

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR ANDRÉ LUIS
..... FURLAN E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 25 / 02 / 2008
.....
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**Análise Comparativa de Sistemas de
Armazenamento de Energia Elétrica
Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio
em Localidades Isoladas da Região Amazônica**

Autor: André Luis Furlan
Orientador: Prof. Dr. Newton Pimenta Neves Jr.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

**Análise Comparativa de Sistemas de
Armazenamento de Energia Elétrica
Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio
em Localidades Isoladas da Região Amazônica**

Autor: **André Luis Furlan**

Orientador: **Prof. Dr. Newton Pimenta Neves Jr.**

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos.

Área de Concentração:

Dissertação de mestrado acadêmico apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Campinas, 2008
SP - Brasil

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

F978a Furlan, André Luis
Análise comparativa de sistemas de armazenamento de energia elétrica fotovoltaica por meio de baterias e hidrogênio em localidades isoladas da região Amazônica / André Luis Furlan. --Campinas, SP: [s.n.], 2008.

Orientador: Newton Pimenta Neves Junior
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Geração de energia fotovoltaica. 2. Baterias. 3. Hidrogênio como combustível. 4. Células a combustível. I. Neves Junior, Newton Pimenta. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Comparative analysis of photovoltaic power storage systems by means of batteries and hydrogen in remote areas of the Amazon region of Brazil

Palavras-chave em Inglês: Photovoltaic panel, Batteries, Hydrogen and fuel cells

Área de concentração:

Titulação: Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos

Banca examinadora: Ennio Peres da Silva, Maria Julita Guerra Ferreira

Data da defesa: 25/02/2008

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADEMICO

**Análise Comparativa de Sistemas de
Armazenamento de Energia Elétrica
Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio
em Localidades Isoladas da Região Amazônica**

Autor: **André Luis Furlan**

Orientador: **Prof. Dr. Newton Pimenta Neves Jr.**

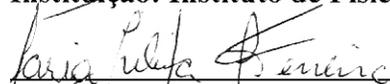
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Newton Pimenta Neves Jr., Presidente
Instituição: Instituto de Física Gleb Wataghin - UNICAMP



Prof. Dr. Ennio Peres da Silva
Instituição: Instituto de Física Gleb Wataghin - UNICAMP



Profa. Dra. Maria Julita Guerra Ferreira
Instituição: CTEEP/São Paulo

Campinas, 25 de fevereiro de 2008

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Dorival e Rosa.

Agradecimentos

Ao Prof. Newton Pimenta pela orientação e confiança depositadas durante o trabalho.

Ao pessoal do Laboratório de Hidrogênio, especialmente ao Antônio, Fernando, Paulo e Daniel, amigos indispensáveis para a realização desta dissertação.

Aos meus irmãos Adilson, Beatriz e Eduardo, que de uma forma ou de outra me ajudaram a tornar possível mais um sonho.

A Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro.

Este trabalho não poderia ser realizado sem a ajuda dessas pessoas e instituições, às quais presto minhas sinceras homenagens.

“Se enxerguei mais longe foi porque me apoiei em ombros de gigantes.”
Isaac Newton

Resumo

FURLAN, André Luís, *Análise Comparativa de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica Fotovoltaica por meio de Baterias e Hidrogênio em Localidades Isoladas da Região Amazônica*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 118 p. Dissertação (Mestrado)

Neste trabalho foram feitas análises comparativas entre as formas de armazenamento de energia elétrica fotovoltaica pela forma tradicional, através de baterias de chumbo-ácido, e por meio de hidrogênio eletrolítico para posterior reconversão em eletricidade utilizando células a combustível. Para tanto, foi desenvolvido um modelo matemático para o dimensionamento dos sistemas, implementado numa planilha eletrônica, onde foram consideradas as principais características e eficiências dos equipamentos que compõem os sistemas, bem como o perfil de carga característico das comunidades da Região Amazônica. A seguir, foi realizada uma análise econômica de ambos os sistemas para uso em comunidades isoladas, tendo sido verificado que nas condições estabelecidas o sistema utilizando baterias apresenta uma vantagem de 20%. No entanto, observou-se que uma redução de aproximadamente 35% nos custos do conjunto eletrolisador/reservatório/célula a combustível, tecnologias ainda em processo de grande evolução tecnológica, torna o sistema a hidrogênio bastante competitivo, podendo-se constituir na melhor opção para o armazenamento de energia de origem fotovoltaica, principalmente devido aos riscos ambientais associados ao manejo de grandes bancos de baterias em regiões isoladas.

Palavras Chave: Painel fotovoltaico, Bateria, Hidrogênio e Célula a Combustível

Abstract

FURLAN, André Luís, *Comparative Analysis of Photovoltaic Power Storage Systems by means of Batteries and Hydrogen in Remote Areas of the Amazon Region of Brazil*, Campinas,; Mechanical Engineering School, The State University of Campinas, 2008. 118 p. Dissertation (Master's Degree).

In this work, comparative analyses of photovoltaic power storage were made, first by the traditional means employing lead-acid batteries, and second by means of electrolytic hydrogen which was later reconverted to power in a fuel cell. In order to design the two systems, it was used a load profile of the communities in Amazon region and by means of a mathematical model, implemented in a spreadsheet, that considers the several devices and their efficiencies in order to make it possible to specify the system components. This was followed by an economical analysis of the two systems for use in remote communities. Considering the present conditions, it was verified that the battery system is 20% more advantageous. However, it was also observed that a reduction of about 35% in the cost of the electrolyzers/buffer/fuel cell, technologies still in processes of development, would make the hydrogen system very competitive, becoming the best option for photovoltaic power storage, especially due to the environmental risks associated with the use of large battery banks in remote regions.

Key Words: Photovoltaic panel, Batteries, Hydrogen and Fuel Cells

Índice

| | |
|---|-------------|
| Dedicatória | iv |
| Agradecimentos | v |
| Resumo | vii |
| Abstract | viii |
| Lista de Figuras | xi |
| Lista de Tabelas | xiii |
| Nomenclatura | xiv |
| Capítulo 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Justificativa | 1 |
| 1.2 Objetivos..... | 5 |
| 1.3 Estrutura da Dissertação | 5 |
| Capítulo 2 Revisão Bibliográfica | 7 |
| 2.1 Energia Solar Fotovoltaica | 7 |
| 2.1.1 Fundamentos da Transformação Fotovoltaica..... | 11 |
| 2.1.2 Características do Fornecimento Fotovoltaico | 13 |
| 2.2 Sistema de Armazenamento: Baterias | 15 |
| 2.2.1 Visão Geral | 15 |
| 2.2.2 Características referentes às formas de aplicação..... | 16 |
| 2.2.3 Características referentes aos tipos de construção..... | 17 |
| 2.2.4 Características elétricas | 18 |
| 2.2.5 Tipos de baterias | 21 |
| 2.3 A eletrólise da água | 28 |
| 2.3.1 Descrição do processo de eletrólise | 29 |
| 2.3.2 Eletrolisadores bipolares..... | 35 |
| 2.4 Células a combustível..... | 37 |
| 2.5 Características do Hidrogênio | 41 |
| 2.5.1 Métodos de produção de hidrogênio | 43 |
| 2.6 Sistemas solar-fotovoltaico-hidrogênio | 44 |
| 2.6.1 Projetos com energia solar fotovoltaica com armazenamento em hidrogênio desenvolvidos no mundo | 45 |
| 2.7 Análise Econômica | 45 |
| 2.7.1 Valor Presente Líquido (VPL)..... | 46 |
| 2.7.2 Incertezas e riscos..... | 47 |

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| Capítulo 3 | Materiais e Métodos | 48 |
| 3.1 | Dimensionamento de sistemas com painéis fotovoltaicos | 48 |
| 3.2 | O modelo matemático para balanço de energia dos sistemas..... | 48 |
| 3.3 | Descrição dos Sistemas Fotovoltaicos..... | 49 |
| 3.4 | Sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em baterias | 51 |
| 3.5 | Sistema fotovoltaico com armazenamento de energia na forma de hidrogênio pressurizado | 55 |
| 3.5.1 | Dados da radiação solar incidente | 61 |
| 3.5.2 | Perfil da demanda | 62 |
| 3.5.3 | Sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em acumuladores eletroquímicos (bateria)..... | 64 |
| 3.5.4 | Sistema fotovoltaico com armazenamento de energia na forma de hidrogênio pressurizado | 68 |
| Capítulo 4 | Resultados e Discussão | 72 |
| 4.1 | Comparação entre os sistemas | 72 |
| 4.1.1 | Painéis fotovoltaicos..... | 73 |
| 4.1.2 | Produção, Armazenamento e Reconversão do H ₂ | 74 |
| 4.1.3 | Sistema de controle..... | 75 |
| 4.1.4 | Energia produzida, excedente e autonomia dos sistemas | 75 |
| 4.2 | Análise econômica dos sistemas..... | 79 |
| 4.2.1 | Custos dos sistemas | 79 |
| 4.3 | Custo da energia elétrica produzida pelos sistemas..... | 83 |
| 4.4 | Análise da sensibilidade dos sistemas | 84 |
| Capítulo 5 | Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros..... | 89 |
| 5.1 | Conclusões..... | 89 |
| 5.2 | Sugestões para trabalhos futuros | 91 |
| Capítulo 6 | Referências Bibliográficas | 93 |
| Anexos | | 99 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 - Componentes terrestres da radiação solar. Fonte: Rosa (2003)..... | 9 |
| Figura 2.2 - Influência da radiação nas características $i-V$ de uma célula fotovoltaica a temperatura constante de 25°C. Fonte: (LASNIER e ANG, 1990). | 13 |
| Figura 2.3 - Influência da temperatura nas características $i-V$ de uma célula solar sob radiação constante (1000 W/m ²). Fonte: (LASNIER e ANG, 1990). | 14 |
| Figura 2.4 - Efeito da temperatura na capacidade de uma bateria 12V. Fonte: (UNIPOWER, 2000). | 18 |
| Figura 2.5 - Durabilidade das baterias de Ni-Cd e Pb-Ácido em relação à temperatura. Fonte: (COELHO, 2001). | 19 |
| Figura 2.6 - Número de ciclos em função da profundidade de descarga. Fonte: MOURA, 2007. | 20 |
| Figura 2.7 - Esquema simplificado de uma célula da bateria de chumbo-ácido. Fonte: (MSPC, 2007). | 22 |
| Figura 2.8 - Esquema da construção de uma célula de NiCd. Fonte: MSPC, 2007. | 23 |
| Figura 2.9 - Comparação das densidades de energia das baterias recarregáveis. Fonte: MSPC, 2007. | 28 |
| Figura 2.10 - Dependência do potencial reversível e termoneutro com a temperatura. | 33 |
| Figura 2.11 - Diagrama esquemático dos eletrolisadores unipolares ou monopolares (a) e bipolares (b). | 36 |
| Figura 2.12: Esquema geral de funcionamento de uma célula a combustível. (Fonte: BALLARD, 2007). | 39 |
| Figura 3.1 - Diferentes arranjos para aproveitamento fotovoltaico. Legenda: CC: corrente contínua, CA: corrente alternada. | 50 |
| Figura 3.2- Arranjo do sistema fotovoltaico com armazenamento em bateria. | 52 |
| Figura 3.3 - Fluxograma de funcionamento do sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias. (Fonte: Elaboração própria) | 54 |
| Figura 3.4 - Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico com armazenamento de energia na forma de hidrogênio pressurizado e geração de energia elétrica por meio de célula a combustível. | 56 |
| Figura 3.5 - Eletrolisador bipolar alcalino da empresa italiana <i>Piel</i> . (Fonte: LH2/UNICAMP)... | 57 |
| Figura 3.6 - Sistema de secagem e remoção de oxigênio. Legenda: a) sistemas de secagem do hidrogênio; b) sistema de remoção de oxigênio. (Fonte: LH2/UNICAMP) | 57 |
| Figura 3.7 - Célula a combustível, (a) vista frontal e (b) vista interna. (Fonte: LH2/UNICAMP) | 59 |
| Figura 3.8 - Fluxograma da rotina de funcionamento do sistema introduzida no CLP. | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 3.9 - Perfil típico da demanda ao longo do dia. Fonte: (Adaptado de CARTAXO, 2002) | 64 |
| Figura 3.10 - Diagrama parcial do modelo matemático em planilha do Microsoft Excel proposto para o sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias. | 64 |
| Figura 3.11 - Diagrama parcial da planilha eletrônica do modelo matemático proposto para o sistema fotovoltaico com armazenamento na forma de hidrogênio pressurizado. | 68 |
| Figura 4.1 - Perfil típico de produção, armazenamento, consumo e excedente de energia elétrica no sistema com painéis fotovoltaicos e baterias. | 77 |
| Figura 4.2 - Perfil típico de produção, armazenamento, consumo e excedente de energia elétrica no sistema fotovoltaico com armazenamento na forma de hidrogênio eletrolítico. | 77 |
| Figura 4.3 - Quantidade de energia armazenada em função da autonomia do sistema fotovoltaico com armazenamento em bateria. | 78 |
| Figura 4.4 - Quantidade de hidrogênio armazenado em função da autonomia do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio. | 79 |
| Figura 4.5 - Contribuição percentual de cada equipamento no investimento inicial (a) e no custo total (b), de acordo com o fluxo de caixa, do sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias. | 81 |
| Figura 4.6 - Contribuição percentual de cada equipamento no investimento inicial (a) e no custo total (b), de acordo com o fluxo de caixa, do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio. | 83 |
| Figura 4.7 - Sensibilidade do custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em bateria com relação ao custo do painel, a autonomia e o custo das baterias. | 85 |
| Figura 4.8 - Sensibilidade do custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio com a variação do custo do painel e o custo do eletrolisador. | 86 |
| Figura 4.9 - Sensibilidade do custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio com a variação do custo e vida útil da célula a combustível (CaC). | 87 |
| Figura 4.10 - Sensibilidade do custo total dos sistemas fotovoltaicos com as variações do conjunto eletrolisador/reservatório/célula a combustível e da bateria. | 88 |

Lista de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1 - Comparação das principais características das baterias recarregáveis. Fonte: (MSPC, 2007)..... | 27 |
| Tabela 2.2: Dados termodinâmicos da reação de eletrólise da água nas condições padrões. | 30 |
| Tabela 2.3 Variação da eficiência com a voltagem de operação e o consumo de energia por unidade de H ₂ gerado..... | 35 |
| Tabela 2.4 - Classificação e caracterização das células a combustível atuais..... | 40 |
| Tabela 2.5 - Características físicas do hidrogênio..... | 42 |
| Tabela 2.6 - Principais processos de geração de hidrogênio..... | 43 |
| Tabela 3.1 - Valores médios horários da radiação solar ao longo de dia típico na região de interesse..... | 62 |
| Tabela 3.2 - Distribuição do consumo de energia elétrica por aplicação..... | 63 |
| Tabela 3.3 - Diagrama parcial da planilha de cálculo para o segundo dia de operação do sistema com baterias..... | 66 |
| Tabela 3.4 - Características dos equipamentos utilizados no sistema com baterias..... | 67 |
| Tabela 3.5 - Diagrama parcial da planilha de cálculo para o segundo dia de operação do sistema a hidrogênio..... | 69 |
| Tabela 3.6 - Características dos equipamentos utilizados no sistema fotovoltaico-hidrogênio estudado..... | 71 |
| Tabela 4.1 - Número de painéis fotovoltaicos e baterias calculadas para o sistema fotovoltaico-bateria..... | 73 |
| Tabela 4.2 - Número de painéis fotovoltaicos, eletrolisador, reservatório e célula a combustível calculados para o sistema fotovoltaico-hidrogênio..... | 73 |
| Tabela 4.3 - Custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias de acordo com o fluxo de caixa..... | 80 |
| Tabela 4.4 - Custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio de acordo com o fluxo de caixa..... | 82 |

Nomenclatura

Letras Latinas

| | |
|---|--------------------|
| C - capacidade da bateria | Ah |
| d - taxa anual de desconto | |
| E_{EI} - energia gasta na eletrólise | kWh |
| E_M - tensão mínima para eletrólise | V |
| E_U - energia útil de saída | kWh |
| E_{rev} - potencial reversível | V |
| F - constante de Faraday | C |
| G - energia livre de Gibbs | J |
| G_{SC} - constante solar | |
| H - Entalpia | kJ/mol |
| H_T - radiação solar média total | kWh/m ² |
| H_M - valor médio mensal da radiação | kWh/m ² |
| H_o - radiação média extraterrestre | kWh/m ² |
| i - corrente elétrica | A |
| K_T - índice de claridade | |
| n_A - sobretensão no anodo | V |
| n_C - sobretensão no catodo | V |
| Rb - fator de correção da radiação solar em superfície horizontal | |

| | |
|--------------------------------------|---|
| T – temperatura | K |
| V_{oc} – tensão de circuito aberto | V |
| V_1 – tensão mínima para a reação | V |
| V_2 – tensão termoneutra | V |

Letras Gregas

β - ângulo relativo a inclinação do painel fotovoltaico

δ - declinação solar

ρ - reflectividade

η – eficiência energética do painel fotovoltaico

Capítulo 1

Introdução

1.1 Justificativa

A história da energia se confunde com a evolução dos processos econômico e social da humanidade. Assim, os crescimentos econômico e industrial de um país estão fortemente ligados ao consumo e à disponibilidade de seus recursos energéticos. Quando o homem começou a substituir a força braçal e a dos animais por mecanismos movidos pela força dos ventos, das águas e pelo uso do carvão, a energia passou a fazer parte de suas necessidades e a determinar cada vez mais os padrões sócio-econômicos da sociedade.

