



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – UFCG
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA – CCT
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**CARACTERIZAÇÃO DE UM ELETROLISADOR BIPOLAR PARA PRODUÇÃO
DE HIDROGÊNIO VISANDO O USO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COMO
FONTE DE ENERGIA**

JOÃO SALES DE SOUZA FILHO

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO DE 2008

**CARACTERIZAÇÃO DE UM ELETROLISADOR BIPOLAR PARA PRODUÇÃO
DE HIDROGÊNIO VISANDO O USO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COMO
FONTE DE ENERGIA**

JOÃO SALES DE SOUZA FILHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Química da Universidade
Federal de Campina Grande, em cumprimento às
exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Área de Concentração: Desenvolvimento Processos Químicos.

Orientadores: Prof. Dr. Hervé Michel Laborde e o Prof. Kepler Borges França (Ph.D)

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO DE 2008

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S729c

2008 Souza Filho, João Sales.

Caracterização de um eletrolisador bipolar para produção de hidrogênio visando o uso de painéis fotovoltaicos como fonte de energia / João Sales de Souza Filho. — Campina Grande, 2008.

96f. : il. Color.

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

Referências.

Orientadores: Dr. Hervé Michel Laborde e Dr. Kepler Borges França (Ph.D).

1. Hidrogênio. 2. Eletrolisador. 3. Energia Solar. I. Título.

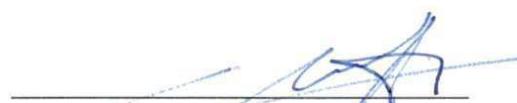
CDU – 661.96(043)

**CARACTERIZAÇÃO DE UM ELETROLISADOR BIPOLAR PARA PRODUÇÃO
DE HIDROGÊNIO VISANDO O USO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COMO
FONTE DE ENERGIA**

JOÃO SALES DE SOUZA FILHO

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 31/07/2008

BANCA EXAMINADORA



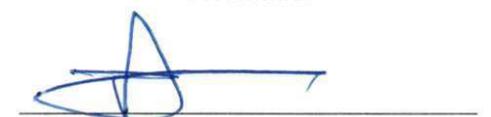
Prof. Dr. Hervé Michel Laborde

Orientador



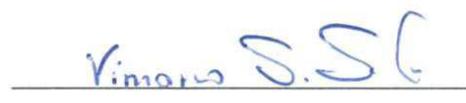
Prof. Kepler Borges França (Ph.D)

Orientador



Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Examinador



Prof. Dr. Vimário Simões Silva

Examinador (Externo)

CAMPINA GRANDE – PB

AGOSTO DE 2008

DEDICATÓRIA

“Dedico esta dissertação a minha querida mãe Zulmira de Andrade Sales, que ao longo da vida se mostrou ser uma grande mulher, sabendo sempre orientar e mostrar os caminhos que os seus três filhos devem sempre trilhar para conquistar um espaço entre os homens, caminhos estes que foram trilhados com honestidade, caráter, humildade e muita força de vontade. Serei sempre grato e te amarei por toda minha vida minha querida mãe”

AGRADECIMENTOS

A Deus por mais uma conquista de vida.

Ao professor Kepler Borges França, pela orientação, paciência no desenvolvimento deste trabalho e apoio por meus 5 anos de atividades no LABDES.

Ao professor Hervé Michel Laborde, pela orientação, apoio, paciência e incentivo durante os 5 anos de orientação (Julho de 2003 a Julho de 2008) nas minhas atividades acadêmicas: (3 anos como orientador do PIBIC, orientador na Monografia de curso e 2 anos como orientador no Mestrado).

Aos meus amigos Sérgio Gusmão e Jorge pela colaboração e sugestões nos equipamentos necessários para prática experimental.

A todos os alunos e servidores que fazem parte do LABDES.

A coordenação da Pós Graduação em Eng. Química, o professor Luis e Maricé P. da Silva, pelo apoio e dedicação aos alunos da Pós Graduação.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Aos meus pais, irmãos e sobrinhos por imenso apoio e carinho.

A minha querida noiva, Vibérica G. Costa que sempre passou o seu apoio, paciência e orientação em todos os momentos.

RESUMO

CARACTERIZAÇÃO DE UM ELETROLISADOR BIPOLAR PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VISANDO O USO DE PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COMO FONTE DE ENERGIA

João Sales de Souza Filho

O hidrogênio surgiu como uma fonte de energia renovável não poluente, que possivelmente substituirá os combustíveis fósseis. Nesse sentido, este trabalho visa estudar o desempenho de um eletrolisador bipolar para produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água, fazendo uso da energia elétrica convencional e energia solar fotovoltaica. O eletrolisador é constituído de 47 células, usando como eletrólito uma solução de KOH, e foi testado inicialmente com a energia elétrica convencional. Observou-se que o sistema teve seu funcionamento ótimo com uma corrente de 42,5 A, e uma tensão de 96,6 V. Isto corresponde a uma potência de 4,10 kW e uma vazão de 0,763 m³/h de hidrogênio. A energia consumida é de 5,37 kWh/m³ de hidrogênio, o que necessitaria de um sistema de energia com 64 painéis que forneceria uma vazão máxima de 0,012 m³/h de hidrogênio por painel. Também foram realizados experimentos com diversas configurações de painéis fotovoltaicos para avaliar o desempenho do eletrolisador. Com 6 painéis conectados em série, a mínima produção de hidrogênio foi obtida com uma tensão de 82,8 V e uma corrente de 1,1 A. Uma máxima produção de hidrogênio de 0,068 m³/h é obtida com uma configuração de 15 painéis solares em série, gerando uma tensão de 90,0 V e uma corrente de 4,49 A.

Palavras-chave: Hidrogênio, Eletrolisador e Energia Solar.

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF A BIPOLAR ELECTROLYSER FOR THE HYDROGEN PRODUCTION USING PHOTOVOLTAIC PANELS AS ENERGY SOURCE

João Sales de Souza Filho

Hydrogen emerges as a clean renewable energy source that will replace fossil fuels. In this way, this work studies the performance of a bipolar electrolyser to produce hydrogen from the water electrolysis, using conventional electricity and photovoltaic solar energy. The electrolyser is constituted of 47 cells working with a KOH solution electrolyte. First, the electrolyser was tested with conventional electricity and showed its best production at a current of 42.5 A and a tension of 96.6 V. This corresponds to a power of 4.10 kW with a hydrogen flow rate of 0.763 m³/h, meaning a energy consumption of 5.67 kWh/m³ which would need 64 photovoltaic panels at a maximum flow rate of 0.012 m³/h.panel. In the second part, the electrolyser is tested with several configurations of photovoltaic panels. With 6 panels connected in series, a minimum hydrogen production is obtained with a tension of 82.8 V and a current of 1,1 A. A maximum hydrogen production of 0,068 m³/h is reached with a solar configuration of 15 panels in series, giving a tension of 90.0 V and a current of 4.49 A.

Keywords: Hydrogen, Water Electrolyser, Solar energy.

SUMÁRIO

SUMÁRIO	i
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELA	vi
LISTA DE QUADRO	viii
LISTA DE FOTO	viii
SIMBOLOGIA	ix
1 – INTRODUÇÃO	01
1.1 – Objetivo Geral.....	02
1.2 – Objetivos Específicos.....	02
2 – FUNDAMENTOS TEÓRICOS	03
2.1 – Hidrogênio	03
2.2 – Perspectiva Energética do Hidrogênio.....	04
2.3 – Aplicações do Hidrogênio como Combustível.....	09
2.4 – Produção do Hidrogênio: Eletrólise da Água	11
2.5 – Tipos de Eletrolisador	12
2.6 – Reações na Eletrólise da Água.....	12
2.7 – Processos Eletrolíticos.....	13
2.8 – Tensão na Célula Eletrolítica	14
2.9 – Energia Solar	15
2.10 – Painéis Fotovoltaicos.....	16
3 – EXPERIMENTAL	19
3.1 – Material utilizado	19
3.1.1 – Material	19
3.1.2 – Produtos Químicos.....	19
3.1.3 – Sistema Eletrolítico (Eletrolisador Bipolar).....	20

3.2 – Processo Experimental para Determinar o Fluxo do Gás	22
3.2.1 – Configurações dos Painéis	23
3.2.2 – Metodologia.....	24
4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES	26
4.1 – Comportamento do Reator Eletrolítico Utilizando Energia Elétrica	26
4.2 – Medição da Vazão dos Gases Oxigênio e Hidrogênio Utilizando como Fonte de Energia a Rede Elétrica.....	30
4.3 – Comportamento da Corrente, Tensão e Potência do Reator Eletrolítico para Fluxos Diferentes de Produção do Hidrogênio Utilizando Energia Elétrica Convencional.....	32
4.4 – Cálculos da Produção do Hidrogênio Utilizando como Fonte de Energia a Rede Elétrica.....	64
4.5 – Cálculo da Eficiência das Células Eletrolíticas para um Reator Utilizando Energia Elétrica.....	65
4.6 – Relação da Vazão da Produção de Hidrogênio em Relação a Corrente, Tensão, Potência do Eletrolisador e Energia Consumida Utilizando Energia Elétrica Convencional.....	66
4.7 - Projeto de um Sistema de Fornecimento de Energia Solar para a Produção de Hidrogênio Eletrolítico.....	71
4.8 – Comportamento da Tensão, Corrente e Potência do Reator Eletrolítico Utilizando Painéis Fotovoltaicos como Fonte de Energia.....	73
4.9 – Cálculo da Eficiência das Células Eletrolíticas Eletrolíticas para um Reator Utilizando Energia Solar.....	77
4.10 – Medição da Vazão dos Gases Oxigênio e Hidrogênio Utilizando como Fonte de Energia Painéis Fotovoltaicos.....	78
4.11 – Cálculos da Produção do Hidrogênio Utilizando como Fonte de Energia Painéis Fotovoltaicos.....	79
4.12 - Relação da Vazão da Produção de Hidrogênio em Relação a Corrente, Tensão, Potência do Eletrolisador e Energia Consumida Utilizando Energia Solar.....	80

4.13 - Sistema de Fornecimento de Energia Solar para a Produção de Hidrogênio Eletrolítico.....	85
4.14 – Comportamento do Eletrolisador em Função da Tensão e Corrente do Reator Eletrolítico.....	88
5 – CONCLUSÕES90
6 – PERSPECTIVAS.....	.92
7 – REFERÊNCIAS93

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Transição Global dos Sistemas de Energia.....	06
Figura 2.2 – 1) Configuração Unipolar e 2) Configuração Bipolar do Eletrolisador	12
Figura 3.1 – Fluxograma do Processo Eletrolítico.....	21
Figura 4.1 - Comportamento do reator eletrolítico em função da pressão ao longo do tempo.....	27
Figura 4.2 - Comportamento da Tensão do Reator Eletrolítico em Função do Tempo.....	28
Figura 4.3 - Comportamento da Corrente em Função do Tempo.....	29
Figura 4.4 - Comportamento da Potência em Função do Tempo.....	30
Figura 4.5 – Curva de Calibração para Diversas Vazões em Função da Corrente.....	31
Figura 4.6 - Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,22 m ³ /h de H ₂	34
Figura 4.7.a - Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,35 m ³ /h de H ₂	35
Figura 4.7.b - Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,35 m ³ /h de H ₂	36

Figura 4.8.a - Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,51 m ³ /h de H ₂	37
Figura 4.8.b - Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,51 m ³ /h de H ₂	38
Figura 4.9.a – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,568 m ³ /h de H ₂	39
Figura 4.9.b – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,568 m ³ /h de H ₂	40
Figura 4.10.a – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,623 m ³ /h de H ₂	41
Figura 4.10.b – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,623 m ³ /h de H ₂	42
Figura 4.11.a – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,736 m ³ /h de H ₂	43
Figura 4.11.b – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,736 m ³ /h de H ₂	44
Figura 4.12.a – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,763 m ³ /h de H ₂	45
Figura 4.12.b – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,763 m ³ /h de H ₂	46
Figura 4.13.a – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,91 m ³ /h de H ₂	47
Figura 4.13.b – Comportamento da Corrente em Função do Tempo para uma Vazão de 0,91 m ³ /h de H ₂	48
Figura 4.14 – Comportamento da Tensão do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,35 m ³ /h de H ₂	50
Figura 4.15 – Comportamento da Tensão do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,51 m ³ /h de H ₂	51
Figura 4.16 – Comportamento da Tensão do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,568 m ³ /h de H ₂	52

Figura 4.17 – Comportamento da Tensão do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,623 m ³ /h de H ₂	53
Figura 4.18 – Comportamento da Tensão do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,736 m ³ /h de H ₂	54
Figura 4.19 – Comportamento da Tensão do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,763 m ³ /h de H ₂	55
Figura 4.20 – Comportamento da Tensão do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,91 m ³ /h de H ₂	56
Figura 4.21 – Comportamento da Potência do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,22 m ³ /h de H ₂	57
Figura 4.22 – Comportamento da Potência do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,35 m ³ /h de H ₂	58
Figura 4.23 – Comportamento da Potência do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,51 m ³ /h de H ₂	59
Figura 4.24 – Comportamento da Potência do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,568 m ³ /h de H ₂	60
Figura 4.25 – Comportamento da Potência do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,623 m ³ /h de H ₂	61
Figura 4.26 – Comportamento da Potência do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,736 m ³ /h de H ₂	62
Figura 4.27 – Comportamento da Potência do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,763 m ³ /h de H ₂	63
Figura 4.28 – Comportamento da Potência do Reator Eletrolítico em Função do Tempo para uma Vazão de 0,91 m ³ /h de H ₂	64
Figura 4.29 – Comportamento da Corrente do Reator em Função de Diversas Vazões de Hidrogênio.....	68
Figura 4.30 – Comportamento da Tensão do Reator em Função de Diversas Vazões de Hidrogênio.....	69
Figura 4.31 – Comportamento da Potência do Reator em Função de Diversas Vazões de Hidrogênio.....	70

Figura 4.32 – Comportamento da Energia Consumida no Reator em Função de Diversas Vazões de Hidrogênio.....	71
Figura 4.33 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para diversas configuração de painéis solares em série.....	75
Figura 4.34 – Comportamento da corrente elétrica do reator eletrolítico em função do tempo para diversas configuração de painéis solares em série.....	76
Figura 4.35 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para diversas configuração de painéis solares em série.....	77
Figura 4.36 – Curva de Calibração da Vazão em Função da Corrente.....	79
Figura 4.37 - Comportamento da Corrente do Reator em Função de Diversas Vazões de Hidrogênio.....	82
Figura 4.38 – Comportamento da Tensão do Reator em Função de Diversas Vazões de Hidrogênio.....	83
Figura 4.39 – Comportamento da Potência do Reator em Função de Diversas Vazões de Hidrogênio.....	84
Figura 4.40 – Comportamento da Energia Consumida no Reator em Função de Diversas Vazões de Hidrogênio.....	85
Figura 4.41 - Comportamento da Vazão por Unidade de Pannel em Função do Número de Painéis Solares.....	87
Figura 4.42 – Comportamento da Corrente versus a Tensão do Eletrolisador.....	89

LISTA DE TABELA

Tabela 4.1 – Valores experimentais da curva de calibração das vazões em função da corrente.....	31
Tabela 4.2 - Consumo de Hidrogênio em relação à Corrente do Reator Eletrolítico.....	33
Tabela 4.3 - Comportamento da Corrente e a quantidade de eletricidade gerada.....	33
Tabela 4.4 – Consumo do Hidrogênio em Relação à Tensão do Reator Eletrolítico.....	49
Tabela 4.5 – Consumo de Hidrogênio em Relação à Potência do Reator Eletrolítico....	56

Tabela 4.6 – Vazão do Hidrogênio.....	65
Tabela 4.7 - Tensão Aplicada ao Reator, Tensão em cada Célula e Eficiência das Células.....	66
Tabela 4.8 – Consumo de Hidrogênio em Relação às Variáveis Corrente, Tensão e Potência Elétrica do Reator Eletrolítico e Energia Consumida.....	67
Tabela 4.9 – Valores de Corrente, Tensão do Reator Eletrolítico e o Número de Painéis Necessários Para Fornecer Energia.....	72
Tabela 4.10 - Valores da Tensão do Reator em Função do Tempo para Diversas Configurações de Painéis.....	74
Tabela 4.11 - Valores de Corrente em Função do Tempo para Diversas Configurações de Painéis.....	75
Tabela 4.12 - Valores da Potência do Reator em Função do Tempo para Diversas Configurações de Painéis.....	76
Tabela 4.13 - Tensão Aplicada ao Reator, Tensão em cada Célula e Eficiência das células.....	78
Tabela 4.14 - Valores Experimentais de Corrente, Tempo do Experimento e Volume Consumido.....	79
Tabela 4.15 – Vazão do Hidrogênio.....	80
Tabela 4.16 - Consumo de Hidrogênio em Relação às Variáveis Corrente, Tensão, Potência Elétrica do Reator Eletrolítico e Energia Consumida.....	81
Tabela 4.17 - Valores de Corrente, Tensão do Reator Eletrolítico, Energia Consumida e o Número de Painéis Necessários para Fornecer Energia.....	86
Tabela 4.18 - Valores de Corrente e Tensão, Fornecidos por Painéis solares.....	88

LISTA DE QUADRO

Quadro 2.1 – A Relação Atômica Hidrogênio / Carbono.....	07
----------------------------------------------------------	----

LISTA DE FOTO

Foto 2.1 – Célula Fotovoltaica.....	16
Foto 3.1 – Eletrolisador Bipolar do LABDES.....	20
Foto 3.2 – Sistema Experimental Utilizado para Determinar o Fluxo de Gás.....	23

SIMBOLOGIA

- A – Unidade de corrente
- aq – Substância em meio líquido
- C – Coulomb
- °C – Unidade de temperatura
- é – Elétrons transferidos na reação
- E – Consumo de energia durante o experimento
- F – Constante de Faraday
- g – Estado gasoso de uma substância
- Ge - Símbolo do elemento químico do germânio
- H – Símbolo do elemento químico do hidrogênio
- H₂ – Símbolo do hidrogênio molecular
- l – Estado líquido de uma substância
- m³ – Metro cúbico
- n – Número de elétrons transferido na reação
- η – Eficiência da célula eletrolítica
- O – Símbolo do elemento químico do oxigênio
- O₂ - Símbolo do oxigênio molecular
- P – Potência do reator eletrolítico
- PV – Painéis fotovoltaicos
- ppm – Partes por milhão
- Si - Símbolo do elemento químico do Silício
- V – Voltagem do reator eletrolítico
- W – unidade de potência

1. INTRODUÇÃO

A sociedade moderna enfrenta sérias dificuldades devido a diversos fatores. Dois problemas relacionados, que podem ser facilmente identificados, são de crucial importância para o futuro da sociedade: o esgotamento dos combustíveis fósseis e a degradação do meio ambiente. Estes problemas estão relacionados com o uso indiscriminado de combustíveis fósseis para produzir energia. Em particular, o uso desses combustíveis em um número cada vez maior de veículos que transitam em grandes centros urbanos é uma das maiores preocupações atuais. A solução destes problemas é, em princípio, simples: desenvolver energias alternativas não poluentes (Gonzalez, 1999).

O hidrogênio surge como um novo regime energético para o mundo, pois trata-se do elemento mais leve e mais abundante no universo. O hidrogênio não é encontrado de forma livre na natureza. Mas ele pode ser obtido de várias maneiras, através de fontes convencionais ou renováveis como o vento, água, luz solar e biomassa.

Apesar de o hidrogênio ser uma grande fonte de energia, a idéia do seu uso como combustível passou a ser cogitada a partir da década de 1970, com a crise provocada pelo aumento do petróleo. Esta crise e os níveis alarmantes de poluição ambiental mobilizaram a comunidade internacional, trazendo à tona a conversão eletroquímica de energia, com o uso de células a combustível (Appleby *et al*, 1993).

As células combustíveis providas de hidrogênio produzem eletricidade. Apesar de ainda terem um custo elevado, elas tem um potencial de fornecer energia em grandes proporções.

A utilização de fontes renováveis visa o desenvolvimento e domínio de novas tecnologias energéticas que viriam a substituir progressivamente as atuais fontes poluentes e não renováveis.

O Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) vem estudando e desenvolvendo um sistema de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água. Há mais dez anos que o LABDES desenvolve pesquisas com hidrogênio com os seguintes trabalhos: Avaliação dos parâmetros de combustão do H_2/O_2 obtidos a partir de um reator eletroquímico bipolar

(Alves, 1992), Sistema de corte e solda de metais não-ferrosos (Andrade, 1993), Aquecimento de ambiente (Sobrinho, 1995), Fornos de olaria (Pereira, 1999 e 2005).

1.1. OBJETIVO GERAL

O presente trabalho tem como objetivo analisar as variáveis do reator utilizando energia elétrica convencional para projetar um arranjo de painéis eficiente ao seu desempenho. Analisar as diversas configurações de painéis fotovoltaicos utilizados para a produção de hidrogênio eletrolítico.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1- Averiguar o comportamento do reator em função da pressão;
- 2- Caracterização do reator eletrolítico para tensão, corrente, potência e energia em função da produção de hidrogênio utilizando energia elétrica convencional;
- 3- Estudar o comportamento da tensão, corrente, potência e energia do reator eletrolítico e projetar o número de painéis fotovoltaicos para o reator;
- 4- Caracterização do reator eletrolítico para tensão, corrente, potência e energia em função da produção de hidrogênio utilizando energia solar de painéis fotovoltaicos;
- 5- Estudar o comportamento da tensão, corrente, potência e energia do reator eletrolítico em função do número de painéis fotovoltaicos utilizados, para produção mínima e máxima de hidrogênio.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1. HIDROGÊNIO

O hidrogênio é o elemento mais simples e abundante do universo, com cada átomo constituído de apenas um próton e um elétron (Lee, 1996 e Amos, 1998).

O hidrogênio está presente em qualquer lugar, mas é difícil de encontrar na Terra como elemento isolado. Isso porque o campo gravitacional da terra é pequeno demais para segurar um elemento tão leve, embora algum H₂ seja encontrado em gases vulcânicos. Em contrapartida, o hidrogênio é o décimo elemento mais abundante na crosta terrestre (1.520 ppm ou 1,152 % em peso). Encontra-se combinado com oxigênio em água (oceanos), com carbono em hidrocarbonetos (combustíveis tais como carvão, petróleo e gás natural) e em plantas, animais e outras formas de vida. O hidrogênio ligado em água e formas orgânicas conta por mais de 70 % da crosta terrestre. O hidrogênio forma mais compostos que qualquer outro elemento (Lee, 1996).

O hidrogênio não é uma fonte primária de energia, não sendo encontrado em minas ou jazidas, nem produzido, em grandes quantidades, através de processos naturais e espontâneos. Por outro lado, pode ser gerado, por meio de um grande número de processos artificiais envolvendo diversas fontes primárias, tais como: carvão, petróleo, energia solar, eólica, nuclear, etc (Pereira, 2005).

A reforma a vapor do metano é o mais comum e o método menos caro de produzir hidrogênio hoje em dia. Envolve o aquecimento do metano (CH₄), do qual o gás natural é principalmente constituído, num reator catalítico. Cerca de 48 % do hidrogênio produzido mundialmente é proveniente deste processo (College of the Desert, 2001).

O carvão pode também ser reformado para produzir hidrogênio, através da gasificação. O hidrogênio pode também ser extraído do petróleo, da gasolina e do metanol mediante o processo de reforma. Este processo de oxidação parcial, imitação do

processo da reforma, é um processo comercial que necessita o uso de oxigênio puro, e é menos eficiente e emite mais gás carbônico do que a reforma a vapor do metano (College of the Desert, 2001).

A biomassa pode também ser usada para produzir hidrogênio, de duas maneiras diferentes. Pode ser gasificada como o carvão, ou pode ser feita mediante pirólise, um processo no qual a biomassa é decomposta pelo calor para formar um óleo que é então reformado com vapor. Os dois procedimentos são relativamente sensíveis ao preço e tipo de biomassa e a distância que ela precisa ser transportada, embora, se resíduos de biomassa são disponíveis, o preço do hidrogênio torna-se competitivo (College of the Desert, 2001).

O método mais promissor de produção de hidrogênio é a eletrólise que envolve o uso de eletricidade para decompor a água em hidrogênio e oxigênio. Atualmente, aproximadamente 4 % do hidrogênio são produzidos pela eletrólise da água. Este processo é econômico para produzir hidrogênio extremamente puro em pequenas quantidades. Mas, a eletrólise fica com o custo maior, devido principalmente a eletricidade que custa atualmente em média 3 a 5 vezes mais do que um combustível fóssil. (College of the Desert, 2001).

Se a eletrólise for realizada a partir de energia renovável, o resultado é um ciclo de hidrogênio muito limpo para o meio ambiente. Durante a última década, sistemas de eletrólise de água funcionando com energia solar e eólica têm sido demonstrados em vários lugares na Finlândia, na Alemanha (Barthels, 1998), na Itália (Galli, 1997), na Arábia Saudita, na Espanha, na Suíça (Hollmuller, 2000) e nos Estados Unidos (Hollenberg, 1995, Lehman, 1997).

2.2. PERSPECTIVA ENERGÉTICA DO HIDROGÊNIO

A ilha Islândia anunciou em 1999 a sua intenção de tornar-se a primeira sociedade do hidrogênio no mundo. A Islândia, que gastou 815 milhões de dólares – um

quarto de seu déficit comercial – na importação de petróleo em 2000, juntou as suas forças com a Shell Hydrogen, a DaimlerChrysler e a Norsk Hydro numa iniciativa multi-milionária de converter todos os ônibus, carros, e barcos em veículos funcionando com células a combustível movidas a hidrogênio num intervalo de 30 a 40 anos. A ilha espera tornar-se a “Kuwait do norte”, exportando hidrogênio para a Europa e outros países. (Arnason, 2000).

