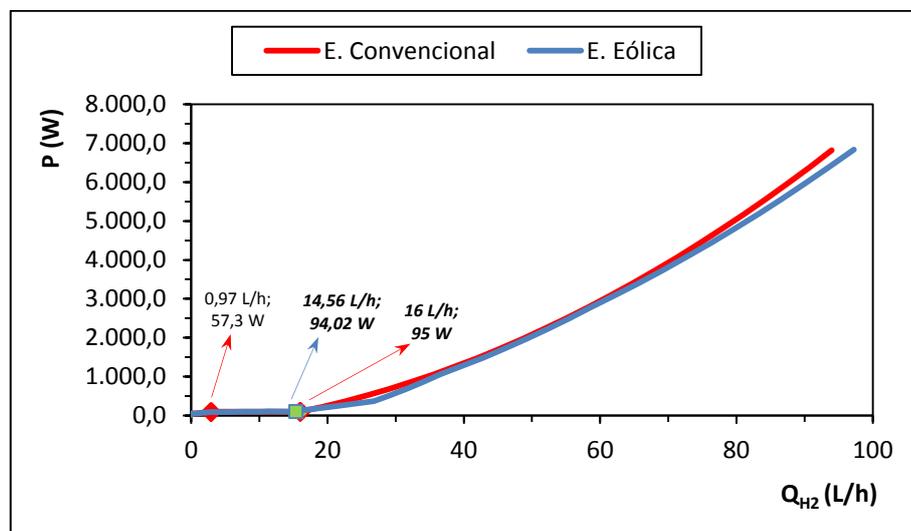
Até atingir a tensão de 5,0 V a vazão de  $H_2$  foi zero. Após 5,0 V ela passa a ocorrer de forma significativa mesmo com a intensidade de corrente diminuído à medida que o valor da tensão aplicada ao sistema foi aumentando. A partir de 10,0 a corrente passou a diminuir de forma menos acentuada com o aumento da tensão aplicada e a vazão de  $H_2$  continuou aumentando na proporção da corrente até atingir o valor de 16,0 L/h para uma corrente de 5,59 A quando a tensão foi 17,0 V.

Após 17,0 V quando a corrente no RM passou a aumentar linearmente de forma expressiva e cada vez mais semelhante ao do aumento da tensão, foi observado que a vazão de  $H_2$  passou a aumentar em uma proporção menor conforme os valores da corrente foram crescendo, ou seja, mais uma vez foi preciso intensidades de corrente maiores para aumentar a vazão. Os valores da vazão de  $H_2$  produzido com o RM utilizando [KOH] a 20% e energia convencional variaram de (0,0 – 97,0) L/h.

Diante dessas observações é possível dizer que o processo de produção de hidrogênio no RM, utilizando solução de KOH a 20% como eletrólito, ocorre com maior eficiência aplicando-se uma tensão de (5,0 a 17,0) V. Essa faixa de tensão leva a uma produção de hidrogênio de até 16,0 L/h, pois mesmo a vazão aumentando com a corrente não se pode dizer que temos um processo eficiente em sua totalidade porque a quantidade de energia consumida também aumenta.

A Figura 24 apresenta o comportamento da potência do RM em função da vazão de  $H_2$  produzido utilizando [KOH] a 20% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica.

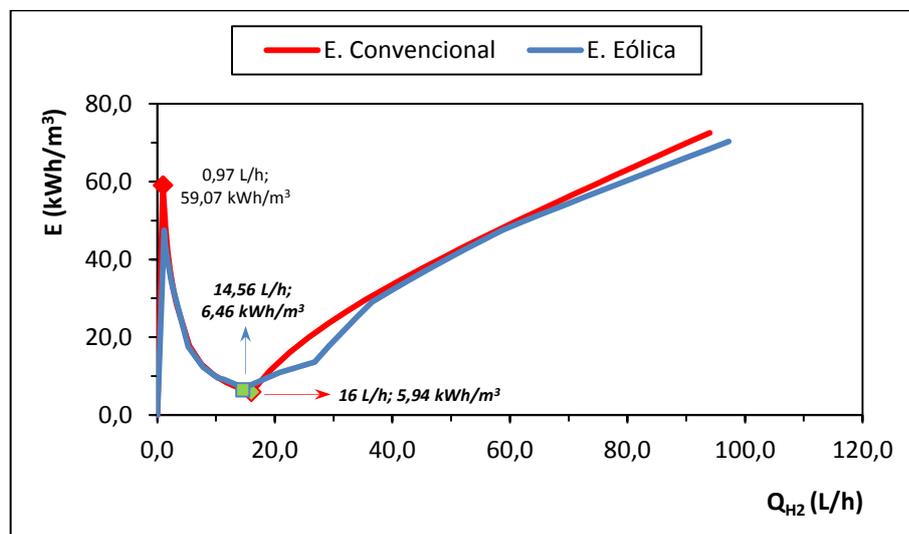
**Figura 24** – Comportamento da potência (P) em função da vazão de  $H_2$  ( $Q_{H_2}$ ) produzido no RM com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.



Considerando uma tensão de (5,0 a 17,0) V para que o processo tenha uma eficiência considerável, pode-se dizer que a potência máxima do RM tá compreendida entre (57,3 – 95,0) W conforme é observado na Figura 25. Sabendo-se disso foi encontrada a eficiência do RM.

Na Figura 25 é possível observar o comportamento da quantidade de energia necessária para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  em função da vazão no RM com [KOH] a 20% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica.

**Figura 25** – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  em função da vazão de  $\text{H}_2$  ( $Q_{\text{H}_2}$ ) produzido no RM com [KOH] a 20% e fontes de energia diferentes.



De acordo com a Figura 25, foram necessários, no mínimo, 5,94 kWh para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  com o RM utilizando solução de KOH a 20% e energia convencional. Esse valor correspondeu à tensão de 17,0 V (1,7 V por célula) e uma corrente de 5,59 A resultando em uma potência de 95,0 W capaz de produzir 16,0 L/h de  $\text{H}_2$  conforme é observado nas Figuras 22, 23, 24 e 25. As eficiências farádica e térmica do RM com solução de KOH a 20% como eletrólito foram 72,35% e 87,06%, respectivamente.

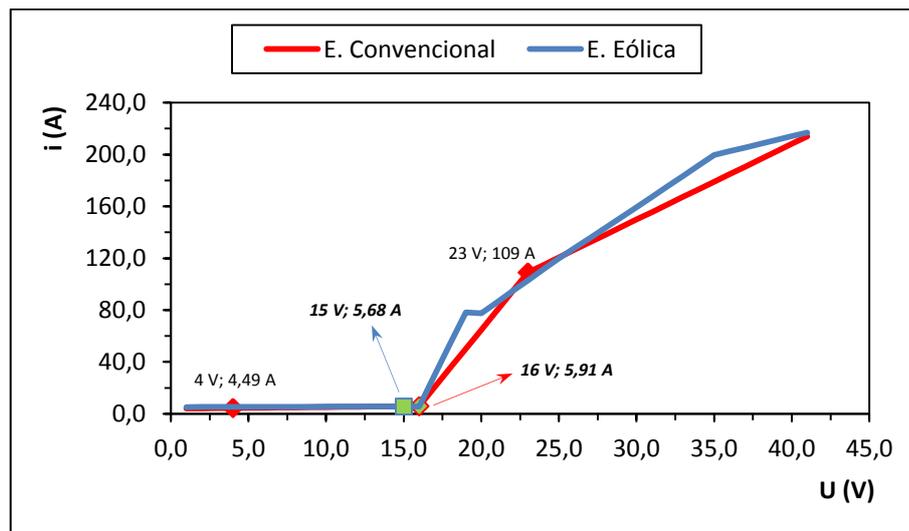
Ao utilizar a energia eólica para fornecer tensão ao RM com [KOH] a 20% os resultados obtidos foram semelhantes. Foi necessário, no mínimo, 6,46 kWh para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  para uma tensão de 16,0 V (1,6 V por célula) e uma corrente de 5,88 A que resultou em uma potência de 12,28 W capaz de produzir 14,56 L/h de  $\text{H}_2$ . Estes resultados também podem ser observados nas Figuras 22, 23, 24 e 25. As eficiências farádica e térmica do RR utilizando solução de KOH a 20% para uma tensão de 19,0 V foram 76,88% e 92,50%, respectivamente.

#### 4.2.2 RM utilizando [KOH] a 25% como eletrólito e energias convencional e eólica

Foram observados comportamentos semelhantes para a corrente em função da tensão aplicada quando comparados com os obtidos quando foi utilizada solução de KOH a 20% em massa como eletrólito.

Na Figura 26 estão apresentados os comportamentos da corrente em função da tensão aplicada no RR utilizando solução de KOH a 25% ( $C = 295,77 \text{ g/L}$ ) como eletrólito e as energias convencional e eólica. Os comportamentos da corrente em função da tensão aplicada quando se utiliza energia convencional e eólica são semelhantes. Será observado o comportamento gerado com o emprego da energia convencional por ele ser mais estável.

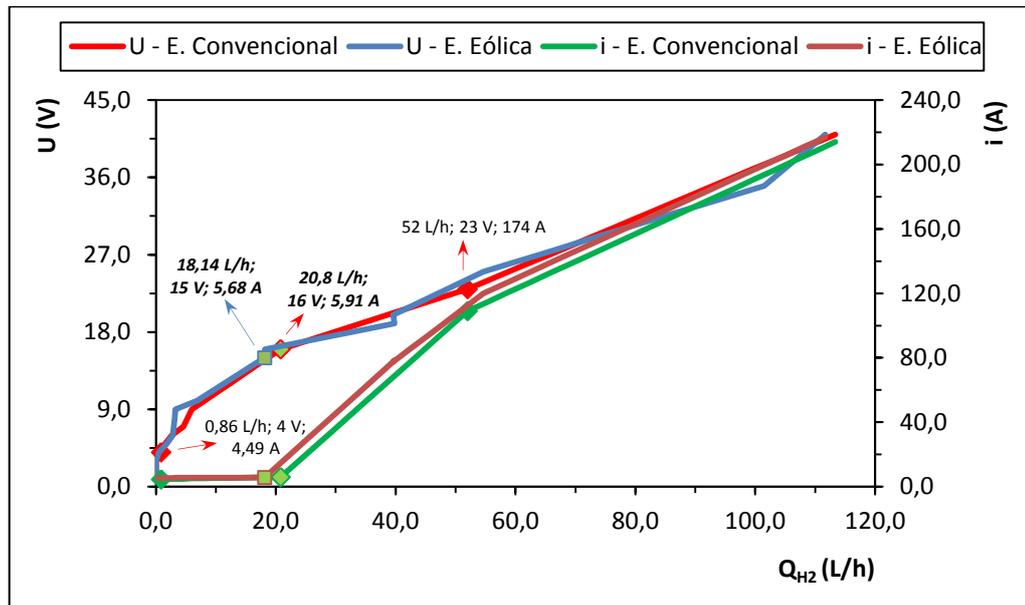
**Figura 26** – Comportamento da corrente ( $i$ ) em função da tensão ( $U$ ) no RM com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.