O exemplo do Brasil, um país que está em desenvolvimento, mostra que a energia tem uma íntima e positiva relação com o Produto Interno Bruto, já que apresenta altos níveis de consumo de energia, comparáveis aos dos países ricos. Mas o acesso a essa energia não é privilégio de todos. Estima-se que haja cerca de 12 milhões de pessoas sem acesso à energia elétrica, e as localidades mais atingidas com esse problema são as comunidades rurais e as de pequenos povoados em áreas isoladas (IBGE, 2000).

Muitas regiões brasileiras, como o caso da Região Amazônica, possuem comunidades sendo supridas de forma precária, com intervalos de atendimento que variam de 4 a 8 horas diárias, e outras em que este serviço nem chega a se completar.

A principal característica desses municípios e comunidades é o fato de todas estarem desconectadas dos Sistemas Elétricos Interligados, tornando a geração descentralizada a forma de geração mais apropriada e necessária a esse cenário (SILVA & CAVALIERO, 2001). Outras características também compartilhadas por essas comunidades são: estarem localizadas às margens dos rios, com acesso limitado quase que exclusivamente a barcos, possuírem baixa densidade populacional e carência de infra-estrutura básica.

A geração de energia elétrica em locais com essas características é feita geralmente através de motores a diesel, onde a capacidade nominal instalada varia de acordo com a comunidade. O óleo diesel utilizado pode ser subsidiado, pago pela Conta de Consumo de Combustíveis (CCC), ou pago pela própria comunidade (SOUZA, 2000).

As centrais termelétricas a óleo diesel foram sempre apresentadas como a solução para a geração de energia elétrica nas regiões isoladas da Amazônia. Mas as dificuldades encontradas para o transporte do óleo diesel, que é feito através de balsas, e a grande diversidade de fabricantes, são fatores que tornam os custos de operação e manutenção bastante elevados, provocando constantes racionamentos. Outros fatores contrários a essa tecnologia refere-se a queima de combustíveis fósseis, uma vez que existe potencial energético significativo de fontes renováveis na região (CAVALIERO, 2003), e o risco de danos ecológicos de graves proporções decorrentes de vazamento de combustíveis nos rios utilizados para transporte do próprio combustível.

A geração de energia elétrica no interior amazonense requer características especiais, principalmente ambientais, por estar situado na Floresta Amazônica, cuja preservação é alvo de constantes debates. Portanto, é fundamental que essas comunidades tirem melhor proveito dos recursos energéticos dessa região, que é onde se encontra a maior parte dos sistemas isolados. Destaca-se também a importância de se buscar um aumento na participação das fontes de energia renovável, fontes não convencionais com baixos impactos ambientais e uma forma alternativa ao consumo de combustíveis de origem fóssil utilizados (SILVA, 2001). Essa alternativa traria melhoria no suprimento de energia e, em consequência, na qualidade de vida das populações residentes nessas comunidades, aumentando as suas possibilidades de crescimento e desenvolvimento econômico, social e humano, de forma sustentável.

A implantação de sistemas autônomos de geração de energia elétrica é uma forma de suprir as necessidades básicas da população. Contribui para que o uso de máquinas em substituição à força motriz aumente a produção dos produtos agrícolas, bem como produção de frio para conservação de pescado e armazenamento de vacinas em postos de saúde. Com respeito à educação, possibilita também aulas noturnas, solucionando o problema dos jovens, cuja presença no trabalho familiar é imprescindível durante o dia, levando ao abandono escolar. A dificuldade de comunicação com o município também pode ser solucionada, pois a implantação de um sistema de rádio acaba facilitando o intercâmbio entre as comunidades, especialmente nas questões referentes à saúde (POMPERMAYER, 1998).

Outro benefício encontrado com a implantação de sistemas autônomos é a possibilidade de estocagem de alimentos perecíveis e conseqüente venda de seus produtos na sede do município, ou nas capitais, promovendo o desenvolvimento de uma atividade econômica, trazendo melhoraria na renda familiar, fator primordial para manter o caboclo no interior (SILVA & CAVALIERO, 2001).

A geração de energia elétrica a partir do uso de fontes renováveis de energia, entre elas a solar, vem despertando grande interesse devido não apenas às crescentes exigências relacionadas à preservação do meio ambiente, como também pelos seus custos, que estão se tornando cada vez mais competitivos em várias aplicações.

Tradicionalmente as instalações de painéis fotovoltaicos que são utilizadas para o atendimento de comunidades isoladas necessitam de bancos de baterias para o fornecimento de energia elétrica no período noturno ou de baixa incidência de luz solar. Entretanto, o regime de funcionamento dos painéis e do banco de baterias nem sempre é otimizado e, mesmo nos melhores casos, é necessário o emprego de um número elevado de baterias. Isso se deve ao fato de que há uma limitação de carga no processo de carregamento das baterias. Nos casos em que a carga fornecida pelos painéis é muito alta, nem sempre é recomendável armazená-la integralmente, pois a taxa de transferência seria superior à suportada pelas baterias e isso implicaria numa grande redução de sua vida útil. Por outro lado, há momentos em que a carga fornecida pelos painéis não é suficiente para o carregamento das baterias. Em muitos casos, em que as baterias atendem a picos de demanda ou demanda prolongada,

são incorporados dispositivos que as protegem contra descargas profundas, o que causaria danos permanentes aos eletrodos das baterias e também reduziria significativamente sua vida útil.

O descarte das baterias utilizadas nos sistemas fotovoltaicos após o término de sua vida útil também é um grave problema, uma vez que depois de serem utilizadas e renovadas, as baterias não são recolhidas e encaminhadas para serem destruídas de forma correta. Em geral, elas são descartadas nas proximidades da comunidade, poluindo o solo e os cursos d'água com seu conteúdo químico.

Outras formas de armazenamento da energia gerada pelos painéis fotovoltaicos podem ser mais interessantes do ponto de vista da otimização do sistema. No caso desta dissertação, é considerado um sistema composto pelos painéis fotovoltaicos conectados a um eletrolisador de água. O hidrogênio gerado pelo eletrolisador é armazenado num reservatório para ser posteriormente utilizado numa célula a combustível. Células a combustível são dispositivos eletroquímicos capazes de converter a energia química contida nas moléculas de hidrogênio em eletricidade, com elevada eficiência.

Uma forma interessante e sustentável de implementar um sistema de geração de energia elétrica é aproveitar as potencialidades energéticas locais da região, da própria população e prefeituras locais e do Governo Federal. O envolvimento de instituições acadêmicas e de pesquisa é também de grande valia por testar as novas tecnologias que vêm sendo desenvolvidas e também propor novos projetos para as comunidades. Mas de nada vale se não existir a vontade da população local em querer, aceitar e decidir qual a melhor forma de desenvolvimento se encaixa a comunidade (TEIXEIRA & CAVALIERO, 2006), havendo dessa forma transferência total do poder de decisão, dos responsáveis pelo projeto aos moradores locais.

O custo da energia elétrica gerada por sistemas fotovoltaicos ainda é bastante elevado em relação ao gerado pelo sistema convencional. O forte investimento inicial em capital torna a disseminação do uso destes sistemas muito difícil. No entanto, é necessária a difusão desta tecnologia para criar uma cultura no uso desta fonte e aumentar a influência sobre aqueles que gerenciam, decidem e financiam os recursos necessários para sua implantação.

Ocorre também que, para a região amazônica a questão não deve ser analisada considerando apenas aspectos econômicos, tendo em vista suas peculiaridades nas questões sociais e ambientais. De acordo com CARTAXO (2000), a implantação de sistemas fotovoltaicos pode satisfazer às necessidades básicas da faixa mais pobre da população em termos de energia elétrica. Pelo exposto, ao analisar projetos dessa natureza é importante que os aspectos humanitários, ambientais e de sustentabilidade sejam considerados tão ou mais importantes do que aspectos puramente econômicos.

1.2 Objetivos

O objetivo geral deste trabalho é comparar duas formas de armazenamento de energia elétrica fotovoltaica, por meio de baterias e hidrogênio, e discutir a viabilidade econômica da utilização desses sistemas.

Os itens seguintes constituem objetivos específicos deste trabalho:

1. Dimensionar os componentes constituintes dos dois sistemas de armazenamento de energia, por meio de baterias e hidrogênio, caracterizando os componentes de cada sistema, bem como o seu funcionamento.
2. Propor um modelo matemático para estudo e comparação dos sistemas de armazenamento de energia com baterias e com hidrogênio.
3. Calcular o custo da energia elétrica produzida em cada sistema e a contribuição de cada componente no custo total por meio de curvas de sensibilidade.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação é dividida em 5 capítulos, descritos a seguir:

Capítulo 1: Introdução, representada por este capítulo.

Capítulo 2: Revisão Bibliográfica, dividida em cinco subseções cobrindo os seguintes tópicos: i) a energia solar fotovoltaica, como fonte geradora de energia elétrica, descrevendo suas principais tecnologias; ii) principais tipos de baterias utilizadas como meio armazenador de energia elétrica; iii) o processo de eletrólise da água, eletrolisadores comerciais, eficiência e o estado da arte dos eletrolisadores; iv) células a combustível, os tipos características, aplicações e eficiências de funcionamento; v) o hidrogênio como vetor energético, caracterizando as propriedades e os métodos de produção e armazenamento.

Capítulo 3: Materiais e Métodos, subdividido em três seções: i) descrição detalhada dos sistemas fotovoltaicos estudados; ii) dimensionamento e metodologia adotada para cada sistema; iii) a análise econômica dos sistemas.

Capítulo 4: Resultados, onde são apresentados os resultados obtidos em três subseções: i) comparação dos sistemas; ii) análises da viabilidade econômica da utilização dos sistemas; iii) análise da sensibilidade de cada componente dos sistemas.

Capítulo 5: Conclusões, onde são apresentadas as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será realizada uma revisão das principais características da energia solar fotovoltaica, o uso do hidrogênio como vetor energético, assim como as tecnologias envolvidas na sua produção e na reconversão do hidrogênio em energia elétrica. Será feita também uma revisão sobre as baterias utilizadas como meio armazenador de eletricidade proveniente de fontes intermitentes de energia. Devido ao fato das tecnologias envolvidas no uso do hidrogênio estarem em pleno desenvolvimento, é necessário apresentar o atual estágio (2007) em que se encontram tais tecnologias.

2.1 Energia Solar Fotovoltaica

A energia vinda do Sol é inesgotável, a quantidade de energia que chega diariamente ao topo da atmosfera terrestre é da ordem de 10^{14} kWh (CHAMBOULEYRON, 1989) ou $3,6 \times 10^{14}$ MJ, de fato uma fonte com imenso potencial a ser explorado. Uma possibilidade de aproveitamento energético está na implantação de sistemas fotovoltaicos, que transformam diretamente essa energia radiante em eletricidade, sem a produção de nenhuma forma intermediária de energia.

Uma forma de analisar o potencial solar/fotovoltaico de uma determinada região pode ser fundamentada nos valores disponíveis em Atlas Solarimétricos ou em dados fornecidos por estações meteorológicas. O Atlas Solarimétrico (TIBA, 2000) constitui um riquíssimo acervo de trabalhos sobre o tema publicado no Brasil ao longo dos últimos 40 anos. Ele fornece a média mensal da radiação solar incidente por metro quadrado em superfícies horizontais ao nível do solo. Como o

ideal é obter o máximo de aproveitamento solar, a correção necessária pode ser alcançada inclinando-se o painel fotovoltaico num ângulo β , correspondente à latitude da região onde o sistema deverá ser instalado, de maneira que os raios incidentes sejam ortogonais ao plano do painel.

Dessa forma, parâmetros como o índice de claridade (K_T), a quantidade de radiação solar direta, difusa e de albedo são importantes para que o cálculo da quantidade da radiação solar média total (H_T) incidente na superfície de um painel fotovoltaico inclinado esteja próximo do seu máximo de fornecimento (DUFFIE & BECKMAN, 1991).

O índice de claridade (K_T) corresponde à razão entre o valor médio mensal diário da radiação (H_M) numa superfície horizontal, ao nível do solo, e a média mensal diária da radiação extraterrestre (H_o). Embora não sofra os efeitos da atmosfera terrestre, o valor de H_o varia diariamente. Dessa forma, para calcular os valores de interesse Klein (1977) recomenda que sejam utilizados os valores de um dia médio que seja representativo do mês. A expressão de H_o que fornece a variação da média diária da radiação extraterrestre ao longo do dia é calculada por meio da seguinte expressão (DUFFIE & BECKMAN, 1991):

$$H_o = \frac{24 \cdot 3600 \cdot G_{SC}}{\pi} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \left(\cos \phi \cos \delta (\sin w_2 - \sin w_1) \sin w_s + \frac{\pi(w_2 - w_1)}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (1)$$

onde, G_{SC} é a constante solar, n é o dia do ano (1 a 365), w_1 e w_2 ângulos solares correspondentes ao intervalo de tempo a ser calculado, ϕ a latitude local e δ a declinação solar.

Como em muitas aplicações é necessário conhecer como os valores de H_o variam em intervalos de uma hora, será adotado um valor de K_T médio que represente o mês para ser utilizado nos cálculos referentes a esse intervalo de interesse. Uma das maneiras de calcular essa média total (H_T) é por meio do método adotado por Liu e Jordan (1962) e mais tarde por Klein (1977), que considera a radiação difusa e a de albedo como isotrópica, isto é, com a mesma intensidade em qualquer direção do céu. Dessa forma, o cálculo da média total pode ser realizado através da soma dos três termos que compõem a radiação total, Figura 2.1.

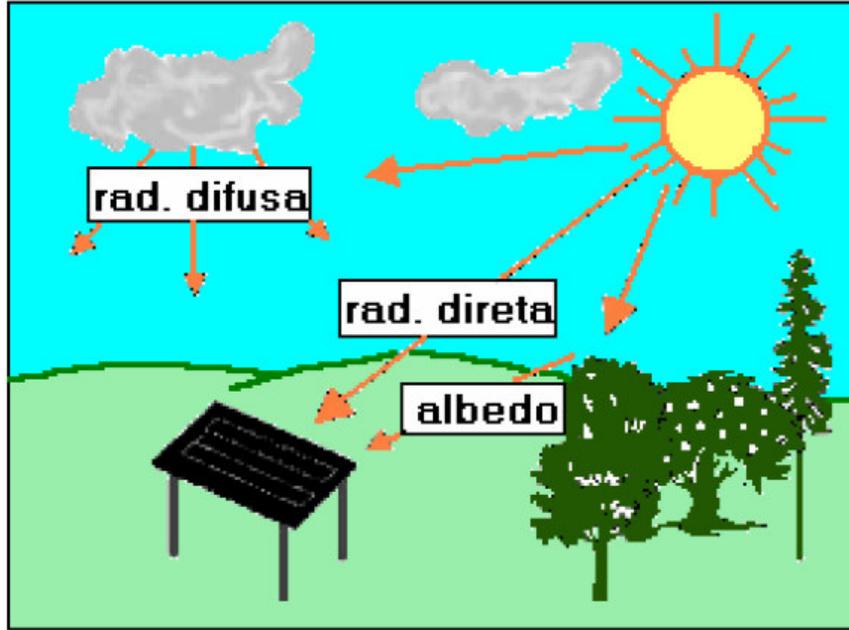


Figura 2.1 - Componentes terrestres da radiação solar. Fonte: Rosa (2003)

$$H_T = Direta + Difusa + Albedo \quad (2)$$

$$H_T = H \left(1 - \frac{H_d}{H} \right) R_b + H_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + H \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (3)$$

onde o primeiro termo se refere à radiação direta, o segundo à radiação difusa e o terceiro à radiação de albedo; ρ é a reflectividade relacionada à radiação solar refletida das superfícies próximas aos painéis instalados e R_b , é a razão da média diária da radiação direta em superfícies inclinadas pela radiação direta nas superfícies horizontais, calculada através da equação abaixo:

$$R_b = \frac{\cos(\phi + \beta) \cos \delta \sin w'_s + (\pi/180) w'_s \sin(\phi + \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta (\sin w_2 - \sin w_1) + (\pi/180) (w_2 - w_1) \sin \phi \sin \delta} \quad (4)$$

onde w'_s é o ângulo horário solar para um dia médio do mês em superfícies inclinadas¹.