Quando a produção do hidrogênio for especificamente da eletrólise da água, assim teremos uma energia renovável, pois a produção atual do hidrogênio é derivada principalmente dos combustíveis fósseis, liberam indiretamente emissões do dióxido de carbono. Quando a produção de hidrogênio estiver em grande escala e um valor comercial competitivo com o petróleo, podemos então sair da dependência dos combustíveis fósseis, que são importados predominantes das regiões instáveis devidos a suas políticas. A consciência está crescendo também visto que o hidrogênio gerado da energia solar usando a eletrólise da água (solar-hidrogênio), é a alternativa a mais promissora para o combustível do futuro (Nowotny *et al*, 2007).

A Figura 2.1 apresentação a porcentagem da utilização dos combustíveis desde o ano de 1850, bem como a projeção energética até o ano de 2150, onde se observa o declínio das fontes energéticas sólidas e líquidas e a ascensão das fontes gasosas (Dunn, 2002).

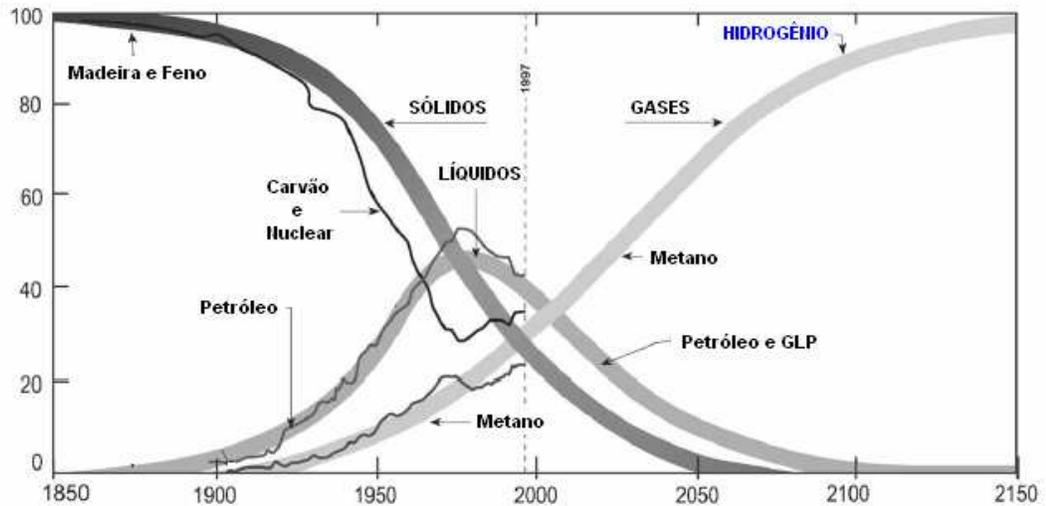
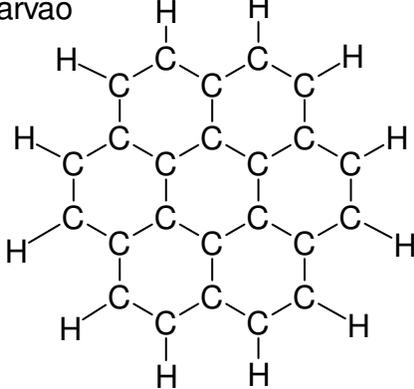
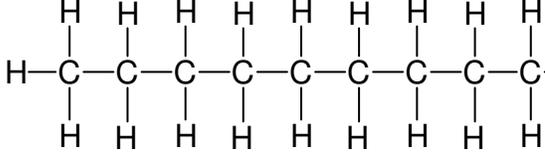
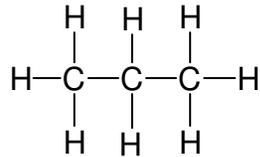
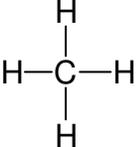


Figura 2.1 - Transição global dos sistemas de energia (Dunn, 2002)

A passagem de combustíveis sólidos para líquidos para gases envolve uma outra transição: o processo menos visível de “decarbonilação”. Da madeira para o carvão, petróleo, gás natural, a relação de átomos de hidrogênio (H) para átomos de carbono (C) nas moléculas de cada fonte aumentou. Passou de 1 : 3 a 1 : 10 (madeira), para 1 : 2 (carvão), 2 : 1 (petróleo) e 4 : 1 (gás natural) (quadro 2.1). De 1860 até 1990, a relação H : C foi multiplicada por 6. O fato mais importante, surpreendente e feliz a ser enfatizado a partir dos estudos energéticos é que, durante os últimos 200 anos, o mundo tem progressivamente favorecido átomos de hidrogênio no lugar de átomos de carbono. A tendência da decarbonilação é no coração da evolução do sistema energético (Dunn, 2002).

<p>Carvão</p>  <p>Coroas H : C = 0,5 : 1</p>	<p>Petróleo mineral</p>  <p>Decano H : C = 2 : 1</p>  <p>Propano (GLP) H : C = 4 : 1,5</p>
<p>Gás natural</p>  <p>Metano H : C = 4 : 1</p>	<p>Hidrogênio</p>  <p>H : C = ∞</p>

Quadro 2.1 - A relação atômica hidrogênio / carbono (Dunn, 2002).

O Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) vem estudando e desenvolvendo um sistema de produção de hidrogênio a partir da eletrólise da água. O hidrogênio eletrolítico assim produzido é imediatamente usado como combustível, avaliação dos parâmetros de combustão do H_2/O_2 obtidos a partir de um reator eletroquímico bipolar (Alves, 1992), em sistema de corte e solda de metais não-ferrosos (Andrade, 1993), em aquecimento de ambiente (Sobrinho, 1995), em fornos de olaria (Pereira, 1999 e 2005).

Em uma região do porte e com concentração de veículos presentes na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), a emissão e concentração de poluentes no ar são inevitáveis. Levando em consideração a necessidade de conservação de energia e eficiência da conversão energética, a redução de emissão de poluentes e o conforto do público, o governo brasileiro por meio do Ministério de Minas e Energia (MME) e a

Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos EMTU/SP, decidiram apoiar um programa para estimular o desenvolvimento e a utilização de ônibus com célula a combustível hidrogênio. O objetivo do projeto é reduzir as emissões de gases poluentes pela introdução de uma nova fonte de energia e tecnologia de propulsão para ônibus urbanos, o combustível hidrogênio (Sulaiman *et al*, 2004).

A Arábia Saudita tem seu clima seco com altas temperaturas e o país encontra-se com necessidade de aproveitar tanta energia solar disponível. O hidrogênio e a energia solar são grandes fontes de energia para o futuro, no qual já encontra-se uma planta da energia solar, produzindo 350 kW de potência que vêm dos painéis fotovoltaicos, no qual encontra-se acoplado a um eletrolisador de água, que com a eletricidade solar produz 463 m³ do hidrogênio por dia. Entretanto, as vantagens econômicas previstas a ser considerada neste papel é a geração de eletricidade com os painéis fotovoltaicos, e também pela produção do hidrogênio devido a eletrólise da água (Sulaiman *et al*, 2004).

No presente momento há dois sistemas experimentais de energia renovável em desenvolvimento no México. O primeiro é em um local grande, um sistema conectado a painéis solares, células combustíveis e hidrogênio produzindo 10 kW de energia solar, que está sendo realizado em um centro de pesquisa de energia e o segundo é um sistema de produção de hidrogênio por meio de energia eólica que gera 10 kW que está sendo realizado na universidade politécnica de Chiapas, para produzir energia e bombear água. Estes tipos de sistemas de energia renovável são ajustados a fim de avaliar os aspectos técnicos, econômicos, e ambientais de tecnologias diferentes da energia renovável. As principais atividades desta pesquisa no México são concentradas na produção do hidrogênio pela eletrólise, produção do bio-hidrogênio usando os micro-organismos, armazenamento do hidrogênio nos nano-materiais e sua utilização (Sebastian *et al*, 2007).

Tem-se que 80% da demanda de energia do mundo são fornecidos por combustíveis fósseis. Devido a isto, foi proposto um programa de geração eletrolítica do hidrogênio para o Brasil com o auxílio dos painéis fotovoltaicos. O hidrogênio gerado servirá como fonte de energia e substituirá gradativamente o combustível fóssil. O local

proposto para a instalação do projeto é na região nordeste do Brasil, uma região com grande incidência da radiação solar. Foi observado que se nenhum hidrogênio estiver introduzido e o combustível fóssil permanecer disponível durante todo o século XXI, a poluição aumentará em torno de 19 vezes até o ano de 2060. Já a introdução do hidrogênio reduzirá a poluição em aproximadamente 60% até o ano 2055 (Lutero *et al.*, 2001).

2.3. APLICAÇÕES DO HIDROGÊNIO COMO COMBUSTÍVEL

Atualmente, os combustíveis fósseis correspondem a 88% da demanda mundial de energia, dentre esses o petróleo é cerca de 38%, o carbono 30%, e gás natural 20%. Já a energia proveniente de combustíveis não fósseis corresponde a 12%, sendo 7% hidroeletricidade e 5% nuclear. Sabe-se também, que as reservas de petróleo e gás natural devem durar várias décadas e as de carbono, vários séculos. Apesar dessa situação aparentemente sustentável, o desenvolvimento de novos sistemas energéticos alternativos está bastante intensificado (Avaca *et al.*, 2002). Os principais motivos para essa preocupação são:

- a) o aumento exagerado do consumo destas fontes convencionais de energia;
- b) a distribuição não homogênea dos recursos energéticos
- c) a produção de contaminantes pelos combustíveis fósseis (emissão de CO₂) e os problemas ambientais correlacionados como chuva ácida, efeito estufa, derramamento de petróleo.

Diversas formas de energia não-convencionais e renováveis estão sendo consideradas como possíveis fontes energéticas para suprir essa demanda crescente. Dentre elas podemos destacar a energia nuclear (fissão), a termonuclear (fusão), a solar, eólica, hidráulica, geotérmica. Algumas dessas fontes energéticas apresentam algumas desvantagens como ser intermitentes (solar, eólica); estar localidades fixas (hidráulica,

geotérmica, biomassa); e além disso não podem ser usadas diretamente como combustível para transporte particular ou público (Avaca *et al.*, 2002).

Estes pré-requisitos podem ser muito bem atendidos pelo hidrogênio, por este poder ser armazenado, transportado, não contaminar, independente de fontes primárias, renovável e também pode ser utilizado de várias formas diferentes (Avaca *et al.*, 2002).

A maior aplicação energética atual do Hidrogênio é o programa espacial norte-americano; em que ele é usado como combustível primário dos foguetes e fonte de energia elétrica durante as missões através de células combustíveis. Outro campo de utilização em grande escala são as centrais elétricas funcionando com células combustíveis, tendo como desvantagem a contaminação de catalisadores pelas impurezas presentes no hidrogênio obtido a partir do metano (Wendt *et al.*, 2000).

As pesquisas visando à utilização de hidrogênio estão voltadas para a aplicação em turbinas a vapor para produção de energia elétrica. Nesses sistemas, a tecnologia é derivada dos foguetes, em que o hidrogênio juntamente com oxigênio se combinam por combustão a altas temperaturas e pressão, gerando grande quantidade de calor. Com a adição de água no reator o vapor é gerado e este gira uma turbina e a energia elétrica é produzida de forma convencional (Wendt *et al.*, 2002).

O uso de hidrogênio em veículos tem alguns problemas que devem ser considerados. O primeiro é o armazenamento do hidrogênio que será usado como combustível. O H₂ pode ser transportado de formas diferentes:

- Como gás comprimido em cilindros
- Na forma líquida em tanques criogênicos

O hidrogênio armazenado em cilindros é muito pesado e ocupa grande volume; o líquido sofre evaporação intensa, e as células combustíveis são caras (Wendt *et al.*, 2002).

O hidrogênio necessário para a combustão pode ser gerado no veículo usando um reformador alimentado por um combustível líquido como a gasolina ou álcool. Esses sistemas já estão disponíveis no mercado, mas apresentam um problema de pureza do gás gerado (Wendt *et al.*, 2002).

O uso de células combustíveis como gerador de energia para transporte vem sendo estudado por várias empresas desde a década de 80. O primeiro automóvel movido à célula combustível foi lançado nos Estados Unidos em 1991 (Wendt *et al.*, 2002).

2.4. PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO: ELETRÓLISE DA ÁGUA

É uma reação de decomposição de substâncias por efeito de uma corrente elétrica. Tal reação se processa a temperatura e pressão constantes em um reator denominado célula eletrolítica. Esta é uma reação “força”, pois só se realiza mediante o consumo de trabalho elétrico útil, que é então armazenado na forma de energia livre de Gibbs (Pereira, 2005).

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 água. 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 (Pereira, 2005).

Na prática, a célula eletrolítica é mais complicada, contendo vários componentes que lhe permitem trabalhar eficiente e economicamente. A reação de decomposição da água é uma reação endotérmica, representada da seguinte forma:



$$\Delta H = 58,15 \text{ kcal/mol a } 150^\circ\text{C} \text{ (Bockris, 1975).}$$

2.5. TIPOS DE ELETROLISADORES

Existem dois tipos de configuração em relação aos eletrodos, configuração unipolar ou bipolar.

Na configuração unipolar, conforme mostra a Figura 2.2, os eletrodos de mesma polaridade da célula eletrolítica são associados eletricamente em paralelo, fazendo com que a voltagem total da célula seja a mesma de um par de célula, aproximadamente 2,0 volts (Pereira, 2005).

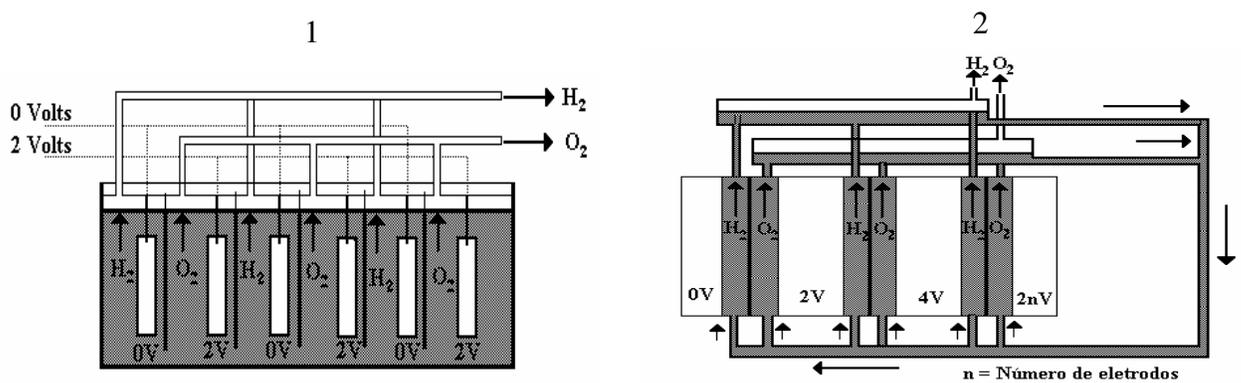


Figura 2.2 - 1) Configuração unipolar e 2) configuração bipolar do eletrolisador (Pereira, 2005).

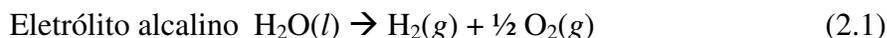
No eletrolisador bipolar, conforme mostra a configuração 2 da Figura 2.2, os eletrodos são ligados eletricamente em série. A voltagem total da célula é dada pelo número de células multiplicado pela voltagem de uma célula. Desta forma tem-se uma alta voltagem e uma baixa amperagem (Pereira, 2005).

2.6. REAÇÕES NA ELETRÓLISE DA ÁGUA

Aplicando uma diferença de potencial nos eletrodos do reator eletrolítico é gerado assim um campo elétrico no meio eletrolítico, produzindo um fluxo iônico

direcionado; os íons de carga positiva se dirigem para o cátodo e os negativos para o ânodo (Pereira, 2005).

Para os eletrólitos alcalinos, a reação é a seguinte:

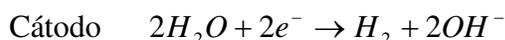


2.7. PROCESSOS ELETROLÍTICOS

Industrialmente existem três versões para o processo de ruptura eletrolítica da molécula de água para produção de hidrogênio com alto grau de pureza:

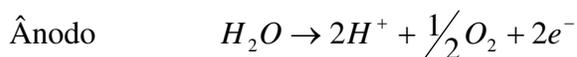
- a) Eletrólise da água com eletrólitos alcalinos usando um diafragma poroso para separar os compartimentos catódico e anódico, evitando assim a mistura do hidrogênio com o oxigênio (Kreuter, 2002).

As reações que ocorrem nos eletrodos são:



- b) Eletrólise da água com membrana ou eletrólito polimérico sólido onde se utiliza uma membrana de troca iônica, condutora de prótons que atua como eletrólito e como separador de eletrodos porosos, simultaneamente. A água a ser dissociada não precisa de um eletrólito dissolvido para aumentar sua condutividade, sendo colocada no sistema no lado anódico somente (Kreuter, 2002).

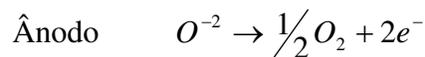
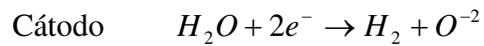
As reações eletrolíticas são:





c) Eletrólise do vapor de água a alta temperatura (700 – 1000°C), utilizando uma cerâmica condutora de íons O^{-2} (tal como ZrO_2 cúbico estabilizado por Y_2O_3 , MgO ou CaO). A água que será dissociada na célula é introduzida no lado catódico, na forma de vapor. Desta forma a quebra eletrolítica da água gera uma mistura de hidrogênio com vapor de água. Os íons O^{-2} são levados através do material cerâmico em direção ao ânodo, onde são descarregados para produzir o oxigênio (Kreuter, 2002).

As reações neste caso são:



2.8. TENSÃO NA CÉLULA ELETROLÍTICA

A aplicação da teoria termodinâmica ao processo conduz aos seguintes resultados:

$$E_1 = \frac{-\Delta G}{n.F}$$

Voltagem mínima para o desenvolvimento das reações (1,23 volts).

$$E_2 = \frac{\Delta H}{n.F}$$

Voltagem termoneutra, onde não há troca de calor entre o sistema químico e o meio ambiente (1,47 volts) onde n é número de elétrons transferido na reação, F , a constante de Faraday (96.489 Coulombs/equivalente) e ΔH , a variação da entalpia da reação (Pereira, 2005).

2.9. ENERGIA SOLAR

A energia solar é uma fonte inesgotável e gratuita. Sendo assim, podendo solucionar parte dos problemas de escassez de energia que abala o mundo. Nos países subdesenvolvidos, como o Brasil, esta fonte de energia deve ser aproveitada ao máximo. Normalmente esses países apresentam elevadas extensões territoriais e estão situados em zonas tropicais, ou seja, dispõem de alta incidência de radiação, o que torna viável o desenvolvimento de tecnologias capazes de transformar a energia solar em energia térmica, elétrica, química, mecânica etc (Palz, 1981).

A conversão direta de energia solar em eletricidade tem sido objeto de estudo desde o fim do século XIX. O efeito fotoelétrico foi descoberto em 1890, quando Lenrich Hertz, testando a teoria eletromagnética da luz proposta por Maxwell, verificando a existência de ondas eletromagnéticas quando uma placa metálica era exposta à luz ultravioleta (Palz, 1981).

Em 1950, foi descoberto que certos materiais denominados de semicondutores tinham a propriedade de converter eletricidade quando expostos à luz, principalmente a luz solar (Palz, 1981).

Em 1954, nos Laboratórios de Bell Telephone, nos Estados Unidos, foram desenvolvidos pastilhas de silício, onde se viu que o silício tem uma eficiência de 10 vezes mais, do que as outras substâncias, na transformação de luz em eletricidade. Em 1955, em Phoenix, no Arizona, ocorreu a primeira apresentação pública de células fotovoltaicas para a geração de eletricidade (Palz, 1981).

Desde então, o silício mostrou ser o material mais barato e eficiente para a produção de eletricidade através do efeito fotovoltaico, vem sendo o elemento mais comercializado para a produção de painéis fotovoltaicos (Palz, 1981).

A transformação da radiação eletromagnética (a luz solar) em energia elétrica é feita por células fotovoltaicas, ou células solares (foto 2.1), que podem ser entendidas como dispositivos semicondutores que produzem uma corrente elétrica quando expostos à luz. Os semicondutores mais comuns são os formados por elementos do grupo IV da tabela periódica, em especial silício (Si) e germânio (Ge), submetidos á

dopagem (troca de alguns átomos da estrutura cristalina por átomos de outros elementos). Se a dopagem é feita com átomos pentavalentes, o cristal é do tipo N. Feita com átomos trivalentes, o cristal é do tipo P. Quando um cristal é unido a um P forma-se uma junção P-N e surge um campo elétrico na região da junção (Palz, 1981).

Quando a célula é exposta à luz (que, no nível atômico, atua como um fluxo de partículas chamadas fótons), parte dos elétrons do material iluminado absorve fótons e, essa energia extra, ‘escapa’ dos átomos. Os elétrons livres vagueiam pelo semicondutor até serem atraídos pelo campo elétrico existente na área de junção e, através de uma ligação externa, são levados para fora da célula, ficando disponíveis para uso (energia elétrica). A célula fotovoltaica não armazena energia elétrica, pois cada elétron que a deixa é substituído pelo retorno de outro (Palz, 1981).

2.10. PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

Os módulos fotovoltaicos, painéis fotovoltaicos (PV) são encontrados comercialmente nos tamanhos que variam entre 10 e 300 Watts. Um sistema fotovoltaico completo consiste de um painel ou um módulo conectado a um inversor que converte a eletricidade de corrente direta em corrente alternada que é compatível com o sistema da rede elétrica (McVeigh, 1979, Palz, 1981).



Foto 2.1 - Célula fotovoltaica.

As fotocélulas possuem os mais diversos empregos, tanto no campo espacial quanto no campo terrestre. No campo espacial possuem aplicação na geração de eletricidade para equipamentos lançados ao espaço, como os satélites. No campo terrestre é utilizada na geração de energia elétrica para: utilização em cerca elétrica; bombeamento d'água; refrigeração; iluminação; televisores; telefonia rural; recarga de baterias automotivas; acionamento de bombas de sistemas de dessalinização de águas, etc. Porém, seu uso ainda está limitado a regiões remotas e em pequenas escala. (McVeigh, 1979, Palz, 1981).

Os painéis fotovoltaicos operam a partir de células solares, a conversão da radiação solar ocorre entre dois eletrodos anexados num sistema líquido ou sólido, onde absorve a luz solar, onde gera a energia elétrica. Assim o material tem que ser de alta pureza e de alta perfeição cristalina (Goetzberger *et al.*, 2002).

O material de célula solar ideal: é constituído de material não tóxico; fácil para instalação em grandes áreas; uma ótima eficiência do painel fotovoltaico e longo tempo de estabilidade (Goetzberger *et al.*, 2002).

No futuro surgiram novas classes de materiais de células solares orgânicas, do ponto de vista global, isto pode ser considerado uma vantagem, de alta potência e baixo custo na eficiência da célula solar (Goetzberger *et al.*, 2002).

O silício tem um pequeno problema, onde 50% do custo de um módulo é devido ao custo da produção de bolachas de silício. A tecnologia presente está relativamente amadurecendo, mas vários estudos têm mostrado que isto ainda pode ter uma redução nos custos. Simulações mostraram que os parâmetros ideais para uma alta eficiência, apontam que com o descrever da espessura da célula a voltagem do circuito aberto aumenta, devido à corrente reduzir, que é resultado da geometria dos painéis (Goetzberger *et al.*, 2002).

A energia solar pode ser transformada em outras formas úteis como, por exemplo, em eletricidade. É preciso tirar vantagem por todos os meios possíveis desta inesgotável fonte de energia que pode nos tornar independente do petróleo ou de alternativas menos seguras, mais caras, com preços atrelados ao dólar. Porém, ainda existem problemas a superar. É preciso lembrar de que esta energia é sujeita a

flutuações e variações. Por exemplo, a radiação é menor no inverno, quando mais precisamos dela. É muito importante continuar buscando tecnologia de recepção, acumulação e distribuição da energia solar. Durante o presente ano, o Sol irradiará na Terra quatro mil vezes mais energia que do que vamos consumir. O Brasil possui os mais elevados índices mundiais dessa fonte de energia (Vera *et al.*, 2004).

Na Inglaterra futuramente terá um projeto para um ônibus movido a energia solar, o ônibus irá liberar vapor d'água ao invés de dióxido de carbono. A luz solar é convertido em eletricidade usada para fazer a eletrólise da água em hidrogênio e oxigênio, o hidrogênio será comprimido em células de combustível consumido pelo ônibus, onde a única emissão será o vapor d'água, acredita-se que seja o maior projeto mundial usando energia solar e hidrogênio (Sebastian, 2001).

3 EXPERIMENTAL

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Referência em Dessalinização da Universidade Federal de Campina Grande (LABDES/UFCG) e tem por finalidade analisar as variáveis do reator para projetar um arranjo de painéis eficientes ao seu desempenho e analisar as diversas configurações de painéis fotovoltaicos para a produção de hidrogênio eletrolítico do eletrolisador.