Na Figura 26 pode-se constatar que a variação da corrente foi muito pequena à medida que o valor da tensão aplicada no reator aumentou até atingir 16,0 V, momento em que tinha intensidade de 5,91 A. A partir de 16,0 V a corrente passou a aumentar de forma acentuada e linear conforme a tensão aplicada atingiu 23,0 V. Após este momento o comportamento da corrente mudou, ela passou a aumentar em uma proporção menor com relação à variação de tensão aplicada. Os valores da corrente registrado variaram de (4,0 – 217,0) A.

O comportamento da tensão e da corrente aplicada em função da vazão de hidrogênio produzido no RM, com solução de KOH a 25% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica, também foi analisado através Figura 27.

**Figura 27**– Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H<sub>2</sub> (Q<sub>H2</sub>) produzido no RM com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.

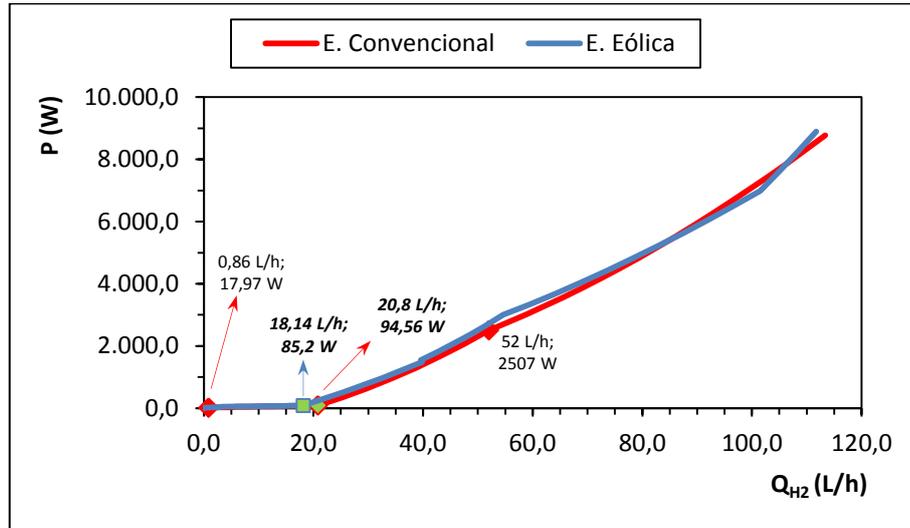


Na Figura 27 observa-se que até atingir a tensão de 4,0 V (4,49 A) a vazão de H<sub>2</sub> produzido foi zero. Após 4,0 V a vazão de H<sub>2</sub> aumentou consideravelmente até 16,0 V, apesar da corrente não ter se comportado da mesma forma que a variação da tensão aplicada no reator. A partir de 16,0 V a corrente passou a aumentar à medida que a tensão seguiu aumentando. Com isso, foi observado novamente que para vazões maiores de H<sub>2</sub> produzido a intensidade da corrente aumentou consideravelmente, resultando em um maior gasto de energia. Ao atingir 23,0 V o comportamento da corrente foi semelhante ao da tensão aplicada, gerando um leve aumento da vazão de H<sub>2</sub> produzido. Os valores da vazão de H<sub>2</sub> produzido com o RM utilizando KOH a 25% e energia convencional variaram de (0,0 – 113,0) L/h.

A partir dessas observações é possível dizer que o processo de produção de hidrogênio no RM, utilizando solução de KOH a 25% como eletrólito, ocorre com maior eficiência aplicando-se uma tensão de (4,0 a 16,0) V, o que leva a uma produção de H<sub>2</sub> de até 20,8 L/h. Considerando estas observações e analisando a Figura 28 que apresenta o comportamento da potência do RM em função da vazão de H<sub>2</sub> produzido, pode-se dizer que a potência máxima do RM, utilizando solução de KOH a 25% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica está compreendida entre (17,97 – 94,56) W.

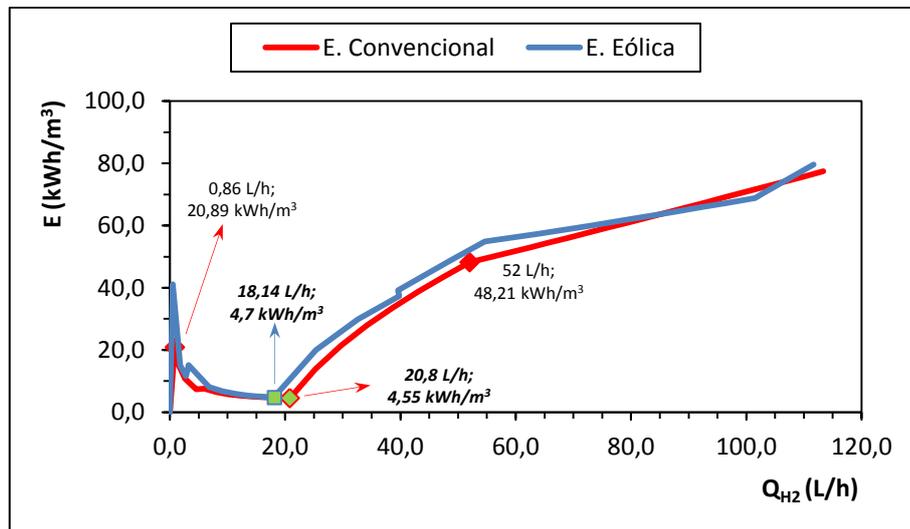
A partir destas observações foi encontrada a eficiência do RM utilizando [KOH] a 25% por meio da quantidade de energia necessária para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de hidrogênio e das eficiências farádica e térmica.

**Figura 28** – Comportamento da potência (P) em função da vazão de H<sub>2</sub> (Q<sub>H2</sub>) produzido no RM com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.



Na Figura 29 está o comportamento da quantidade de energia consumida para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> em função da vazão de H<sub>2</sub> produzido no RM com [KOH] a 25% como eletrólito e as energias convencional e/ou eólica.

**Figura 29** – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> em função da vazão de H<sub>2</sub> (Q<sub>H2</sub>) produzido no RM com [KOH] a 25% e fontes de energia diferentes.



De acordo com a Figura 29 são necessários, no mínimo, 4,55 kWh para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> com o RM utilizando [KOH] a 25% como eletrólito. Esse valor corresponde à aplicação de 16,0 V (1,6 V por célula) para que se tenha uma corrente de 5,91 A e, conseqüentemente, uma potência de 94,56 W capaz de produzir 20,8 L/h de H<sub>2</sub> conforme

pode ser observado nas Figuras 26, 27, 28 e 29. As eficiências farádica e térmica do RR utilizando solução de KOH a 25% foram 76,88% e 92,50%, respectivamente.

Os resultados obtidos quando foi utilizada a energia eólica para fornecer tensão ao RM com [KOH] a 25% são semelhantes. Neste caso foram necessários, no mínimo, 4,7 kWh para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> quando o aerogerador fornece uma tensão de 15,0 V (1,5 V por célula) que dissipa uma corrente igual a 5,68 A e resulta em uma potência de 85,2 W capaz de produzir 18,14 L/h de H<sub>2</sub>. Estes resultados também podem ser observados nas Figuras 26, 27, 28 e 29. As eficiências farádica e térmica do RR utilizando solução de KOH a 20% para uma tensão de 15,0 V foram 82,0% e 98,67%, respectivamente.

#### 4.3 Análise comparativa do desempenho dos reatores eletrolíticos referência (RR) e modificado (RM)

Com as caracterizações do RRe do RM foi possível estabelecer uma análise comparativa do desempenho de cada um deles. A Tabela 4 apresenta os melhores resultados obtidos em cada um deles para concentrações diferentes de KOH e utilizando energia convencional. Esses resultados reforçam o que foi observado nas caracterizações realizadas. Em anexo estão todos os resultados obtidos neste trabalho.

Na Tabela 4 verifica-se que os reatores se comportaram de forma semelhante com relação à tensão e as eficiências farádica e térmica quando foi utilizada solução de KOH a 20% em massa (C = 236,61 g/L). Para uma tensão de 17,0 V nos reatores (com KOH a 20%) a intensidade de corrente do RM foi maior do que a do RR, fato que provocou aumento na vazão de hidrogênio produzido.

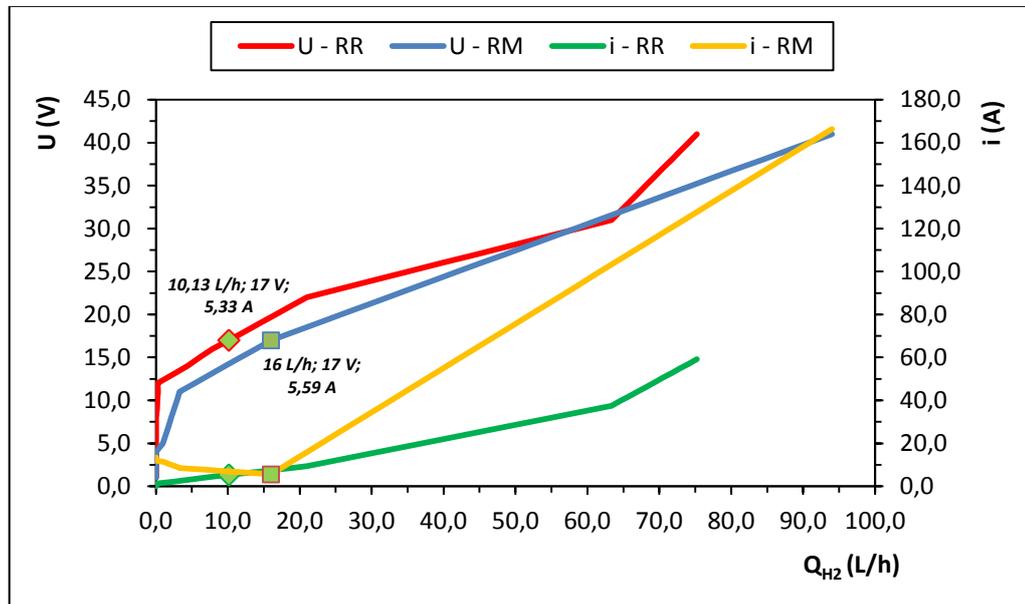
**Tabela 4** – Resultados obtidos com o RR e o RM operando com [KOH] a 20% e 25% e energia convencional.