¹ Para uma análise mais aprofundada e cálculos mais precisos envolvendo todas essas variáveis e outros parâmetros ver DUFFIE & BECKMAN, 1991.

Assim, a partir dos valores relativos à radiação total (H_T) na inclinação e intervalo de tempo desejados para a região escolhida, pode-se determinar a energia total (ou densidade de energia total, em Wh/m^2) para cada mês m fazendo-se a multiplicação de H_T pelos respectivos números de dias de cada mês.

Este valor final pode então ser utilizado para estimar a quantidade de energia elétrica gerada por um dado sistema fotovoltaico. Com base nas características do fornecimento fotovoltaico, a energia elétrica gerada por um sistema previamente dimensionado e instalado em uma determinada região pode ser estimada através da relação:

$$E_{\text{fot}} = \eta \cdot A \cdot H_T \quad (5)$$

onde η é a eficiência de conversão do painel fotovoltaico e A (m^2) é a área realmente ocupada pelo material semicondutor.

ROBERTS, 1991 em seu livro apresenta uma expressão que exemplifica a utilização dessa energia elétrica gerada para calcular o número de painéis necessários para um sistema fotovoltaico.

$$N_p = \frac{Wh_{\text{dia}}}{(Wh_{\text{dia, mod}}) * (Ef. bat)} \quad (6)$$

onde:

N_p = número de painéis necessários;

Wh_{dia} = Energia requerida por dia pelas aplicações;

$Wh_{\text{dia, mod}}$ = Energia produzida por dia por um painel;

$Ef. bat$ = Eficiência da bateria

2.1.1 Fundamentos da Transformação Fotovoltaica

As células solares são dispositivos capazes de converter de forma direta a energia luminosa em eletricidade, sendo que para isso são utilizadas as propriedades eletrônicas de uma classe de materiais conhecidas como semicondutores. O princípio básico de seu funcionamento é o efeito fotovoltaico, conhecido desde 1839 pelos estudos realizados por Henry Becquerel, que demonstrou a possibilidade de conversão da radiação luminosa em energia elétrica mediante a incidência de luz em um eletrodo mergulhado numa solução de eletrólito (LASNIER & ANG, 1990). Mas apenas em 1945, a partir de trabalhos realizados nos “Laboratórios da Bell Telephone”, surgiu a fotocélula de silício com características encontradas atualmente, cuja eficiência era de aproximadamente 6% (LASNIER & ANG, 1990). Em 1954 foi desenvolvido o processo de purificação de monocristais de silício, conhecido como processo Czochralski, o qual vem sendo utilizado até os dias de hoje.

No ano de 1958, as fotocélulas passaram a integrar os sistemas de geração de energia dos satélites artificiais, onde sua confiabilidade, durabilidade, e relação potência-peso foram de grande importância, caracterizando-se como o principal uso das células solares na década de 60. Mas, devido ao alto custo da tecnologia, não se pensou em sua aplicação terrestre. Já na década de 70, a crise do petróleo estimula o uso de células fotovoltaicas para a geração de energia elétrica dando início às aplicações terrestres desta tecnologia.

As células solares são feitas de um material semicondutor, em geral o silício, dopados com boro e fósforo. Basicamente uma célula solar é uma junção p-n, onde a face dopada do silício que é tipo n está separada da face que é tipo p, se as duas partes são colocadas em contato é esperado que os elétrons migrem de regiões de baixa concentração eletrônica para regiões de alta concentração. Entretanto, ocorre um acúmulo de carga positiva no lado tipo n e um acúmulo de carga negativa no lado tipo p. Este desequilíbrio será responsável pelo surgimento de um campo elétrico que irá se opor à tendência natural da difusão de elétrons e buracos, e desse modo uma situação de equilíbrio será atingida (LASNIER & ANG, 1990).

No momento em que a luz formada por fótons incide na célula solar, haverá a formação de pares elétrons – buraco para cada fóton que possuir energia suficiente, energia de *gap* (1,1 eV para o silício). Como esse valor de energia corresponde a fótons próximos ao infravermelho, no caso do

silício, 25% da energia do espectro solar não será aproveitada na conversão. Por outro lado, fótons com energia superior terão parte da energia perdida na forma de calor, que para o silício é de aproximadamente 30% (CHAMBOULEYRON, 1989). Nestas condições os elétrons produzidos irão fluir para o lado tipo n e os buracos irão para o lado tipo p. Este fluxo de elétrons será responsável pelo surgimento de uma corrente (i); como o campo elétrico da célula irá fornecer a diferença de potencial (V), será possível gerar potência (P). Adicionando-se contatos elétricos a ambos os lados da célula é possível fazer com que determinados sistemas elétricos funcionem.

A potência fornecida ($P = i \times V$) depende das características físicas da célula e da quantidade e qualidade da radiação incidente. Para determinar a geração de energia elétrica do painel é necessário entender suas características de fornecimento, em geral definidas por curvas $i-V$ e conhecer o valor da radiação solar no ponto de utilização.

O material mais utilizado na fabricação das células fotovoltaicas até hoje tem sido o silício cristalino (c-Si), devido principalmente à maturidade no conhecimento deste material semicondutor, amplamente utilizado na indústria de microeletrônica. Além do silício cristalino outros semicondutores são empregados na tecnologia fotovoltaica, tais como o silício amorfo (a-Si), o telureto de cádmio (CdTe) e os compostos relacionados ao disseleneto de cobre e índio (CuInSe₂) ou CIS. O fato do Cd, Te, Se serem elementos altamente tóxicos impõe um obstáculo ao uso mais intensivo dessas tecnologias (GREEN, 2000).

A primeira geração de tecnologia de fabricação fotovoltaica caracterizou-se pelo uso intensivo de material semicondutor, sendo que mais de 40% do custo do produto final é atribuído à lâmina de silício inicial (GREEN, 2004). Uma segunda geração, que utiliza a tecnologia de filmes finos em sua fabricação, utiliza bem menos material semicondutor, até 100 vezes menos, podendo trazer enormes vantagens em termos de redução dos custos. No entanto, como desvantagem, os rendimentos ficam na faixa de 8% para painéis comerciais (GREEN, 2004) comparado a 16% da tecnologia tradicional com lâmina de silício (KYOCERA, 2007). Mas, analisando o processo de fabricação e investigando a possibilidade na redução dos custos por unidade de área depositada, assim como os valores de eficiência que podem ser obtidos com os avanços na tecnologia, ZWEIBEL (2000) estima valores abaixo de US\$ 1 por watt fabricado através dessa nova tecnologia.

2.1.2 Características do Fornecimento Fotovoltaico

Quando um painel fotovoltaico está exposto à luz, ele gera energia elétrica em corrente contínua, onde a corrente gerada é diretamente proporcional à radiação solar incidente. A Figura 2.2 mostra as curvas $i-V$ características de uma célula fotovoltaica sob diferentes níveis de radiação solar, onde se pode observar claramente essa dependência.

Como o valor de tensão no qual ocorrem os máximos de fornecimento (identificados pela linha pontilhada) pouco varia para os diferentes níveis de radiação, pode-se concluir também que o valor de máximo fornecimento de potência também é proporcional à radiação. O valor da tensão de circuito aberto (V_{OC}) cresce com o aumento da radiação, obedecendo a uma relação logarítmica (CULVER, 1990), pois não depende da área exposta aos raios solares, sendo função apenas do material (LASNIER e ANG, 1990).

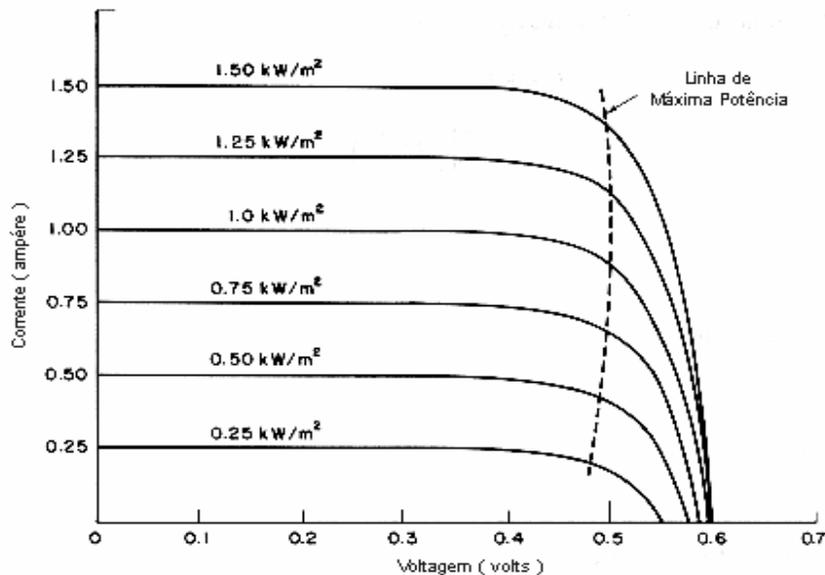


Figura 2.2 - Influência da radiação nas características $i-V$ de uma célula fotovoltaica a temperatura constante de 25°C. Fonte: (LASNIER e ANG, 1990).

A Figura 2.3 mostra as características de uma célula em funcionamento a diferentes temperaturas. Com o aumento da temperatura tem-se uma diminuição no valor da barreira de gap , o que facilita a ocorrência do efeito fotovoltaico e contribui para um pequeno aumento da corrente. Mas o valor de V_{OC} diminui linearmente com o aumento da temperatura da célula, fazendo com que o ponto de máximo também diminua (LASNIER e ANG, 1990).

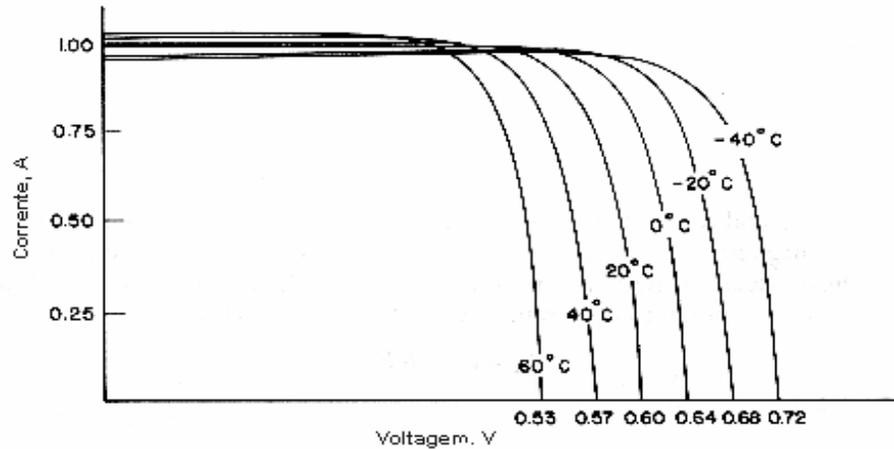


Figura 2.3 - Influência da temperatura nas características $i-V$ de uma célula solar sob radiação constante (1000 W/m^2). Fonte: (LASNIER e ANG, 1990).

A eficiência da conversão fotovoltaica é definida como a relação entre a potência elétrica de saída e a potência da radiação incidente, nas condições padrões de teste realizados em laboratório (1000 W/m^2 , 25°C). Ela pode ser influenciada tanto por fatores físicos (temperatura) como por fatores associados à tecnologia de fabricação das células (material), a qual tem sido melhorada constantemente (LASNIER e ANG, 1990).

A quantidade de energia elétrica fornecida por um painel fotovoltaico é tipicamente 80% daquela medida nas condições padrões de teste feitas em laboratório. Nas condições reais de utilização, os painéis estão geralmente cerca de 20°C mais quentes que a temperatura do ar, desse modo à eficiência de operação dos painéis chega a ser reduzida em 10% devido aos efeitos da temperatura. A diminuição de desempenho resulta da ligeira diferença de tensão entre os painéis, quando eles estão conectados para formar um arranjo fotovoltaico. Perdas ôhmicas nos condutores de conexão, sujeira e outros efeitos podem também contribuir para a redução do desempenho dos painéis. A natureza dessas perdas depende dos detalhes de projeto do sistema e localização da instalação (LASNIER e ANG, 1990).

A utilização de dispositivos fotovoltaicos em maior escala se torna cada vez mais interessante num cenário em que existe a tendência ao esgotamento de algumas das fontes primárias de energia tradicionalmente utilizadas e considerando o consumo sempre crescente de energia elétrica. Mas o

alto custo do processo de produção dos dispositivos ainda se apresenta como um obstáculo a ser superado.

2.2 Sistema de Armazenamento: Baterias

2.2.1 Visão Geral

Até os dias de hoje a forma mais conhecida e utilizada para se armazenar energia elétrica é através das baterias. Quando uma bateria é conectada a uma fonte de alimentação, ocorre a conversão da energia elétrica em energia química em seu interior, possibilitando o armazenamento para futuro fornecimento de energia elétrica. Portanto, a bateria não produz energia, apenas a armazena. Para o caso das baterias recarregáveis o processo de armazenamento ou fornecimento de energia pode ser realizado inúmeras vezes (VINCENT et all, 1984).

As baterias possuem várias formas de aplicações: como fonte portátil de energia elétrica, alimentação de sistemas automotivos, supridora de sistemas com curtos períodos de demanda, armazenadora de energia elétrica gerada por fontes renováveis e intermitentes, como solar e a eólica dentre outras. Uma das principais formas de construção é feita utilizando fluídos (água, ácido), gel ou AGM (*absorbed glass mat* - semelhante a uma fibra de vidro) como eletrólito (COELHO, 2001 apud BWS Group).

A quantidade de eletricidade ou carga que uma bateria pode armazenar é chamada de capacidade, que é uma função da quantidade de material ativo presente nas estruturas internas das baterias que estão em contato com o eletrólito (ROBERTS, 1991). Embora o coulomb (C) seja a unidade básica de carga em eletricidade, na prática, a capacidade da bateria é medida em ampère-hora (Ah). Essa medida indica o número de horas que a bateria pode fornecer uma determinada corrente elétrica antes de sua descarga completa. Como exemplo, uma bateria com capacidade de carga de 80 Ah pode fornecer 8 A por 10 h ou 4 A por 20 h.

As baterias podem ser constituídas por apenas uma célula eletroquímica ou por um conjunto de células conectadas eletricamente entre si. Podem, também, ser classificadas como não-recarregáveis (células primárias) ou recarregáveis (células secundárias), dependendo do tipo de células que as compõem (VINCENT et all, 1984).

2.2.2 Características referentes às formas de aplicação

Como já mencionado, as baterias podem ser classificadas quanto à forma de utilização. Como cada tipo de bateria apresenta diferentes características, a melhor será aquela que mais se aproxime das exigências impostas pelo sistema a ser implementado (BOCKRIS & REDDY, 1998).

As baterias automotivas, também conhecidas como SLI (*Starting, Lighting and Ignition*), são utilizadas principalmente para ignição ou partida de motores dos automóveis. Necessitam de uma elevada corrente por um curto intervalo de tempo. Esse tipo de bateria é constituído por placas muito finas com uma grande área. Portanto, não são projetadas para descargas que ultrapassem a 1% a 5% da sua capacidade total, caso contrário podem se danificar rapidamente.

As baterias para veículos de tração são projetadas para que possam operar em regime de ciclos diários profundos com taxa de descarga moderada. São resistentes ao processo de ciclo, porém, necessitam de uma freqüente manutenção devido ao consumo excessivo de água.

Já para aplicações em sistemas fotovoltaicos, as baterias são projetadas para operar em ciclos diários rasos, com taxas reduzidas de descarga e para suportar descargas profundas esporadicamente, ocasionadas pela ausência de recurso solar em dias nublados. As baterias estacionárias são utilizadas em aplicações onde sistemas permanecem em flutuação, com situações ocasionais de carga e descarga. Elas possuem baixo consumo de água apesar da sua tolerância ao ciclo ser moderada.

Baterias que possuem ciclo profundo suportam descargas até 80% de sua carga total, por várias vezes, pelo fato de suas placas internas serem mais espessas, em média 4,2 mm, em comparação com as baterias automotivas, que apresentam 1 mm de espessura. Porém, esse tipo de bateria não funcionaria muito bem em automóveis, uma vez que não fornecem as elevadas correntes necessárias para a partida. São utilizadas principalmente em empilhadeiras e veículos de tração (COELHO, 2001).