3.1. MATERIAL UTILIZADO

Para a realização deste trabalho foram utilizados os seguintes equipamentos e reagentes:

3.1.1. MATERIAL

O eletrolisador bipolar é constituído das seguintes unidades:

- um reator eletrolítico, composto de 47 células separadas por espaçadores de PVC de 0,2 cm de espessura com 26 cm de diâmetro;
- um manômetro, um voltímetro e um amperímetro;
- Reservatório do eletrólito;
- Purgadores;
- Trocador de calor;
- Fonte de alimentação;
- Regulador de pressão.

3.1.2. PRODUTOS QUÍMICOS

- KOH (Hidróxido de Potássio);

- Benzina;
- Álcool.

3.1.3. SISTEMA ELETROLÍTICO (ELETROLISADOR BIPOLAR)

O eletrolisador bipolar apresentado na Foto 3.1 possui as seguintes características:

- Tipo: Eletrolisador Bipolar
- Potência máxima do reator: 5000 W
- Tensão do reator: 96 V
- Corrente máxima do reator: 50 A
- Pressão de trabalho: 1,5 kgf/cm² - 1,0 kgf/cm²



Foto 3.1: Eletrolisador Bipolar do LABDES.

A Figura 3.1 apresenta o sistema. do eletrolisador bipolar que é constituído das seguintes unidades:

- um reator eletrolítico, constituído de 47 células em série (local onde os gases são gerados);
- um sistema de refrigeração que atua como trocador de calor, cuja função é baixar a temperatura do gás eletrolítico facilitando a condensação do eletrólito;
- um purgador utilizado para evitar a presença de íons estranhos;
- selos controladores de chama, que são a benzina e ou álcool etílico com o objetivo de evitar o recuo, diminuindo seu caráter explosivo;
- Fonte de alimentação que corresponde ao transformador monofásico de 220 V para 110 V, retificador de corrente e disjuntor de segurança;
- um pressostato utilizado para controlar a pressão interna do sistema através da pressão de saída dos gases.

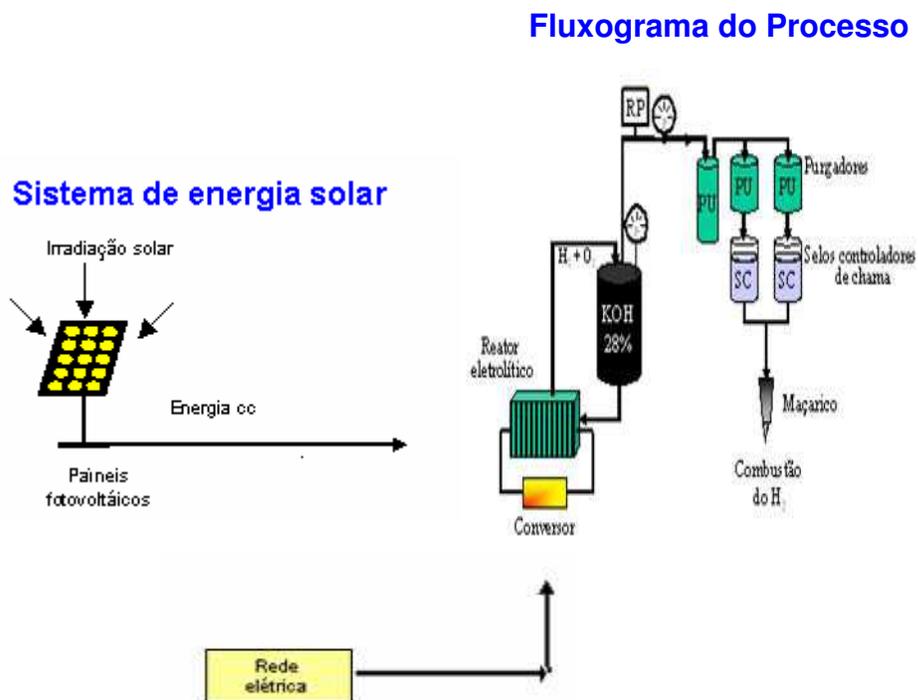


Figura 3.1: Fluxograma do Processo Eletrolítico (Pereira, 2005).

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAR O FLUXO DO GÁS

Durante o processo, foi avaliada a energia necessária para o funcionamento do eletrolisador, e projetado a quantidade de painéis fotovoltaicos necessários para atender as especificações do reator eletrolítico e determinado o fluxo de gás para cada arranjo de painel.

Para determinar o fluxo do gás não foi utilizado um fluxômetro comercial, devido os gases ($H_2 + O_2$) saírem juntos do eletrolisador, os fluxômetros comerciais são específicos para medir a vazão do hidrogênio ou oxigênio, então foi montado um sistema experimental como mostra a Foto 3.2, uma proveta de 2 litros, um recipiente de vidro de 8 litros, o maçarico e um cronômetro. O sistema experimental foi utilizado durante cada experimento da seguinte maneira, depois de conectado os painéis solares ao reator eletrolítico acoplou o maçarico entre a proveta e o recipiente, tanto o recipiente quanto a proveta estavam cheios com água, em seguida anotou o valor inicial de volume em que a água se encontrava na proveta e com um cronômetro marcou o tempo em que em esvaziava a água da proveta. Anota o valor final em que a água restou depois do experimento, obtendo o valor do volume de água deslocado pela presença do gás que ocupou o lugar da água em um determinado tempo, para cada arranjo de painéis foram realizados em média quatro medições, para um tempo de 3 minutos para cada experimento e depois fez a média do volume e tempo, para assim fazer os cálculos que determina a vazão do gás ($O_2 + H_2$).



Foto 3.2: Sistema experimental utilizado para determinar o fluxo de gás.

3.2.1. CONFIGURAÇÕES DOS PAINÉIS

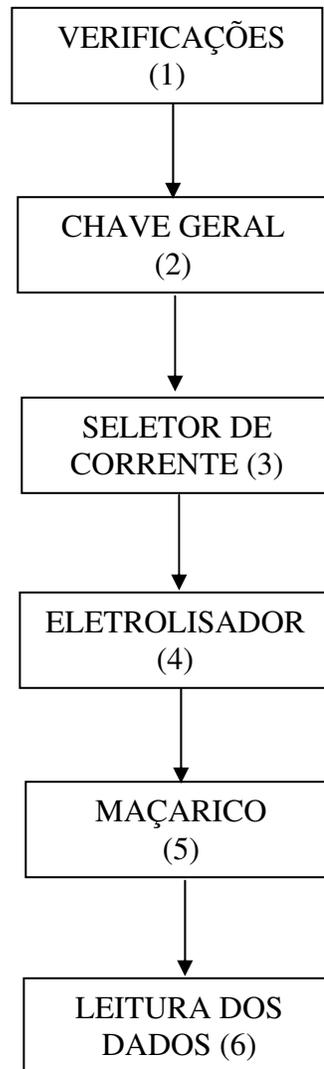
A configuração dos painéis depende da demanda energética dos equipamentos que serão alimentados pelo sistema de energia solar.

A ligação elétrica em série dos painéis solares permite a obtenção de uma maior tensão por uma corrente constante enquanto a ligação em paralelo permite obter uma maior corrente por uma tensão constante. Logo, a ligação em série será vantajosa para aparelhos que precisam utilizar baixa corrente e alta tensão e a ligação em paralelo será favorável ao uso de equipamentos que necessitam de baixa tensão e alta corrente.

De posse dos dados obtidos através do consumo energético do eletrolisador em função da produção de hidrogênio, pode projetar um sistema de fornecimento de energia solar, ou seja, definir o número de painéis fotovoltaicos necessários ao melhor desempenho do eletrolisador em estudo.

3.2.2. METODOLOGIA

Procedimentos básicos para ligar o eletrolisador com energia elétrica convencional:



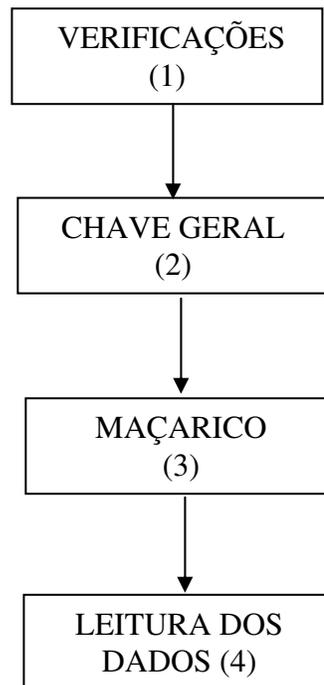
- 1) PROCEDIMENTO – Observar os níveis de água, benzina e álcool, verificar se há algum tipo de vazamento e se o maçarico está fechado;
- 2) PROCEDIMENTO – Ligar a chave do disjuntor;
- 3) PROCEDIMENTO – Posicionar a chave seletora na corrente desejada;
- 4) PROCEDIMENTO - O eletrolisador começa a produzir hidrogênio de forma semi-contínua, ocorre o desligamento automático do reator, quando esta atinge a

pressão de trabalho de $1,5 \text{ kgf/cm}^2$, em seguida o reator volta a ligar novamente quando atingir a pressão mínima de operação da máquina ($1,0 \text{ kgf/cm}^2$).

5) PROCEDIMENTO – Ajustar a abertura da válvula do maçarico;

6) PROCEDIMENTO - Os dados são lidos através de um sistema de aquisição de dados, que está conectado ao um computador, onde o programa do sistema permite registrar os dados para uma futura análise.

Procedimentos básicos para ligar o eletrolisador com energia obtida de painéis fotovoltaicos:



1) PROCEDIMENTO – Observar os níveis de água, benzina e álcool, verificar se há algum tipo de vazamento e se o maçarico está fechado;

2) PROCEDIMENTO – Ligar a chave do disjuntor;

5) PROCEDIMENTO – Ajustar a abertura da válvula do maçarico;

6) PROCEDIMENTO - Os dados são lidos através de um sistema de aquisição de dados, que está conectado ao um computador, onde o programa do sistema permite registrar os dados para uma futura análise.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos nesta etapa foram avaliados e discutidos, quanto ao comportamento da corrente, tensão e potência do reator eletrolítico em função do tempo para diversas vazões de produção do hidrogênio, utilizando como fonte de alimentação para o reator a energia elétrica convencional. Também foi projetado um sistema de fornecimento de energia solar para a produção de hidrogênio eletrolítico.

Em uma segunda etapa foram avaliados os dados de corrente, tensão e potência do reator eletrolítico em função do tempo para diversas vazões de produção do hidrogênio, utilizando painéis fotovoltaicos como fonte de alimentação para o reator. Várias configurações de painéis fotovoltaicos foram montadas para a produção de hidrogênio eletrolítico.

4.1 COMPORTAMENTO DO REATOR ELETROLÍTICO UTILIZANDO ENERGIA ELÉTRICA.

Durante a eletrólise são produzidos os gases hidrogênio e oxigênio de forma separada. Devido o eletrolisador ter uma única saída de gás que é o maçarico, então os gases hidrogênio e oxigênio saem misturado do reator eletrolítico.

A Figura 4.1 apresenta o comportamento do reator eletrolítico em função da pressão do sistema. Durante o experimento o reator é controlado de forma automática pelo pressostato para desligar quando a pressão dos gases atingir um valor de $1,5 \text{ kgf/cm}^2$ no reator, evitando assim um aumento de pressão no reator que pode causar vazamento. Quando a máquina estiver desligada, o consumo de hidrogênio e oxigênio provoca a diminuição dos gases no reator. Quando esta pressão atinge $1,0 \text{ kgf/cm}^2$, então a máquina liga e começa a produzir hidrogênio e oxigênio novamente.

Este processo é automatizado, tanto para ligar como desligar a alimentação elétrica do eletrolisador. O tempo de ligamento e desligamento depende da demanda e do consumo dos gases produzidos.

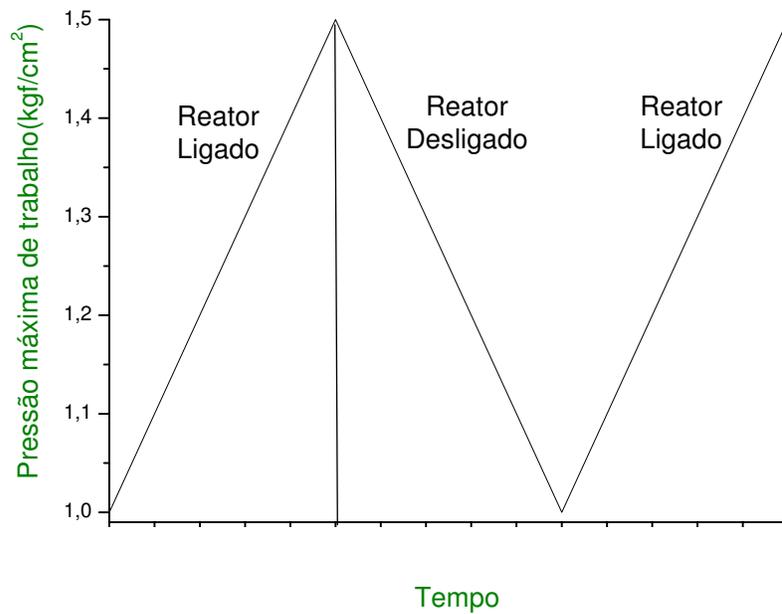


Figura 4.1: Comportamento do reator eletrolítico em função da pressão ao longo do tempo.

As Figuras de 4.2, 4.3 e 4.4 apresentam como ocorre o funcionamento do reator eletrolítico em relação às variáveis: tensão, corrente e potência do reator eletrolítico.

A Figura 4.2, apresenta a variação da tensão do reator eletrolítico em função do tempo. Durante o experimento o reator é controlado de forma automática para desligar quando a produção de hidrogênio atingir uma pressão de 1,5 kgf/cm² no reator, evitando assim um aumento de pressão no reator que pode causar vazamento. O descarregamento acontece de forma capacitiva, e quase nunca o valor da tensão chega à zero, quando o hidrogênio produzido for sendo consumido e a pressão for diminuindo e atingindo uma pressão mínima de 1,0 kgf/cm² no reator, então o reator liga novamente de forma instantânea.

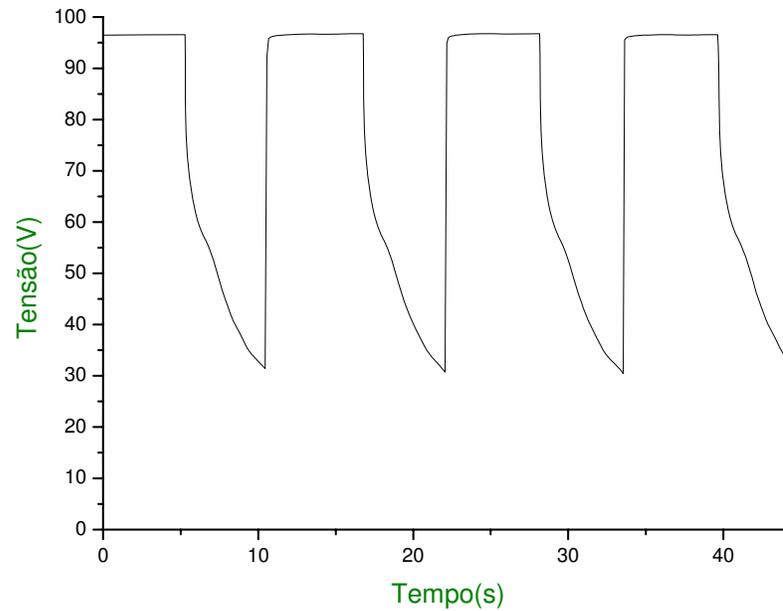


Figura 4.2: Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo.

A Figura 4.3 apresenta a variação da corrente em função do tempo. Quando a máquina está desligada vai consumido o hidrogênio e também vai diminuindo a pressão do reator para $1,0 \text{ kgf/cm}^2$, então a máquina liga e começa a produzir hidrogênio. Durante alguns segundos a máquina fica ligada com uma determinada corrente, em seguida a máquina se desliga e o valor da corrente volta à zero. Quando o reator eletrolítico se desliga é devido à pressão interna da máquina que atinge a pressão de calibragem do pressostato ($1,5 \text{ kgf/cm}^2$), cortando assim a corrente.

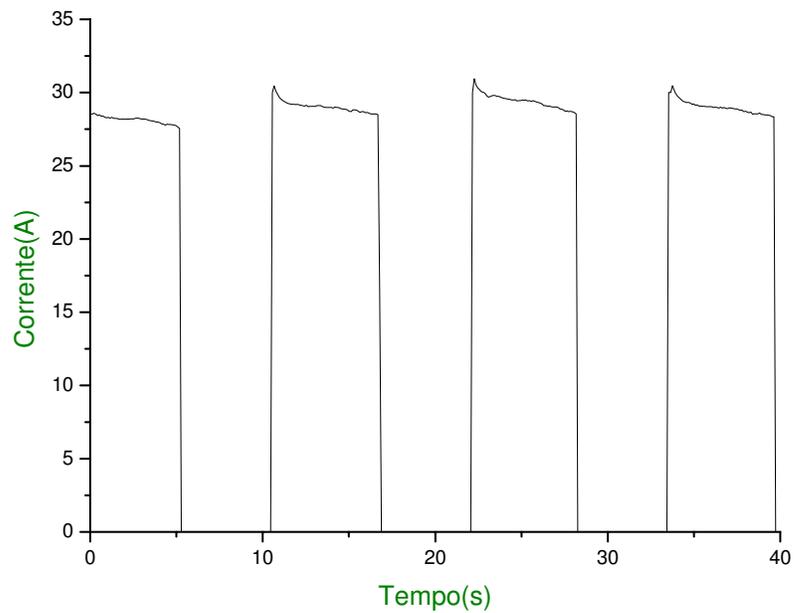


Figura 4.3: Comportamento da corrente em função do tempo.

Na Figura 4.4 apresenta a potência do reator eletrolítico em função do tempo, esta variável é apresentada de acordo com os valores obtidos de corrente e tensão do reator, apresentando as mesmas características de ligar e desligar automaticamente, que depende da pressão interna do reator. Representando a quantidade de potência necessária para produção de hidrogênio.

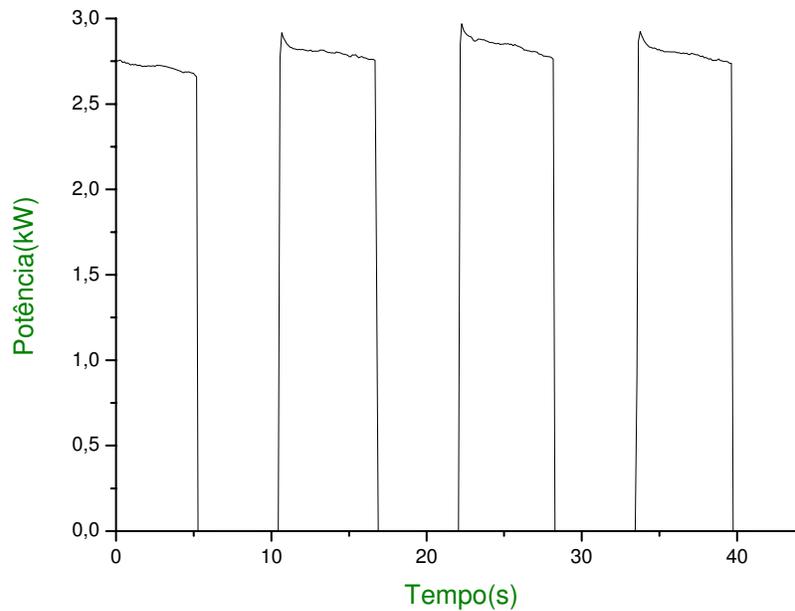


Figura 4.4: Comportamento da potência em função do tempo.

4.2 MEDIÇÃO DA VAZÃO DOS GASES OXIGÊNIO E HIDROGÊNIO UTILIZANDO COMO FONTE DE ENERGIA A REDE ELÉTRICA

Para determinar a produção dos gases ($O_2 + H_2$) foi montado um sistema com uma proveta e um recipiente de vidro no qual foi imerso o maçarico com saída de gás. Os dados apresentados na Tabela 4.1 referem-se à curva de calibração das vazões em função da corrente. Cada ponto na Figura representa a média de três repetições realizadas para cada valor de corrente e o tempo de esvaziamento da proveta. A Figura 4.5 apresenta a curva de calibração das vazões em função da corrente, o aumento da vazão do gás é proporcional ao aumento da corrente.

Tabela 4.1 – Valores experimentais da curva de calibração das vazões em função da corrente.

Corrente(A)	0	30	41	48	50
Tempo(s)	0	5,4	3,4	2,6	2,5
Volume (L)	0	1	1	1	1
Vazão(m ³ /h)	0	0,67	1,07	1,36	1,40

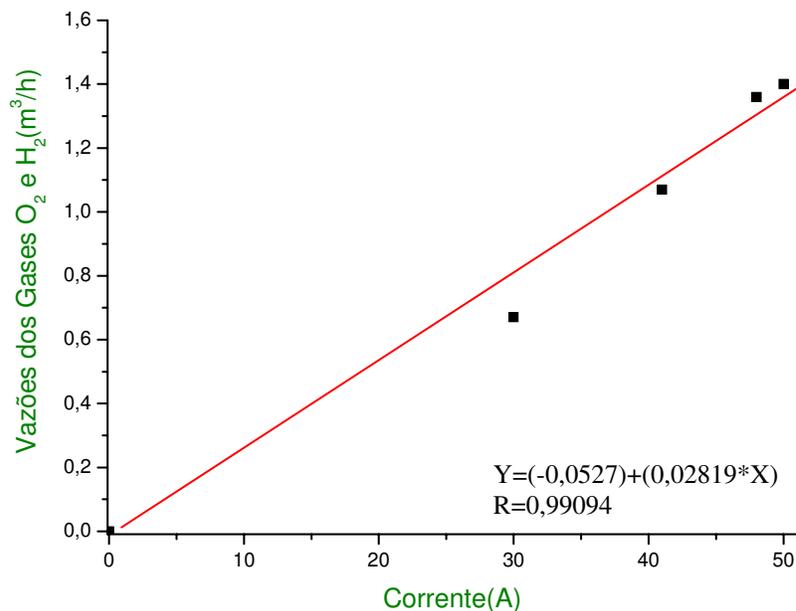
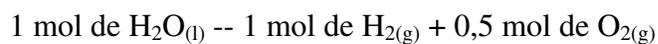


Figura 4.5 – Curva de calibração para diversas vazões em função da corrente.

Para determinar a produção de hidrogênio a partir da mistura dos gases, foi visto que para cada 1 mol de água são produzidos 1 mol de hidrogênio e 0,5 mol de oxigênio.



Para obter o valor da produção de hidrogênio foram realizados os seguintes cálculos. A equação mostra que a vazão obtida é então igual à 1,5 vezes a vazão do hidrogênio.

4.3 COMPORTAMENTO DA CORRENTE, TENSÃO E POTÊNCIA DO REATOR ELETROLÍTICO PARA FLUXOS DIFERENTES DE PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO UTILIZANDO ENERGIA ELÉTRICA CONVENCIONAL

As Figuras 4.6 a 4.29 apresentam a variação da corrente, tensão e potência do reator eletrolítico em função do tempo para vazões distintas de 0,22 m³/h a 0,91 m³/h de hidrogênio.

Ao testar o desempenho do sistema de produção de hidrogênio eletrolítico, as variáveis (tensão, corrente e potência elétrica) do sistema são caracterizados de acordo com o seu desempenho, usando como fonte energética a rede elétrica.

As Figuras 4.6 a 4.13 que representam a corrente do reator eletrolítico em função do tempo, tem uma corrente média de 13,5 A à 50,3 A, para os fluxos que variam de 0,22 m³/h a 0,91 m³/h de hidrogênio, respectivamente. Com o aumento da produção de hidrogênio, ocorre o aumento da corrente. Após certo intervalo de tempo, ocorre o desligamento automático da máquina (amperagem cai à zero) significando que os gases já estão na pressão de trabalho da máquina.

Analisando o comportamento da variação da tensão, as figuras 4.14 e 4.21, mostram que os valores das tensões aumentam os fluxos do gás, a tensão depende do número de células do reator (47 células) para fornecer mais voltagem.

As Figuras 4.22 a 4.29 têm o comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo em relação às vazões de 0,22 m³/h a 0,91 m³/h.

Através da tensão e corrente, obtém a potência do reator eletrolítico, no qual a potência média de 1,27 kW a 4,87 kW, para diversos fluxos de 0,22 m³/h a 0,91 m³/h. Logo com o aumento do fluxo da produção do hidrogênio, ocorre o aumento da potência do reator eletrolítico.

Tabela 4.2 – Consumo de hidrogênio em relação à corrente do reator eletrolítico.

Figuras	Corrente (A)	Vazão do H ₂ (m ³ /h)
4.6	13,50	0,220
4.7	20,70	0,350
4.8	29,05	0,510
4.9	32,10	0,568
4.10	35,04	0,623
4.11	41,10	0,736
4.12	42,50	0,763
4.13	50,30	0,910

A Tabela 4.3 apresenta a relação da corrente com a quantidade de eletricidade gerada, observa-se que com o aumento da corrente, irá gerar mais fluxo de elétrons. Como consequência, a vazão também aumentará, mostrando que o aumento da produção de hidrogênio está relacionado com o aumento da corrente.

Através da integração da área da figura (utilizando o software Origin 6.0), obteve a quantidade de eletricidade. Com a seguinte equação:

$$Q = \int I dt \quad (4.1)$$

Tabela 4.3 – Comportamento da corrente e a quantidade de eletricidade gerada.