Reator	[KOH]	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H<sub>2</sub></sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )		η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )	Redução de E (%)
						Placa	Esponja				
RR	20%	17,0	5,33	90,57	10,13	0,042	--	72,35	87,06	8,94	33,56
RM	20%	17,0	5,59	95,00	16,00	0,042	0,087	72,35	87,06	5,94	
RR	25%	17,0	5,32	90,47	11,20	0,047	--	72,35	87,06	8,08	43,68
RM	25%	16,0	5,91	94,56	20,80	0,043	0,122	76,88	92,50	4,55	

A vazão de H<sub>2</sub> obtida foi 36,69% maior do que a obtida com o RR. Esta observação explica a razão de que para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> no RM houve uma economia de 33,56% na

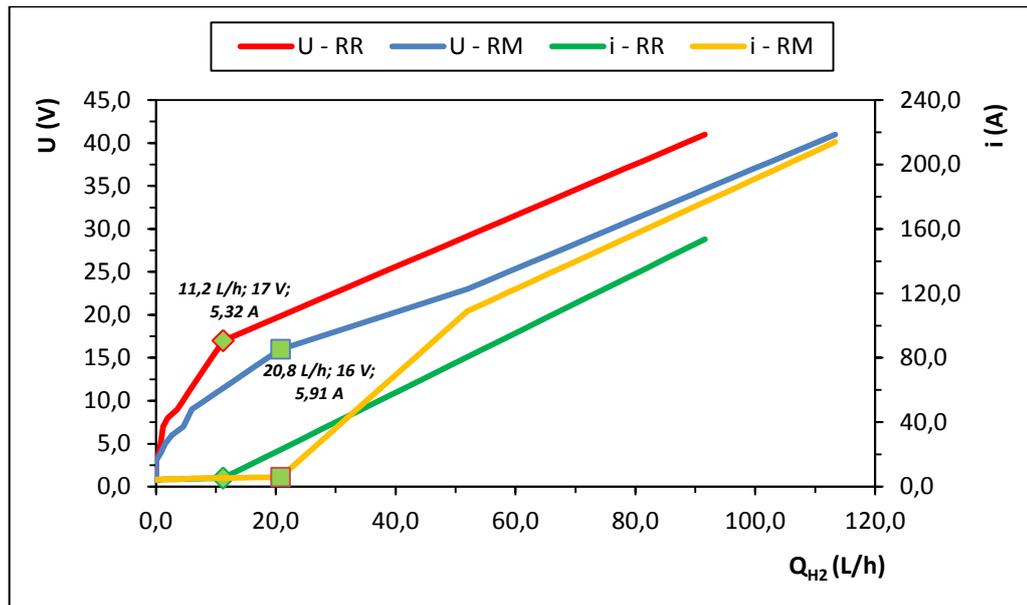
quantidade de energia consumida no processo, pois com o RR foram precisos  $8,94 \text{ kWh/m}^3$  de  $\text{H}_2$  enquanto que no RM foram  $5,94 \text{ kWh/m}^3$  de  $\text{H}_2$ . A Figura 30 apresenta o comportamento da tensão e da corrente em função da vazão de  $\text{H}_2$  produzido no RR e no RM com solução de KOH a 20% como eletrólito. Nela é possível verificar as observações citadas e constatar que, de fato, o processo se tornou mais eficiente no RM para a mesma tensão aplicada aos dois reatores por meio da diferença entre os valores da corrente e da vazão de  $\text{H}_2$  produzido.

**Figura 30** – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de  $\text{H}_2$  ( $Q_{\text{H}_2}$ ) produzido no RR e no RM com [KOH] a 20% como eletrólito.



Pode-se dizer que o semelhante ocorreu quando foi utilizada solução de KOH a 25% em massa ( $C = 295,77 \text{ g/L}$ ) como eletrólito nos reatores. Mas foi observado que a maior eficiência do RR e do RM ocorreram em tensões diferentes; a tensão do RR foi maior do que a do RM. Esta observação pode ser feita na Tabela 4. A partir dela foi constatado que quando foi aplicada a tensão de 17,0 V no RR foram precisos 8,08 kWh para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$ , enquanto que no RM foram precisos apenas 4,55 kWh quando a tensão foi 16,0 V. Dessa forma houve uma economia de 43,69% na energia consumida para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  no RM. A vazão de  $\text{H}_2$  produzido está diretamente ligada a este resultado, ela foi 46,16% maior em relação à do RR. Na Figura 31 é possível verificar as observações citadas no comportamento da tensão e da intensidade de corrente em função da vazão de  $\text{H}_2$  produzido no RR e no RR com solução de KOH a 25% como eletrólito.

**Figura 31** – Comportamento da tensão (U) e da corrente (i) em função da vazão de H<sub>2</sub> (Q<sub>H2</sub>) produzido no RR e no RM com [KOH] a 25% como eletrólito.



#### 4.4 Avaliação da utilização dos eletrodos porosos de níquel

Os resultados obtidos com o RM demonstram ganho no desempenho do processo de produção de hidrogênio ao utilizar os eletrodos porosos de níquel estudados neste trabalho. Esse ganho está diretamente relacionado com as propriedades físicas e químicas da esponja de níquel soldadas nas superfícies das placas niqueladas. A Tabela 5 apresenta algumas propriedades físicas e químicas fornecidas pelo fabricante da esponja porosa de níquel.

**Tabela 5** – Propriedades físico-químicas da esponja porosa de níquel.

Especificações da Esponja Porosa de Níquel	
Porosidade	96%
PPI	90 – 120
Densidade de superfície	500 g/m <sup>2</sup>
Resistência à tração	Vertical – 130 N/cm <sup>2</sup> / Horizontal – 100 N/cm <sup>2</sup>
Espessura	0,05 mm
Alongamento	Vertical – 5% / Horizontal – 12%
Taxa de resistência	5x10 <sup>-6</sup>
Tensão nominal	3,7 V
Aparência	Cinza-prata

**Fonte:** Fabricante Xiamen Tob New Energy Technology Company, Ltd.

A esponja de níquel utilizada neste trabalho é comumente empregada na indústria de baterias como a base da placa de eletrodos positivos (Níquel-hidreto metálico/ Ni-Cd). A esponja porosa é composta por níquel puro (99,9% de pureza) e apresenta excelentes propriedades de resistência à corrosão e dureza. Ela também pode ser utilizada como:

- Material de filtragem de ar/petróleo/fumaça, etc.;
- Eletrodo poroso em processos elétricos como a galvanoplastia;
- Eliminação de calor;
- Amortização de materiais;
- Materiais de blindagem eletromagnética;
- Portador de catalizador;
- Metal precioso de recuperação.

Segundo o fabricante, a esponja porosa de níquel pode aumentar significativamente a superfície específica devido à grande porosidade e é excelente para ser utilizada em eletrodos para aumentar a eficiência da reação eletroquímica devido às características do metal. Diante destas informações foi realizada Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com a esponja porosa de níquel para avaliar a sua estrutura superficial no Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia de Materiais da UFCG. A Figura 32 apresenta as imagens obtidas com a MEV realizada.

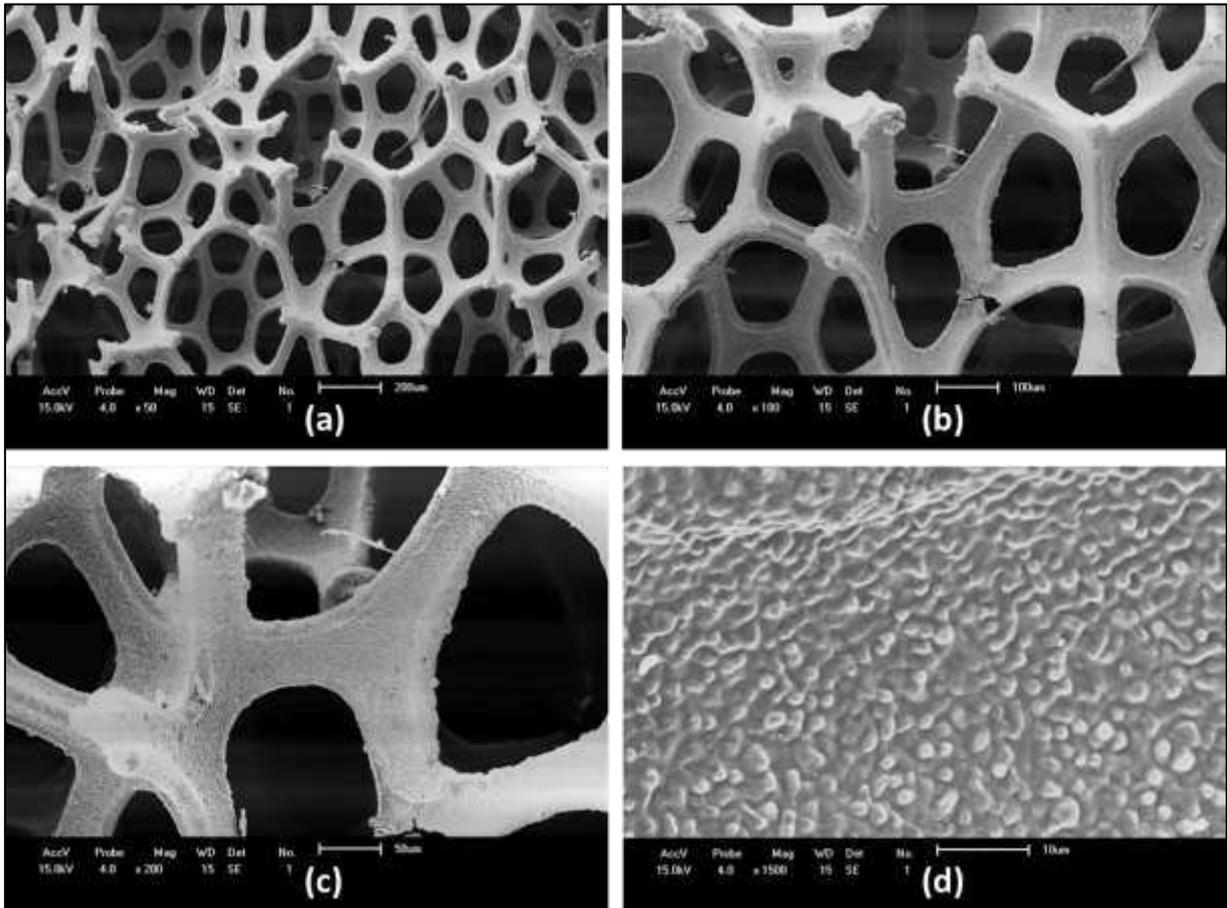
Nelas foi observada a grande porosidade da esponja e que seus poros apresentam forma semelhante no decorrer da estrutura. Além disso, ficou constatado por meio da sua distribuição granulométrica, que as partículas de níquel presentes na esponja estão dispostas uniformemente na área da boca dos poros. Essa grande porosidade aliada a uma elevada área superficial de contato juntamente com a capacidade do níquel em conduzir eletricidade e sua significativa permeabilidade magnética são os responsáveis pelo desempenho obtido na produção de H<sub>2</sub> com RM.