2.2.3 Características referentes aos tipos de construção

O meio em que as placas das baterias estão imersas é a principal característica que as diferenciam quanto aos aspectos construtivos. Podem estar imersas em gel, cujo ácido foi transformado em gel devido à adição de sílica gel, tornando-o uma massa gelatinosa. Uma vantagem alcançada por estar imerso nesse meio está no fato de não ocorrer derramamento e respingo do ácido, o que aumenta a segurança do usuário que realiza a manutenção dessas baterias. Como desvantagem, essa bateria deve ser descarregada a uma taxa menor de corrente para prevenir excesso de formação de gás (COELHO, 2001), impossibilitando a descarga de correntes elevadas como as baterias automotivas, o que poderia danificá-las definitivamente.

As baterias que possuem suas placas imersas em meio sólido, ou AGM, possuem seus eletrodos imersos num material semelhante à lã de vidro. Possuem características semelhantes às baterias de gel, devendo ser evitadas taxas elevadas de carga e descarga.

As baterias com placas imersas em meio líquido possuem válvulas que podem ou não ser removidas. Nas baterias seladas ou livres de manutenção, essas válvulas não podem ser removidas. Elas servem unicamente para regular a pressão interna na medida em que haja formação de gases durante o período de carga. Se essas baterias forem recarregadas muitas vezes, elas podem perder água a ponto de ficarem totalmente inutilizadas. Poucas baterias possuem capas especiais para promover a conversão do hidrogênio e oxigênio novamente em água, reduzindo a perda em 95% (ROBERTS, 1991).

A maioria das baterias de ciclo profundo utiliza placas de chumbo-cálcio para aumentar a sua vida útil. As baterias de chumbo-antimônio perdem a sua carga mais rapidamente que as baterias de chumbo e chumbo-cálcio. No entanto, o antimônio aumenta a resistência mecânica das placas, o que pode ser um fator importante para aplicações em veículos elétricos, onde os ciclos de carga e descarga são freqüentes. Esse tipo de bateria não pode ficar muito tempo sem uso, devendo ser carregada de tempos em tempos para evitar a sulfatação² das placas e sua deterioração.

² Formação ou deposição de sulfato de chumbo na superfície e nos poros do material ativo das placas.

2.2.4 Características elétricas

As características elétricas das baterias são as informações mais importantes e decisivas para a escolha do tipo que melhor se aplica a um determinado sistema. Dentre elas está a sua capacidade de fornecimento de carga, ou simplesmente capacidade da bateria, expresso em Ah, bem como a tensão fornecida entre os seus terminais.

Outro fator de grande importância na escolha do tipo de bateria é a temperatura de operação. Embora a capacidade da bateria aumente a temperaturas acima de 25°C, sua vida útil diminui. Por exemplo, nas baterias de chumbo-ácido a capacidade é reduzida em 50% a -30°C e para cada 8,5°C acima de 24°C, a capacidade é reduzida à metade (COELHO, 2001).

A Figura 2.4 mostra os efeitos da temperatura ambiente em relação à capacidade de uma bateria selada de chumbo-ácido de 12 volts conforme indicado no manual do fabricante. Há uma curva para cada corrente de descarga, onde a corrente de descarga é dada como um percentual da capacidade (C) da bateria em ampère-hora, no padrão de descarga de 20 h.

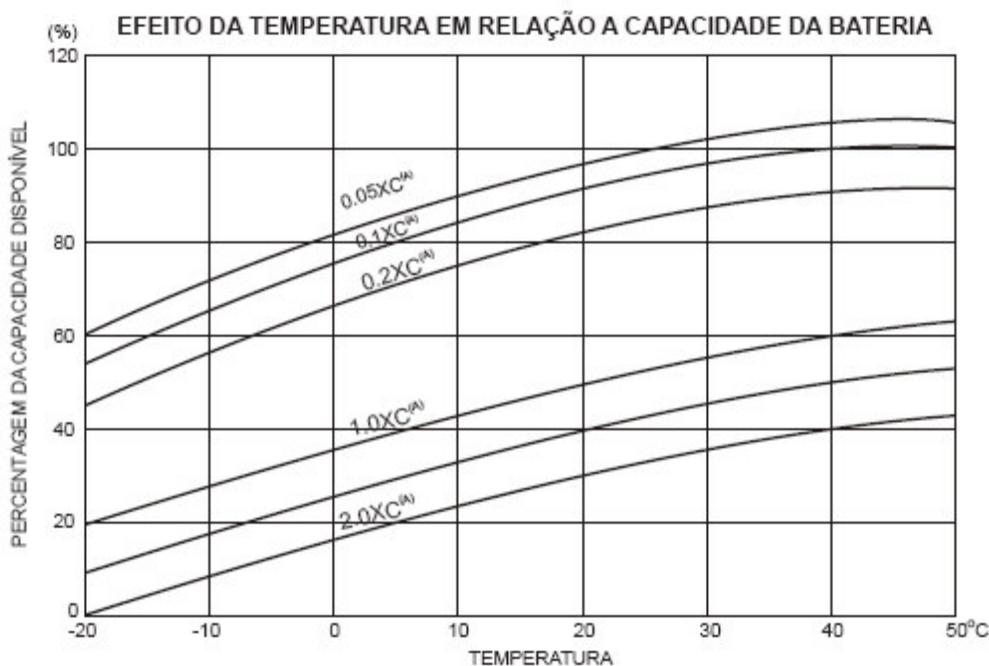


Figura 2.4 - Efeito da temperatura na capacidade de uma bateria 12V. Fonte: (UNIPOWER, 2000).

A Figura 2.5 apresenta a diminuição da durabilidade das baterias, onde fica evidenciada a maior durabilidade de um banco de baterias de níquel-cádmio quando comparado ao de chumbo-ácido. Evidencia também como o aumento da temperatura interfere de forma direta na durabilidade das baterias.

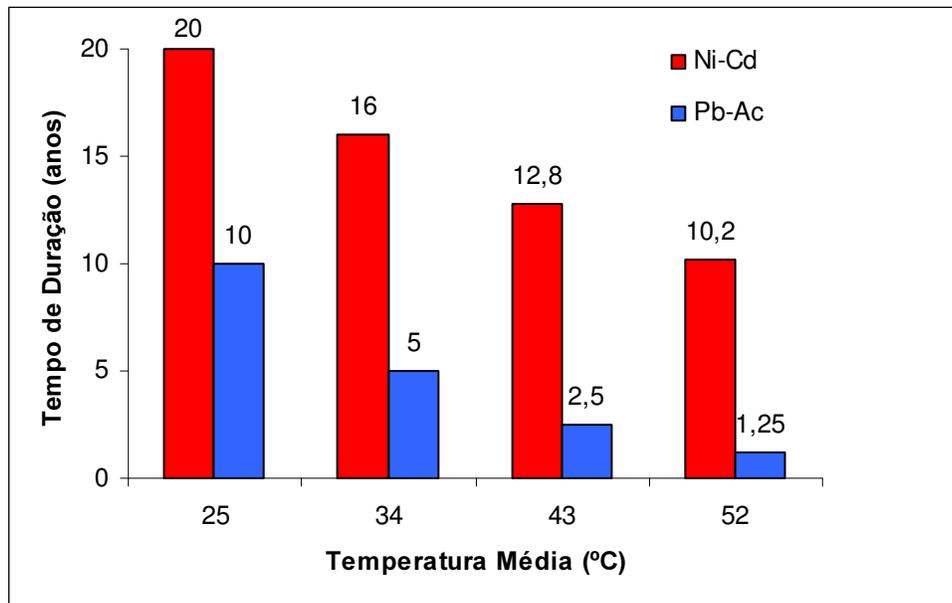


Figura 2.5 - Durabilidade das baterias de Ni-Cd e Pb-Ácido em relação à temperatura. Fonte: (COELHO, 2001).

Outra característica muito importante é o número de ciclos de descarga, ou descarga profunda que as baterias podem fornecer. A seqüência de descarga e posterior carga de uma bateria é denominada ciclo. O número de ciclos alcançado por uma bateria até que sua capacidade seja reduzida a 80% é chamado ciclo de vida da bateria (ROBERTS, 1991). Esse número depende da profundidade da descarga, que pode ocorrer antes que ela tenha atingido sua carga completa, da corrente de descarga fornecida e da temperatura de operação.

A vida útil de uma bateria está diretamente ligada a quão profundamente ela é descarregada a cada ciclo. A Figura 2.6 mostra o número de ciclos em função da profundidade de descarga para a família MF e MC das baterias estacionárias Moura Clean de 12V.

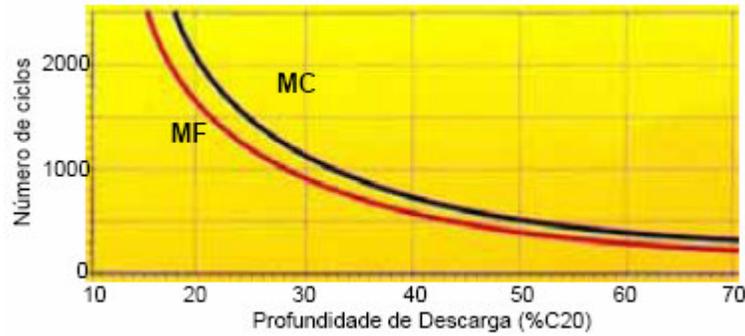


Figura 2.6 - Número de ciclos em função da profundidade de descarga. Fonte: MOURA, 2007.

O estado de carga, ou seja, a quantidade de carga que ainda pode ser fornecida em relação à capacidade de carga total de uma bateria pode ser determinada medindo-se a tensão nos seus terminais (para baterias de chumbo-ácido) ou através da medição da acidez do eletrólito. Mas isto não é suficiente para dizer se a bateria ainda apresenta condições de uso, sendo necessário para isso à realização de um teste de descarga (BOCKRIS & REDDY, 1998).

Todas as baterias sofrem auto-descarga gradualmente mesmo quando não estão em uso. A taxa de auto-descarga é normalmente especificada por uma porcentagem da sua capacidade que é perdida no intervalo de um mês (ROBERTS, 2001). Por isso, para preservar a bateria uma tensão de flutuação deve ser mantida entre os seus terminais mesmo que a bateria não esteja sendo utilizada.

ROBERTS, 1991 em seu livro apresenta uma expressão para calcular a quantidade de baterias necessárias para um sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias.

$$C_T = \frac{Wh_{dia} * A}{12} \quad (7)$$

onde: C_T = Capacidade total necessária (Ah em 12V)

A = Autonomia requerida (dia)

Wh_{dia} = Energia requerida por dia pelas aplicações

$$N_B = \frac{C_T}{C_b * pd} \quad (8)$$

onde: N_B = Número mínimo de baterias necessárias (12V)

C_b = Capacidade total da bateria (Ah)

pd = Profundidade de descarga máxima (%)

2.2.5 Tipos de baterias

Existem atualmente vários tipos de baterias disponíveis no mercado e a escolha deve ser feita com base no tipo de aplicação, características elétricas, durabilidade e custo. A voltagem fornecida pela bateria depende do número células e do tipo de material que as constituem. Desse modo, é razoável que a comparação entre as baterias seja feita para uma mesma voltagem, 12V, por exemplo.

A seguir serão apresentadas brevemente algumas características das principais baterias utilizadas atualmente e suas aplicações.

Baterias de Chumbo-Ácido

As baterias de chumbo-ácido possuem um grande mercado, mais de 90% dos veículos automotivos as utilizam devido principalmente ao seu baixo custo. Na sua construção mais comum, o anodo é de chumbo e o catodo de óxido de chumbo (PbO_2), arrançados em placas retangulares planas, dispostas e interligadas alternadamente com separadores de material poroso não condutor, para evitar contato elétrico direto. O conjunto fica no interior de uma cuba, submerso no eletrólito de ácido sulfúrico. O esquema simplificado de uma célula é apresentado na Figura 2.7.

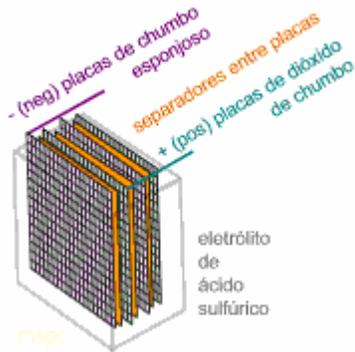


Figura 2.7 - Esquema simplificado de uma célula da bateria de chumbo-ácido. Fonte: (MSPC, 2007)

A reação global para a descarga é:



À medida que a bateria é utilizada a concentração de ácido sulfúrico diminui. Uma vez que ele tem massa específica significativamente superior à da água, a redução da massa específica do eletrólito (e, portanto, da carga) pode ser facilmente observada com densímetro tipo flutuador e constitui uma forma prática de medir a carga da bateria (MSPC, 2007).

A célula chumbo-ácida é recarregável, provavelmente devido ao fato do produto da descarga (sulfato de chumbo) ser insolúvel no eletrólito e permanecer junto dos eletrodos (ROBERTS, 1991). Uma vez descarregada, total ou parcialmente, uma fonte externa de energia elétrica reverte às reações, regenerando o chumbo e o óxido de chumbo dos eletrodos e o ácido sulfúrico do eletrólito.

Mas o processo de carga tem seu lado negativo, pois pode haver a reação comum de decomposição da água: $2\text{H}_2\text{O(l)} \rightarrow 2\text{H}_2\text{(g)} + \text{O}_2\text{(g)}$. Ou seja, pode ocorrer à formação de uma mistura gasosa potencialmente explosiva e, para reduzir esse risco, a carga deve ser controlada (BOCKRIS & REDDY, 1998).

A evaporação da água faz necessária a complementação periódica com água pura. Para evitar isto, surgiram na década de 1970 as primeiras células seladas. Segundo Bockris & Reddy, 1998,

existe também um composto catalítico que possibilita a produção de água, a partir do hidrogênio e oxigênio formados durante o processo de carga.

Uma das desvantagens do uso de baterias de chumbo-ácido está na dificuldade de se determinar e manter precisamente seu estado de carga. Já a durabilidade dessa bateria depende muito da forma como ela é descarregada e da temperatura em que ela é operada. Outra desvantagem em relação às outras tecnologias é que elas possuem baixa densidade de energia por massa, 28 a 35 Wh/kg. Para aplicações que requerem muita energia, a quantidade de baterias de chumbo-ácido é muito grande, o que as torna inadequadas para a aplicação. A vida média de uma bateria de chumbo-ácido, sem a ocorrência de descargas profundas, raramente excede a 4 anos.

Baterias de Níquel-Cádmio (NiCd)

Bastante utilizada em aparelhos eletrônicos portáteis (telefones, computadores etc.), é composta por um anodo de cádmio, catodo de hidróxido de níquel (Ni(OH)_2) e eletrólito de hidróxido de potássio (KOH) (MSPC, 2007). É também utilizada em alguns veículos elétricos e artefatos espaciais. Para obter o máximo de capacidade no menor espaço possível, anodo e catodo são filmes flexíveis enrolados conforme esboço da Figura 2.8. Existe também um filme de material absorvente e não condutor que fixa o eletrólito entre ambos.

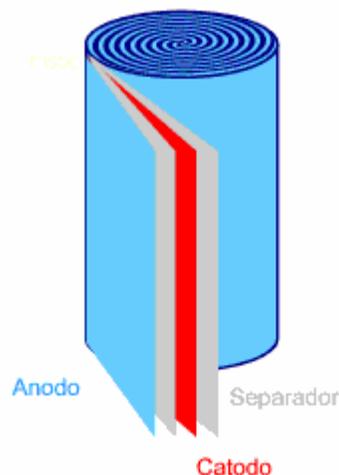
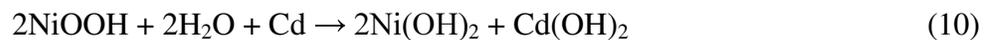


Figura 2.8 - Esquema da construção de uma célula de NiCd. Fonte: MSPC, 2007

Existem processos especiais para fabricação, como a deposição de níquel em pó sobre um filme de aço e aquecimento para fixação, formando uma superfície porosa. O hidróxido de níquel é depositado nos poros por processo eletroquímico (BOCKRIS & REDDY, 1998). Há também processos especiais para fabricação do anodo de cádmio, como a deposição do pó, de forma similar ao catodo. Essas baterias são recarregáveis e têm vantagens como maior vida útil (suporta mais ciclos de carga-descarga) e maior tempo de conservação sem uso (vários meses, sem perda significativa da carga).

A sua reação global de descarga é:



No processo de carga, a reação ocorre no sentido inverso.

Este tipo de bateria possui maior energia e densidade de potência do que as baterias de chumbo-ácido. Elas são também robustas, possuem uma longa durabilidade e ainda são mais baratas do que as baterias a base de níquel, as quais apresentam valores da ordem de US\$ 350 a US\$ 400/kWh ou mais (COELHO, 2001).