Corrente (A)	Quantidade de eletricidade (C)
13,50	5400,5
20,70	8285,8
29,05	11621,5
32,10	12842,2
35,04	14018,2
41,10	16442,9
42,50	17001,2
50,30	20120,1

A Figura 4.6 tem um comportamento diferente em relação às demais figuras que representam as correntes do eletrolisador, visto que quando o reator produz uma quantidade suficiente de hidrogênio, a pressão interna da máquina atinge a pressão de calibragem do pressostato ($1,5 \text{ kgf/cm}^2$) automaticamente desliga-se o reator, para esta figura não ocorre o desligamento da máquina, devido à produção de hidrogênio ser consumida a mesma quantidade que foi produzida.

Esta Figura tem uma corrente de $13,5 \text{ A}$, com uma produção de $0,22 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, durante o início do experimento ocorreu um aumento na corrente, ocasionada por no momento em que quando liga a máquina aparece o surgimento das primeiras bolhas de gás, que ficam retidas nas paredes do meio, assim há um aumento da corrente para romper esta resistência. Logo após, a corrente tende a se estabilizar produzindo assim o hidrogênio. A quantidade de eletricidade gerada para este experimento foi de $5400,5 \text{ C}$, que produziu a vazão de $0,22 \text{ m}^3/\text{h}$, a uma corrente média de $13,5 \text{ A}$. O aumento da quantidade de eletricidade é proveniente do aumento da corrente, aumentando assim a vazão do gás. Visto que, o aumento da corrente é um fator limitante para a vazão do gás.

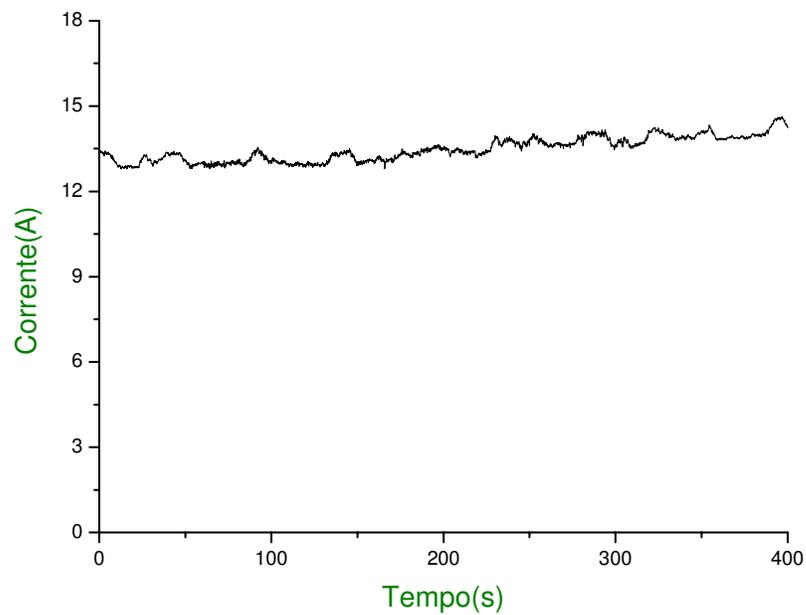


Figura 4.6 – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,22 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A partir da Figura 4.7 até a Figura 4.12, é perceptível uma mudança no comportamento do eletrolisador quando, nestes casos, a corrente de operação é superior a 20 A. A partir desses valores da corrente nota-se, então, que o sistema passou a desligar-se quando a pressão máxima de trabalho da máquina é atingida ($1,5 \text{ kgf/cm}^2$) e só voltando a religar quando o gás produzido for consumido, e por conseqüência, atingir a pressão de trabalho de $1,0 \text{ kgf/cm}^2$.

A Figura 4.7.a mostra o comportamento da corrente de 20,7 A em função do tempo para uma vazão de $0,35 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, o primeiro ciclo de trabalho é irregular devido à formação de bolhas dentro do reator impedindo a produção do gás. Os dois ciclos consecutivos devem-se a uma diminuição da corrente, ou seja, um ajuste do setup de corrente. A partir do quarto ciclo de trabalho, nota-se que o sistema entra em regime permanente.

A quantidade de eletricidade para uma vazão de $0,35 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio foi de 8285,8 C, o aumento da corrente gerou a necessidade de mais eletricidade para produzir uma maior vazão.

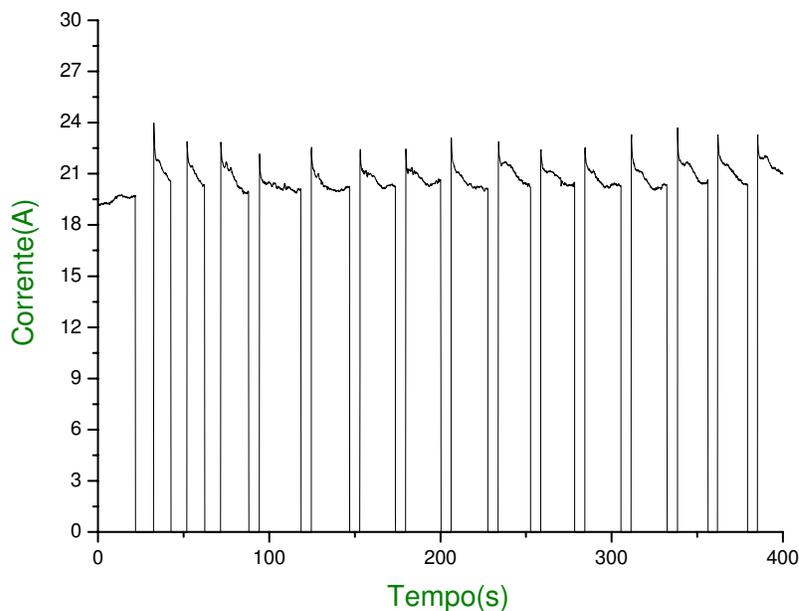


Figura 4.7.a – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,35 \text{ m}^3/\text{h}$.

A Figura 4.7.b, mostra de forma detalhada o comportamento da corrente de 20,7 A em função do tempo. Para a Figura 4.7.a. tem seu desempenho da seguinte maneira, passa 19 segundos ligado produzindo gás, em seguida quando o pressostato atinge seu ponto de trabalho, desliga o reator, passando assim 6 segundos desligado, até o momento em que necessite produzir o gás novamente.

O tempo de produção do gás é de 19 segundos, que depende da corrente aplicada, quanto maior a corrente, menor será o tempo de produção do gás. Já o tempo de 6 segundos em que encontra-se desligado o reator, vai depender da quantidade de gás que esta saindo pelo maçarico. Visto que, com o maçarico todo aberto o tempo de desligamento será muito pequeno.

Para esta Figura, o maçarico encontrava-se com 80% de sua válvula aberta.

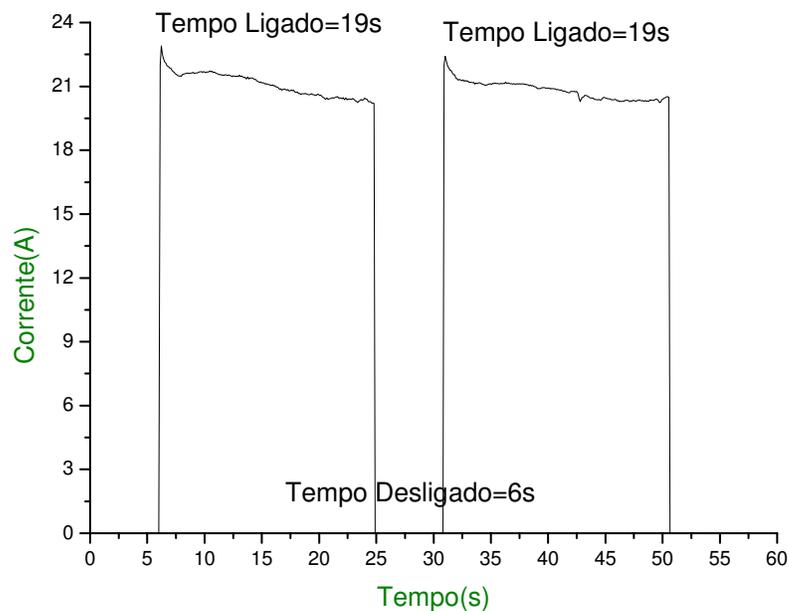


Figura 4.7.b – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de 0,35 m³/h.

A Figura 4.8.a representa o comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de 0,51 m³/h de hidrogênio, operando com uma corrente de 29,05 A. Como já foi observado na figura anterior, tem o mesmo processo de ligar e desligar. A

figura tem o primeiro ciclo um comportamento incomum aos demais ciclos, pois no momento que em que liga o reator, ocorre a formação das primeiras bolhas de gás, impedindo a formação do gás. Mas a partir do segundo ciclo em diante, o processo de formação do gás ocorre de forma coerente por todo o experimento.

A quantidade de eletricidade para uma vazão de $0,51 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio foi de $11621,5 \text{ C}$, com o aumento da corrente para $29,05 \text{ A}$.

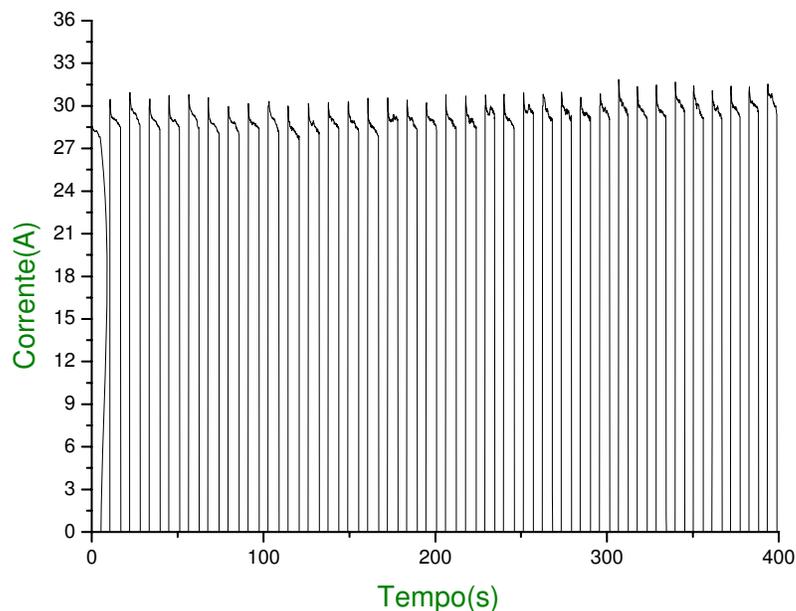


Figura 4.8.a – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,51 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.8.b, analisa de forma detalhada o comportamento da corrente em função do tempo para a uma corrente de $29,05 \text{ A}$. Para este sistema tem o seguinte desempenho, na produção do gás à máquina passa 6 segundos ligado, em seguida quando o pressostato atinge seu ponto de trabalho, desliga-se automaticamente, passando 5 segundos desligado (com a válvula toda aberta), até o momento em que necessite produzir o gás novamente. O tempo de produção de 6 segundos é inferior ao da Figura 4.6.b, pois com o aumento da corrente, diminui o tempo de produção, devido ser mais rápido a formação do gás.

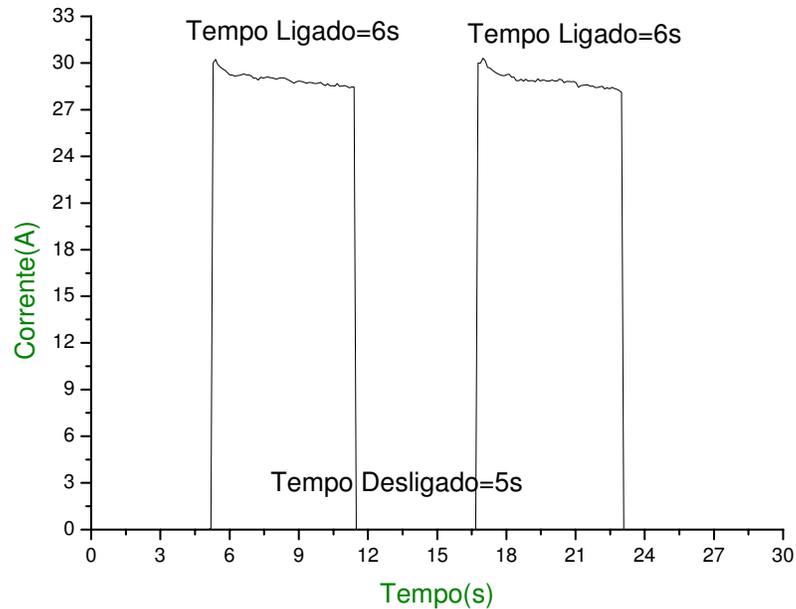


Figura 4.8.b – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,51 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.9.a apresenta o comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,568 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, com uma corrente de 32,1 A. Tendo o seu comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina.

As Figuras anteriores têm em seu primeiro ciclo a formação de bolhas, e nesta figura não a presença deste fenômeno, pois antes de iniciar este experimento já tinham realizados outras bateladas. Todos os ciclos estão coerentes para o processo de formação do gás.

O aumento da corrente para 32,1 A, foi responsável pelo o aumento da quantidade de eletricidade de 12842,2 C, que elevou a vazão para $0,568 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio.

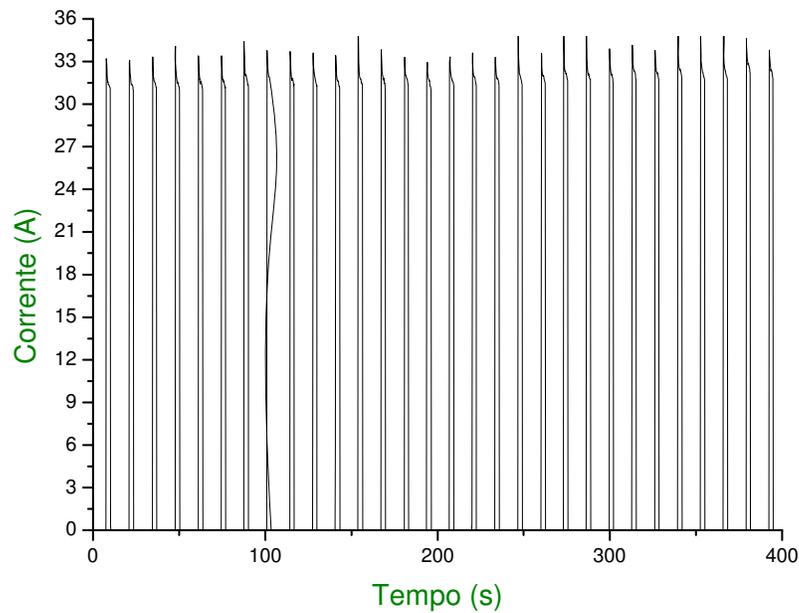


Figura 4.9.a – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,568 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.9.b, analisa de forma detalhada o comportamento da corrente em função do tempo a uma corrente de 32,1 A. Tendo o seguinte desempenho, na produção do gás, à máquina passa 3 segundos ligado, em seguida quando o pressostato atinge seu ponto de trabalho, desliga-se automaticamente, passando 13 segundos desligado, até o momento em que necessite produzir o gás novamente.

Como a corrente aumentou, logo diminuiu o tempo de produção do gás, fechou a válvula em cerca de 80%, aumentando assim, o tempo para ligar a máquina.

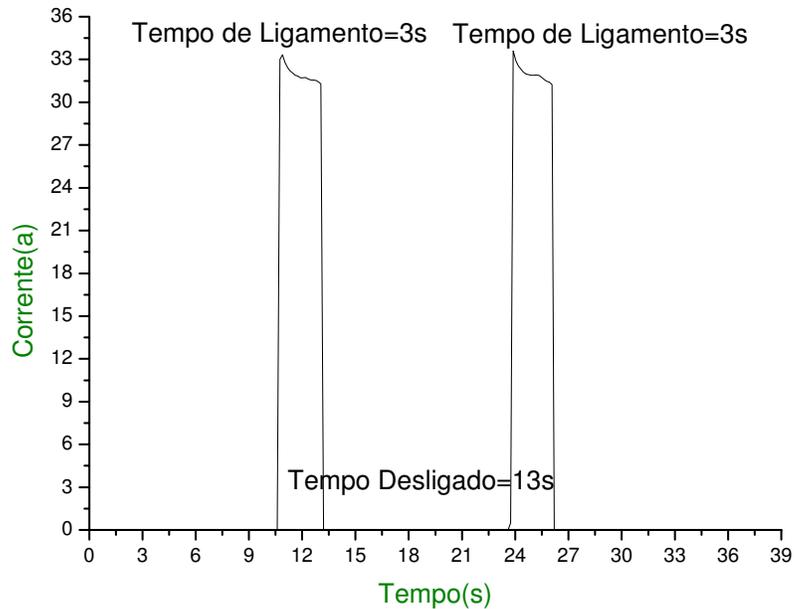


Figura 4.9.b – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,568 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.10.a apresenta o comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,623 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, com uma corrente de $35,04 \text{ A}$. Tendo o seu comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina.

Como já havia realizados outros experimentos anterior, não ocorreu a formação de bolhas. Foram realizados todos os manuseios de mudança de corrente e abertura ou fechar a válvula do maçarico, anterior ao experimento. Evitando assim qualquer interferência na figura.

O aumento da corrente para $35,04 \text{ A}$, foi responsável pelo o aumento da quantidade de eletricidade de $14018,2 \text{ C}$, que elevou a vazão para $0,623 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio.

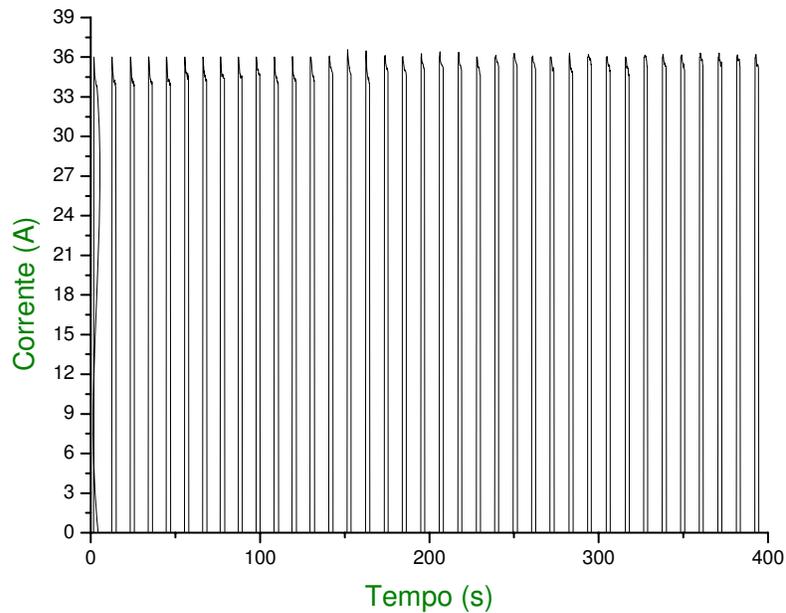


Figura 4.10.a – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de 0,623 m³/h de H₂.

A Figura 4.10.b, mostra de forma detalhada o comportamento da corrente em função do tempo.

Na produção do gás, à máquina passa 3 segundos ligado, em seguida quando o pressostato atinge seu ponto de trabalho, desliga-se automaticamente, passando 8 segundos desligado, até o momento em que necessite produzir o gás novamente.

Como a corrente aumentou, logo diminuiu o tempo de produção do gás, neste experimento deixou a válvula na metade.

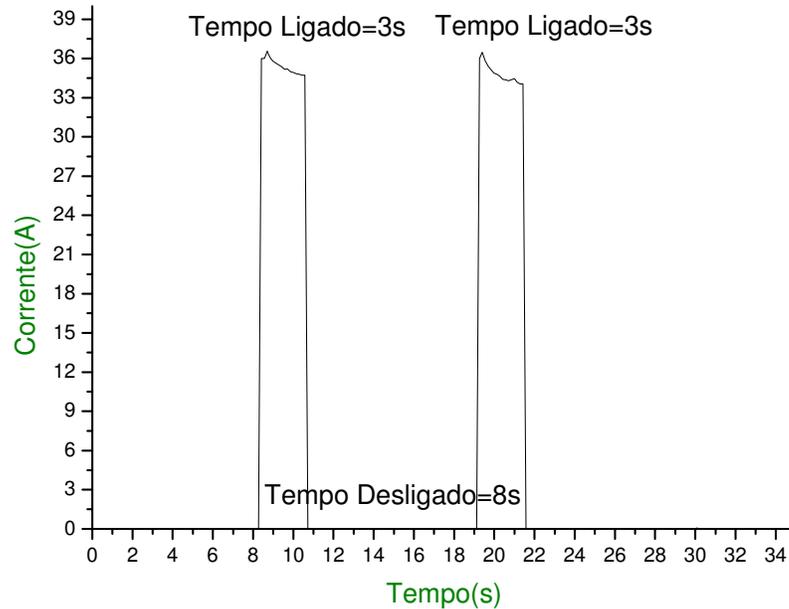


Figura 4.10.b – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,623 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.11.a representa o comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,736 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, com uma corrente de $41,1 \text{ A}$. Com o comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina.

Durante este experimento não ocorreu à formação de bolhas, mas nos primeiros 4 ciclos, foi realizado um manuseio na válvula do maçarico, pois a válvula encontrava-se muito aberta, então fechou-se um pouco, diminuindo assim seu espaço de desligamento.

Aumentou a corrente para $41,1 \text{ A}$, gerando o aumento da quantidade de eletricidade de $16442,9 \text{ C}$, que elevou a vazão para $0,736 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio.

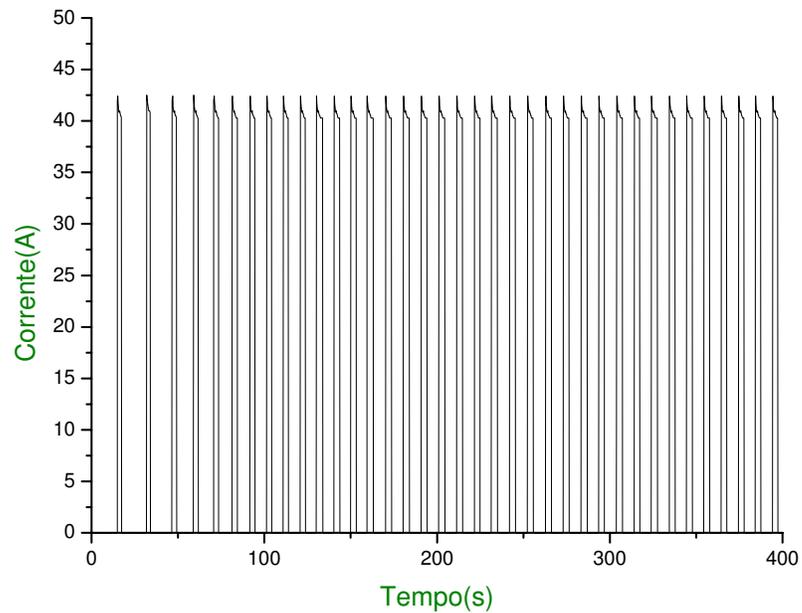


Figura 4.11.a – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de 0,736 m³/h de H₂

A Figura 4.11.b, mostra de forma detalhada o comportamento da corrente em função do tempo. Na produção do gás, a máquina passa 3 segundos ligado, em seguida quando o pressostato atinge seu ponto de trabalho, desliga-se automaticamente, passando 7 segundos desligado, até o momento em que necessite produzir o gás novamente.

O tempo de produção do gás neste experimento permitiu a abertura da válvula em 50%.

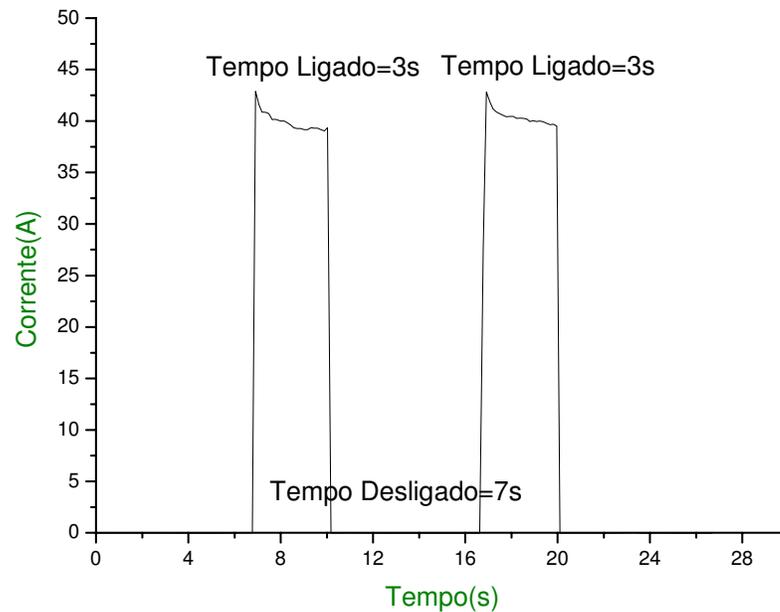


Figura 4.11.b – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,736 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.12.a representa o comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,763 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, com uma corrente de 42,5 A. Com o comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina.

Durante este experimento não ocorreu à formação de bolhas. Foram realizados todos os manuseios de mudança de corrente e abertura ou fechar a válvula do maçarico, anterior ao experimento. Evitando assim qualquer interferência na Figura.

Aumentou a corrente para 42,5 A, gerando o aumento da quantidade de eletricidade de 17001,2 C, que elevou a vazão para $0,763 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio.