O melhor desempenho obtido com o RM em relação ao obtido com o RR indica que os eletrodos porosos de níquel realmente favorecem o processo eletroquímico, uma vez que para a mesma tensão aplicada nos reatores a corrente obtida com o RM foi 4,65% maior do que a obtida no RR, quando o eletrólito (KOH) estava sob a concentração de 20% em massa. Pode-se dizer que o mesmo ocorreu quando o eletrólito estava com concentração de 25%, mesmo considerando que o aumento da concentração do eletrólito pode favorecer a eficiência do reator, uma vez que os dois reatores operaram nas mesmas condições. Para a [KOH] a 25% e

---

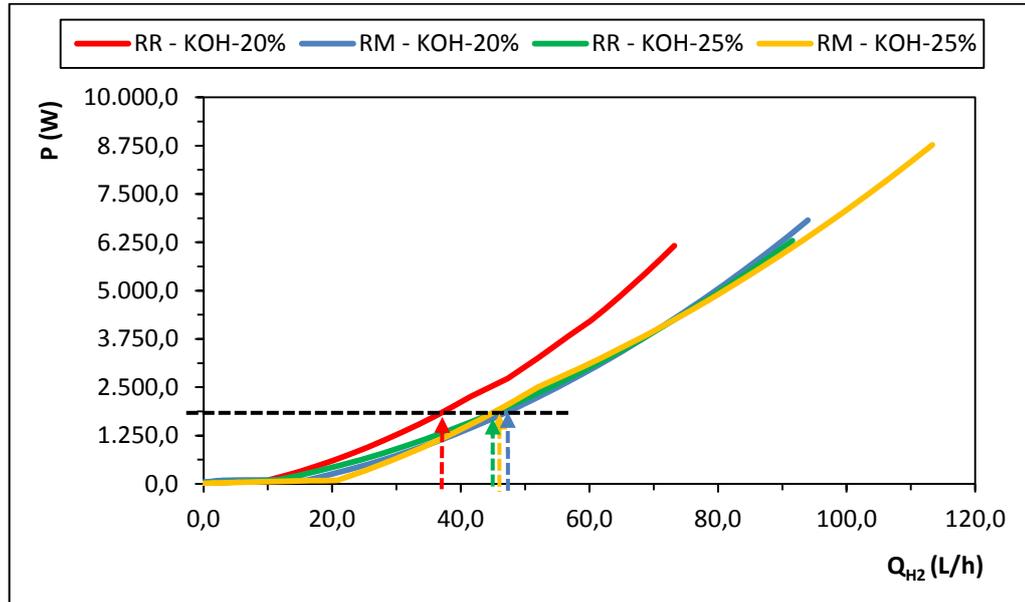
a mesma tensão aplicada (17,0 V), a corrente obtida com o RM foi 9,98% maior em relação à obtida no RR.

**Figura 32** – MEV da esponja porosa de níquel: (a) x50; (b) x100; (c) x200 e (d) x1500.



O aumento ocorrido na corrente fez com que a potência do RM fosse maior do que a do RR. A potência do RM com solução de KOH a 20% em massa foi 4,66% maior em relação à potência do RR para uma tensão de 17,0 V. Para a [KOH] de 25% a potência do RM foi 5,33% maior em relação à obtida no RR mesmo a tensão do RM sendo 16,0 V e a do RR 17,0 V. Esse aumento na potência fez com que se produzisse mais hidrogênio com a mesma quantidade de energia fornecida. Conforme se observa na Figura 33, que apresenta o comportamento da potência em função da vazão de  $H_2$  produzido nos RR e RM com solução de KOH a (20 e 25) % em massa como eletrólito, para a mesma potência o RM apresenta a maior vazão de  $H_2$  produzido.

**Figura 33** – Comportamento da potência (P) em função da vazão de H<sub>2</sub> (Q<sub>H<sub>2</sub></sub>) produzido no RR e no RM com [KOH] a (20 e 25) % em massa como eletrólito.

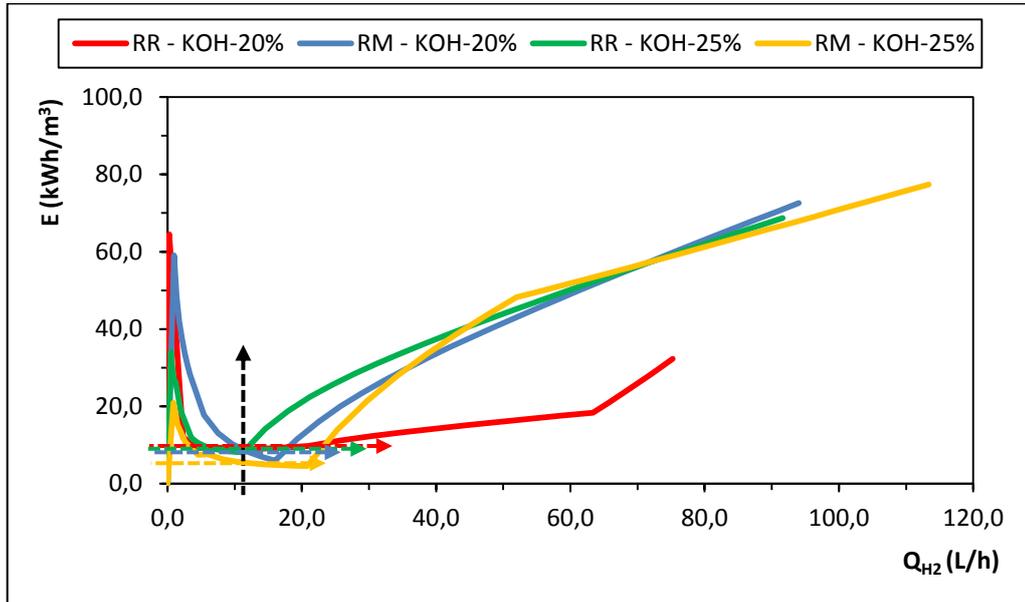


Desse modo a quantidade de energia consumida para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> foi 33,56% menor no RM em relação à consumida no RR quando a tensão aplicada foi 17,0 V e os reatores operaram com [KOH] a 20% em massa. Quando a [KOH] foi 25% em massa, a economia de energia foi 43,68% para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> com o RM em relação ao RR. A Figura 34 que apresenta o comportamento da quantidade de energia consumida para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> no RR e no RM com solução de KOH a (20 e 25) % em massa como eletrólito. Nela observa-se que para uma mesma vazão o RM consome menos energia por 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> produzido.

A eficiência do RM deve-se aos eletrodos porosos de níquel estudados neste trabalho. O fluxo de hidrogênio produzido pela área eletrolítica dos eletrodos (Tabela 4) demonstram o ganho na produção de H<sub>2</sub> ao utilizá-los.

Quando o reator RR operou com 17,0 V e [KOH] a 20% em massa a vazão de H<sub>2</sub> foi 10,13 L/h, um fluxo de 0,042 L/(h.cm<sup>2</sup>) de H<sub>2</sub>. Esse fluxo foi da placa niquelada totalmente lisa com área eletrolítica, ou seja, a que acontece a eletrólise de 240,41 cm<sup>2</sup>. Quando o RM operou em condições iguais de tensão e concentração do eletrólito, a vazão de H<sub>2</sub> foi 16,0 L/h. Neste caso a vazão de H<sub>2</sub> se deu pela soma obtida dos fluxos da área eletrolítica lisa e da área com esponja porosa de níquel soldada. A área eletrolítica com a esponja porosa de níquel soldada foi 132,25 cm<sup>2</sup>, logo no RM a área eletrolítica lisa foi 108,12 cm<sup>2</sup>. O fluxo da área com a esponja porosa de níquel soldada foi de 0,087 L/(h.cm<sup>2</sup>) de H<sub>2</sub>.

**Figura 34** – Comportamento da quantidade de energia (E) para produzir  $1,0 \text{ m}^3$  de  $\text{H}_2$  em função da vazão de  $\text{H}_2$  ( $Q_{\text{H}_2}$ ) produzido no RR e no RM com  $[\text{KOH}]$  a (20 e 25) % em massa como eletrólito.



Quando os reatores operaram com  $[\text{KOH}]$  a 25% em massa o fluxo da área eletrolítica lisa e da área eletrolítica com esponja porosa de níquel soldada foram (0,043 e 0,122)  $\text{L}/(\text{h}\cdot\text{cm}^2)$  de  $\text{H}_2$ , respectivamente. Os fluxos apresentaram uma grande diferença mesmo as tensões aplicadas nos reatores serem diferentes: 17,0 V no RR e 16,0 V no RM.

Com isso ficou evidente que área eletrolítica com esponja porosa de níquel soldada produziu mais que o dobro de  $\text{H}_2$  em relação à área eletrolítica lisa quando a concentração do eletrólito foi 20% em massa. Ao aumentar a concentração do eletrólito para 25% em massa a produção passou para praticamente o triplo da produzida. Por isso pode-se dizer que a produção de  $\text{H}_2$  torna-se mais eficiente com  $[\text{KOH}]$  a 25% em massa.

Diante do exposto pode-se dizer que desempenho obtido no RM demonstra que o eletrodo poroso de níquel é viável e uma boa alternativa para ser empregado no processo de eletrolise da água para a produção de hidrogênio.

## 5 CONCLUSÕES

Com o estudo realizado para avaliar um reator constituído com eletrodos porosos de níquel para produção de hidrogênio eletrolítico, foram obtidas as seguintes conclusões:

1. Os comportamentos da corrente em função da tensão aplicada nos reatores utilizando energia convencional e energia eólica é praticamente o mesmo. Esse fato demonstra a viabilidade de utilizar a energia não convencional (eólica) para a produção de hidrogênio.
  2. Até atingir a tensão de 12,0 V a vazão de H<sub>2</sub> produzido com o Reator Referência utilizando [KOH] a 20% foi praticamente zero. Ela passou a ocorrer de forma significativa a partir do momento que a tensão foi 12 V. O melhor desempenho do Reator Referência com [KOH] a 20% ocorreu com tensão de 17,0 V. Foram consumidos 8,94 kWh/m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> produzido. A corrente; a potência; a vazão de H<sub>2</sub> produzido e as eficiências farádica e térmica foram 5,33 A; 90,57 W; 10,13 L/h de H<sub>2</sub>; 72,35% e 87,06%, respectivamente.
  3. Até atingir a tensão de 4,0 V a vazão de H<sub>2</sub> produzido com o Reator Referência utilizando [KOH] a 25% foi zero. Após 4,0 V ela aumentou consideravelmente até 17,0 V, passando, a partir deste ponto, a aumentar na mesma proporção que a tensão aplicada. O melhor desempenho do Reator Referência com [KOH] a 25% ocorreu com tensão de 17,0 V. Foram consumidos 8,08 kWh/m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> produzido. A corrente; a potência; a vazão de H<sub>2</sub> produzido e as eficiências farádica e térmica foram 5,32 A; 90,47 W; 11,2 L/h de H<sub>2</sub>; 72,35% e 87,06%, respectivamente.
  4. Até atingir a tensão de 5,0 V a vazão de H<sub>2</sub> produzido com o Reator Modificado utilizando [KOH] a 20% foi zero. Após 5,0 V ela passou a ocorrer de forma significativa à medida que o valor da tensão foi aumentando. O melhor desempenho do Reator Modificado com [KOH] a 20% ocorreu com tensão de 17,0 V. Foram consumidos 5,94 kWh/m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> produzido. A corrente; a potência; a vazão de H<sub>2</sub> produzido e as eficiências farádica e térmica foram 5,59 A; 95,0 W; 16,0 L/h de H<sub>2</sub>; 72,35% e 87,06%, respectivamente.
  5. Até atingir a tensão de 4,0 V a vazão de H<sub>2</sub> produzido com o Reator Modificado utilizando [KOH] a 25% foi zero. Após 4,0 V a vazão de H<sub>2</sub> aumentou consideravelmente
-

até 16,0 V, passando, a partir deste ponto, a aumentar conforme a tensão aplicada. O melhor desempenho do Reator Modificado com [KOH] a 25% ocorreu com tensão de 16,0 V. Foram consumidos 4,55 kWh/m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> produzido. A corrente; a potência; a vazão de H<sub>2</sub> produzido e as eficiências farádica e térmica foram 5,91 A; 94,56 W; 20,8 L/h de H<sub>2</sub>; 76,88% e 92,50%, respectivamente.