O segredo da longa durabilidade deste tipo de bateria está no material das placas, relativamente imune aos agentes químicos que a cercam, o que mantém toda a sua integridade mecânica e condutividade elétrica inalteradas durante toda a vida útil da bateria (BOCKRIS & REDDY, 1998). Por esse motivo podem-se encontrar bancos de baterias de níquel-cádmio com 20 ou 30 anos de uso, com aproximadamente 100% de capacidade. Segundo os fabricantes, o alto preço pago inicialmente por este tipo de bateria é compensador em longo prazo. O custo inicial de um banco de baterias de níquel-cádmio chega a ser 3 a 4 vezes maior do que um banco de baterias de chumbo-ácido.

Como vantagem essas baterias são menos susceptíveis a variação de temperatura, suportando um regime de trabalho em temperaturas mais elevadas, o que faz com que sua vida útil seja afetada em menor grau quando comparadas às baterias de chumbo-ácido (BOCKRIS & REDDY, 1998). A grande desvantagem está na alta toxicidade dessas baterias. O cádmio é um metal altamente tóxico, e

seu uso vem sendo questionado por razões ambientais (COELHO, 2001). Embora o seu grande uso seja encontrado em veículos especiais ou em banco de baterias para telecomunicações, a tendência é de serem substituídas por baterias de níquel metal hidreto, mesmo com uma expectativa de vida menor.

Outro fator relevante está no fenômeno que pode ocorrer: se a célula é submetida a ciclos repetidos de carga e descarga de capacidade inferior à capacidade total da célula, por exemplo, 70%, ela "memoriza" o valor e não aceita uma carga maior que 70%, por mais que se estenda a operação de carga. Isto se deve aparentemente à formação de uma superfície passiva nos eletrodos, que bloqueia a reação (BOCKRIS & REDDY, 1998). No uso do dia-a-dia, é mais provável a ocorrência de uma perda de tensão devido a sobrecargas, que alteram as estruturas cristalinas dos metais dos eletrodos.

Baterias de Níquel-Metal Hidreto (NiMH)

As baterias de níquel metal hidreto podem ser consideradas uma evolução das de níquel cádmio (NiCd) (COELHO, 2001). Apresentam maiores taxas de energia armazenada por unidade de massa ou de volume e são menos prejudiciais ao ambiente. A construção é similar à das células de NiCd. Anodo e catodo são filmes flexíveis enrolados e separados por filmes de material fibroso que retém o eletrólito. O conjunto é encapsulado e interligado com os bornes externos para formar o dispositivo prático. Há ainda um pequeno suspiro para liberação dos gases eventualmente formados (BOCKRIS & REDDY, 1998). Também de forma similar às células de NiCd, o catodo é hidróxido de níquel (Ni(OH)_2) e o eletrólito, hidróxido de potássio (KOH). A diferença está no anodo que, no lugar do cádmio, usa um hidreto metálico, que na realidade, é uma liga metálica com grande capacidade de absorção de hidrogênio (cerca de 1000 vezes o seu volume). Tais ligas são em geral compostas por dois metais: um do "tipo A", que absorve hidrogênio de forma exotérmica e outro do "tipo B", que absorve de forma endotérmica (BOCKRIS & REDDY, 1998). Assim, a combinação de ambos forma uma liga que pode operar satisfatoriamente em condições usuais. Algumas composições podem ser, por exemplo: Mg_2Ni , TiFe , LaNi_5 , ZnMn_2 , etc.

Sua reação global de descarga é descrita como:



onde M é a liga absorvente e H_{ab}, o hidrogênio absorvido. Na carga as reações se invertem. Pode-se observar que, na carga, a liga M absorve hidrogênio e o libera na descarga.

As baterias de níquel metal hidreto possuem algumas vantagens em relação aos outros tipos: resistem a um número maior de cargas e descargas em sua vida útil do que as de NiCd, possuindo um potencial energético superior a estas (20% em média). Ainda em comparação com as de NiCd, possuem custo apenas ligeiramente superior, talvez a única desvantagem, mas tempo de recarga inferior e maior resistência a variações de temperatura. Elas possuem melhor desempenho dentre as tecnologias existentes, são economicamente atrativas e possuem 50% mais densidade de energia em massa que as baterias de chumbo-ácido.

Baterias de Lítio-Íon

Nessas baterias, o anodo é normalmente carbono na forma de grafite, enquanto que no catodo são utilizados compostos como óxido de lítio e manganês (LiMn₂O₄), óxido de lítio e níquel (LiNiO₂) ou óxido de lítio e cobalto (LiCoO₂). Este último é mais comum (BOCKRIS & REDDY, 1998). O eletrólito é formado por um sal de lítio (como LiPF₆) dissolvido em uma mistura de carbonatos orgânicos, ou outras composições de acordo com o fabricante. A construção é na forma de filmes enrolados em espiral, semelhante às células de NiCd e NiMH. A sua reação global de descarga é:



onde M é um dos metais do composto catódico conforme já mencionado. As reações se dão pela intercalação de íons de lítio, isto é, a inserção em outro material sem mudança significativa na estrutura do mesmo e pelo processo inverso (BOCKRIS & REDDY, 1998).

A tensão gerada é cerca de 3,7 volts, praticamente o triplo da de uma célula de NiCd ou NiMH. É certamente a bateria recarregável mais eficiente em termos de energia armazenada por massa ou por volume (MSPC, 2007).

Apresentam como vantagem o fato de possuírem picos de potência específica de mais de 1000W/kg, e energia específica de mais de 100Wh/kg. Apresentam duas grandes desvantagens: precisam ser aquecidas a 70°C para um desempenho adequado, e os eletrodos metálicos de Lítio tem vida curta, pois a deposição de detritos no eletrodo leva a um curto circuito interno (BOCKRIS & REDDY, 1998). Precisam de um controle de carga preciso, pois possui baixa tolerância a sobrecarga. Ainda assim, este tipo de bateria possui uma maior eficiência energética do que as baterias a base de chumbo ou níquel podem atingir.

A Tabela 2.1 resume as principais características dos tipos mais usados de baterias recarregáveis. As informações são apenas aproximadas e podem variar de acordo com o fabricante. A Figura 2.9 apresenta as faixas de densidades energéticas empregadas por estas baterias.

Tabela 2.1 - Comparação das principais características das baterias recarregáveis. Fonte: (MSPC, 2007)

| Dado | Chumbo-ácido | NiCd | NiMH | Li - íon |
|-------------------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Densidade energética | Baixa | Baixa | Média | Alta |
| Características de estocagem | Precisam ser carregadas | Boas | Boas | Boas |
| Vida útil | Baixa | Longa | Longa | Média/Longa |
| Velocidade de carga | Lenta | Lenta ou rápida | Lenta ou rápida | Lenta |
| Restrições ambientais | Sim | Sim | Não | Não |
| Custo | Baixo | Médio | Médio/Alto | Alto |
| Tolerância de sobrecarga | Alta | Média | Baixa | Baixa |

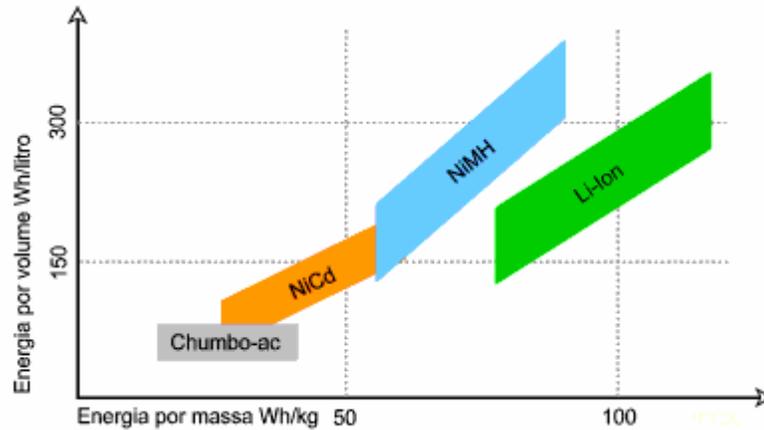


Figura 2.9 - Comparação das densidades de energia das baterias recarregáveis. Fonte: MSPC, 2007

Aqui foram apresentados os tipos mais comuns de baterias utilizadas atualmente. Foram descritas também as suas principais características, tanto em aspectos construtivos como as suas vantagens e desvantagens. Com base nos argumentos apresentados, a escolha do melhor tipo de bateria é influenciada principalmente pela densidade de energia, densidade de potência e vida útil, mas fatores como custo e confiabilidade são também muito importantes. Para o trabalho em questão optou-se por utilizar baterias de chumbo-ácido, por apresentarem características próximas às requeridas, facilidade na obtenção e menor custo.

2.3 A eletrólise da água

O hidrogênio é o mais simples dos elementos químicos e o átomo mais abundante do universo. Entretanto, na atmosfera terrestre sua concentração é da ordem $0,5\mu\text{mol/mol}$ (partes por milhão), o que impede sua obtenção direta do ar. Desta forma o hidrogênio precisa ser extraído de outras substâncias e não pode ser considerado uma fonte de energia primária e sim um vetor energético.

A eletrólise da água é o processo pelo qual se pode obter o hidrogênio a partir da água e eletricidade. É praticada desde o início do século XX, porém com instalações de tamanhos relativamente pequenos. Entre 1920 e o final da década de 30, um grande número de projetos

diferenciados de eletrolisadores³ de grande porte foram desenvolvidos, levando à construção de plantas de 20 a 25.000 m³/h de hidrogênio as quais funcionavam através da utilização de energia hidroelétrica de baixo custo, no Canadá, na Noruega e em outras localidades, para suprir a produção de amônia para fertilizantes nitrogenados (LeROY, 1983).

A disponibilidade de hidrocarbonetos a baixo custo como alternativa à energia hidroelétrica, em alguns poucos anos que antecederam à Segunda Guerra Mundial, fez cessar o desenvolvimento dessas grandes instalações baseadas em eletrolisadores de grande porte. Apenas a instalação de Aswan High Dam foi construída neste período, apresentando no início de sua operação, capacidade nominal de 40.000 m³/h de hidrogênio.

Somente na década de 70 renasceu o interesse na produção de hidrogênio em grande escala, neste momento com fortes programas de desenvolvimento nos países da Europa, Canadá, USA, Japão e outros, incluindo o Brasil, programas que encaram a eletrólise da água como um importante processo para a produção de grandes quantidades de hidrogênio.

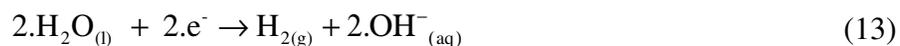
2.3.1 Descrição do processo de eletrólise

Denomina-se eletrólise da água, ou processo eletrolítico, ao processo eletroquímico de dissociação da água, onde os produtos finais das reações desencadeadas são hidrogênio e oxigênio moleculares.

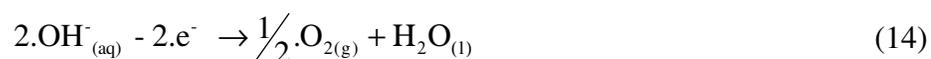
Com a aplicação de uma diferença de potencial entre os eletrodos (catodo e anodo) e com a existência, entre eles, de um meio condutor iônico líquido (solução aquosa ácida ou básica) ou sólido (membranas poliméricas ou cerâmicas permiônicas), esta decomposição é realizada através do fornecimento de corrente contínua por uma fonte de energia elétrica. Quando se aplica a força eletromotriz acima de um determinado potencial mínimo há passagem de corrente entre os eletrodos, desencadeando as reações eletrolíticas para evolução de hidrogênio no catodo (redução) e oxigênio no anodo (oxidação). Para o caso de um meio condutor básico, as reações do processo são as seguintes:

³ Denominação dos equipamentos utilizados para a produção de hidrogênio e oxigênio através da eletrólise da água.

- No catodo:



- No anodo:



- Global:



A variação na entalpia (ΔH) para a decomposição eletroquímica da água é dada por:

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S = -nF.E + nF.T\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p \quad (16)$$

sendo G a energia livre de Gibbs, S a entropia, T a temperatura do processo, n o número de elétrons transferidos na evolução de uma molécula de hidrogênio ($n = 2$), F a constante de Faraday (96.485 C/mol), E o potencial reversível e p a pressão, mantida constante no processo (ULLMANN'S, 1989).

Para a reação total (8), os dados termodinâmicos, na condição padrão de temperatura e pressão (298,13 K e 1 atm), estão disponíveis na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Dados termodinâmicos da reação de eletrólise da água nas condições padrões.

| Nome | Símbolo | Valor | Unidade |
|----------------------------------|---------------------|-------|---------|
| Entalpia da reação | ΔH^0_{298K} | 286 | kJ/mol |
| Entropia da reação | ΔS^0_{298K} | 163 | J/mol.K |
| Energia livre de Gibbs da reação | ΔG^0_{298K} | 237 | kJ/mol |

Fonte: ULLMANN'S (1989)

Utilizando-se os dados da Tabela 2.2 é possível realizar um balanço energético da eletrólise da água. Considerando-se o processo como reversível tem-se que energia elétrica fornecida deve ser igual à variação da energia química (ULLMANN'S, 1989; CHESF, 1987).

$$E_E = \Delta G = n.F.E_{rev} \quad (17)$$

onde E_E é a energia elétrica necessária, e E_{rev} é o potencial ideal de decomposição (potencial reversível da eletrólise), que nas condições padrões pode ser expresso da seguinte forma

$$E_{rev} = \Delta G / (n.F) = 1,229V \quad (18)$$

Nestas condições, a energia teórica mínima para a decomposição da água é de 237 kJ/mol $H_2 = 118,5$ kJ/g $H_2 = 2,94$ kWh/m³ H_2 produzido.

A cada reação química é associada uma variação da entalpia (ΔH). Para um processo isotérmico à pressão constante, a reação de decomposição eletroquímica da água é representada pela equação (17), que pode ser reescrita como

$$\Delta G = \Delta H - \Delta Q_r \quad (19)$$

$$\Delta Q_r = T\Delta S \quad (20)$$

onde ΔQ_r é a quantidade de calor trocada com o ambiente se a reação de eletrólise se passa reversivelmente à temperatura constante. Este valor de entalpia mostra-se maior que o valor representado para a energia de Gibbs, visto que nessa grandeza está inclusa a variação entrópica do sistema, ou seja, a quantidade adicional de energia direcionada ao novo nível organizacional dos produtos envolvidos. Isto faz com que a tensão aplicada nos eletrodos (V) deva ser superior ao valor da reversibilidade (E_{rev}). A diferença ($V - E_{rev}$) se perde por efeito Joule, sendo, desta forma, dissipada na forma de calor irreversível (ΔQ_i) (SCIENTIA, 1980):

$$V - E_{rev} = \frac{\Delta Q_i}{(n.F)} \quad (21)$$

Utilizando-se as equações acima se obtém

$$V = -(\Delta H - \Delta Q_r + \Delta Q_i)/(n.F) \quad (22)$$

Se a quantidade de calor reversível (ΔQ_r) que deve ser fornecida à célula for neutralizada pela energia dissipada sob a forma de calor no eletrólito (ΔQ_i), a tensão de eletrólise fica, então, reduzida a $-\Delta H/(n.F)$. Nestas condições a célula opera em condições adiabáticas, e a tensão de eletrólise é chamada de potencial termoneutro, E_{th} , (potencial de decomposição mínimo teórico). Na condição padrão é descrito como:

$$E_{th} = -\Delta H/(n.F) = 1,482 V \quad (23)$$

o que equivale a uma energia mínima para a produção de hidrogênio por eletrólise de 286 kJ/mol $H_2 = 143 \text{ kJ/g } H_2 = 3,55 \text{ kWh/m}^3$.

A Figura 2.10 mostra a variação do potencial reversível e termoneutro com a temperatura. A eletrólise da água não ocorre para tensões abaixo do potencial reversível, região A, na região B o processo é endotérmico e só ocorre se calor for fornecido ao sistema. Acima do potencial termoneutro, região C, o processo é exotérmico e a eletrólise ocorre com calor sendo fornecido ao meio.

A maioria dos eletrolisadores opera na região C. Termodinamicamente é estabelecido um potencial mínimo para a eletrólise, sendo a diferença entre a tensão de operação do eletrolisador e a tensão mínima é conhecida como sobretensão. Esta sobretensão é provocada também pelos seguintes fatores: limitada condutividade do eletrólito em decorrência da concentração de íons próximos aos eletrodos e ao redor dos íons de carga oposta (dupla camada elétrica, camada difusa, etc.), causando uma diminuição da capacidade de locomoção dos íons; taxa de reação lenta nos eletrodos; acúmulo de gases junto aos eletrodos, reduzindo a área disponível à reação, sendo importante que os gases que se formam sejam retirados rapidamente (CHESF, 1987).