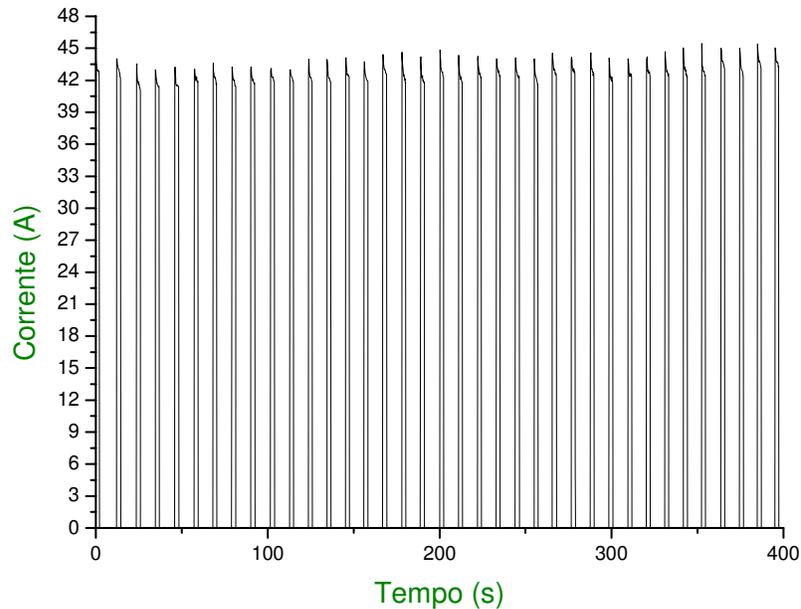


Figura 4.12.a – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de 0,763 m³/h de H₂.

A Figura 4.12.b, mostra de forma detalhada o comportamento da corrente em função do tempo. Na produção do gás, a máquina passa 2,5 segundos ligado, em seguida quando o pressostato atinge seu ponto de trabalho, desliga-se automaticamente, passando 8 segundos desligado, até o momento em que necessite produzir o gás novamente.

Para este experimento fechou a válvula do maçarico um pouco menos da metade, aumentando o tempo desligamento.

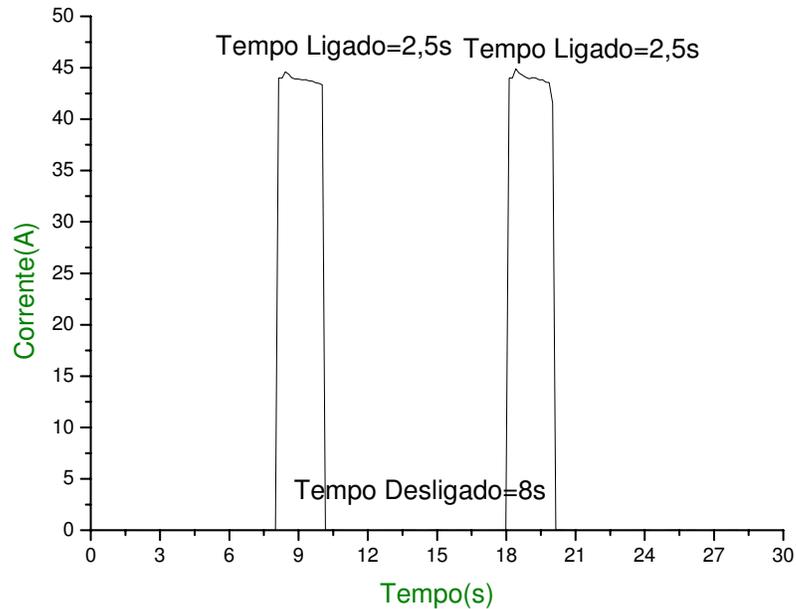


Figura 4.12.b – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,763 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.13.a representa o comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,91 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, com uma corrente máxima de $50,3 \text{ A}$. Com o comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina.

Durante este experimento não ocorreu à formação de bolhas. Foram realizados todos os manuseios de mudança de corrente e abertura ou fechar a válvula do maçarico, anterior ao experimento. Evitando assim qualquer interferência na Figura.

Aumentou a corrente para $50,3 \text{ A}$, gerando o aumento da quantidade de eletricidade de $20120,1 \text{ C}$, que elevou a vazão para $0,91 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio.

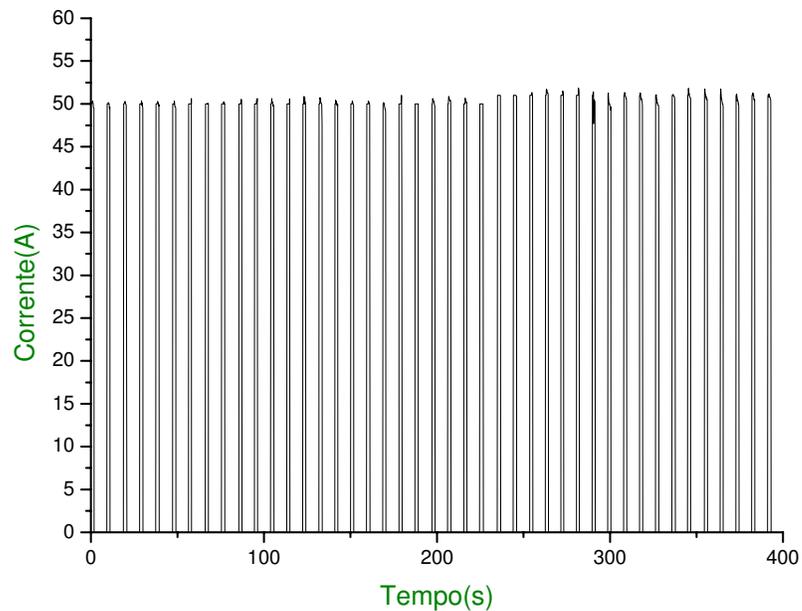


Figura 4.13.a – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de 0,91 m³/h de H₂.

A Figura 4.13.b, mostra de forma detalhada o comportamento da corrente em função do tempo. Na produção do gás, a máquina passa 2 segundos ligado, diminuindo ainda mais o tempo de produção do gás, em seguida quando o pressostato atinge seu ponto de trabalho, desliga-se automaticamente, passando 8 segundos desligado, até o momento em que necessite produzir o gás novamente.

Para este experimento fechou a válvula do maçarico um pouco menos da metade, aumentando o tempo de desligamento.

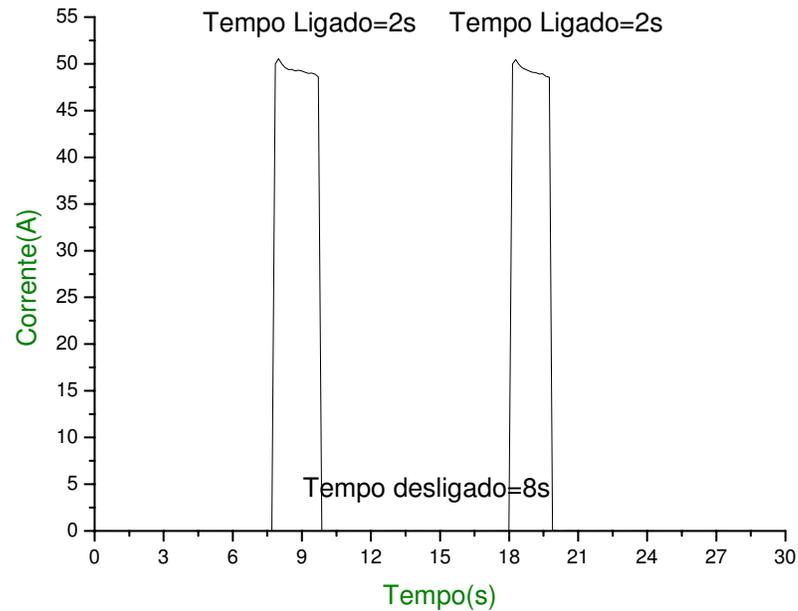


Figura 4.13.b – Comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de 0,91 m³/h de H₂.

Abaixo encontra-se a Tabela para formação dos gráficos da tensão do reator eletrolítico.

Observa-se um aumento de tensão em todos os experimentos, mais é devido a um ajuste de setup para aumentar a corrente e a tensão depende também do número de células presentes no reator eletrolítico, que são de 47 células.

Tabela 4.4 – Consumo de hidrogênio em relação à tensão do reator eletrolítico.

Figuras	Tensão (V)	Vazão do H ₂ (m ³ /h)
4.14	95,6	0,350
4.15	95,9	0,510
4.16	96,1	0,568
4.17	96,15	0,623
4.18	96,5	0,736
4.19	96,6	0,763
4.20	96,9	0,910

As Figuras de 4.14 a 4.20 apresentam o comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo, para diversas vazões de hidrogênio. Visto que a tensão do reator depende da quantidade de número de células que formam o reator eletrolítico e um ajuste no setup para aumentar a corrente.

A partir da Figura 4.14 até 4.20 a máquina começa desligar e ligar, significando que durante a realização dos experimentos a pressão atingiu a pressão de calibragem da máquina.

Na Figura 4.14, observa-se o comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo, para uma vazão de 0,35 m³/h de hidrogênio. Nota-se também que o descarregamento acontece de forma capacitiva, não chegando a zero, e sim, a um valor mínimo de 26 A, para os ciclos. O reator tem uma faixa de aquecimento que varia de 30°C a 60°C. Para este experimento, a temperatura de aquecimento estava em torno de 50°C.

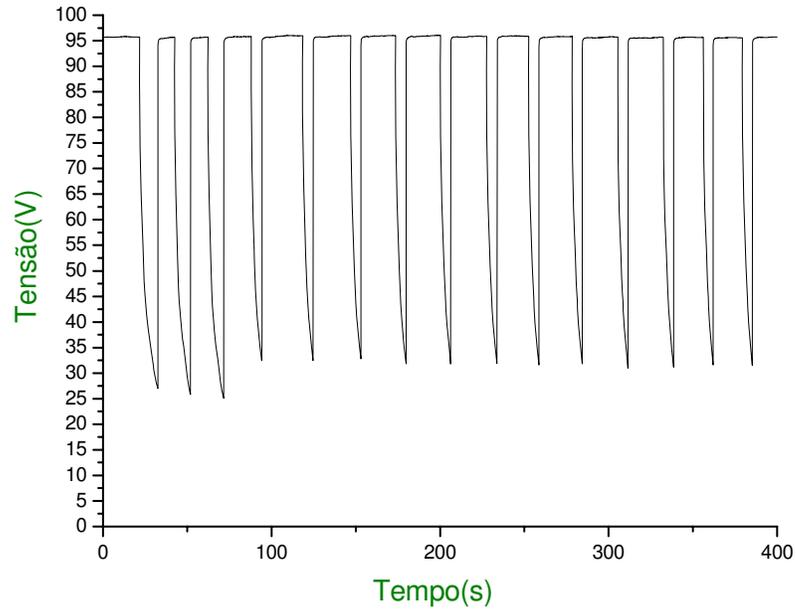


Figura 4.14 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,35 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.15 apresenta o comportamento da tensão do reator de $95,9 \text{ V}$, em função do tempo, para uma vazão de $0,51 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio. A corrente de descarga chegou a 32 A , pois a temperatura do reator encontrava-se em torno de (50°C) .

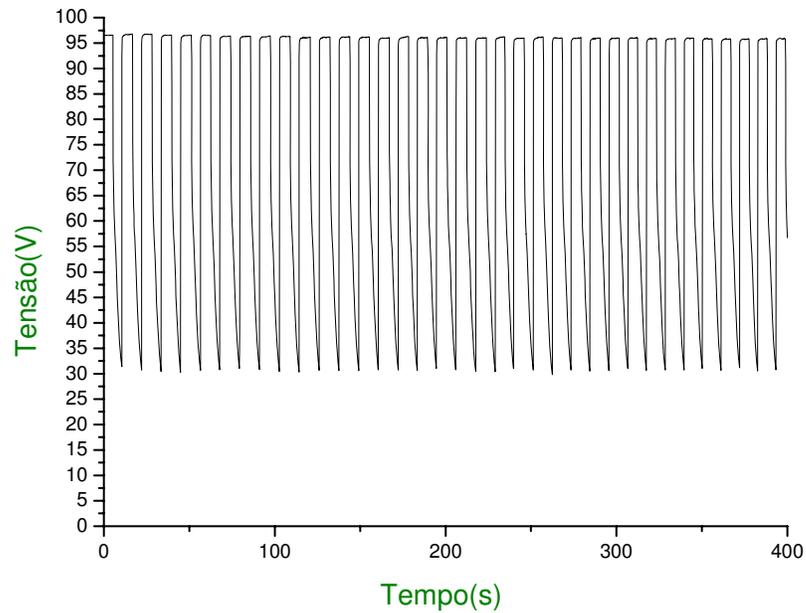


Figura 4.15 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,51 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.16 apresenta o comportamento da tensão do reator de 96,1 V, em função do tempo, para uma vazão de $0,568 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio. A corrente de descarga chegou a 10 A, pois a temperatura do reator encontrava-se na temperatura mínima (30°C).

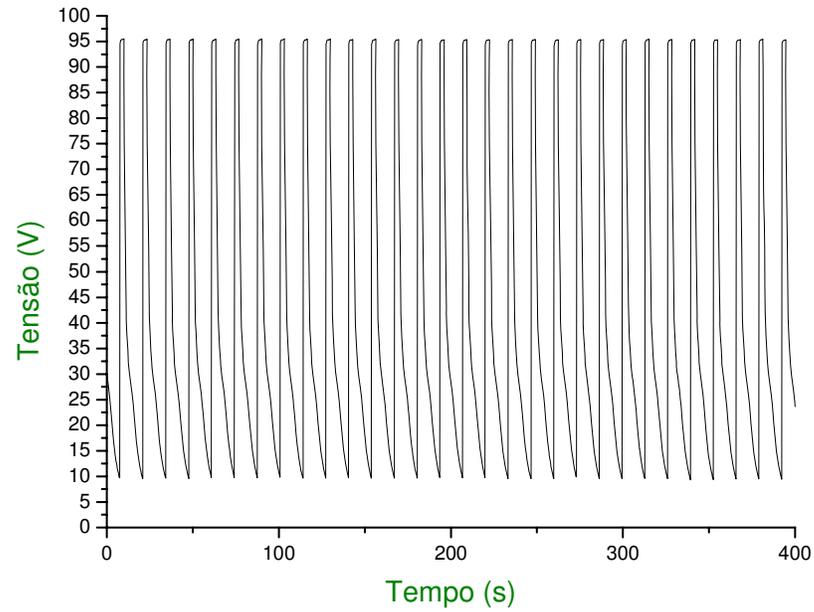


Figura 4.16 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,568 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.17 representa o comportamento da tensão do reator de $96,15 \text{ V}$, em função do tempo, para uma vazão de $0,623 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio. As correntes de descarga, chegaram a 14 A , pois a temperatura do reator encontrava-se na temperatura mínima (30°C).

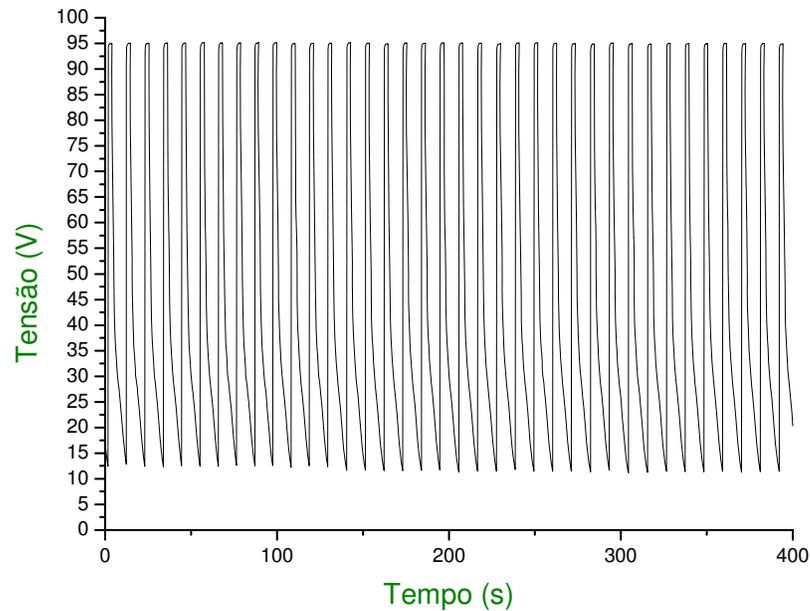


Figura 4.17 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,623 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.18 apresenta o comportamento da tensão do reator de 96,5 V, em função do tempo, para uma vazão de $0,736 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio. As demais correntes de descarga, chegaram a 13 A, pois a temperatura do reator encontrava-se na temperatura mínima (30°C).

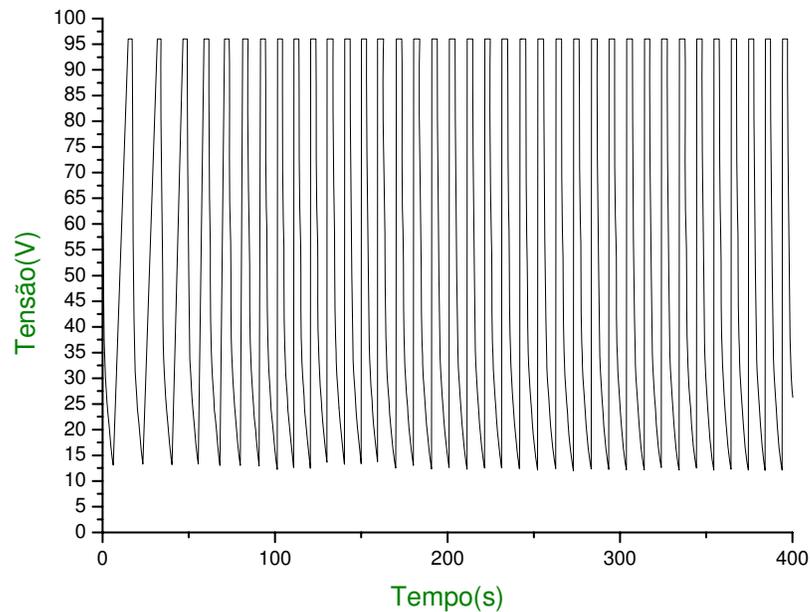


Figura 4.18 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,736 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.19 apresenta o comportamento da tensão do reator de 96,6 V, em função do tempo, para uma vazão de $0,763 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio. Nos 40 segundos iniciais da produção do hidrogênio, um dos fios desconectaram do reator provocando assim, um erro de leitura. Após resolver o problema, os valores da tensão voltaram a ser significativos.

As correntes de descarga, chegaram a 9 A, pois a temperatura do reator encontrava-se na temperatura mínima (30°C).

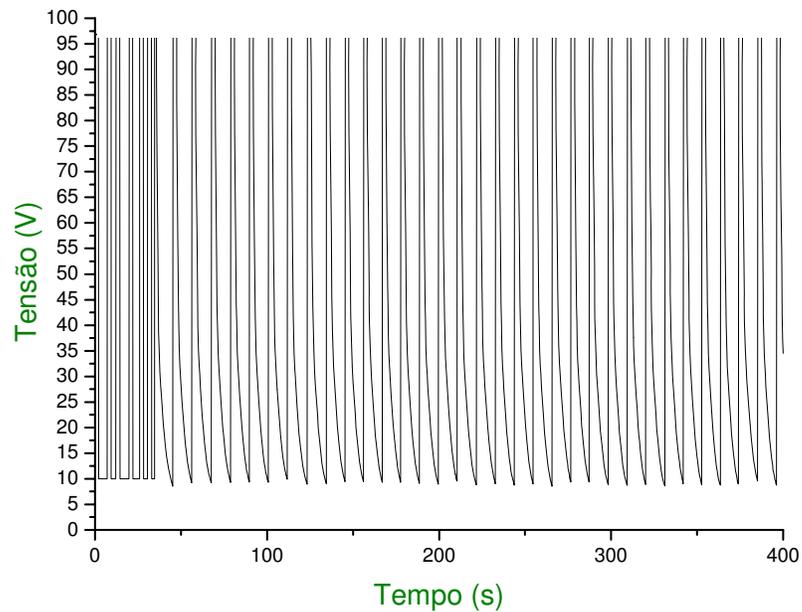


Figura 4.19 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,763 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.20 representa o comportamento da tensão do reator de 96,9 V, em função do tempo, para uma vazão de $0,91 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio.

As demais correntes de descarga chegaram a 10 A, pois a temperatura do reator encontrava-se na temperatura mínima (30°C).

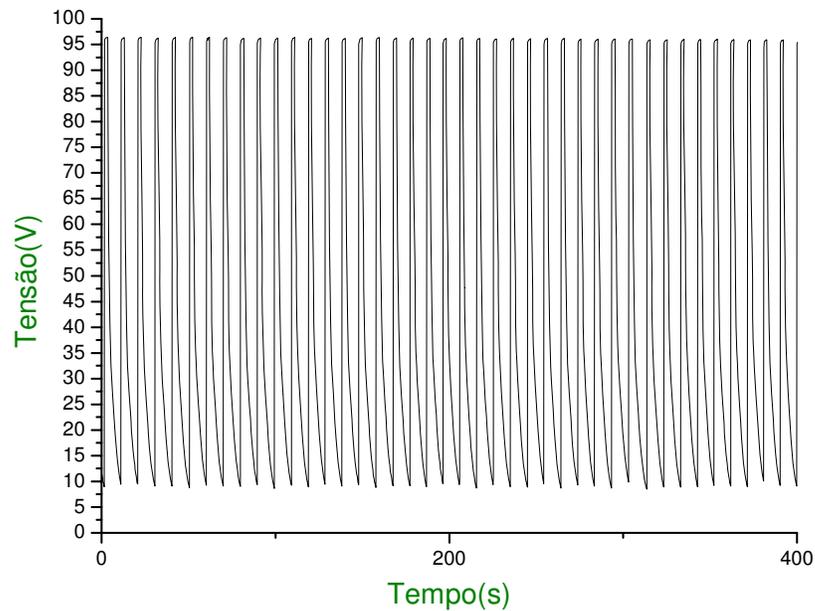


Figura 4.20 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de 0,91 m³/h de H₂.

A Tabela 4.5 apresenta a potência do reator eletrolítico para diversas vazões de hidrogênio.

Tabela 4.5 – Consumo de hidrogênio em relação à potência do reator eletrolítico.

Figuras	Potência (kW)	Vazão do H ₂ (m ³ /h)
4.21	1,27	0,220
4.22	1,98	0,350
4.23	2,78	0,510
4.24	3,08	0,568
4.25	3,37	0,623
4.26	3,97	0,736
4.27	4,10	0,763
4.28	4,87	0,910

As Figuras 4.21 a 4.28 apresentam a variação da produção de hidrogênio e o consumo de energia em função do tempo, referente aos experimentos realizados.

A Figura 4.21 mostra o experimento em que uma potência de 1,27 kW atingiu uma vazão de hidrogênio de 0,22 m³/h. Observa-se nas figuras seguintes que com o aumento da vazão do gás, a o aumento da potência.

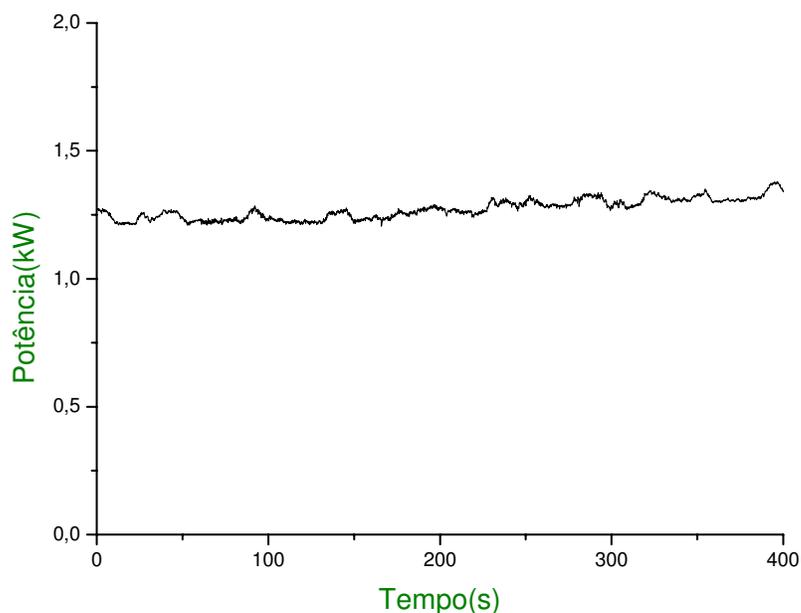


Figura 4.21 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de 0,22 m³/h de H₂.

A Figura 4.22 mostra o comportamento da potência em função do tempo para uma vazão de 0,35 m³/h de hidrogênio, operando com uma potência de 1,98 kW.

O primeiro ciclo de trabalho irregular deve-se a formação de bolhas dentro do reator impedindo a produção. Os dois ciclos consecutivos deve-se a uma diminuição da corrente, ou seja, um ajuste do setup de corrente. A partir do quarto ciclo de trabalho, nota-se que o sistema entra em regime constante de trabalho.

Os ciclos da Figura de potência serão decorrentes da variação da corrente e tensão.