6. Comparando os reatores operando com [KOH] a 20%, ficou constatado que a corrente; a potência e a vazão de H<sub>2</sub> produzido no Reator Modificado foram (4,65; 4,66 e 36,69) %, respectivamente, maiores que no Reator Referência. Desse modo a energia consumida para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> foi 33,56% menor no Reator Modificado em relação à consumida no Reator Referência.
  7. Comparando os reatores operando com [KOH] a 25%, ficou constatado que a corrente; a potência e a vazão de H<sub>2</sub> produzido no Reator Modificado foram (9,98; 5,33 e 46,16) %, respectivamente, maiores que no Reator Referência mesmo as tensões registradas serem diferentes (17,0 V e 16,0 V, respectivamente). Desse modo a energia consumida para produzir 1,0 m<sup>3</sup> de H<sub>2</sub> foi 43,69% menor no Reator Modificado em relação à consumida no Reator Referência.
  8. O melhor desempenho do Reator Modificado em relação ao Reator Referência deve-se aos eletrodos porosos de níquel.
  9. O fluxo de H<sub>2</sub> dos eletrodos lisos do Reator Referência para 17,0 V e [KOH] a (20 e 25) % foram (0,042 e 0,043) L/(h.cm<sup>2</sup>), respectivamente. Já o fluxo de H<sub>2</sub> dos eletrodos porosos de níquel do RM para (17,0 e 16,0) V e [KOH] a (20 e 25) % foram (0,087 e 0,122) L/(h.cm<sup>2</sup>), respectivamente.
  10. A área eletrolítica com esponja porosa de níquel soldada produziu mais que o dobro e praticamente o triplo de H<sub>2</sub> em relação à área eletrolítica lisa com [KOH] a (20 e 25) % em massa, respectivamente. Por isso pode-se dizer que a produção de H<sub>2</sub> torna-se mais eficiente com [KOH] a 25% em massa e nas condições de operação utilizada.
  11. Diante do desempenho obtido pelo Reator Modificado o eletrodo poroso de níquel mostrou-se viável para ser empregado no processo de eletrolise da água para a produção de hidrogênio.
-

## 6 PERSPECTIVAS

Como perspectivas para trabalhos futuros:

- Instrumentalizar o processo de produção de hidrogênio eletrolítico com o Reator Modificado constituído com eletrodos porosos de níquel;
  - Redimensionar o reator modificado para obter maior potência e produção de hidrogênio eletrolítico;
  - Adequar o sistema de geração de energia eólica para ser utilizado na produção de hidrogênio como fonte de energia;
  - Estudar a cinética de reação de eletrólise como os eletrodos porosos de níquel;
  - Estimar o custo do hidrogênio eletrolítico obtido com os eletrodos porosos de níquel e uma fonte de energia eólica.
-

---

**REFERÊNCIAS**

- ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). *Atlas de energia elétrica do Brasil*. 3ª ed. – Brasília: Aneel, 2008.
- AVACA, L. A.; TOKORO, R. A. *História, Evolução e Crescimento da Eletroquímica/Eletoanalítica nestes últimos 25 anos*. Química Nova, v. 25 n. 1, p 25-30, 2002.
- BARD, 1983 *Significance of hydrogen content in fuel combustion*, International Journal of Hydrogen Energy.
- BARTHELIS, K., GROEHN, H. G., HEUTS, G., LENNARTZ, M., MAI, H., MERGEL, J., SCHMID, L. and RITZENHOFF, P. *Phoebus-Julich: an autonomous energy supply system comprising photovoltaics, electrolytic hydrogen, fuel cell*. International Journal of Hydrogen Energy, 23 (1998) 295.
- BEZERRA and SIGFÚSSON, T., *Iceland – a future hydrogen economy*, International Journal of Hydrogen Energy, 2001.
- BOCKRIS, J. O. M., CONWAY, B. E. *Modern Aspects of Electrochemistry*, Plenum Press – New York, 1975.
- CARCASSI, M. N., FINESCHI, F. *Deflagrations of H<sub>2</sub> – air and CH<sub>4</sub> – air lean mixtures in a vented multi-compartment environment*. Energy, v. 30, nº 8, p. 1439 – 1451, 2005.
- CASPER, M. S., *Hydrogen manufacture by Electrolysis, Thermal Decompositional Unusual Techniques*, Noyes Data Corporation, Park Ridge, New Jersey, USA, 1978.
- CGEE, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. *Energias do futuro*. Relatório final. Brasília: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 139 p., 2008.
- CHATTANATHAN, S. A., ADHIKARI, S., ABDOULMOUMINE N., *A review on current status of hydrogen production from bio-oil*, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 16, p. 2366-2372, 2012.
- CHERRY, R. S. *A Hydrogen utopia?* International Journal of Hydrogen Energy, v. 29, nº 2, p. 125-129, 2004.
- COLLEGE OF THE DESERT. *Hydrogen Properties – Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies*, Modulo 1, Revision 02, p. 9 – 24, 2001.
- CRESESB, *Mecanismos de Geração dos Ventos*. 2014. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/content.php?cid=211>>. Acesso em: 19 Abr. 2014.
-

- DANTE, R. C.; GUERECA, L. P.; NERI, L.; ESCAMILLA, J. L.; AQUINO, L.; CELIS, J. *Life cycle analysis of hydrogen fuel: a methodology for a strategic approach of decision making*. International Journal of Hydrogen Energy, p. 171, p. 46 – 237, 2007.
- DIOCELINO, S., *Hydrogen futures: toward a sustainable energy system*. International Journal of Hydrogen Energy, 27 (1998) 235.
- EPE, Empresa de Pesquisa Energética (Brasil). *Balanco Energético Nacional 2012: Ano base 2011 – Rio de Janeiro: EPE, 2012. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2012.aspx>>*. Acesso em: 18 abr. 2013.
- FILHO, J. S. S. *Caracterização de um Eletrolisador para Produção de Hidrogênio visando o uso de Painéis Fotovoltaicos como Fonte de Energia*. Dissertação de Mestrado em Engenharia Química – DEQ/UFCG/Campina Grande – PB, 2008.
- GALLI, S. and STEFANONI, M., *Development of a solar-hydrogen cycle in Italy*. International Journal of Hydrogen Energy, 22 (1997) 453.
- GERAÇÃO TÉRMICA. Tabelas com os valores das capacidades caloríficas de alguns combustíveis. Disponível em: <<http://www.antoniolima.web.br.com/arquivos/podercalorifico.htm>>. Acesso em: 08 set. 2014.
- GOLDFARB, J., *Eletrolisador bipolar com múltiplas funções, Patente no MU7401372-6, Dep. no INPI: 21/07/1994*.
- GOLDFARB, J., FRANÇA, K. B., PALOMINO, G. N., ALVES, J. J. N., *Opção Alternativa para produção de Energia em Alta Escala no Nordeste*, IV Encontro Regional de Química, Aracajú, SE, novembro 1989.
- GOLDEMBERG, J., LUCON, O. *Energias renováveis: um futuro sustentável*. Rev USP, São Paulo, n. 72, Fev. 2007.
- GUPTA, R. B., *Hydrogen Fuel – Production, Transport, and Storage*, CRC Press, 611 p., 2009.
- HOLLENBERG, J. W., Chen, E. N., LAKERAM, K. and MODROUKAS, D. *Development of a photovoltaic energy conversion system with hydrogen energy storage*. International Journal of Hydrogen Energy, 20 (1995) 239.
- HOLLMULLER, P., JOUBERT, J. M., LACHAL, B. and YVON K. *Evaluation of a 5 kWp photovoltaic hydrogen production and storage installation for a residential home in Switzerland*. International Journal of Hydrogen Energy, 25 (2000) 97.
- IEA, International Energy Agency. *Hydrogen & Fuel Cells: Review of National R&D – Geothermal Energy Annual Report*, Programs, OECD/IEA, p. 46-77, 2004.
-

- KAI ZENG, D. Z. *Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications*. Progress in Energy and Combustion Science, 2010. 36: p. 307-326.
- KALOGIROU, M. *Hydrogen Manufacture by Electrolysis, Thermal Decompositional Unusual Techniques*, Noyes Data Corporation, Park Ridle, New Jersey, USA, 2005.
- KIM, S.; KORATKAR, N.; KARABACAK, T.; LU, T. M. *Water electrolysis activated by Ru nanorod array electrodes*. Appl Phys Lett, v. 88, nº 26, p. 310-613, 2006.
- LAY, J. J., LEE. Y. J., NOIKE, T. *Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal solid waste*. Water Research, v. 33 (11), p. 2579-2586, 1999.
- LEE, J. D. *Química inorgânica não tão concisa*, 4ª ed., Ed, Edgard Blucher Ltda., 1996, p.103-115.
- LEHMAN, P. A., CHAMBERLIN, C.E., PAULETTO, G. And Rocheleau, M.A., *Operating experience with a photovoltaic-hydrogen energy system*. International Journal of Hydrogen Energy, 22 (1997) 465.
- LOPES, D. G. *Análise Técnica e Econômica da Inserção da Tecnologia de Produção de Hidrogênio a partir da Reforma de Etanol para Geração de Energia Elétrica com Células a Combustível*. Planejamento em Sistemas Energéticos, UNICAMP, Tese de Doutorado, Campinas, 2009.
- MÉMENTO DE L'HYDROGÈNE, 2003. *Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible*. Disponível em: <<http://www.afhypac.org/fr/accueil>>. Acesso em: 09 ag. 2014.
- PATRÍCIO, R. A.; SALES, A. D.; SACRAMENTO, E. M.; DE LIMA, L. C.; A, VEZIROGLU, T. N. *Wind hydrogen energy system and the gradual replacement of natural gas in the State of Ceará e Brazil*. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 37, p. 7355 – 7364. 2012.
- PEREDO, E. M. M. *Produção de Hidrogênio por Fotoeletrolise da Água – Aproveitamento do Subproduto Oxigênio*. Dissertação de Mestrado em Otimização Energética na Indústria Química, Instituto Superior do Porto – ISEP, 2012.
- PEREIRA, F. F. *Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento para Cozimento de Argilas Utilizando Hidrogênio Eletrolítico como Combustível*. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Processos, DEQ/UFPB/Campina Grande – PB, 1999.
- PEREIRA, F. F. *Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento para Cozimento de Argilas Utilizando Hidrogênio Eletrolítico como Combustível*. Tese de Doutorado em Engenharia de Processos, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, 2005.
- PLETCHER, D., WALSH, F. C. *Industrial Electrochemistry*, Paperback edition, 1993.
-