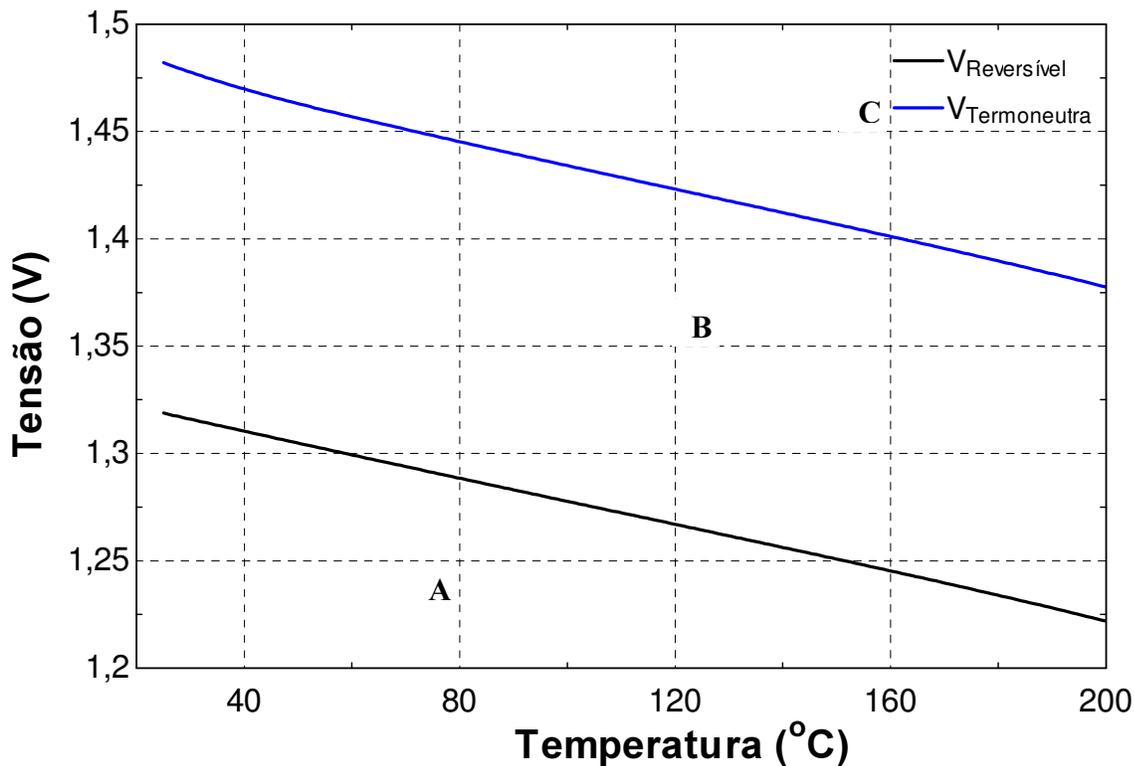


Figura 2.10 - Dependência do potencial reversível e termoneutro com a temperatura.

Quando se consideram os fatores de sobretensão a equação para a voltagem de operação do eletrolisador fica expressa como

$$V_{op} = E + \eta_c + \eta_a + i.R \quad (24)$$

sendo V_{op} é a voltagem operacional (aplicada entre os eletrodos); E voltagem mínima teórica (termodinâmica); η_c sobretensão no catodo; η_a sobretensão no anodo; i a corrente elétrica na célula, em A; e R é a resistência ôhmica de todos os componentes do eletrolisador, em Ω . O termo $i.R$ se refere à queda de tensão devido à perda ôhmica nas células, dependendo de fatores tais como: condutividade do meio condutor iônico, distância entre os eletrodos, condutividade do diafragma, condutividade dos eletrodos, resistência de contato entre os componentes do eletrolisador, entre outros.

O aumento da temperatura de operação do eletrolisador diminui a sobretensão, mas causa o aumento da corrosão dos componentes (diminuição da resistência química e mecânica dos materiais do eletrolisador) e torna necessário pressurizá-lo para evitar perda de água e eletrólito por evaporação.

Com a pressurização há um aumento do consumo de energia, mas ocorre um incremento na eficiência do processo, uma vez que ocorre uma redução no tamanho das bolhas de gás que se formam junto aos eletrodos.

A eficiência energética de um eletrolisador é definida como a relação entre o poder calorífico superior do hidrogênio formado ($n.F.V_{pcs}$) e a energia elétrica fornecida ao sistema ($n.F.V_{op}$), desta forma:

$$\eta = \frac{V_{pcs}}{V_{op}} \quad (25)$$

sendo V_{op} a voltagem operacional do eletrolisador; V_{pcs} a voltagem correspondente ao poder calorífico superior do hidrogênio que pode ser determinada em função da temperatura ($^{\circ}\text{C}$) pela equação:

$$V_{pcs}(T, p = 1,015 \text{ bar}) = 1,4756 + 2,252 \cdot 10^{-4} T + 1,52 \cdot 10^{-8} T^2 \quad (26)$$

sendo T a temperatura do processo em $^{\circ}\text{C}$ e a equação válida somente para a pressão atmosférica (LeROY, 1983). Nas condições padrões (1,015 bar e 25°C), o $V_{pcs} = 1,482 \text{ V}$; então nestas condições a equação (18) pode ser reescrita como:

$$\eta = \frac{1,482}{V_{op}} \quad (27)$$

A Tabela 2.3 apresenta a variação da eficiência do processo de eletrólise e consumo de energia do eletrolisador com a voltagem de operação nas condições padrões.

Tabela 2.3 Variação da eficiência com a voltagem de operação e o consumo de energia por unidade de H₂ gerado.

| Eficiência | Voltagem de operação (V) | Consumo de energia (kWh/m³) |
|-------------------|---------------------------------|---|
| 100% | 1,481 | 3,544 |
| 96% | 1,543 | 3,692 |
| 92% | 1,610 | 3,852 |
| 88% | 1,683 | 4,027 |
| 84% | 1,763 | 4,219 |
| 80% | 1,839 | 4,400 |
| 78% | 1,899 | 4,544 |
| 76% | 1,949 | 4,663 |
| 74% | 2,001 | 4,789 |
| 72% | 2,057 | 4,922 |
| 70% | 2,116 | 5,063 |

2.3.2 Eletrolisadores bipolares

Os eletrolisadores são geralmente classificados em convencionais e avançados, de forma que os convencionais são ainda divididos em dois tipos: unipolar (também conhecido como tipo tanque) e bipolar (filtro-prensa). Ambos os tipos de eletrolisadores são compostos por células individuais justapostas, ligadas em paralelo no tipo unipolar e em série no tipo bipolar, conforme ilustrado na Figura 2.11.

Nos eletrolisadores convencionais os eletrodos são geralmente protegidos por uma camada depositada de níquel, com ou sem a presença de outros metais, para evitar corrosão e produzir efeitos catalíticos. O diafragma, em geral, era constituído por um tecido de amianto (ou asbesto) ou, mais recentemente, à base de teflon.

Os eletrolisadores avançados são geralmente do tipo bipolar, com elevadas densidades de corrente que, por serem mais compactos, podem proporcionar aumento da eficiência e diminuição dos

custos dos materiais de construção e equipamentos auxiliares. Com as técnicas de construção e materiais desenvolvidos para estes eletrolisadores, operam a temperaturas entre 60° a 100°C e pressões no intervalo de 1 a 30 bar, usualmente.

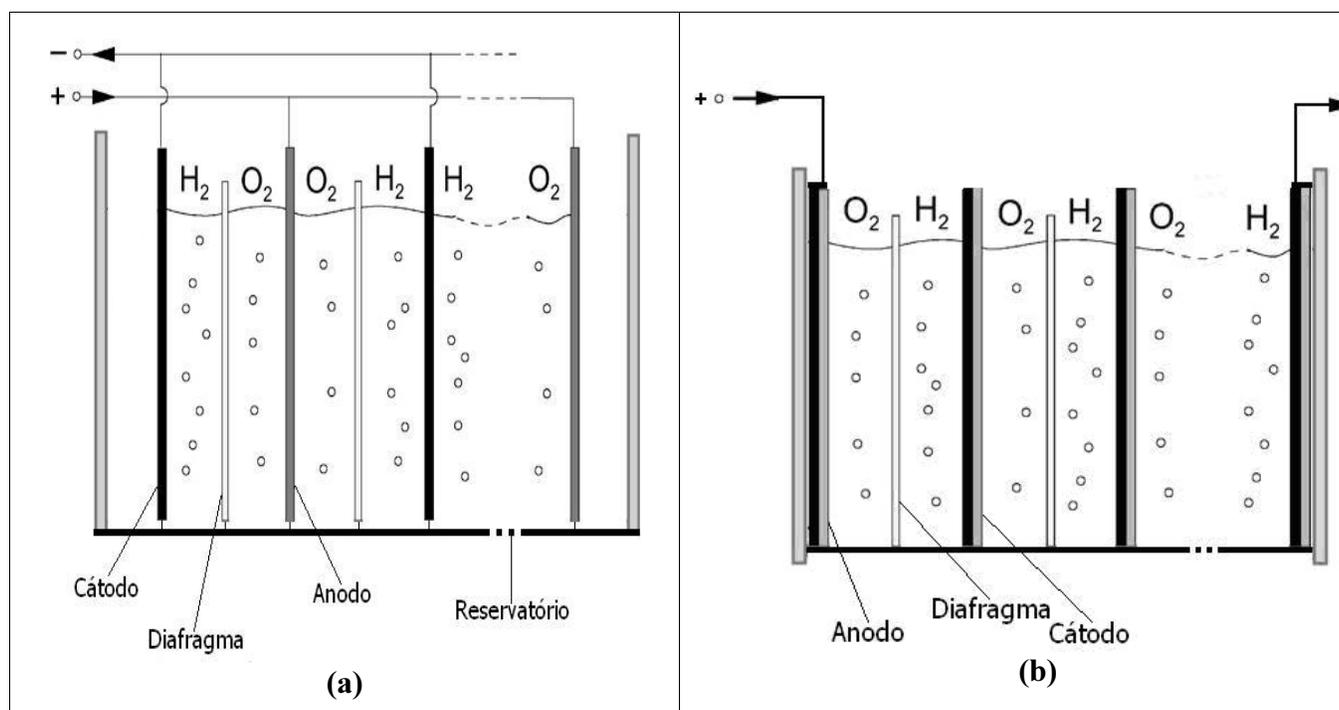


Figura 2.11 - Diagrama esquemático dos eletrolisadores unipolares ou monopolares (a) e bipolares (b).

O condutor iônico líquido mais comumente utilizado é uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH_{aq}), cuja condutividade iônica é maximizada na faixa de concentração de 28% a 30% g/g, o que determina um menor consumo energético. Sua utilização é viabilizada pela resistência à corrosão do aço, material comumente utilizado na construção de muitos dos dispositivos destinados à eletrólise (WENDT et al, 1991). Para estes casos, onde o eletrólito é líquido, o uso de diafragmas para separação dos gases evoluídos é inevitável. Estes componentes devem ser estáveis quimicamente na presença do eletrólito, mecanicamente resistentes, bons condutores dos íons envolvidos e maus condutores eletrônicos, além de manter estas características durante um longo tempo de utilização, nas condições termodinâmicas de operação da célula eletrolítica.

Durante muitos anos, diafragmas baseados em asbesto foram utilizados, principalmente em eletrolisadores unipolares. Este material apresenta baixas perdas ôhmicas, mas sua utilização está limitada à temperatura máxima de 80°C e por este motivo, outros materiais passaram a ser estudados e utilizados como diafragmas para células eletrolíticas.

Destaca-se o uso de diafragmas baseados em teflon, sinterizado ou composto por fios em malha, e para eletrolisadores alcalinos avançados, os diafragmas metalo-cerâmicos, como é o caso do diafragma composto por um suporte metálico de Ni-*mesh* sinterizado, recoberto por NiO, estáveis até a temperatura de 60°C e pressões de até 200 bar (BRINGMANN, 2003).

2.4 Células a combustível

Células a combustível (CaC) são dispositivos eletroquímicos que convertem a energia química de um combustível em eletricidade em corrente contínua de baixa tensão (SILVA, 1991). Seu princípio de funcionamento consiste em converter a energia livre de Gibbs em trabalho elétrico através da oxidação isotérmica do combustível utilizado.

São dispositivos semelhantes às baterias, com a vantagem de dispensarem recargas. Fornecem energia elétrica enquanto for fornecido combustível. Estes dispositivos são classificados em termos do tipo de eletrólito empregado e da temperatura de operação. As principais tecnologias atualmente em desenvolvimento, juntamente com algumas características relevantes para a escolha de acordo com a operação, são apresentadas na tabela 2.3.

A PEMFC (*Proton Exchange Membrane Fuel Cell* - Célula a combustível com membrana condutora de prótons) é considerada uma das tecnologias mais promissoras. Ela utiliza platina como catalisador e uma membrana sólida, apresentando a desvantagem de operar somente com H₂ puro, aumentando em muito os cuidados com a origem do combustível, uma vez que até mesmo pequenas quantidades de CO podem prejudicar permanentemente os catalisadores dos eletrodos. Com a introdução de H₂ pelo lado do anodo, na presença de um catalisador adequado, ocorre a dissociação da molécula em prótons e elétrons. O próton (íon positivo) atravessa a membrana (eletrólito) que separa os eletrodos e chega ao lado do catodo, onde se combina com o oxigênio formando água e

produzindo calor. Os elétrons que permanecem no lado do anodo não são conduzidos pelo eletrólito e, fazendo-os circular por uma carga externa, obtém-se uma corrente elétrica contínua, esquema que é mostrado na Figura 2.12. As reações eletroquímicas que ocorrem sob a ação da platina são:

Reação Anódica:



Reação Catódica:



Reação global:



Enquanto a eficiência da PEMFC operando com H_2 e com ar atmosférico é elevada (próxima à 50%), sistemas práticos que utilizam H_2 de reforma e ar pressurizado têm sua eficiência diminuída. Pequenas unidades de 30 kW possuem eficiências em torno de 35 % (incluindo a conversão CC/CA), unidades de 200 kW em torno de 40% e unidades maiores 45%.

PEMFC maiores que 1 kW são geralmente pressurizadas para aumentar a reação química nas baixas temperaturas envolvidas. Pressões de ar de 3 bar (3×10^5 Pa) ou maiores devem ser usadas para a célula ter uma densidade de potência razoável. Em pequenos sistemas isto resulta em substancial perda de eficiência, pois os compressores de ar também adicionam considerável complexidade ao sistema de célula a combustível.

Neste trabalho, será utilizado este tipo de CaC tendo em vista que suas características são adequadas para a aplicação a ser implementada.

A SOFC (*Solid Oxid Fuel Cell* - Célula a combustível do tipo óxido sólido) é considerada uma das mais promissoras para geração estacionária de eletricidade a partir de hidrocarbonetos, pelo fato

de ser tolerante às impurezas e poder reformar⁴ internamente estes compostos, uma vez que trabalha em temperaturas elevadas, entre 600°C e 1000°C (873,15 e 1273,15 K).

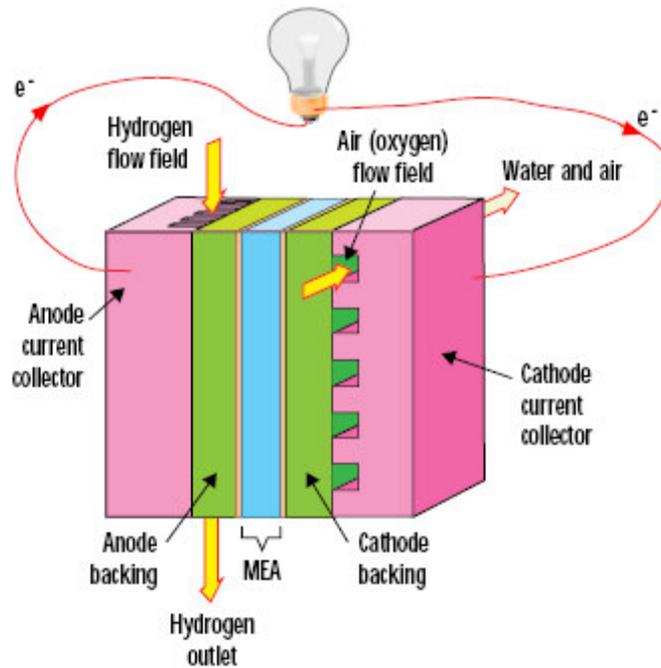


Figura 2.12: Esquema geral de funcionamento de uma célula a combustível. (Fonte: BALLARD, 2007)

⁴ A reação de reforma de um combustível é a sua reação com ar (ou oxigênio) e água, produzindo uma mistura gasosa rica em hidrogênio e dióxido de carbono e outros componentes minoritários.