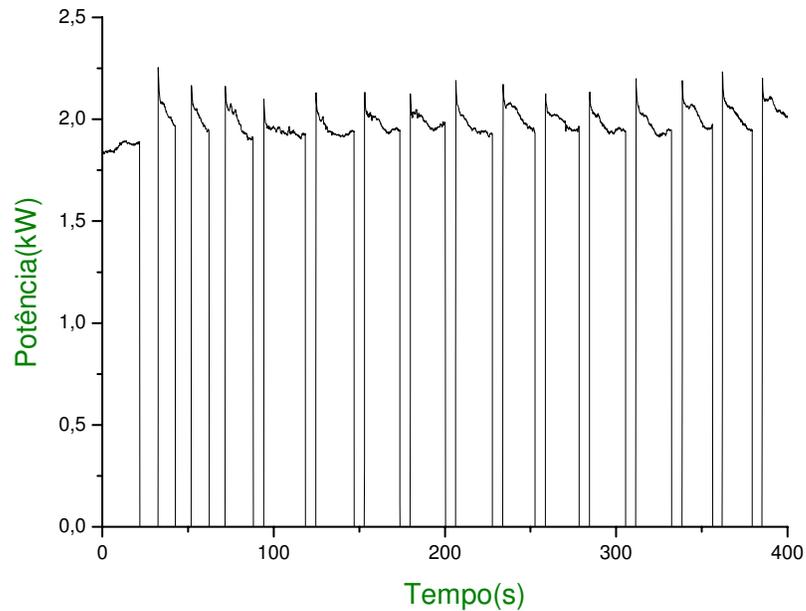


Figura 4.22 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,35 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.23 apresenta o comportamento da potência em função do tempo para uma vazão de $0,51 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, operando com uma potência de $2,78 \text{ kW}$. Como já foi observado na figura anterior, tem o mesmo processo de ligar e desligar. A Figura tem o primeiro ciclo um comportamento incomum aos demais ciclos, pois no momento que em que liga o reator, ocorre a formação das primeiras bolhas de gás, impedindo a formação do gás. Mas a partir do segundo ciclo em diante, o processo de formação do gás ocorre de forma coerente por todo o experimento.

Os ciclos da figura de potência serão decorrentes da variação da corrente e tensão.

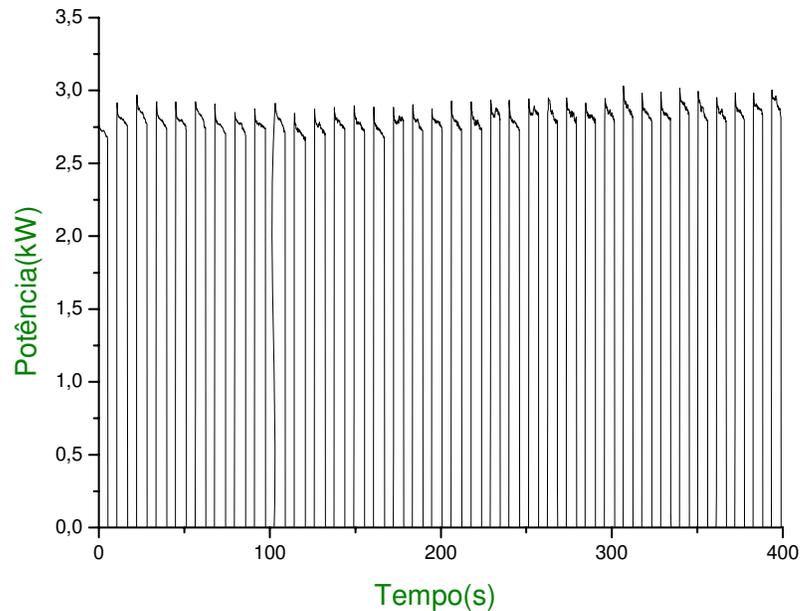


Figura 4.23 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,51 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.24 apresenta o comportamento da potência em função do tempo para uma vazão de $0,568 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, operando com uma potência de $3,08 \text{ kW}$.

Tendo o seu comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina. As Figuras anteriores têm em seu primeiro ciclo a formação de bolhas, e nesta figura não a presença deste fenômeno, pois antes de iniciar este experimento já tinham realizados outras bateladas. Todos os ciclos estão coerentes para o processo de formação do gás.

Os ciclos da figura de potência serão decorrentes da variação da corrente e tensão.

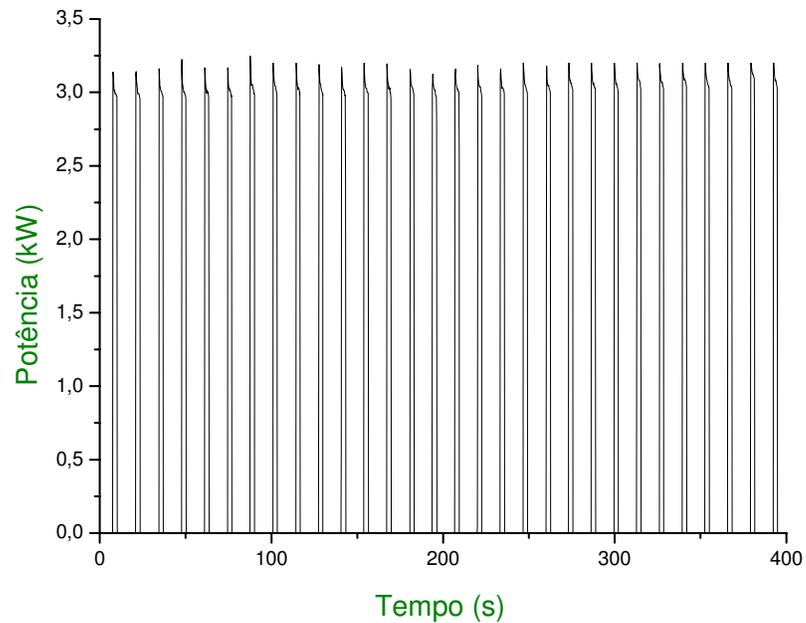


Figura 4.24 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,568 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.25 apresenta o comportamento da potência em função do tempo para uma vazão de $0,623 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, operando com uma potência de $3,37 \text{ kW}$.

Tendo o seu comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina.

Como já havia realizados outros experimentos anteriores, não ocorreu à formação de bolhas. Foram realizados todos os manuseios de mudança de corrente e abertura ou fechar a válvula do maçarico, anterior ao experimento. Evitando assim qualquer interferência na figura.

Os ciclos da figura de potência serão decorrentes da variação da corrente tensão.

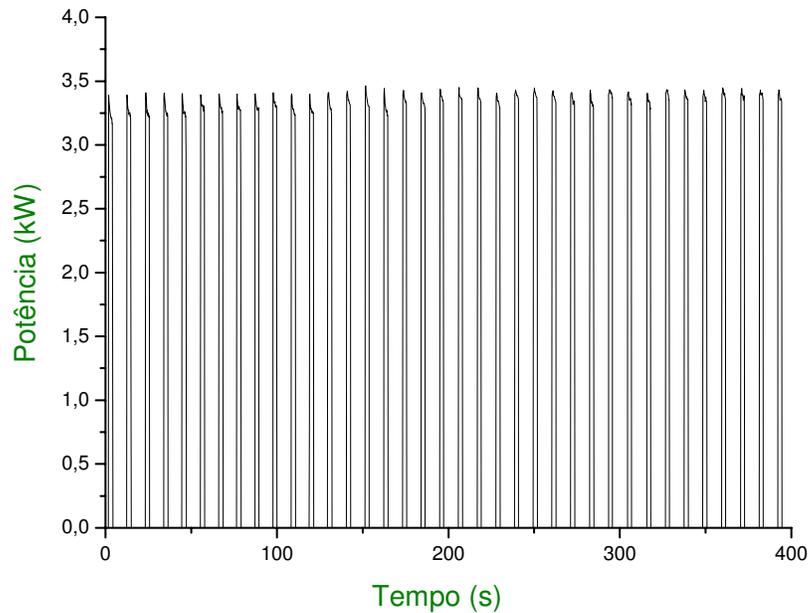


Figura 4.25 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,623 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.26 apresenta o comportamento da potência em função do tempo para uma vazão de $0,736 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, operando com uma potência de 3,97 kW.

Com o comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina.

Durante este experimento não ocorreu à formação de bolhas, mas nos primeiros 4 ciclos, foi realizado um manuseio na válvula do maçarico, pois a válvula encontrava-se muito aberta, então fechou-se um pouco, diminuindo assim seu espaço de desligamento.

Os ciclos da figura de potência serão decorrentes da variação da corrente e tensão.

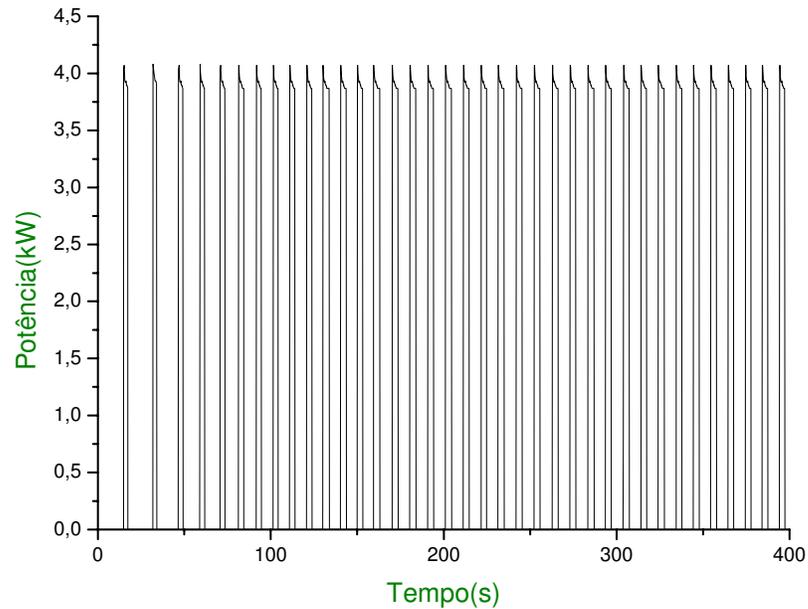


Figura 4.26 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,736 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.27 apresenta o comportamento da potência em função do tempo para uma vazão de $0,763 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, operando com uma potência de $4,10 \text{ kW}$.

Com o comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina. Durante este experimento não ocorreu à formação de bolhas. Foram realizados todos os manuseios de mudança de corrente e abertura ou fechar a válvula do maçarico, anterior ao experimento. Evitando assim qualquer interferência na figura.

Os ciclos da figura de potência serão decorrentes da variação da corrente e tensão.

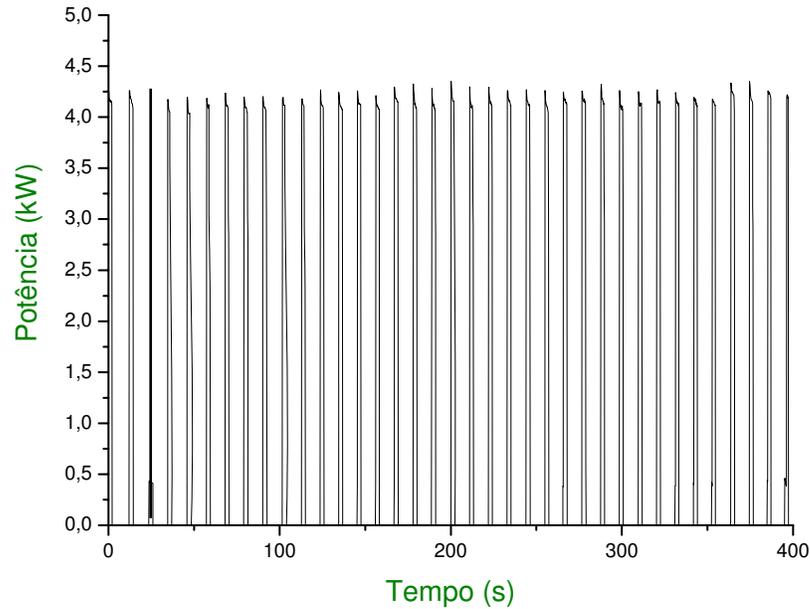


Figura 4.27 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de $0,763 \text{ m}^3/\text{h}$ de H_2 .

A Figura 4.28 apresenta o comportamento da corrente em função do tempo para uma vazão de $0,91 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio, operando com uma potência de $4,87 \text{ kW}$. Com o comportamento de ligar e desligar relacionado à pressão de trabalho da máquina.

Durante este experimento não ocorreu à formação de bolhas. Foram realizados todos os manuseios de mudança de corrente e abertura ou fechar a válvula do maçarico, anterior ao experimento. Evitando assim qualquer interferência na figura.

Os ciclos da figura de potência serão decorrentes da variação da corrente e tensão.

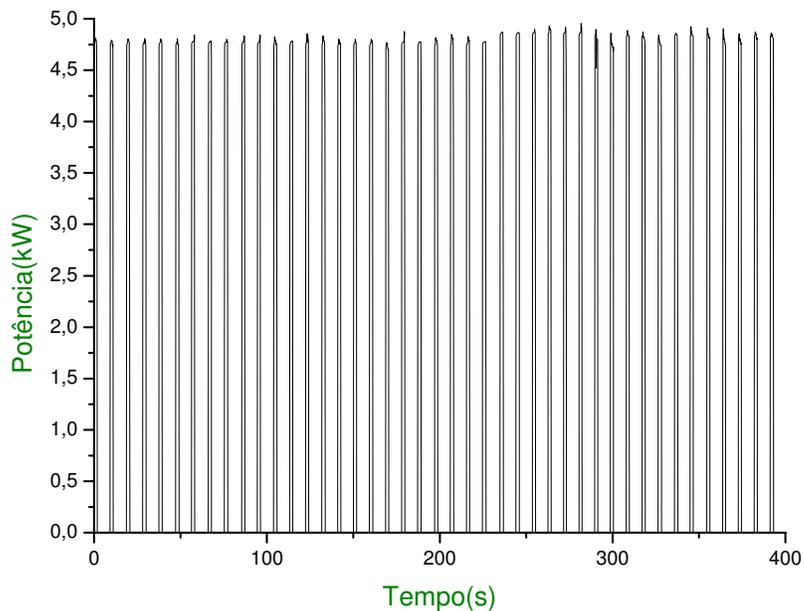


Figura 4.28 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para uma vazão de 0,91 m³/h de H₂.

4.4 CÁLCULOS DA PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO UTILIZANDO COMO FONTE DE ENERGIA A REDE ELÉTRICA

Para determinar a produção do gás foi montado um sistema experimental com uma proveta e um recipiente de vidro no qual foi imerso o maçarico com saída de gás. Com o tempo necessário para o esvaziamento da proveta para obteve as vazões de 0,33 m³/h a 1,37 m³/h de gás (O₂ + H₂).

A partir dos dados da Tabela 4.6 foi possível quantificar a produção de hidrogênio obtida na reação da decomposição da água:



Assim foi visto que para cada mol de água são produzidos 1 mol de hidrogênio e 0,5 mol de oxigênio. Para obter o valor da produção de hidrogênio foram realizados os

seguintes cálculos. A equação mostra que a vazão obtida é então igual a 1,5 vezes a vazão do hidrogênio. Conseqüentemente, a vazão do hidrogênio é:

Vazão do hidrogênio = $1,37 \text{ m}^3/\text{h}$ vazão do gás ($\text{H}_2 + \text{O}_2$) / 1,5 = $0,91 \text{ m}^3/\text{h}$ de hidrogênio.

De forma análoga foram realizados todos os cálculos para determinar a produção de hidrogênio em cada experimento. Encontram-se presentes na tabela abaixo:

Tabela 4.6 – Vazão do hidrogênio.

Vazão do gás $\text{O}_2 + \text{H}_2$ (m^3/h)	Vazão do H_2 (m^3/h)
0,330	0,220
0,530	0,350
0,770	0,510
0,850	0,568
0,935	0,623
1,104	0,736
1,144	0,763
1,370	0,910

4.5 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS ELETROLÍTICAS PARA UM REATOR UTILIZANDO ENERGIA ELÉTRICA.

As tensões aplicadas no reator eletrolítico foram de 94,4 a 96,9 V, obtidas com a diferença de potencial aplicada sobre a quantidade do número de células presente no reator, que são de 47 células, tendo assim em cada célula uma diferença de potencial de 2,00 a 2,06 Volts. Através da diferença de potencial aplicada, pode-se obter a eficiência das células eletrolíticas, a Tabela 4.7 apresenta a relação da tensão aplicada no reator, a tensão aplicada por célula e a eficiência das células.

A eficiência de uma célula eletrolítica em termos de tensão é dada por:

$$\eta(\%) = \left(\frac{1,47}{V} \right) \times 100 \quad (4.3)$$

Tabela 4.7 – Tensão aplicada ao reator, tensão em cada célula e eficiência das células.

Tensão(V)	Tensão em cada célula(V)	Eficiência(%)
94,40	2,00	73,2
95,60	2,03	72,3
95,90	2,04	72,0
96,10	2,04	72,0
96,15	2,05	71,9
96,50	2,05	71,9
96,60	2,06	71,5
96,90	2,06	71,5

A tensão aplicada a cada célula foi de 2,00 a 2,06 volts, tendo assim uma eficiência de 71,5 a 73,2%. Os valores das eficiências foram considerados satisfatórios, quando comparados com células eletrolíticas industriais. As células eletrolíticas industriais operam com uma diferença de potencial que varia de 1,70 a 2,10 volts, o que corresponde a um rendimento de 70 a 86,5% (Memento de L'Hydrogène, 2002).

4.6 RELAÇÃO DA VAZÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM RELAÇÃO A CORRENTE, TENSÃO, POTÊNCIA DO ELETROLISADOR E ENERGIA CONSUMIDA UTILIZANDO ENERGIA ELÉTRICA CONVENCIONAL

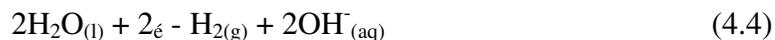
A Tabela 4.8 apresenta a relação das variáveis relacionadas nas Figuras abaixo, mostrando que com o aumento da vazão do gás, a necessidade do aumento da corrente aplicada no reator eletrolítico, visto que a tensão é obtida a partir do número de células do reator e o aumento no setup da máquina, tendo assim um aumento da potência do reator e a energia necessária para produção do hidrogênio.

Tabela 4.8 – Consumo de Hidrogênio em relação às variáveis Corrente, Tensão, Potência elétrica do Reator Eletrolítico e Energia Consumida.

Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (kW)	Energia (kWh/ m ³)	Vazão do H ₂ (m ³ /h)
13,50	94,4	1,27	5,77	0,220
20,70	95,6	1,98	5,66	0,350
29,05	95,9	2,78	5,45	0,510
32,10	96,1	3,08	5,42	0,568
35,04	96,15	3,37	5,41	0,623
41,10	96,5	3,97	5,39	0,736
42,50	96,6	4,10	5,37	0,763
50,30	96,9	4,87	5,35	0,910

A Figura 4.29 apresenta uma variação média da corrente elétrica em função da produção de hidrogênio, mostrando que com o aumento da corrente elétrica a o aumento da vazão do gás.

A produção de hidrogênio é proporcional à corrente que passa através de uma célula eletrolítica, tem a seguinte reação para demonstrar o aumento da corrente em relação ao aumento da vazão do gás, a equação 2.4.



Para uma corrente de 13,5 A tem uma vazão de 0,22 m³/h de hidrogênio, e a medida que aumenta a vazão do gás para 0,91 m³/h de hidrogênio a o aumento significativo da corrente para 50,3 A.

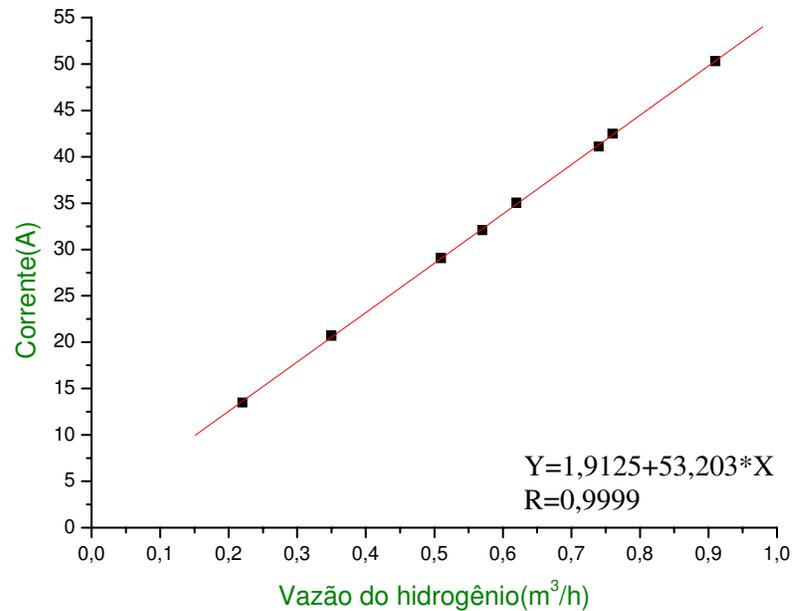


Figura 4.29 - Comportamento da corrente do reator em função de diversas vazões de hidrogênio.

A Figura 4.30 apresenta o comportamento da tensão do reator em função da produção de hidrogênio, nota-se que ocorreu uma variação nas tensões do reator, que depende da quantidade de células presentes no reator eletrolítico e um aumento do setup da máquina. Variando a tensão de 94,4 V a 96,9 V em todos os experimentos realizados com vazões de hidrogênio que de 0, a 0,91 m³/h.

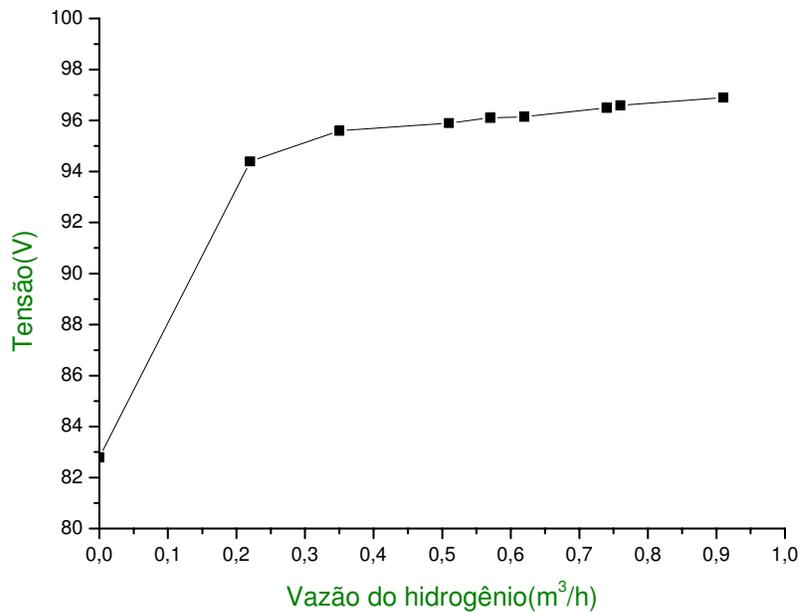


Figura 4.30 – Comportamento da tensão do reator em função de diversas vazões de hidrogênio.

A Figura 4.31 apresenta a variação da potência do reator eletrolítico em função da produção de hidrogênio. Ocorre um aumento da potência em relação à vazão do hidrogênio. Observa-se que a potência elétrica aumenta linearmente com a vazão do gás, mostrando que o aumento da corrente é fundamental para o aumento da potência.

Para uma potência de 1,27 kW tem uma vazão de 0,22 m³/h, e com o aumento da vazão para 0,91 m³/h é necessário um aumento da potência para 4,87 kW, maior potência atingida nos experimentos.

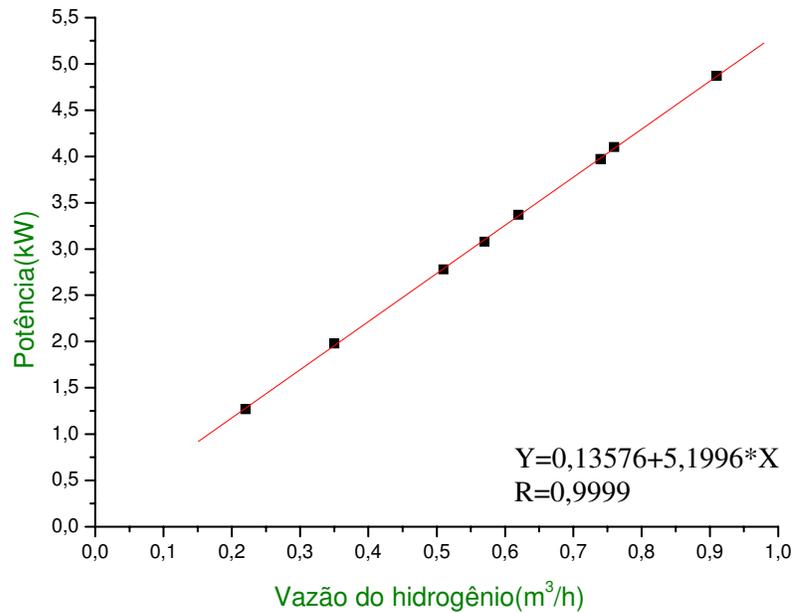


Figura 4.31 – Comportamento da potência do reator em função de diversas vazões de hidrogênio.

A energia consumida por metro cúbico de hidrogênio é a relação entre a potência e a vazão do gás, mostrado na Figura 4.32. O valor da energia diminui à medida que a potência aumenta, a vazão também aumenta mais significativamente que a da potência, diminuindo assim a relação da potência versus vazão do gás.

Observa-se que os valores de energia mais próximos do valor teórico foram os seguintes: As energias de 5,39 kWh/m³ há uma vazão de 0,736 m³/h e 5,37 kWh/m³ há uma vazão de 0,763 m³/h, representam 51% a mais de energia consumida. E a energia que ficou mais próxima da teórica foi a de 5,35 kWh/m³, com 50% de energia consumida a mais que a teórica. As demais energias representam valores acima de 52% de energia consumida quando comparada com a energia teórica.