- RAPELLI, R. M. *Eletrodos porosos de níquel/zinco para produção de hidrogênio por eletrólise da água*. Dissertação de mestrado em Química na área de físico-química, Instituto de Química, UNICAMP, 2012.
- RIBEIRO. S. K.; REAL. M. V. *Novos Combustíveis*. 92 p.; il.; Rio de Janeiro: E-Papers, 2006.
- SANTOS, J. E. *Controle e automação de um sistema de geração de energia elétrica renovável: Avaliação da célula a combustível H<sub>2</sub>/ar tipo PEMFC*. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Recursos Regionais e Meio Ambiente, Centro de Ciências e Tecnologia, UFCG, 2013.
- SILVA E. P., CAMARGO, J. C. *Integração e Sistemas com Células Combustível*, 1º Workshop Internacional sobre Células a Combustível. São Paulo, SP – 2002.
- SILVA, E. P. *Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio*, Ed. da Unicamp, Campinas, SP, 1991.
- SOLMAZ, R.; DONER, A.; SAHIN, I.; YECE, A. O.; KARDAS, G. I.; YAZICI, B.; ERBIL, M. *The stability of NiCoZn electrocatalyst for hydrogen evolution activity in alkaline solution during long-term electrolysis*. International Journal of Hydrogen Energy 34, 7910 – 7918, 2009.
- SOLMAZ, R.; KARDAS, G. I. *Hydrogen evolution and corrosion performance of NiZn coatings*. Energy Conversion and Management 48, 583 – 59 2007.
- SOUSA. A. B. *Estudo de um Eletrolisador Bipolar Alcalino Visando a Produção de H<sub>2</sub>*. Tese de Doutorado em Engenharia Química – Recursos Regionais e Meio Ambiente, DEQ/UFCG/Campina Grande – PB, 2013.
- UNEP, United Nations Environment Program, *relatório citado em C&E News*, 79, p. 53, 2001.
- ZENG, K.; ZHANG, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. Progress in Energy and Combustion, v. 36, p. 307-326, 2010.
-

# APÊNDICE

---

**APÊNDICE A – Resultados obtidos com o Reator Referência – KOH 20% e Energia Convencional**

Dado	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H2</sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )	η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
0	1,0	0,00	0,00	0,00	0,000	1230,00	1480,00	0,00
1	2,0	0,00	0,00	0,00	0,000	615,00	740,00	0,00
2	3,0	0,13	0,40	0,00	0,000	410,00	493,33	0,00
3	4,0	0,27	1,07	0,00	0,000	307,50	370,00	0,00
4	5,0	0,40	2,02	0,00	0,000	246,00	296,00	0,00
5	6,0	0,54	3,22	0,00	0,000	205,00	246,67	0,00
6	7,0	0,67	4,70	0,00	0,000	175,71	211,43	0,00
7	8,0	0,81	6,45	0,00	0,000	153,75	185,00	0,00
8	9,0	0,94	8,46	0,14	0,001	136,67	164,44	60,89
9	10,0	1,07	10,75	0,19	0,001	123,00	148,00	56,57
10	11,0	1,21	13,30	0,26	0,001	111,82	134,55	51,16
11	12,0	1,34	16,12	0,25	0,001	102,50	123,33	64,49
12	13,0	2,14	27,82	2,33	0,010	94,62	113,85	11,97
13	14,0	2,94	41,12	4,40	0,018	87,86	105,71	9,35
14	15,0	3,73	56,01	6,11	0,025	82,00	98,67	9,17
15	16,0	4,53	72,49	7,85	0,033	76,88	92,50	9,23
16	17,0	5,33	90,57	10,13	0,042	72,35	87,06	8,94
17	18,0	6,12	110,24	12,30	0,051	68,33	82,22	8,96
18	19,0	6,92	131,51	14,48	0,060	64,74	77,89	9,08
19	20,0	7,72	154,36	16,65	0,069	61,50	74,00	9,27
20	21,0	8,51	178,81	18,83	0,078	58,57	70,48	9,50
21	22,0	9,31	204,86	21,00	0,087	55,91	67,27	9,76
22	23,0	12,44	286,14	25,71	0,107	53,48	64,35	11,13
23	24,0	15,57	373,69	30,41	0,127	51,25	61,67	12,29
24	25,0	18,70	467,49	35,12	0,146	49,20	59,20	13,31
25	26,0	21,83	567,55	39,83	0,166	47,31	56,92	14,25
26	27,0	24,96	673,86	44,54	0,185	45,56	54,81	15,13
27	28,0	28,09	786,44	49,24	0,205	43,93	52,86	15,97
28	29,0	31,22	905,27	53,95	0,224	42,41	51,03	16,78
29	30,0	34,35	1030,37	58,66	0,244	41,00	49,33	17,57
30	31,0	37,47	1161,72	63,37	0,264	39,68	47,74	18,33
31	32,0	39,65	1268,68	64,55	0,269	38,44	46,25	19,65
32	33,0	41,82	1379,99	65,74	0,273	37,27	44,85	20,99
33	34,0	43,99	1495,64	66,92	0,278	36,18	43,53	22,35
34	35,0	46,16	1615,63	68,11	0,283	35,14	42,29	23,72
35	36,0	48,33	1739,96	69,30	0,288	34,17	41,11	25,11
36	37,0	50,50	1868,64	70,48	0,293	33,24	40,00	26,51
37	38,0	52,68	2001,66	71,67	0,298	32,37	38,95	27,93
38	39,0	54,85	2139,02	72,86	0,303	31,54	37,95	29,36
39	40,0	57,02	2280,73	74,04	0,308	30,75	37,00	30,80
40	41,0	59,19	2426,78	75,23	0,313	30,00	36,10	32,26

**APÊNDICE B – Resultados obtidos com o Reator Referência – KOH 20% e Energia Eólica**

Dado	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H<sub>2</sub></sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )	η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
0	1,0	0,00	0,00	0,00	0,000	1230,00	1480,00	0,00
1	2,0	0,00	0,00	0,00	0,000	615,00	740,00	0,00
2	3,0	0,15	0,44	0,00	0,000	410,00	493,33	0,00
3	4,0	0,30	1,18	0,00	0,000	307,50	370,00	0,00
4	5,0	0,44	2,22	0,00	0,000	245,94	295,92	0,00
5	6,0	0,59	3,54	0,00	0,000	205,00	246,67	0,00
6	7,0	0,74	5,17	0,01	0,000	175,71	211,43	0,00
7	8,0	0,89	7,08	0,00	0,000	153,75	185,00	0,00
8	9,0	1,03	9,30	0,12	0,000	136,67	164,44	80,79
9	10,0	1,18	11,81	0,29	0,001	123,00	148,00	40,72
10	11,0	1,33	14,61	0,62	0,003	111,82	134,55	23,56
11	12,0	1,48	17,71	1,17	0,005	102,50	123,33	15,14
12	13,0	2,45	31,85	2,49	0,010	94,62	113,85	12,79
13	14,0	3,48	48,71	4,43	0,018	87,86	105,71	11,00
14	15,0	4,51	67,64	6,37	0,026	82,00	98,67	10,62
15	16,0	5,02	80,24	8,67	0,036	76,88	92,50	9,26
16	17,0	5,15	87,55	8,98	0,037	72,35	87,06	9,75
17	18,0	4,73	85,05	9,53	0,040	68,33	82,22	8,92
18	19,0	6,47	122,99	12,13	0,050	64,74	77,89	10,14
19	20,0	8,22	164,42	14,74	0,061	61,50	74,00	11,16
20	21,0	9,97	209,34	17,34	0,072	58,57	70,48	12,07
21	22,0	11,72	257,77	19,94	0,083	55,91	67,27	12,93
22	23,0	14,91	343,04	24,80	0,103	53,48	64,35	13,83
23	24,0	18,11	434,71	29,66	0,123	51,25	61,67	14,66
24	25,0	21,31	532,77	34,51	0,144	49,20	59,20	15,44
25	26,0	24,51	637,24	39,37	0,164	47,31	56,92	16,19
26	27,0	27,71	748,09	44,22	0,184	45,56	54,81	16,92
27	28,0	30,91	865,35	49,08	0,204	43,93	52,86	17,63
28	29,0	34,10	989,00	53,94	0,224	42,41	51,03	18,34
29	30,0	37,30	1119,04	58,79	0,245	41,00	49,33	19,03
30	31,0	40,50	1255,49	63,65	0,265	39,68	47,74	19,73
31	32,0	41,89	1340,54	64,92	0,270	38,44	46,25	20,65
32	33,0	43,28	1428,38	66,20	0,275	37,27	44,85	21,58
33	34,0	44,68	1519,00	67,47	0,281	36,18	43,53	22,51
34	35,0	46,07	1612,41	68,75	0,286	35,14	42,29	23,45
35	36,0	47,46	1708,60	70,03	0,291	34,17	41,11	24,40
36	37,0	48,85	1807,57	71,30	0,297	33,24	40,00	25,35
37	38,0	50,25	1909,33	72,58	0,302	32,37	38,95	26,31
38	39,0	51,64	2013,88	73,85	0,307	31,54	37,95	27,27
39	40,0	53,03	2121,21	75,13	0,313	30,75	37,00	28,23
40	41,0	54,42	2231,32	76,41	0,318	30,00	36,10	29,20