Tabela 2.4 - Classificação e caracterização das células a combustível atuais

| Tipo | T (°C) | Eficiência Energética | Eletrólito | Combustível | Agente de Oxidação |
|-------|------------|-----------------------|--|--|--|
| AFC | 60 a 80 | 60% | 45% g/g KOH a 28,5 bar ou 80% a 85% KOH a pressões entre 2 e 3 bar. | H ₂ puro | O ₂ puro |
| PEMFC | 60 a 100 | 60% | Membrana polimérica | H ₂ puro | O ₂ puro |
| PAFC | 160 a 220 | 45% | H ₃ PO ₄ 95% a 97% g/g | H ₂ puro. Eletrodos cobertos: gás reformado ou gás de carvão | O ₂ puro O ₂ puro |
| MCFC | 600 a 700 | 60% | Mistura de carbonatos alcalinos fundidos (Na, K e Li) | H ₂ (impuro), CO, hidrocarbonetos | O ₂ (impuro) ar |
| SOFC | 800 a 1200 | 60% | Liga estabilizada de ítrio-zircônio (ZrO ₂ e 8-10% de Y ₂ O ₃ ;YSZ) | H ₂ (impuro), CO, hidrocarbonetos | ar |

Fonte: FERREIRA, 2003.

Uma das grandes vantagens é que ela utiliza um eletrólito sólido, não havendo a necessidade de reciclar o eletrólito. Uma SOFC pequena de 1 kW pode ser construída com muitas folhas finas de forma compacta. Outra grande vantagem da SOFC é que tanto o hidrogênio quanto o monóxido de carbono são aproveitados como combustível, podendo utilizar seguramente muitos hidrocarbonetos. Devido à suas elevadas temperaturas de operação, a compressão de ar não é necessária, resultando em sistemas com operação silenciosa e maiores eficiências.

Uma desvantagem da SOFC, principalmente em aplicações automotivas, é que ela necessita de um tempo relativamente longo para atingir a temperatura mínima (650 °C), o que não constitui um empecilho para plantas estacionárias, que trabalham continuamente.

As MCFC (*Molten Carbonate Fuel Cell* - Célula a combustível do tipo carbonato fundido) possuem uma temperatura de operação de 600 a 650 °C, mais baixa que a SOFC, mas também podem reformar internamente hidrocarbonetos leves, possuindo a desvantagem de ser sensível à

corrosividade da membrana de carbonato fundido. Grandes plantas de geração usando turbina a gás para extrair o calor excedente da célula poderiam alcançar até 60% de eficiência global, operando com gás natural. Ao que tudo indica esse tipo de célula a combustível de grande porte é o que mais rapidamente atingirá o estágio comercial pleno.

As PAFC (*Phosphoric Acid Fuel Cell* - Célula a combustível de ácido fosfórico) têm se desenvolvido nos últimos 15 anos, apresentando uma eficiência real menor que as MCFC ou SOFC. Sua menor temperatura de operação (entre 160 e 220°C) é considerada mais apropriada para pequenas e médias unidades geradoras de eletricidade. Unidades geradoras médias de 200 kW possuem eficiência em torno de 40% e grandes unidades de 11 MW, cerca de 45%, operando com gás natural.

As AFC (*Alkaline Fuel Cell* - Célula a combustível alcalina) são muito sensíveis à contaminação por CO₂, até mesmo no oxidante, necessitando de H₂ e O₂ puros, o que limita bastante sua aplicação. Ela opera em várias temperaturas, com uma eficiência de produção de eletricidade CC pode chegar a 60%.

2.5 Características do Hidrogênio

Embora seja considerado o elemento químico mais abundante do universo (LOF, 1987), o hidrogênio molecular não é encontrado na natureza em quantidade suficiente para suprir a demanda necessária. Para obtê-lo é necessário retirá-lo de substâncias onde ele esteja presente, como a água e os compostos orgânicos, através de reações que não ocorrem espontaneamente, sendo por isso necessário o fornecimento de energia.

O hidrogênio pode ser obtido por meio de vários processos, utilizando diversas fontes de energia, tais como energia solar, eólica, nuclear, o carvão, o petróleo, a biomassa e seus derivados, como o etanol e o metanol. Em todos estes processos a produção do hidrogênio pode apresentar alta eficiência energética, o que o torna bastante indicado para o armazenamento de energia.

Atualmente o emprego energético do hidrogênio é inferior a 20% do total do gás produzido, sendo os 80% restantes utilizados principalmente como insumo na indústria química, petroquímica e

siderúrgica. Da produção total mundial de hidrogênio estima-se que 96% provenham de fontes não renováveis como o carvão e o petróleo, sendo a reforma do gás natural a principal forma de obtenção industrial do gás. Os 4% restantes são produzidos através da eletrólise da água utilizando fontes de energia renováveis como a solar, eólica ou hidrelétrica, ou ainda através da reforma de combustíveis renováveis como o etanol ou o metanol (TOLMASQUIM, 2003).

A Tabela 2.5 apresenta o resumo das principais características físicas do hidrogênio utilizadas no desenvolvimento deste trabalho. Deve-se observar que devido ao fato do hidrogênio ser um gás nas condições normais de temperatura e pressão, suas características físicas são fortemente influenciadas pela pressão e temperatura. Neste trabalho, exceto quando indicado, serão consideradas as condições normais de temperatura e pressão (273 K, 1,015 bar).

Tabela 2.5 - Características físicas do hidrogênio.

| Propriedade | Valor |
|--|--|
| Peso atômico | 1,00797 u.m.a |
| Ponto de fusão | -259,14°C (14,01 K) |
| Ponto de vaporização | -251,87°C (20,28 K) |
| Densidade | 0,08987 g/L (kg/m ³) |
| Densidade (líquido, -253°C) | 70,8 g/L (kg/m ³) |
| Densidade (sólido, -262°C) | 70,6 g/L (kg/m ³) |
| Temperatura crítica | -240,0°C (33,15 K) |
| Pressão crítica | 13,0 atm (13,17×10 ⁵ Pa) |
| Calor específico à pressão constante | |
| Gás a 25°C | 14,3×10 ³ J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Líquido a -256°C | 8,79×10 ³ J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Sólido a -259,8°C | 2,3×10 ³ J.kg ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Calor de fusão (-259,2°C) | 58,5×10 ³ J.kg ⁻¹ |
| Calor de vaporização (-252,8°C) | 44,8×10 ⁴ J.kg ⁻¹ |
| Condutividade térmica (25°C) | 181 mW.m ⁻¹ .K ⁻¹ |
| Limites de inflamabilidade com oxigênio | 4% a 94%mol/mol |
| Limites de inflamabilidade com o ar | 4,1% a 75%mol/mol |
| Temperatura de auto-ignição com o oxigênio | 0,08987 g/L (kg/m ³) |
| Temperatura de auto-ignição com ar | 70,8 g/L (kg/m ³) |

Fonte: SILVA, 1991

2.5.1 Métodos de produção de hidrogênio

Na Tabela 2.6 estão indicados os principais processos utilizados para a produção do hidrogênio e as fontes primárias de energia associadas.

Tabela 2.6 - Principais processos de geração de hidrogênio.

| Processo | Insumo básico | Fonte de energia |
|------------------------------------|--|---|
| Eletrólise | Água | Eletricidade |
| Reforma a vapor de hidrocarbonetos | Hidrocarbonetos leves (metano, nafta) + Água | Calor gerado pela queima de hidrocarbonetos |
| Oxidação parcial de óleos pesados | Hidrocarbonetos Pesados + Água | Calor gerado pela queima de |
| Oxidação parcial do Carvão | Carvão + Água | Calor gerado pela queima do carvão |
| Termoquímica | Água | Calor gerado por usinas nucleares/energia solar |
| Eletrólise fotovoltaica | Água | Radiação solar |

Armazenamento do H₂

Depois de produzido e purificado, o gás é armazenado em gasômetros a selos d'água, quando a baixas pressões, ou em vasos de pressão, a pressões intermediárias de 5 a 50 bar. Os gasômetros mantêm a pressão do gás constante e agem como um equipamento de alívio hidráulico.

A tecnologia de tanques para armazenamento de hidrogênio evoluiu das ligas convencionais de cromo-molibdênio para tanques multicamadas, que utilizam em sua construção metais leves (como o alumínio) e polímeros de alta densidade ultra-resistentes. O armazenamento de hidrogênio gasoso tem sido realizado sobre altíssimas pressões para aplicações veiculares, aproximadamente 700 bar (70 MPa), podendo atingir 1.000 bar em tanques para aplicações estacionárias. Os compressores para este tipo de armazenamento de hidrogênio devem receber especial atenção devido à reatividade e fugacidade do gás, que em tais condições termodinâmicas podem provocar sérias fragilizações dos

componentes internos do compressor. Este equipamento não deve também ocasionar contaminação do gás purificado, sendo aconselhável à aplicação de compressores do tipo diafragma.

Mostra-se também presente a possibilidade de armazenamento de hidrogênio liquefeito, todavia os processos conhecidos de liquefação necessitam de muita energia (para o caso do resfriamento eletromagnético) ou apresentam ciclos de liquefação com períodos muito longos (liquefação catalítica). Os materiais de construção dos tanques criogênicos precisam ser cuidadosamente escolhidos devido à baixíssima temperatura (aproximadamente 22 K ou -251°C).

Outra possibilidade é o armazenamento de hidrogênio em hidretos metálicos (estruturais ou intersticiais) ou ainda na forma de vetores químicos. Estas tecnologias estão em contínuo desenvolvimento, mas os produtos disponíveis ainda possuem elevado preço, baixo tempo de vida ou desempenho insatisfatório.

2.6 Sistemas solar-fotovoltaico-hidrogênio

Os principais objetivos de um sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio desenvolvidos atualmente são demonstrar a sua viabilidade técnica e, a partir dos resultados, desenvolver um método matemático global que envolva todos os fluxos de energia e considere todas as eficiências das transformações envolvidas e que possa servir para modelar e simular a operação de sistemas dessa natureza, para com isso determinar os custos desta tecnologia.

Para otimizar o desempenho do sistema é de fundamental importância conhecer o funcionamento dos equipamentos envolvidos e desenvolver técnicas de operação e controle apropriadas.

As características particulares do painel fotovoltaico, onde energia elétrica fornecida varia de acordo com a intensidade de radiação solar (sem mencionar a dependência com a temperatura), indicam a necessidade de se utilizar um controle automático que seja capaz de levar o consumo elétrico das células eletrolíticas o mais próximo possível do fornecimento máximo instantâneo do painel fotovoltaico.

2.6.1 Projetos com energia solar fotovoltaica com armazenamento em hidrogênio desenvolvidos no mundo

GARCIA-CONDE e ROSA (1992) apresentam uma descrição técnica de um sistema de produção de hidrogênio da energia fotovoltaica realizado na Espanha, com o objetivo de testar e verificar o uso desta tecnologia. O sistema é composto por 8,5 kW (potência pico) de painéis fotovoltaicos, com um sistema de controle que possibilita uma mudança na conexão dos painéis para que o fornecimento de tensão e corrente se ajuste à operação de um eletrolisador alcalino de 5,2 kW.

GALLI e STEFANONI (1997) apresentaram um trabalho descrevendo uma montagem demonstrativa realizada na Itália de um sistema fotovoltaico/hidrogênio/célula a combustível, com o objetivo de testar o funcionamento e a eficiência dos componentes. São descritos também o sistema de armazenagem de hidrogênio em hidretos metálicos e as características e os resultados de testes da célula a combustível. Ainda são descritos os sistemas de controle e monitoramento, importante para a segurança do sistema, e uma planta da construção realizada para receber a montagem.

ULLEBERG, 2004 e GIÖCKNER et all., 2002 publicam os resultados de dez anos de operação do sistema PHOEBUS na Alemanha, no qual demonstram a importância da estratégia de controle e operação do sistema fotovoltaico que utilizam hidrogênio como armazenador de energia elétrica. O sistema é composto por painéis fotovoltaicos com 43 kW de potência pico, de diferentes tipos e em diferentes inclinações, formando um barramento de 220 Vdc, acoplados a um banco de baterias com 110 células de chumbo-ácido e a um eletrolisador alcalino que opera entre 5 e 26 kW, dimensionado para fornecer energia a um prédio (biblioteca) do centro de pesquisa. Esse sistema funcionou por 10 anos sem maiores problemas.

2.7 Análise Econômica

Para melhor comparar os sistemas propostos para armazenamento de energia fotovoltaica é necessário proceder a uma avaliação econômica, principalmente porque, neste caso, as tecnologias utilizadas são muito distintas entre si.

Avaliar os resultados econômicos consiste em analisar a rentabilidade total do projeto, considerando todas as receitas e despesas ao longo de um período de análise, ou seja, seu fluxo de caixa (KAPLAN, 1983).

2.7.1 Valor Presente Líquido (VPL)

Segundo Kaplan, um dos principais critérios para análise econômica está relacionado ao cálculo do valor presente líquido do fluxo de caixa associado a cada sistema. Esse cálculo considera que o dinheiro tem um valor temporal, ou seja, não é indiferente receber ou gastar certa quantia hoje ou daqui um ano. Por outro lado há um valor de equivalência, entre certa quantia daqui um ano e certa quantia no presente.

Essa equivalência pode ser representada matematicamente a partir da relação abaixo:

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^n} \quad (31)$$

sendo, VP = valor presente

VF = valor futuro

i = taxa de desconto, ou de atualização do capital, em cada período

n = número de períodos de defasagem entre o instante P e F, em geral, em meses ou anos.

A taxa de desconto adotada usualmente no mercado é de 15%, valor que remunera satisfatoriamente o capital investido num grande número de aplicações. Neste trabalho será adotada a taxa de 10%, uma vez que os sistemas apresentados ainda se encontram em estágio de desenvolvimento.

Portanto, o valor presente líquido (VPL) relativo à soma algébrica das receitas e despesas de um fluxo de caixa, devidamente atualizadas para o momento presente por uma taxa de desconto pré-estabelecida, pode ser expresso da seguinte forma:

$$VPL = \sum_{j=1}^n (FC_j) \cdot (1+i)^{-j} \quad (32)$$

sendo FC_j o valor do fluxo de caixa em um dado período j .

O VPL é adotado como um dos critérios de decisão para a realização do projeto. Caso o VPL seja maior que zero, o investimento é viável, caso ele seja menor que zero, o investimento é tido como inviável (KAPLAN, 1983).

2.7.2 Incertezas e riscos

As decisões econômicas raramente são tomadas em condição de absoluta certeza. As incertezas na tomada de decisão resultam em risco, que está diretamente relacionado ao risco do projeto de investimento não ser viável como havia sido avaliado a priori (SAMUELSON, 2004).

Segundo KAPLAN (1983), a análise de sensibilidade é uma das abordagens possíveis para avaliar as incertezas de um empreendimento. A análise de sensibilidade é uma técnica de simulação simples, porém bastante útil. A análise é feita tomando-se como variáveis os parâmetros mais incertos, tais como as receitas projetadas, os custos dos insumos principais e a taxa de desconto. A técnica tradicional é variar o valor de um dado parâmetro em 10% ou 20% em torno do valor arbitrado para o fluxo de caixa de referência. O efeito de cada parâmetro deve ser analisado isoladamente. Calcula-se o resultado do parâmetro de decisão (VPL) e comparam-se os resultados. Os parâmetros cujas variações forem mais significativas devem ser analisados com mais atenção (SAMUELSON, 2004).

Capítulo 3

Materiais e Métodos

Neste capítulo serão descritos os sistemas fotovoltaicos envolvendo o armazenamento de energia elétrica em acumuladores eletroquímicos e na forma de hidrogênio eletrolítico para futura reconversão em energia elétrica através de células a combustível. Também será descrita a metodologia para o dimensionamento dos sistemas por meio do modelo matemático proposto, os procedimentos de operação dos sistemas e a metodologia para a análise comparativa de custos entre os dois sistemas.

3.1 Dimensionamento de sistemas com painéis fotovoltaicos

Para dimensionar sistemas envolvendo energia elétrica fornecida por painéis fotovoltaicos, inicialmente deve-se conhecer a incidência da radiação solar do local correspondente, bem como as informações referentes às características do consumo energético a ser atendido. O dimensionamento consiste no balanço entre a energia disponível e a consumida, levando em conta os rendimentos dos diferentes componentes envolvidos na transformação (CASTAÑER, 1985).

3.2 O modelo matemático para balanço de energia dos sistemas

O modelo matemático foi desenvolvido utilizando a planilha do Microsoft Excel; nele foram introduzidas as principais características associadas aos sistemas. Para os dados de entrada foi considerada a radiação solar horária e o perfil da demanda contendo o consumo horário de cada

aplicação. É introduzida também a eficiência dos equipamentos e processos bem como os limites mínimos e máximos de funcionamento para todos os equipamentos. Toda a lógica de controle foi inserida na planilha considerando que a energia final de um dia é igual à energia inicial do próximo dia. Como dados de saída, são fornecidas as quantidades de energia utilizada, armazenada e desperdiçada ao longo das 24 horas pelos equipamentos dos sistemas.