Teoricamente para produzir 1 m³ de H₂ (0,5 m³ de O₂) são necessários 806,3g de H₂O e 730,4 kJ de energia, ou seja, 3,55 kWh/m³ de hidrogênio (Pereira, 2005).

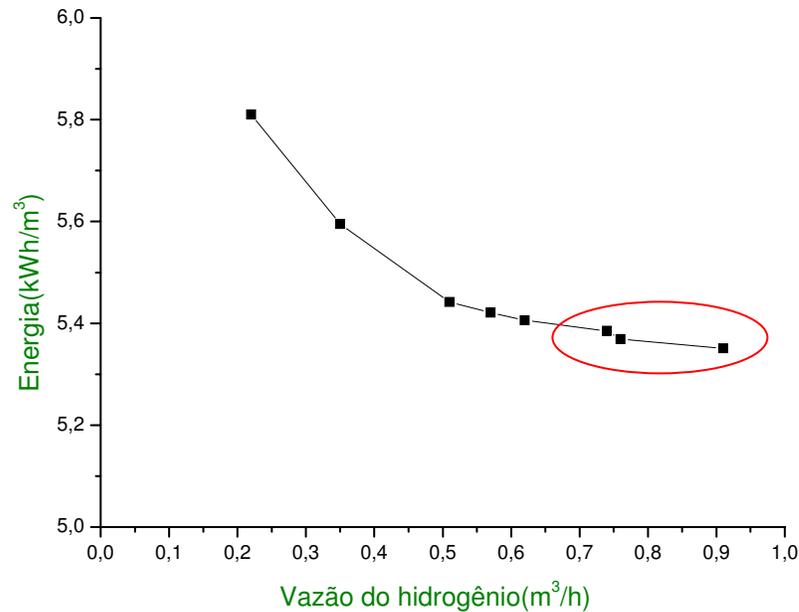


Figura 4.32 – Comportamento da energia consumida no reator em função de diversas vazões de hidrogênio.

4.7 PROJETO DE UM SISTEMA DE FORNECIMENTO DE ENERGIA SOLAR PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO

De posse dos dados obtidos através do consumo energético do eletrolisador, poderá ser projetado um sistema de fornecimento de energia solar, ou seja, definir o número de painéis fotovoltaicos necessários ao melhor desempenho do eletrolisador. Várias configurações de painéis são possíveis, painéis em série e/ou paralelos.

Na Tabela 4.9 foram colocados faixas de corrente e de vazões, além da tensão do reator eletrolítico, dados necessários para determinação do melhor arranjo dos painéis.

Os cálculos para elaboração da quantidade necessária de painéis fotovoltaicos foram baseados nas seguintes especificações: o painel fornece uma tensão de 12 V e uma corrente máxima de 7 A, no entanto tem-se uma perda de carga de 20% sobre a corrente, dessa forma os cálculos foram realizados para uma corrente de 5 A.

Para uma corrente de até 13,50 A, com uma tensão de 94,4 V, são necessários 24 painéis, com 8 painéis em série e 3 conjuntos de painéis em paralelos, fornecendo no máximo 0,22 m³/h de hidrogênio para este tipo de reator eletrolítico. A vazão por unidade de painel para este experimento foi de 0,009.

Tabela 4.9 – Valores de corrente, tensão do reator eletrolítico e o número de painéis necessários para fornecer energia.

Corrente Máxima (A)	Tensão (V)	Número de Painéis em Série	Número de Painéis em Paralelo	Número Total de Painéis Solares	Vazão do H ₂ (m ³ /h)	Vazão /painel (m ³ /h/ unidade de painel)
13,50	94,4	8	3	24	0,220	0,009
20,70	95,6	8	4	32	0,350	0,011
29,05	95,9	8	6	48	0,510	0,011
32,10	96,1	8	7	56	0,568	0,011
35,04	96,15	8	7	56	0,623	0,011
41,10	96,5	8	9	64	0,736	0,011
42,50	96,6	8	9	64	0,763	0,012
50,30	96,9	8	10	80	0,910	0,011

Para uma vazão de 0,35 m³/h de hidrogênio, uma corrente de 20,70 A, são necessários 8 painéis em série e 4 conjuntos de painéis em paralelo, totalizando 32 painéis e uma vazão por unidade de painel de 0,011 m³/h.

Com 48 painéis, 8 painéis em série e 6 conjuntos de painéis em paralelo, de corrente de 29,05 A e 95,9 V de tensão para uma vazão de 0,51 m³/h de hidrogênio. Já com 56 painéis, 8 painéis em série e 7 conjuntos de painéis em paralelo, pode fornecer vazões que variam de 0,568 a 0,623 m³/h de hidrogênio, com correntes de 32,1 e 35,04 A e vazões por unidade de painel 0,011 e 0,011 m³/h respectivamente.

Com 64 painéis, 8 painéis em série e 9 conjuntos de painéis em paralelo, atende a uma faixa de corrente de 41,1 a 42,5 A, com vazões respectivas de 0,736 a

0,763 m³/h de hidrogênio e vazões por unidade de painel de 0,011 e 0,012 m³/h respectivamente.

Sabendo-se que para a máxima corrente aplicada ao reator eletrolítico (50,3 A), o sistema fornece uma vazão de até 0,91 m³/h de hidrogênio; necessitando de 80 painéis, 8 painéis em série para atender aos 96,9 V e 10 conjuntos de painéis em paralelo para uma vazão de 0,011 m³/h por unidade de painel.

Apesar da faixa de corrente de 50,3 A está próximo do consumo de energia teórico de produção de hidrogênio, não se enquadram no funcionamento ideal do reator, pois quando o reator atinge uma corrente acima de 45 A, até sua corrente máxima de trabalho (50 A), a produção de hidrogênio é descoordenada, saindo gás e gotículas minúsculas de substância líquida (que pode ser devido a um arraste de benzina, álcool ou a condensação de vapor de água) pelo maçarico.

Para fornecer uma quantidade maior de gás, é necessário o aumento da corrente, para o aumento da corrente o sistema necessita de um maior conjunto de painéis fotovoltaicos associados em paralelo.

A quantidade de painéis ideal para o sistema são de 64 painéis fornecendo corrente entre 42,50 A, produzindo hidrogênio de 0,763 m³/h, com uma vazão máxima de 0,012 m³/h por unidade de painel.

4.8 COMPORTAMENTO DA TENSÃO, CORRENTE E POTÊNCIA DO REATOR ELETROLÍTICO UTILIZANDO PAINÉIS FOTOVOLTAICOS COMO FONTE DE ENERGIA

Os resultados obtidos nesta etapa foram avaliados e discutidos, quanto ao comportamento da corrente, tensão e potência do reator eletrolítico em função do tempo para diversas vazões de produção do hidrogênio, utilizando energia solar com diferentes configurações de painéis fotovoltaicos em série.

A Figura 4.33 apresenta o comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo, para um sistema de fornecimento de energia solar acoplado a um reator eletrolítico.

A tensão necessária para o funcionamento do reator vai depender do número de células em série que compõe o reator eletrolítico, sendo o reator composto de 47 células em série, que fornece no máximo 2,04 volts por célula e gera uma tensão de até 96 volts no reator eletrolítico. A tensão é fornecida por painéis solares convenientemente associados em série que dependem da tensão nominal de cada painel e da incidência solar de momento sobre os painéis fotovoltaicos.

Os arranjos de painéis solares montados para alimentar o eletrolisador com energia solar foram os seguintes: 6 painéis em série, 9 painéis em série, 12 painéis em série, 15 painéis em série e 21 painéis em série. O número de painéis escolhidos para cada experimento foi devido a disposição em que encontravam-se presente, com o mínimo de 6 painéis e o máximo de 21 painéis solares disponíveis para realizar o experimento.

A Tabela 4.10 apresenta a relação da tensão do reator em função do tempo para diversas configurações de painéis solares em série.

Tabela 4.10 – Valores da tensão do reator em função do tempo para diversas configurações de painéis.

Tensão(V)	82,8	88,0	89,7	90,0	93,9
Painéis	6	9	12	15	21

A Figura 4.33 apresenta o comportamento da tensão em função do tempo com o aumento do número de painéis fotovoltaicos. Pode observar que para um arranjo de 6 painéis em série foi fornecido uma tensão de 82,8 volts ao reator, com 21 painéis a tensão atingiu 93,9 volts, com o aumento da quantidade de painéis solares há o aumento da tensão que alimenta o reator eletrolítico e a incidência solar é fundamental para o aumento da voltagem em cada arranjo de painéis.

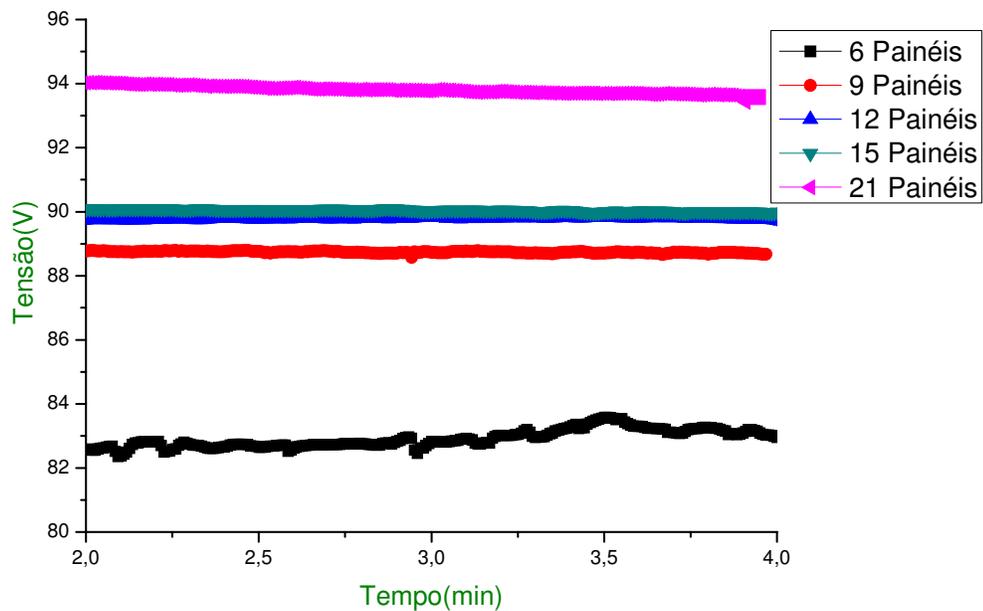


Figura 4.33 – Comportamento da tensão do reator eletrolítico em função do tempo para diversas configuração de painéis solares em série.

A Figura 4.34 apresenta o comportamento da corrente elétrica do reator eletrolítico em função do tempo, para um sistema de fornecimento de energia solar acoplado a um reator eletrolítico. A Tabela 4.11 apresenta a relação da corrente em função do tempo para diversas configurações de painéis solares em série.

Tabela 4.11 – Valores de corrente em função do tempo para diversas configurações de painéis.

Corrente(A)	1,1	3,4	4,3	4,49	5,6
Painéis	6	9	12	15	21

Na Figura 4.34, o reator eletrolítico foi avaliado para diversas configurações de painéis solares, a corrente varia de acordo com o sistema montado. Para a configuração com 6 painéis em série a corrente obtida foi de 1,1 A, com o acréscimo de painéis solares para um arranjo de 21 painéis em série, a corrente atingiu 5,6 A e o

aumento de corrente em relação a quantidade de painéis em série é devido ao aumento da tensão gerada pelo acréscimo de painéis fotovoltaicos.

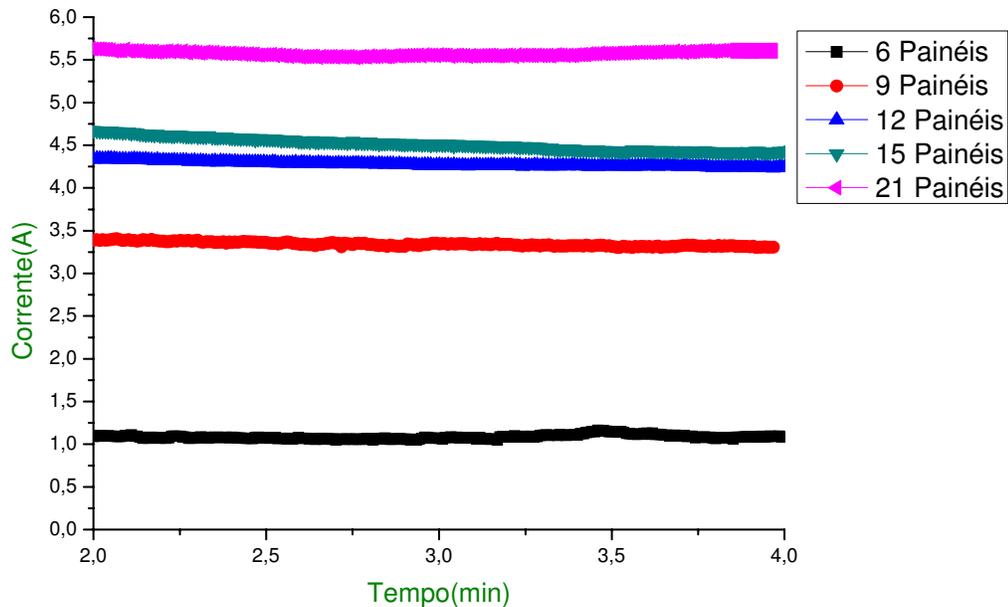


Figura 4.34 – Comportamento da corrente elétrica do reator eletrolítico em função do tempo para diversas configurações de painéis solares em série.

A Figura 4.35 apresenta o comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo, para um sistema de fornecimento de energia solar acoplado a um reator eletrolítico. A Tabela 4.12 apresenta a relação da potência do reator em função do tempo para diversas configurações de painéis solares em série.

Tabela 4.12 – Valores da potência do reator em função do tempo para diversas configurações de painéis.

Potência(W)	91,0	299,2	385,7	404,1	525,8
Painéis	6	9	12	15	21

Através da tensão e corrente, obtém os valores da potência do reator eletrolítico, a Figura 4.35 apresenta a potência que variou de 91,0 W a 525,8 W, para diversos arranjos de painéis solares (6 painéis a 21 painéis solares). O acréscimo de painéis solares aumenta a tensão e corrente, sendo responsável pelo aumento da potência do reator eletrolítico.

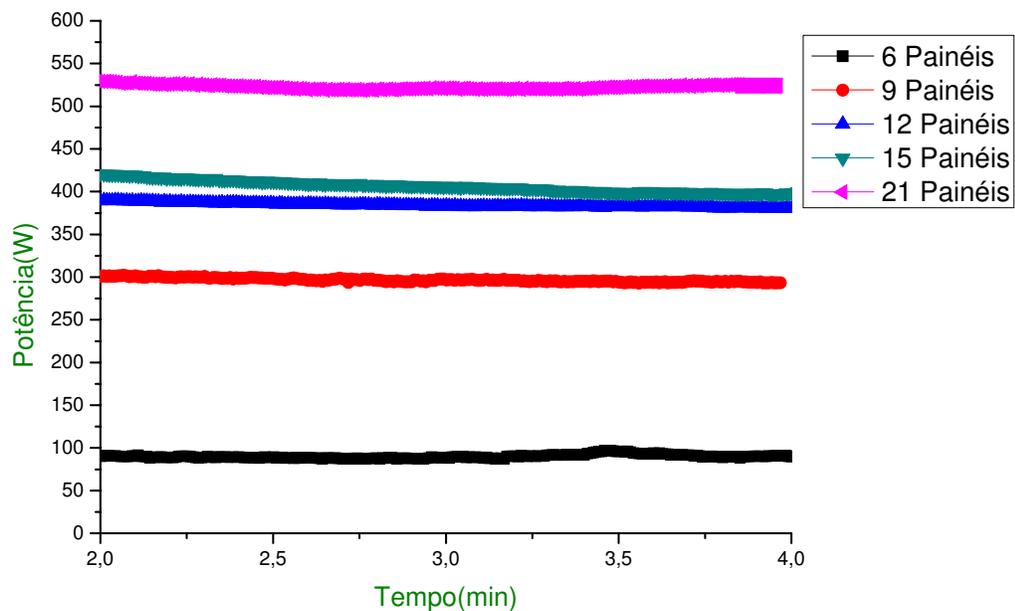


Figura 4.35 – Comportamento da potência do reator eletrolítico em função do tempo para diversas configuração de painéis solares em série.

4.9 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DAS CÉLULAS ELETROLITICAS PARA UM REATOR UTILIZANDO ENERGIA SOLAR.

As tensões aplicadas no reator eletrolítico foram de 82,8 a 93,9 V, obtidas com a diferença de potencial aplicada sobre a quantidade do número de células presente no reator, que são de 47 células, tendo assim em cada célula uma diferencia de potencial de 1,76 a 1,99 Volts. Através da diferença de potencial aplicada, pode-se obter a

eficiência das células eletrolíticas, a Tabela 4.13 apresenta a relação da tensão aplicada no reator, a tensão aplicada por célula e a eficiência das células.

A eficiência de uma célula eletrolítica em termos de tensão é dada por:

$$\eta(\%) = \left(\frac{1,47}{V} \right) \times 100 \quad (4.5)$$

Tabela 4.13 – Tensão aplicada ao reator, tensão em cada célula e eficiência das células.

Tensão(V)	Tensão em cada célula(V)	Eficiência(%)
82,8	1,76 V	83,5
88,0	1,87 V	78,6
89,7	1,91 V	76,9
90,0	1,91 V	76,9
93,9	1,99 V	73,9

A tensão aplicada a cada célula foi de 1,76 a 1,99 volts, tendo assim uma eficiência de 73,9 a 83,5%. Os valores das eficiências foram considerados satisfatórios, quando comparados com células eletrolíticas industriais. As células eletrolíticas industriais operam com uma diferença de potencial que varia de 1,70 a 2,10 volts, o que corresponde a um rendimento de 70 a 86,5% (Memento de L'Hydrogène, 2002).

4.10 MEDIÇÃO DA VAZÃO DOS GASES OXIGÊNIO E HIDROGÊNIO UTILIZANDO COMO FONTE DE ENERGIA PAINÉIS FOTOVOLTAICOS.

Para determinar a produção do gás foi montado um sistema com uma proveta e um recipiente de vidro no qual foi imerso o maçarico com saída de gás. Os dados apresentados na Tabela 4.14 referem-se à curva de calibração das vazões em função da corrente. Cada ponto na Figura representa a média de três repetições realizadas para cada valor de corrente e tempo de esvaziamento da proveta. A Figura 4.36 apresenta a curva de

calibração das vazões em função da corrente, o aumento da vazão do gás é proporcional ao aumento da corrente.

Tabela 4.14 – Valores experimentais da curva de calibração das vazões em função da corrente.

Corrente(A)	0	1,1	3,4	4,3	4,49	5,6
Tempo(s)	0	214	71	46	35	54
Volume (L)	0	0,5	1	1	1	2
Vazão(L/min)	0	0,14	0,85	1,3	1,7	2,25

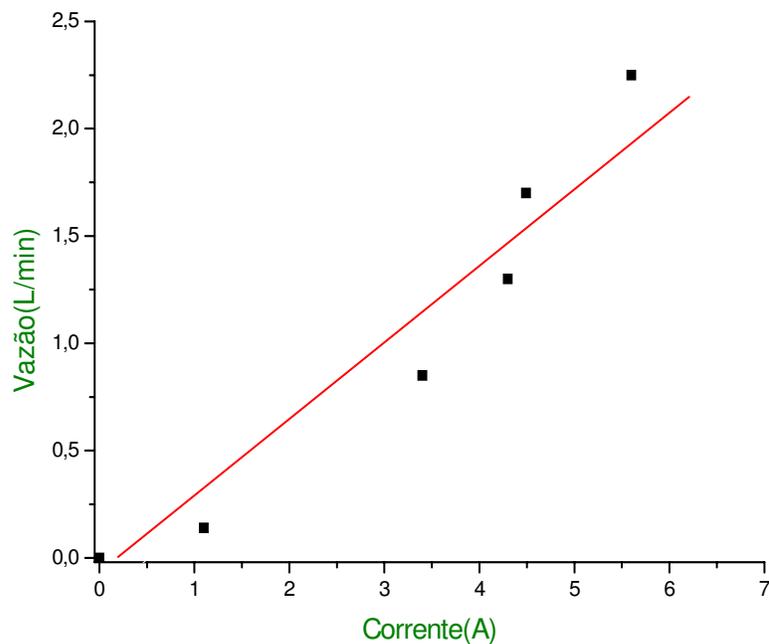
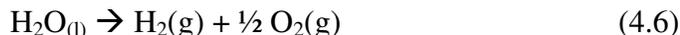


Figura 4.36 – Curva de calibração da vazão em função da corrente.

4.11 CÁLCULOS DA PRODUÇÃO DO HIDROGÊNIO UTILIZANDO COMO FONTE DE ENERGIA OS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS

A partir dos dados da Tabela 4.15 foi possível quantificar a produção de hidrogênio obtida na reação da decomposição da água:



Assim foi visto que para cada mol de água são produzidos 1 mol de hidrogênio e 0,5 mol de oxigênio. A equação mostra que a vazão é igual à 1,5 vezes a vazão do hidrogênio. Conseqüentemente, a vazão do hidrogênio é:

Vazão do hidrogênio = 2,25 L/min vazão do gás ($\text{H}_2 + \text{O}_2$) / 1,5 = 1,50 L/min de hidrogênio.

De forma análoga foram realizados todos os cálculos para determinar a produção de hidrogênio em cada experimento, encontram-se presentes na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Vazão do hidrogênio.

Vazão do gás $\text{O}_2 + \text{H}_2$ (L/min)	Vazão do H_2 (L/min)
0,14	0,093
0,86	0,57
1,30	0,87
1,69	1,13
2,25	1,50

4.12 RELAÇÃO DA VAZÃO DA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO EM RELAÇÃO A CORRENTE, TENSÃO, POTÊNCIA DO ELETROLISADOR E ENERGIA CONSUMIDA UTILIZANDO ENERGIA SOLAR.

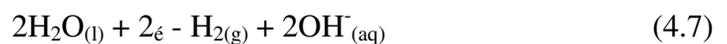
A Tabela 4.16 apresenta a relação das variáveis relacionadas nas figuras abaixo, mostrando que com o aumento da vazão do gás, a necessidade do aumento da corrente aplicada no reator eletrolítico, visto que a tensão é obtida a partir da irradiação solar e o número de células do reator, tendo assim um aumento da potência do reator, que é a energia necessária para produção do hidrogênio.

Tabela 4.16 – Consumo de Hidrogênio em relação às variáveis Corrente, Tensão, Potência elétrica do Reator Eletrolítico e Energia Consumida.

Corrente (A)	Tensão (V)	Potência (kW)	Vazão do H ₂ (m ³ /h)	Energia (kWh/ m ³)	Vazão do H ₂ (L/min)
1,1	82,8	0,091	0,0056	16,25	0,093
3,4	88,0	0,299	0,034	8,79	0,57
4,3	89,7	0,3857	0,052	7,41	0,87
4,49	90,0	0,4041	0,068	5,94	1,13
5,6	93,9	0,5258	0,090	5,84	1,50

A Figura 4.37 apresenta a variação da corrente elétrica em função da produção de hidrogênio, evidenciando que com o aumento da corrente elétrica ocorre o aumento da produção do hidrogênio.

A produção de hidrogênio é proporcional à corrente que passa através de uma célula eletrolítica. A seguinte reação demonstra o aumento da corrente em relação ao aumento da vazão do gás.



Para uma corrente de 1,1 A tem-se uma vazão de 0,093 L/min de hidrogênio, e a medida que aumenta a vazão do gás para 1,50 L/min de hidrogênio ocorre o aumento significativo da corrente para 5,6 A.

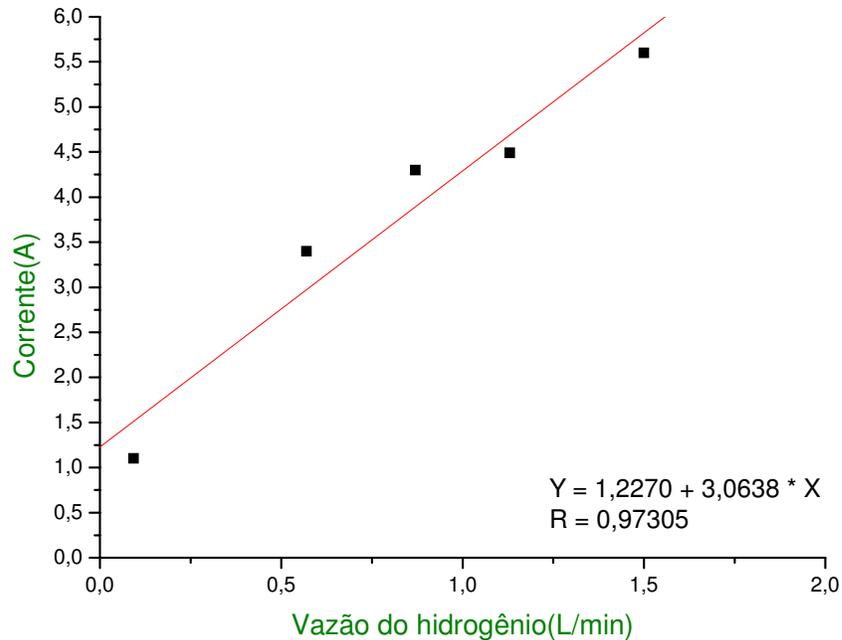


Figura 4.37 - Comportamento da corrente do reator em função de diversas vazões de hidrogênio.