**APÊNDICE C – Resultados obtidos com o Reator Referência – KOH 25% e Energia Convencional**

Dado	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H<sub>2</sub></sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )	η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
0	1,0	4,02	4,02	0,00	0,000	1230,00	1480,00	0,00
1	2,0	4,10	8,20	0,00	0,000	615,00	740,00	0,00
2	3,0	4,18	12,55	0,00	0,000	410,00	493,33	0,00
3	4,0	4,26	17,06	0,50	0,002	307,50	370,00	34,12
4	5,0	4,35	21,73	0,75	0,003	246,00	296,00	28,97
5	6,0	4,43	26,57	1,00	0,004	205,00	246,67	26,57
6	7,0	4,51	31,56	1,20	0,005	175,71	211,43	26,30
7	8,0	4,59	36,72	1,95	0,008	153,75	185,00	18,83
8	9,0	4,67	42,04	3,55	0,015	136,67	164,44	11,84
9	10,0	4,75	47,53	4,51	0,019	123,00	148,00	10,55
10	11,0	4,83	53,17	5,46	0,023	111,82	134,55	9,73
11	12,0	4,92	58,98	6,42	0,027	102,50	123,33	9,19
12	13,0	5,00	64,96	7,37	0,031	94,62	113,85	8,81
13	14,0	5,08	71,09	8,33	0,035	87,86	105,71	8,53
14	15,0	5,16	77,39	9,29	0,039	82,00	98,67	8,33
15	16,0	5,24	83,85	10,24	0,043	76,88	92,50	8,19
16	17,0	5,32	90,47	11,20	0,047	72,35	87,06	8,08
17	18,0	11,50	207,00	14,55	0,061	68,33	82,22	14,23
18	19,0	17,68	335,90	17,90	0,074	64,74	77,89	18,77
19	20,0	23,86	477,14	21,25	0,088	61,50	74,00	22,45
20	21,0	30,04	630,75	24,60	0,102	58,57	70,48	25,64
21	22,0	36,21	796,71	27,95	0,116	55,91	67,27	28,50
22	23,0	42,39	975,03	31,30	0,130	53,48	64,35	31,15
23	24,0	48,57	1165,71	34,65	0,144	51,25	61,67	33,64
24	25,0	54,75	1368,74	38,00	0,158	49,20	59,20	36,02
25	26,0	60,93	1584,13	41,35	0,172	47,31	56,92	38,31
26	27,0	67,11	1811,88	44,70	0,186	45,56	54,81	40,53
27	28,0	73,29	2051,99	48,05	0,200	43,93	52,86	42,71
28	29,0	79,46	2304,45	51,40	0,214	42,41	51,03	44,83
29	30,0	85,64	2569,27	54,75	0,228	41,00	49,33	46,93
30	31,0	91,82	2846,44	58,10	0,242	39,68	47,74	48,99
31	32,0	98,00	3135,98	61,45	0,256	38,44	46,25	51,03
32	33,0	104,18	3437,87	64,80	0,270	37,27	44,85	53,05
33	34,0	110,36	3752,11	68,15	0,283	36,18	43,53	55,06
34	35,0	116,53	4078,72	71,50	0,297	35,14	42,29	57,04
35	36,0	122,71	4417,68	74,85	0,311	34,17	41,11	59,02
36	37,0	128,89	4768,99	78,20	0,325	33,24	40,00	60,98
37	38,0	135,07	5132,67	81,55	0,339	32,37	38,95	62,94
38	39,0	141,25	5508,70	84,90	0,353	31,54	37,95	64,88
39	40,0	147,43	5897,09	88,25	0,367	30,75	37,00	66,82
40	41,0	153,61	6297,84	91,60	0,381	30,00	36,10	68,75

**APÊNDICE D – Resultados obtidos com o Reator Referência – KOH 25% e Energia Eólica**

Dado	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H2</sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )	η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
0	1,0	4,28	4,28	0,00	0,000	1230,00	1480,00	0,00
1	2,0	4,32	8,65	0,00	0,000	615,00	740,00	0,00
2	3,0	4,36	13,09	0,00	0,000	410,00	493,33	0,00
3	4,0	4,40	17,61	0,52	0,002	307,50	370,00	33,86
4	5,0	4,44	22,21	1,07	0,004	245,94	295,92	20,78
5	6,0	4,48	26,88	1,62	0,007	205,00	246,67	16,63
6	7,0	4,52	31,63	2,16	0,009	175,71	211,43	14,62
7	8,0	4,56	36,46	2,71	0,011	153,75	185,00	13,45
8	9,0	4,60	41,37	3,26	0,014	136,67	164,44	12,69
9	10,0	4,57	45,67	3,06	0,013	123,00	148,00	14,91
10	11,0	4,54	49,90	2,87	0,012	111,82	134,55	17,41
11	12,0	4,51	54,07	2,67	0,011	102,50	123,33	20,25
12	13,0	4,47	58,17	2,47	0,010	94,62	113,85	23,53
13	14,0	4,44	62,22	2,28	0,009	87,86	105,71	27,34
14	15,0	4,41	66,21	2,08	0,009	82,00	98,67	31,85
15	16,0	4,92	78,75	5,36	0,022	76,88	92,50	14,70
16	17,0	5,43	92,31	8,63	0,036	72,35	87,06	10,69
17	18,0	5,94	106,88	11,91	0,050	68,33	82,22	8,97
18	19,0	6,45	122,48	12,16	0,051	64,74	77,89	10,07
19	20,0	15,33	306,66	16,50	0,069	61,50	74,00	18,59
20	21,0	24,22	508,61	20,84	0,087	58,57	70,48	24,41
21	22,0	33,11	728,34	25,18	0,105	55,91	67,27	28,93
22	23,0	41,99	965,85	29,52	0,123	53,48	64,35	32,72
23	24,0	50,88	1221,12	33,86	0,141	51,25	61,67	36,06
24	25,0	59,77	1494,17	38,20	0,159	49,20	59,20	39,11
25	26,0	64,73	1683,00	41,54	0,173	47,31	56,92	40,51
26	27,0	69,69	1881,76	44,88	0,187	45,56	54,81	41,93
27	28,0	74,66	2090,44	48,22	0,201	43,93	52,86	43,35
28	29,0	79,62	2309,05	51,56	0,214	42,41	51,03	44,78
29	30,0	84,59	2537,59	54,90	0,228	41,00	49,33	46,22
30	31,0	90,85	2816,26	58,28	0,242	39,68	47,74	48,32
31	32,0	97,11	3107,44	61,65	0,256	38,44	46,25	50,40
32	33,0	103,37	3411,15	65,03	0,270	37,27	44,85	52,46
33	34,0	109,63	3727,38	68,40	0,285	36,18	43,53	54,49
34	35,0	115,89	4056,12	71,78	0,299	35,14	42,29	56,51
35	36,0	122,15	4397,39	75,15	0,313	34,17	41,11	58,51
36	37,0	128,41	4751,19	78,53	0,327	33,24	40,00	60,50
37	38,0	134,67	5117,50	81,90	0,341	32,37	38,95	62,48
38	39,0	140,93	5496,33	85,28	0,355	31,54	37,95	64,45
39	40,0	147,19	5887,69	88,65	0,369	30,75	37,00	66,41
40	41,0	153,45	6291,56	92,03	0,383	30,00	36,10	68,36

**APÊNDICE E – Resultados obtidos com o Reator Modificado – KOH 20% e Energia Convencional**

Dado	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H2</sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )	η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
0	1,0	13,42	13,42	0,00	0,000	1230,00	1480,00	0,00
1	2,0	12,93	25,86	0,00	0,000	615,00	740,00	0,00
2	3,0	12,44	37,31	0,00	0,000	410,00	493,33	0,00
3	4,0	11,95	47,80	0,00	0,000	307,50	370,00	0,00
4	5,0	11,46	57,30	0,97	0,007	246,00	296,00	59,07
5	6,0	10,97	65,82	1,36	0,010	205,00	246,67	48,46
6	7,0	10,48	73,37	1,75	0,013	175,71	211,43	42,00
7	8,0	9,99	79,93	2,14	0,016	153,75	185,00	37,44
8	9,0	9,50	85,52	2,52	0,019	136,67	164,44	33,89
9	10,0	9,01	90,13	2,91	0,021	123,00	148,00	30,96
10	11,0	8,52	93,76	3,30	0,024	111,82	134,55	28,41
11	12,0	8,03	96,42	3,69	0,027	102,50	123,33	26,33
12	13,0	7,55	98,09	4,08	0,029	94,62	113,85	24,67
13	14,0	7,06	98,79	4,47	0,031	87,86	105,71	23,33
14	15,0	6,57	98,50	4,86	0,033	82,00	98,67	22,22
15	16,0	6,08	97,24	5,25	0,035	76,88	92,50	21,33
16	17,0	5,59	95,00	5,64	0,037	72,35	87,06	20,59
17	18,0	5,10	91,80	6,03	0,039	68,33	82,22	19,96
18	19,0	4,61	88,59	6,42	0,041	64,74	77,89	19,43
19	20,0	4,12	85,38	6,81	0,043	61,50	74,00	18,96
20	21,0	3,63	82,17	7,20	0,045	58,57	70,48	18,54
21	22,0	3,14	78,96	7,59	0,047	55,91	67,27	18,17
22	23,0	2,65	75,75	7,98	0,049	53,48	64,35	17,83
23	24,0	2,16	72,54	8,37	0,051	51,25	61,67	17,50
24	25,0	1,67	69,33	8,76	0,053	49,20	59,20	17,17
25	26,0	1,18	66,12	9,15	0,055	47,31	56,92	16,83
26	27,0	0,69	62,91	9,54	0,057	45,56	54,81	16,50
27	28,0	0,20	59,70	9,93	0,059	43,93	52,86	16,17
28	29,0	-0,29	56,49	10,32	0,061	42,41	51,03	15,83
29	30,0	-0,78	53,28	10,71	0,063	41,00	49,33	15,50
30	31,0	-1,27	50,07	11,10	0,065	39,68	47,74	15,17
31	32,0	-1,76	46,86	11,49	0,067	38,44	46,25	14,83
32	33,0	-2,25	43,65	11,88	0,069	37,27	44,85	14,50
33	34,0	-2,74	40,44	12,27	0,071	36,18	43,53	14,17
34	35,0	-3,23	37,23	12,66	0,073	35,14	42,29	13,83
35	36,0	-3,72	34,02	13,05	0,075	34,17	41,11	13,50
36	37,0	-4,21	30,81	13,44	0,077	33,24	40,00	13,17
37	38,0	-4,70	27,60	13,83	0,079	32,37	38,95	12,83
38	39,0	-5,19	24,39	14,22	0,081	31,54	37,95	12,50
39	40,0	-5,68	21,18	14,61	0,083	30,75	37,00	12,17
40	41,0	-6,17	17,97	15,00	0,085	30,00	36,10	11,83

**APÊNDICE F – Resultados obtidos com o Reator Modificado – KOH 20% e Energia Eólica**

Dado	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H<sub>2</sub></sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )	η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
0	1,0	12,45	12,45	0,00	0,000	1230,00	1480,00	0,00
1	2,0	12,04	24,08	0,00	0,000	615,00	740,00	0,00
2	3,0	11,63	34,90	0,00	0,000	410,00	493,33	0,00
3	4,0	11,23	44,90	0,00	0,000	307,50	370,00	0,00
4	5,0	10,82	54,10	1,14	0,009	245,94	295,92	47,49
5	6,0	10,41	62,46	1,45	0,011	205,00	246,67	42,97
6	7,0	10,00	70,02	1,77	0,013	175,71	211,43	39,61
7	8,0	9,60	76,77	2,08	0,016	153,75	185,00	36,88
8	9,0	9,19	82,70	2,40	0,018	136,67	164,44	34,52
9	10,0	8,78	87,81	2,71	0,020	123,00	148,00	32,40
10	11,0	8,37	92,11	5,25	0,038	111,82	134,55	17,56
11	12,0	7,97	95,60	7,78	0,055	102,50	123,33	12,28
12	13,0	7,56	98,27	10,32	0,070	94,62	113,85	9,52
13	14,0	7,40	103,63	11,30	0,070	87,86	105,71	9,17
14	15,0	6,75	101,25	15,36	0,094	82,00	98,67	6,59
15	16,0	5,88	94,02	14,56	0,081	76,88	92,50	6,46
16	17,0	5,93	100,82	14,61	0,080	72,35	87,06	6,90
17	18,0	12,63	227,35	20,77	0,125	68,33	82,22	10,95
18	19,0	19,18	364,44	26,80	0,161	64,74	77,89	13,60
19	20,0	26,03	520,63	29,27	0,171	61,50	74,00	17,79
20	21,0	32,73	687,37	31,69	0,181	58,57	70,48	21,69
21	22,0	39,43	867,50	34,10	0,190	55,91	67,27	25,44
22	23,0	46,13	1061,04	36,52	0,192	53,48	64,35	29,05
23	24,0	52,83	1267,98	39,69	0,199	51,25	61,67	31,95
24	25,0	59,53	1488,33	42,86	0,207	49,20	59,20	34,73
25	26,0	66,23	1722,07	46,03	0,214	47,31	56,92	37,41
26	27,0	72,93	1969,21	49,20	0,222	45,56	54,81	40,03
27	28,0	79,63	2229,75	52,37	0,229	43,93	52,86	42,58
28	29,0	86,33	2503,70	55,54	0,236	42,41	51,03	45,08
29	30,0	93,03	2791,04	58,71	0,244	41,00	49,33	47,54
30	31,0	99,74	3091,79	62,21	0,254	39,68	47,74	49,70
31	32,0	106,44	3405,93	65,71	0,276	38,44	46,25	51,83
32	33,0	113,14	3733,48	69,21	0,298	37,27	44,85	53,94
33	34,0	119,84	4074,43	72,71	0,320	36,18	43,53	56,04
34	35,0	126,54	4428,77	76,21	0,342	35,14	42,29	58,11
35	36,0	133,24	4796,52	79,71	0,365	34,17	41,11	60,17
36	37,0	139,94	5177,67	83,21	0,387	33,24	40,00	62,22
37	38,0	146,64	5572,22	86,72	0,409	32,37	38,95	64,26
38	39,0	153,34	5980,17	90,22	0,431	31,54	37,95	66,29
39	40,0	160,04	6401,52	93,72	0,453	30,75	37,00	68,31
40	41,0	166,74	6836,28	97,22	0,475	30,00	36,10	70,32

**APÊNDICE G – Resultados obtidos com o Reator Modificado – KOH 25% e Energia Convencional**

Dado	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H2</sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )	η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
0	1,0	4,14	4,14	0,00	0,013	1230,00	1480,00	0,00
1	2,0	4,25	8,51	0,00	0,014	615,00	740,00	0,00
2	3,0	4,37	13,12	0,00	0,014	410,00	493,33	0,00
3	4,0	4,49	17,97	0,86	0,014	307,50	370,00	20,89
4	5,0	4,61	23,05	1,51	0,015	246,00	296,00	15,26
5	6,0	4,73	28,37	2,63	0,015	205,00	246,67	10,79
6	7,0	4,85	33,92	4,57	0,015	175,71	211,43	7,42
7	8,0	4,96	39,71	5,29	0,016	153,75	185,00	7,51
8	9,0	5,08	45,73	6,00	0,016	136,69	164,48	7,62
9	10,0	5,20	52,01	8,12	0,017	123,00	148,00	6,41
10	11,0	5,32	58,51	10,23	0,017	111,82	134,55	5,72
11	12,0	5,44	65,25	12,34	0,017	102,50	123,33	5,29
12	13,0	5,56	72,22	14,46	0,018	94,62	113,85	4,99
13	14,0	5,67	79,43	16,57	0,018	87,86	105,71	4,79
14	15,0	5,79	86,88	18,69	0,018	82,00	98,67	4,65
15	16,0	5,91	94,56	20,80	0,019	76,88	92,50	4,55
16	17,0	20,64	350,83	25,26	0,066	72,35	87,06	13,89
17	18,0	35,36	636,56	29,71	0,113	68,33	82,22	21,42
18	19,0	50,09	951,74	34,17	0,160	64,74	77,89	27,85
19	20,0	64,82	1296,37	38,63	0,206	61,50	74,00	33,56
20	21,0	79,55	1670,46	43,09	0,253	58,57	70,48	38,77
21	22,0	94,27	2074,00	47,54	0,300	55,91	67,27	43,62
22	23,0	109,00	2507,00	52,00	0,347	53,48	64,35	48,21
23	24,0	114,83	2756,00	55,41	0,366	51,25	61,67	49,74
24	25,0	120,67	3016,67	58,82	0,384	49,20	59,20	51,29
25	26,0	126,50	3289,00	62,23	0,403	47,31	56,92	52,86
26	27,0	132,33	3573,00	65,63	0,421	45,56	54,81	54,44
27	28,0	138,17	3868,67	69,04	0,440	43,93	52,86	56,03
28	29,0	144,00	4176,00	72,45	0,459	42,41	51,03	57,64
29	30,0	149,83	4495,00	75,86	0,477	41,00	49,33	59,25
30	31,0	155,67	4825,67	79,27	0,496	39,68	47,74	60,88
31	32,0	161,50	5168,00	82,68	0,514	38,44	46,25	62,51
32	33,0	167,33	5522,00	86,09	0,533	37,27	44,85	64,15
33	34,0	173,17	5887,67	89,49	0,551	36,18	43,53	65,79
34	35,0	179,00	6265,00	92,90	0,570	35,14	42,29	67,44
35	36,0	184,83	6654,00	96,31	0,589	34,17	41,11	69,09
36	37,0	190,67	7054,67	99,72	0,607	33,24	40,00	70,74
37	38,0	196,50	7467,00	103,13	0,626	32,37	38,95	72,40
38	39,0	202,33	7891,00	106,54	0,644	31,54	37,95	74,07
39	40,0	208,17	8326,67	109,95	0,663	30,75	37,00	75,73
40	41,0	214,00	8774,00	113,35	0,682	30,00	36,10	77,40

**APÊNDICE H – Resultados obtidos com o Reator Modificado – KOH 25% e Energia Eólica**

Dado	U (V)	i (A)	P (W)	V <sub>H2</sub> (L/h)	J (L/h.cm <sup>2</sup> )	η <sub>farádica</sub> (%)	η <sub>térmica</sub> (%)	E (kWh/m <sup>3</sup> )
0	1,0	5,25	5,25	0,00	0,017	1230,00	1480,00	0,00
1	2,0	5,28	10,57	0,00	0,017	615,00	740,00	0,00
2	3,0	5,32	15,95	0,00	0,017	410,00	493,33	0,00
3	4,0	5,35	21,38	0,52	0,017	307,50	370,00	41,12
4	5,0	5,38	26,88	1,78	0,017	246,00	296,00	15,10
5	6,0	5,41	32,44	2,79	0,017	205,00	246,67	11,63
6	7,0	5,44	38,06	2,95	0,017	175,71	211,43	12,91
7	8,0	5,47	43,74	3,10	0,017	153,75	185,00	14,09
8	9,0	5,50	49,47	3,26	0,018	136,69	164,48	15,17
9	10,0	5,53	55,28	6,83	0,018	123,00	148,00	8,09
10	11,0	5,56	61,14	9,09	0,018	111,82	134,55	6,72
11	12,0	5,59	67,06	11,35	0,018	102,50	123,33	5,91
12	13,0	5,62	73,05	13,62	0,018	94,62	113,85	5,36
13	14,0	5,65	79,09	15,88	0,018	87,86	105,71	4,98
14	15,0	5,68	85,20	18,14	0,018	82,00	98,67	4,70
15	16,0	5,71	91,36	18,15	0,018	76,88	92,50	5,03
16	17,0	29,89	508,16	25,37	0,095	72,35	87,06	20,03
17	18,0	54,07	973,33	32,59	0,172	68,33	82,22	29,87
18	19,0	78,26	1486,85	39,80	0,249	64,74	77,89	37,35
19	20,0	77,44	1548,74	39,56	0,247	61,50	74,00	39,15
20	21,0	85,95	1804,92	42,57	0,274	58,57	70,48	42,39
21	22,0	94,46	2078,12	45,59	0,301	55,91	67,27	45,58
22	23,0	102,97	2368,33	48,60	0,328	53,48	64,35	48,73
23	24,0	111,48	2675,58	51,62	0,355	51,25	61,67	51,84
24	25,0	119,99	2999,84	54,63	0,382	49,20	59,20	54,91
25	26,0	127,87	3324,60	59,26	0,407	47,31	56,92	56,10
26	27,0	135,74	3665,11	63,90	0,432	45,56	54,81	57,36
27	28,0	143,62	4021,37	68,53	0,457	43,93	52,86	58,68
28	29,0	151,50	4393,38	73,17	0,482	42,41	51,03	60,05
29	30,0	159,37	4781,14	77,80	0,508	41,00	49,33	61,45
30	31,0	167,43	5190,24	82,54	0,533	39,68	47,74	62,88
31	32,0	175,48	5615,44	87,28	0,559	38,44	46,25	64,34
32	33,0	183,54	6056,76	92,02	0,585	37,27	44,85	65,82
33	34,0	191,59	6514,19	96,76	0,610	36,18	43,53	67,32
34	35,0	199,65	6987,73	101,50	0,636	35,14	42,29	68,84
35	36,0	202,54	7291,38	103,20	0,645	34,17	41,11	70,65
36	37,0	205,43	7600,80	104,90	0,654	33,24	40,00	72,46
37	38,0	208,32	7916,01	106,60	0,663	32,37	38,95	74,26
38	39,0	211,20	8236,99	108,30	0,673	31,54	37,95	76,06
39	40,0	214,09	8563,75	110,00	0,682	30,75	37,00	77,85
40	41,0	216,98	8896,29	111,70	0,691	30,00	36,10	79,64