A Figura 4.38 apresenta o comportamento da tensão do reator em função da produção de hidrogênio, nota-se o aumento da tensão do reator depende da quantidade de células presentes no reator eletrolítico, número de painéis ligados em série e irradiação solar. Com o aumento na tensão gera um aumento da corrente, que por consequência produz uma maior vazão de hidrogênio. A tensão varia de 82,8 a 93,9 V, a uma vazão de 0,093 e 1,50 L/min de hidrogênio.

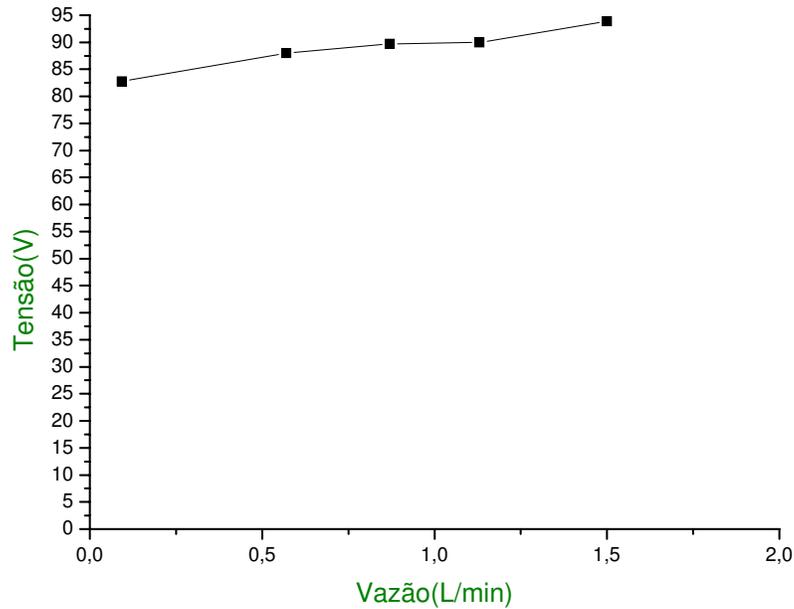


Figura 4.38 – Comportamento da tensão do reator em função de diversas vazões de hidrogênio.

A Figura 4.39 apresenta a variação da potência do reator eletrolítico em função da produção de hidrogênio. Ocorre um aumento da potência em relação à vazão do hidrogênio. Observa-se que a potência elétrica aumenta linearmente com a vazão do gás, mostrando que o aumento da corrente e da tensão é fundamental para o aumento da potência.

Para uma potência de 91,0 kW tem uma vazão de 0,093 L/min, e com o aumento da vazão para 1,50 L/min é necessário um aumento da potência para 525,8 W, maior potência atingida nos experimentos.

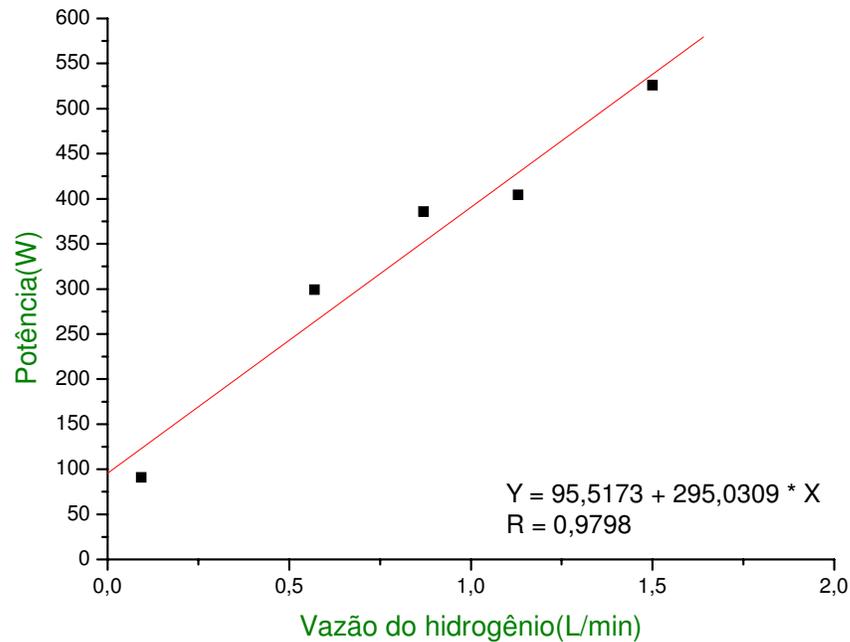


Figura 4.39 – Comportamento da potência do reator em função de diversas vazões de hidrogênio.

A energia consumida por metro cúbico de hidrogênio é a relação entre a potência e a vazão do gás, apresentado na Figura 4.40. O valor da energia diminui, porque a medida que a potência aumenta, também a vazão aumenta, visto que a vazão aumenta significativamente em relação a potência, diminuindo assim a relação da potência versus vazão do gás.

Observando-se o comportamento da variação do consumo de energia em função da vazão, nota-se que, para a energia de $5,94 \text{ kWh/m}^3$ há uma vazão de $1,13 \text{ L/min}$ e para $5,84 \text{ kWh/m}^3$ há uma vazão de $1,50 \text{ L/min}$, as energias encontram-se próximo da faixa do consumo de $3,55 \text{ kWh/m}^3$, valor teórico para a produção de hidrogênio. Estão destacadas na Figura 4.40 as energias que estão próximas da faixa de consumo teórico.

Teoricamente para produzir 1 m^3 de H_2 ($0,5 \text{ m}^3$ de O_2) são necessários $806,3\text{g}$ de H_2O e $730,4 \text{ kJ}$ de energia, ou seja, $3,55 \text{ kWh/m}^3$ de hidrogênio (Pereira, 2005).

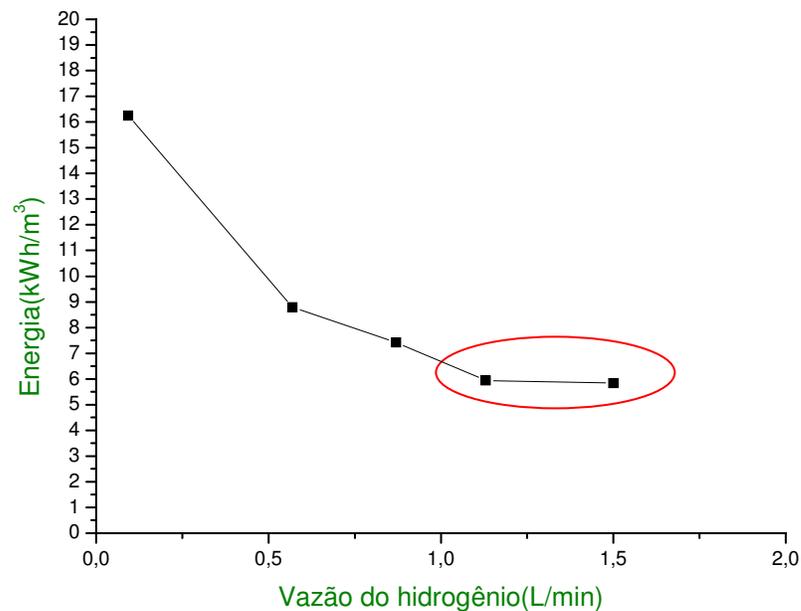


Figura 4.40 – Comportamento da energia consumida no reator em função de diversas vazões de hidrogênio.

4.13 SISTEMA DE FORNECIMENTO DE ENERGIA SOLAR PARA A PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO

De posse dos dados obtidos através da corrente, tensão e o número de painéis utilizados para a produção de hidrogênio, foram avaliados a energia consumida e a vazão de hidrogênio por unidade de painel.

Na Tabela 4.17 foram colocados os valores de corrente, tensão, número de painéis em série utilizados no experimento, energia consumida, a vazão de hidrogênio produzida e a vazão por unidade de painel solar.

Tabela 4.17 – Valores de corrente, tensão do reator eletrolítico, energia consumida e o número de painéis necessários para fornecer energia.

Corrente (A)	Tensão (V)	Números de Painéis em Série	Energia (kWh/m ³)	Vazão do H ₂ (L/min)	Vazão/painel (L/min/unid)
1,1	82,8	6	16,25	0,093	0,0155
3,4	88,0	9	8,79	0,57	0,060
4,3	89,7	12	7,41	0,87	0,073
4,49	90,0	15	5,94	1,13	0,075
5,6	93,9	21	5,84	1,50	0,071

Para uma corrente de 1,1 A com uma tensão gerada de 82,8 V, fornecido por 6 painéis fotovoltaicos produziu 0,093 L/min de hidrogênio e consumiu uma energia de 16,25 kWh/m³, produzindo uma vazão de 0,0155 L/min por unidade de painel solar. Para este resultado precisam de um elevado consumo de energia para produzir uma vazão desprezível, valores obtidos num dia de insolação baixa.

Para produzir uma vazão de 0,57 L/min a uma corrente de 3,4 A e 88,0 volts, foram necessários 9 painéis, que consumiram uma energia de 8,79 kWh/m³ e produziram uma vazão de 0,060 L/min por unidade de painel fotovoltaico. Para um dia nublado utilizou-se o mínimo de 9 painéis solares que produziram hidrogênio com uma vazão significativa de 0,57 L/min.

Para uma corrente de 4,3 A com uma tensão gerada de 89,7 V, fornecido por 12 painéis fotovoltaicos produziu-se 0,87 L/min de hidrogênio e consumiu-se uma energia de 7,41 kWh/m³, produzindo uma vazão de 0,073 L/min por unidade de painel solar. Esses valores foram obtidos num dia de insolação baixa.

Para produzir uma vazão de 1,13 L/min a uma corrente de 4,49 A e 90,0 volts, foram necessários 15 painéis, que consumiram uma energia de 5,94 kWh/m³ (valor este próximo do valor teórico de produção de hidrogênio) e produziram uma vazão máxima dentre as configurações de painéis em série de 0,075 L/min por unidade de painel fotovoltaico. Esses valores foram obtidos num dia de insolação baixa.

A Figura 4.41 apresenta o comportamento da vazão por unidade de painel em função ao número de painéis solares ligados em série, que foram testados no reator eletrolítico. É possível observar que a vazão por unidade de painel aumenta com o acréscimo de painéis solares até uma configuração de 15 painéis, ponto em que atinge a máxima vazão de $0,075 \text{ m}^3/\text{h}$ por unidade de painel.

Quando são adicionados mais painéis em série ligados aos 15 painéis solares, diminui o rendimento da vazão por cada painel, visto que a vazão já não aumenta tão significativamente com o aumento de painéis. Logo, o ponto ótimo de painéis solares para este eletrolisador são 15 painéis em série.

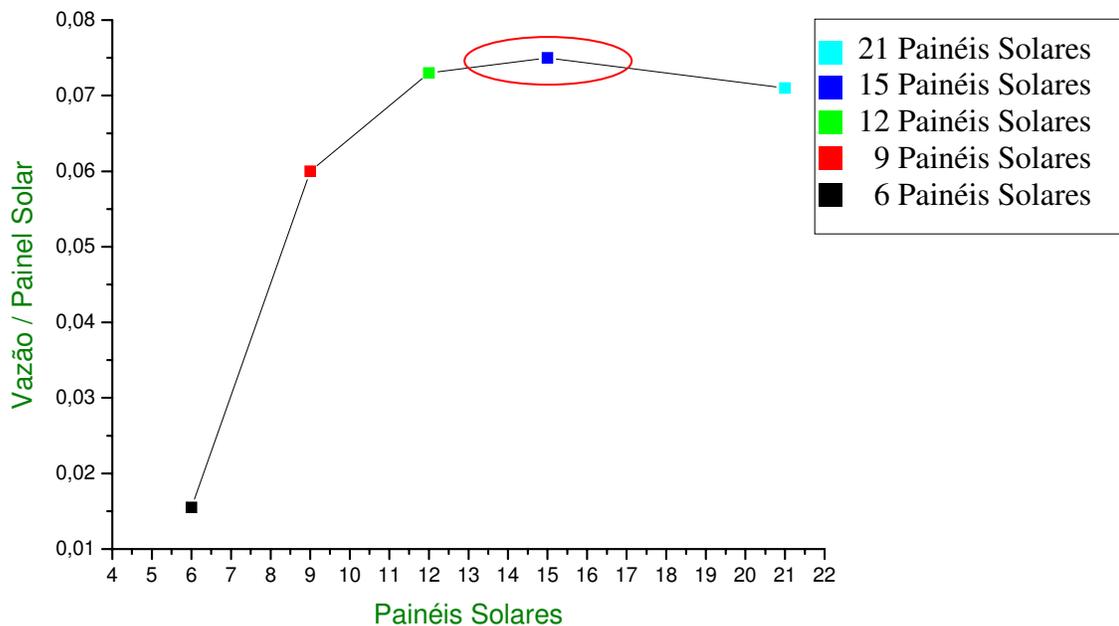


Figura 4.41: Comportamento da vazão por unidade de painel em função do número de painéis solares.

Apesar do arranjo de 21 painéis consumirem uma energia $5,84 \text{ kWh/m}^3$, valor este próximo do valor teórico de produção de hidrogênio e a uma corrente de 5,6 A e tensão de 93,9 volts, não se enquadram no funcionamento ideal do reator, por diminuir a vazão em relação a cada unidade de painel solar, elevando os custos com painéis fotovoltaicos.

4.14 COMPORTAMENTO DO ELETROLISADOR EM FUNÇÃO DA TENSÃO E CORRENTE DO REATOR ELETROLÍTICO

O eletrolisador bipolar é formado por um conjunto de células eletrolíticas ligadas em série, que aumenta a tensão do reator com o aumento da quantidade de células e a incidência solar. O eletrolisador em estudo é composto de 47 células em série.

A configuração do eletrolisador requer baixas amperagens e altas voltagens devido ao número de células conectadas em série. Assim, os painéis solares foram montados em diversas configurações:

- 6 painéis solares em série;
- 9 painéis solares em série;
- 12 painéis solares em série;
- 15 painéis solares em série;
- 18 painéis solares em série;
- 21 painéis solares em série.

Os painéis solares foram ligados diretamente ao eletrolisador, no entanto a corrente e a tensão não atingiram seus picos, devido a presença de nuvens e a ausência de baterias para suprir a queda de energia nos momentos de baixa irradiação solar.

A Tabela 4.18 representa a corrente e tensão, valores fornecidos pelos painéis fotovoltaicos.

Tabela 4.18 – Valores de corrente e tensão, fornecidos por painéis solares.

Corrente (A)	Tensão(V)	Quantidade de Painéis
1,1	82,8	6
2,25	86,7	9
3,5	89,2	12
4,49	90	15
6,6	93,9	18
7,5	94,2	21

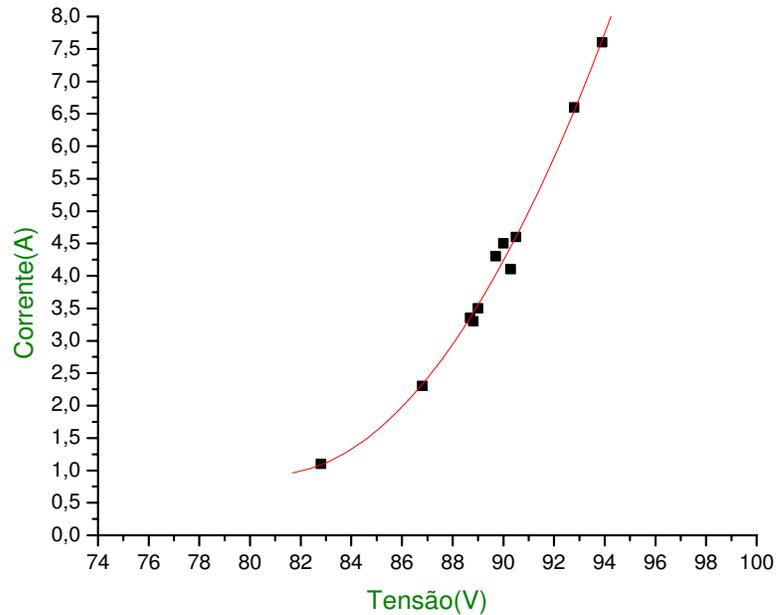


Figura 4.42 – Comportamento da corrente versus a tensão do eletrolisador.

A Figura 4.42 mostra o comportamento da corrente *versus* tensão, no qual observa-se um aumento na tensão que gera um aumento na corrente. A partir de 82,8 V, ocorre a formação das primeiras bolhas dos gases nas cavidades do reator, onde haverá produção de hidrogênio. Assim, com a configuração de 6 painéis em série obtém o início da formação das primeiras bolhas dos gases.

Pode ser observado que a partir de uma configuração de 6 painéis solares em série, ocorre uma produção mínima de hidrogênio a uma tensão acima de 82,8 V.

5. CONCLUSÕES

De acordo com o estudo realizado durante o trabalho de um sistema de produção de hidrogênio eletrolítica utilizando energia elétrica, foram obtidas as seguintes conclusões:

- Para o sistema funcionando com energia elétrica, o aumento da corrente vai depender da tensão, a voltagem aumenta com um ajuste no setup da máquina. Os valores da potência vão aumentar com a tensão e corrente. O aumento da produção de hidrogênio é proporcional ao fluxo de elétrons que passa através de uma célula eletrolítica.
- A energia é consumida em relação a potência com o volume de hidrogênio produzido em metros cúbicos, os valores da energia diminuem com o aumento da vazão do hidrogênio, isso ocorre devido ao aumento significativo da vazão em relação à potência. Logo as energias de $5,39 \text{ kWh/m}^3$, $5,37 \text{ kWh/m}^3$ e $5,35 \text{ kWh/m}^3$ referentes às correntes de 41,10, 42,50 e 50,30 A respectivamente. Porém para uma corrente superior a 45 A o sistema não tem seu funcionamento adequado para a produção do hidrogênio, devido sair do maçarico gás e gotículas minúsculas de substâncias líquidas.
- O sistema tem seu funcionamento ótimo em 42,5 A, a uma voltagem de 96,6 V e energia consumida de $5,37 \text{ kWh/m}^3$ para 64 painéis. As quantidades superiores a 64 painéis apenas elevam os custos, pois com 64 painéis atingiria a maior vazão de $0,012 \text{ m}^3/\text{h}$ por unidade de painel.

Para um estudo realizado de um sistema de produção de hidrogênio eletrolítica utilizando energia solar, foram obtidas as seguintes conclusões:

- O aumento da corrente vai depender da tensão, a voltagem aumenta com o acréscimo de painéis fotovoltaicos em série e a incidência solar sobre os painéis. Os valores da potência vão aumentar com a tensão e corrente. O aumento da produção de hidrogênio é proporcional ao fluxo de elétrons que passa através de uma célula eletrolítica.
- Os valores da energia diminuem com o aumento da vazão do hidrogênio, isso ocorre devido ao aumento significativo da vazão em relação à potência. Logo as energias de $5,94 \text{ kWh/m}^3$ e $5,84 \text{ kWh/m}^3$ referentes as configurações de 15 e 21 painéis solares respectivamente.
- Com uma voltagem aplicada ao sistema de $82,8 \text{ V}$, com 6 painéis em série há produção mínima de hidrogênio, com uma tensão de $88,0 \text{ V}$, gerada por 9 painéis em série ocorre a produção de hidrogênio significativa, mas a partir de $93,9 \text{ V}$ gerados de 15 painéis em série o eletrolisador bipolar fornece sua maior produção de $0,075 \text{ L/min}$ de hidrogênio por unidade de painel fotovoltaico.
- No comportamento do eletrolisador em função da corrente versus tensão, pode observar um aumento da tensão que gera um aumento na corrente. A partir de $82,8 \text{ V}$, começa a formação das primeiras bolhas do gás, utilizando o mínimo de 6 painéis em série.

6. PERSPECTIVAS

Perspectivas para futuros trabalhos:

- Montar e testar um eletrolisador constituído de 6 células eletrolíticas com a produção separada do H₂ e do O₂.
- Acoplar o eletrolisador e testar o sistema de fornecimento de energia solar projetado, isto é, o número de painéis fotovoltaicos e de baterias necessárias ao melhor desempenho do eletrolisador;
- Estimar o custo do hidrogênio eletrolítico obtido da fonte de energia solar.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, J. J., **Avaliação de Parâmetros de Combustão H₂/O₂ obtidos a partir de um Reator Eletroquímico Bipolar** (Dissertação de Mestrado) DEQ/UFPB/ Campina Grande – PB, 1992.

AMOS, W.A., **Costs of storing and transporting hydrogen, Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory (NREL)**, November 1998.

AMORIM, M. C. C., **Avaliação de um Sistema de Aquecimento fazendo uso de Hidrogênio Eletrolítico como Fonte de Energia** (Dissertação de Mestrado), DEQ / UFPB / Campina Grande – PB, 1995.

ANDRADE, N. C., **Avaliação de uma Soldadora Oxi - Hidrogênica com Adição de Oxigênio** (Dissertação de Mestrado), DEQ / UFPB / Campina Grande – PB, 1993.

APPLEBY, A.J e FOULKES, F.R., **Fuel Cell Handbook, Krieger Publishing Company Malabar, Flórida.**, 1993.

ARNASON, B. and Sigfússon, T., **Iceland – a future hydrogen economy**, International Journal of Hydrogen Energy, 25 (2000) 89.

AVACA, L. A. e TOKORO, R. . **A História, Evolução e Crescimento da Eletroquímica/Eletroanalítica Nestes Últimos 25 Anos**. Química Nova, v. 25, n. 1, p. 25-30, 2002

BARTHEL, H., Brocke, W.A., Bonhoff, 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.

BOCKRIS J. O. M., e, CONWAY B. E. **Modern Aspects of Electrochemistry**, Plenum Press – New York, 1975.

COLLEGE OF THE DESERT, a) **Hydrogen Fuel cell Engines and Related Technologies, Module 2: Hydrogen Use, 2001.** b) **Hydrogen Fuel cell Engines and Related Technologies, Module 1: Hydrogen Use, 2001.**

DUNN, S., **Hydrogen futures: toward a sustainable energy system**, International Journal of Hydrogen Energy, 27 (2002) 235.

GALLI, S. and Stefanoni, M., **Development of a solar-hydrogen cycle in Italy.** International Journal of Hydrogen Energy, 22 (1997) 453.

GOETZBERGER, A., LUTHER, J e WILLEKE, G., **Solar cells: past, present, future**, Solar Energy Materials & Solar Cells, 74 (2002) 1-11.

GONZALES, E. R., **Eletrocatalise e poluição ambiental.** Química Nova, 23 (2000) 2.

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.

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.

KREUTER, W.Hofmann, H. **Hydrogen Production from Renewables.** EESD N°: NNE5-PTA-2002-003 / 1.

LEE, J.D., Química inorgânica não tão concisa, 4ª ed., Editora 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.

LUTERO, C. L., VEZIROGLU, T. N., **Long- term environmental and sócio-economic impact of a hydrogen energy program in Brazil**. International Journal of Hydrogen Energy, 26 (2001) 39 – 45.

MCVEIGH, J.C., Sun Power – **An introduction to the applications of solar energy**. Pergamon International Library. England, 1979.

Memento de L’Hydrogène, disponível no site Association Française de L’Hydrogène < <http://www.afh2.org/>>. Acesso em outubro de 2003.

NOWOTNY, J e SHEPPARD, L.R, **Solar-hydrogen**, International Journal of Hydrogen Energy, 32 (2007) 2607 – 2608.

PALZ, W. **Energia solar e fontes alternativas**. Hemus. São Paulo, 1981.

PEQUENO, F. S., **Aplicação do Hidrogênio Eletrolítico para fins de Aquecimento de Ambiente Através de um Trocador de Calor Convectivo** (Dissertação de Mestrado), DEQ / UFPB / Campina Grande – PB, 1996.

PEREIRA, F. F., **Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento para Cozimento de Argilas Utilizando Hidrogênio Eletrolítico como Combustível** (Dissertação de Mestrado), DEQ / UFCG / Campina Grande – PB, 1999.

PEREIRA, F. F., **Desenvolvimento e Avaliação de um Sistema de Aquecimento Utilizando Hidrogênio Eletrolítico como Combustível** (Tese de Doutorado), DEQ / UFCG / Campina Grande – PB, 2005.

SEBASTIAN, P.J; e GAMBOA, S.A, **Local grid connected integrated solar-hydrogen-fuel cell systems in México**. International Journal of Hydrogen Energy, 32 (2007) 3109.

SEBASTIAN, P.J., **Materials for hydrogen production & storage**. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 26, Issue 12, December 2001, Page 1257.

SOBRINHO, M. A. M., **Estudo de Sistema de Aquecimento de Ambiente Utilizando Hidrogênio Eletrolítico como Combustível** (Dissertação de Mestrado), DEQ / UFPB / Campina Grande – PB, 1995.

SULAIMAN, A., VEZIROGLU, T. N., **Solar-hydrogen energy system for Saudi Arabia**, International Journal of Hydrogen Energy, 29 (2004) 1181 – 1190.

VERA, L.H. e KRENZINGER, A. Software PVSIZe - **Desempeño en Simulación de Sistemas Fotovoltaicos**. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. v. 8, n. 1, p. 04.13-04.18, Argentina, 2004.

VLADIMIR, L., **Gaseous hydrogen production by water dissociation method**. International Journal of Hydrogen Energy.

WENDT, H.; Götz, M. e Linardi, M., **“Tecnologia de Células a Combustível”**, Química Nova, 2000, 23(4).