Para uma adequada simulação da operação de todo o sistema foram definidos alguns intervalos de tempo que auxiliaram a simplificar o modelo experimental e a realizar o balanço de energia. Os intervalos de tempo de interesse e as condições operacionais relacionadas são as seguintes:

1. 1 h: é a unidade de tempo fundamental do modelo, período no qual a energia fornecida pelos painéis e a energia consumida são consideradas constantes, embora esses valores variem ao longo do período de 24 h.
2. 24 h: período que corresponde a um ciclo diário completo dos sistemas. Por definição os ciclos se iniciam sempre às 00h00.
3. 5 dias: é o período constituído por 5 ciclos de 24 horas, onde se pode verificar o balanço de energia. Por definição os sistemas de armazenamento, banco de baterias ou tanque de hidrogênio encontram-se plenamente carregados no início do 1º dia.

3.3 Descrição dos Sistemas Fotovoltaicos

Por se tratar de sistemas que envolvem a energia fotovoltaica, inicialmente serão descritos alguns dos arranjos mais interessantes para fornecimento de energia elétrica por meio dessa tecnologia. Os principais componentes de um sistema fotovoltaico são os painéis fotovoltaicos, responsáveis pela conversão direta da radiação solar em eletricidade, na forma de corrente contínua. Dependendo do tipo de aplicação, outros componentes precisam ser agregados em conjunto com os sistemas fotovoltaicos para os processos de armazenamento, regulação e controle da energia elétrica. A Figura 3.1 apresenta os arranjos mais encontrados em sistemas fotovoltaicos.

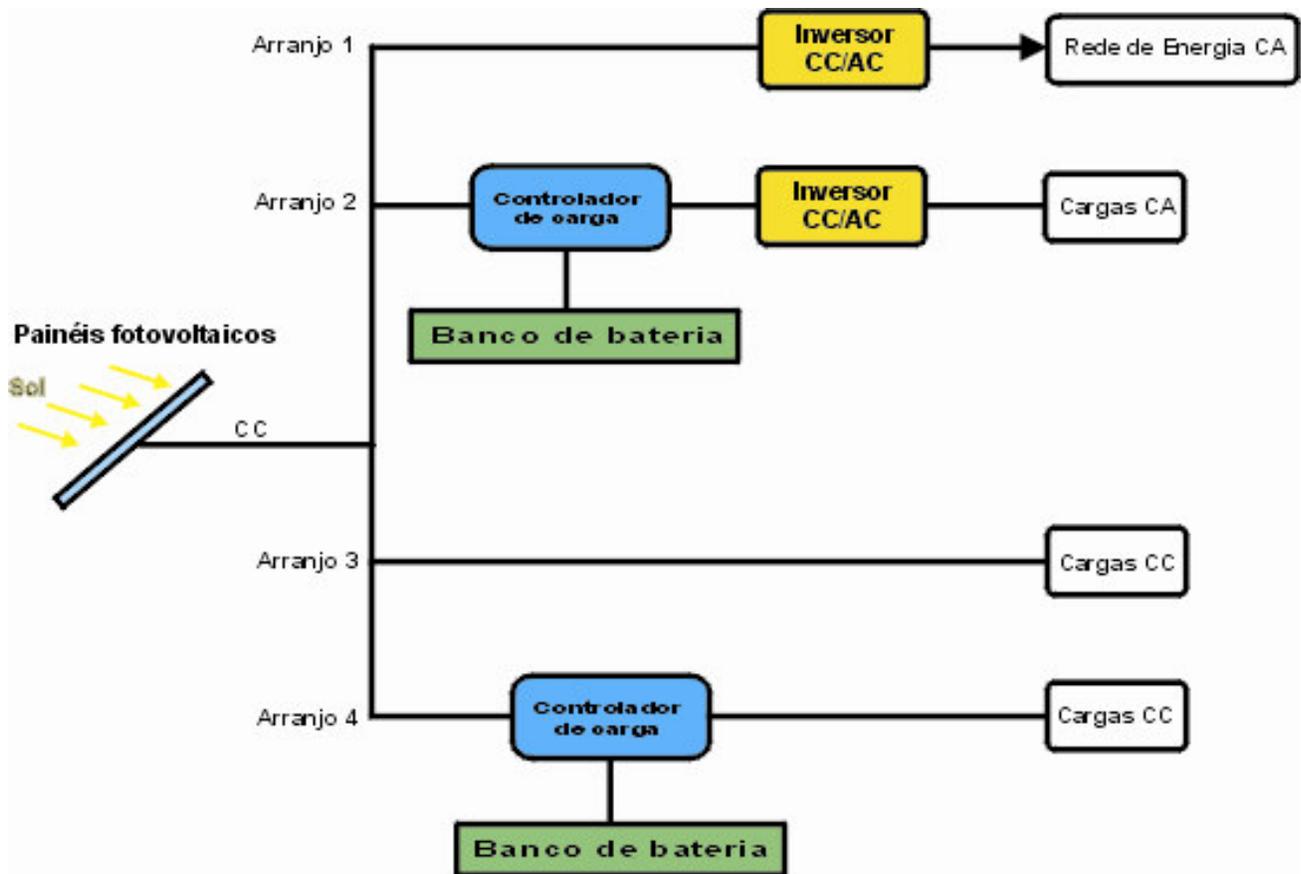


Figura 3.1 - Diferentes arranjos para aproveitamento fotovoltaico. Legenda: CC: corrente contínua, CA: corrente alternada.

No Arranjo 1, os painéis fornecem energia elétrica através de um inversor que converte a corrente contínua (CC) oriunda dos painéis em corrente alternada (CA), na tensão e frequência da rede local, não sendo utilizado um sistema de armazenamento.

Os Arranjos 2, 3 e 4 constituem um sistema fotovoltaico para geração isolada de eletricidade (*stand alone system*), ou seja, um sistema desconectado da rede de distribuição. A energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos pode ser armazenada ou utilizada diretamente, geralmente, em cargas de corrente alternada tais como televisores, lâmpadas, refrigeradores, etc.

Em outra aplicação comum, o Arranjo 3 utiliza o sistema fotovoltaico para o bombeamento de água. Neste caso, os painéis são conectados diretamente a um motor de corrente contínua cujo

acionamento está associado à demanda instantânea de água ou ao nível de reservatórios para suprimento de água.

O Arranjo 4 é similar ao Arranjo 2, para geração isolada de eletricidade, alimentando cargas em corrente contínua ao invés de corrente alternada.

Dentre os arranjos descritos, o Arranjo 2 é o que apresenta as características que satisfazem as necessidades das comunidades, pois possui um banco de bateria capaz de armazenar e fornecer energia elétrica em corrente alternada, nos períodos sem insolação, padrão dos eletrodomésticos utilizados nas comunidades. Desta forma, comparar o armazenamento de energia, por meio de baterias ou hidrogênio, nestes sistemas é um dos objetivos desta dissertação.

3.4 Sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em baterias

A Figura 3.2 apresenta o arranjo do sistema completo a ser analisado, composto pelos seguintes equipamentos:

- Painéis fotovoltaicos
- Controlador de carga
- Bateria
- Inversor de frequência

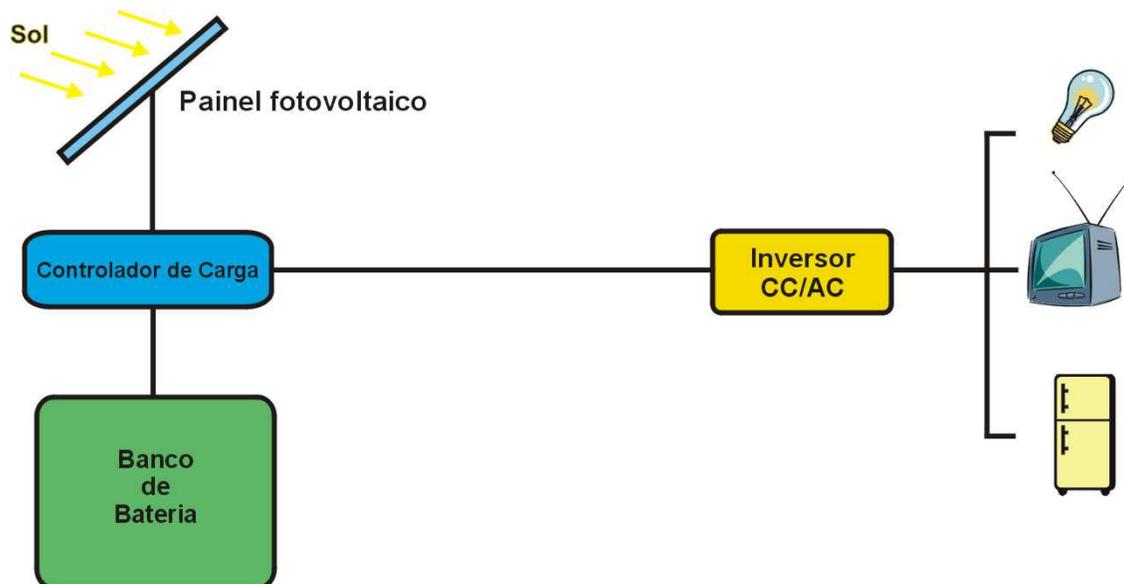


Figura 3.2- Arranjo do sistema fotovoltaico com armazenamento em bateria.

Sistema de armazenamento: Baterias

A função mais importante das baterias é armazenar energia para alimentar as cargas quando os painéis não são capazes de produzir energia suficiente, ou seja, durante as noites e dias nublados.

Denomina-se autonomia ao número de dias que o sistema pode alimentar as cargas sem receber energia dos painéis solares por falta de luz solar. A autonomia normalmente definida para aplicações não críticas (residenciais) são de 3 a 5 dias e aplicações críticas (telecomunicações) de 7 a 10 dias (ROBERTS, 1991). O valor típico do número de dias sem insolação para a Região Amazônica, que está entre as latitudes 0° e 30° , é de 5 dias, e esta será a autonomia adotada neste trabalho.

As baterias podem também estabilizar as flutuações de corrente produzidas pelos painéis fotovoltaicos, garantindo uma faixa de corrente mais adequada para a operação dos componentes do sistema a serem alimentados.

Controlador de carga

É utilizado para controlar as operações de carga ou descarga do banco de baterias, evitando que as baterias sejam sobrecarregadas ou descarregadas excessivamente. Considerando que a bateria é um elemento crítico na instalação, responsável pela maior parte dos custos de manutenção de um sistema fotovoltaico, o controlador de carga desempenha uma função muito importante no sistema.

Conforme apresentado na Figura 3.2, o controlador de carga recebe a energia gerada pelos painéis fotovoltaicos e gerencia a transferência de energia entre o banco de baterias e o inversor de corrente que faz a conexão à carga (ROBERTS, 1991). O monitoramento da tensão do banco de bateria indica o estado de carga das baterias. Se o consumo total de energia pelas cargas é inferior à energia produzida pelos painéis, por exemplo, em dias ensolarados e consumo dentro do planejado, o banco de baterias vai armazenando a energia excedente até alcançar plena carga. Na prática, esse estado é alcançado quando as baterias atingem um determinado valor de tensão. Nesse caso, o controlador deve desconectar os painéis fotovoltaicos do banco de baterias a fim de evitar que as baterias fiquem submetidas a tensões cada vez mais elevadas, o que geraria correntes parasitas internas, elevaria a temperatura do eletrólito, danificando as baterias e reduzindo sua vida útil e eficiência.

Quando ocorre uma sucessão de dias nublados, ou caso haja um aumento de consumo em dias subsequentes, as baterias vão se descarregando, até atingirem um valor mínimo de carga pré-estabelecido. A partir daí o controlador impede que as baterias atinjam valores ainda inferiores, desconectando as cargas do sistema. Assim que as baterias retornam ao valor de tensão nominal, o controlador reconecta as cargas no sistema. Como exemplo, para sistemas fotovoltaicos isolados operando com baterias de chumbo-ácido, que contam com controladores com ajuste de mínima e máxima tensão das baterias, são recomendados os seguintes valores de tensão (DINIZ, 1999):

- tensão máxima de carregamento por bateria: $(14,2 \pm 0,2)$ V
- tensão de reinício de carregamento por bateria: $(13,2 \pm 0,2)$ V
- tensão de desconexão das cargas: $(11,3 \pm 0,2)$ V
- tensão de reconexão das cargas: $(12,5 \pm 0,2)$ V

A Figura 3.3 apresenta o fluxograma do funcionamento do sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias.

Legenda:

- PF** = Energia elétrica fornecida pelos painéis fotovoltaicos
- D** = Demanda de energia
- C_{max}** = Carga máxima da bateria
- C_{min}** = Carga mínima da bateria
- C_{bat}** = Carga da bateria
- Bat ON** = Bateria começa a fornecer energia elétrica
- Bat OFF** = Bateria não está fornecendo energia elétrica
- Bat Carr.** = bateria sendo carregada

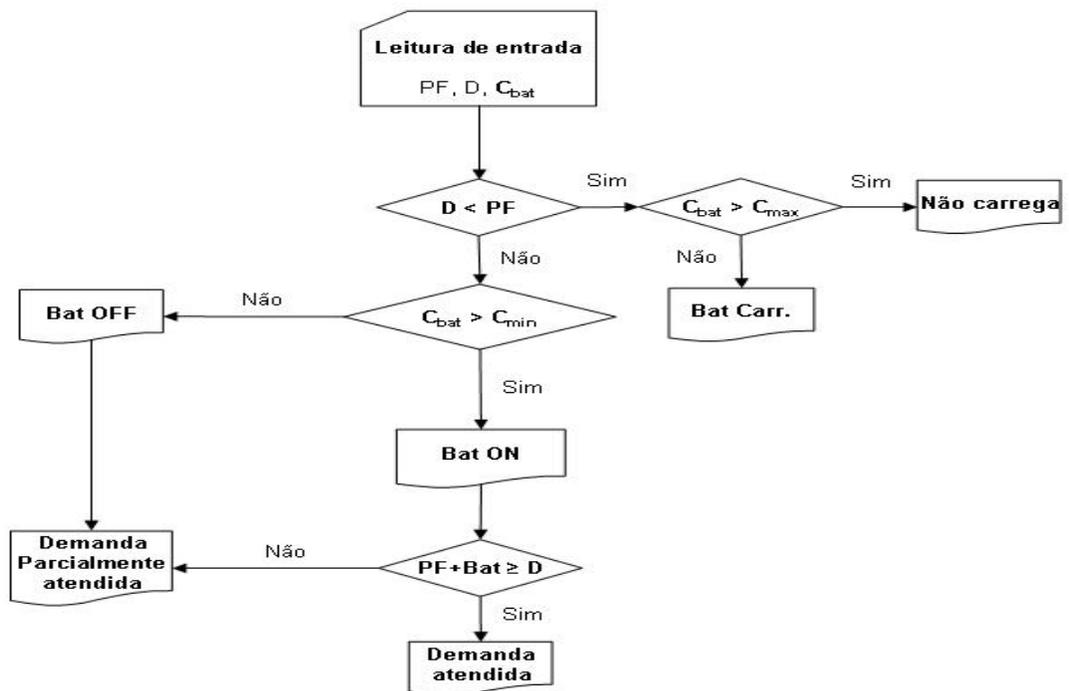


Figura 3.3 - Fluxograma de funcionamento do sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias. (Fonte: Elaboração própria)

Inversor de frequência

Dispositivo eletrônico responsável pela transformação da corrente contínua em alternada. Normalmente trabalham em tensões contínuas padrão de entrada (12, 24, 48 ou 120 VCC) ou faixas de tensões admissíveis, convertendo esta energia para o padrão alternado, 127 ou 220 VAC, na

freqüência de 50 ou 60 Hz, com ou sem sincronização da freqüência de geração com a freqüência da rede local de baixa tensão.

A escolha do inversor depende das características das cargas a serem alimentadas. Para sistemas fotovoltaicos com alta exigência na qualidade da energia gerada são utilizados inversores com saída senoidal, cuja forma de onda é similar à fornecida pelas concessionárias de energia, com eficiências da ordem de 95% e distorções inferiores a 5% (SMA AMÉRICA Inc., 2007). Para sistemas com menor exigência, a onda de saída poderá ter o formato trapezoidal ou mesmo quadrado, sendo os custos destes equipamentos diretamente proporcionais à qualidade da tensão fornecida.

3.5 Sistema fotovoltaico com armazenamento de energia na forma de hidrogênio pressurizado

A Figura 3.4 apresenta um diagrama esquemático do sistema fotovoltaico com armazenamento de energia na forma de hidrogênio pressurizado, composto principalmente pelos seguintes equipamentos:

- Painel fotovoltaico;
- Sistema de controle de potência;
- Eletrolisador;
- Reservatório de hidrogênio;
- Célula a combustível;
- Inversor de freqüência.

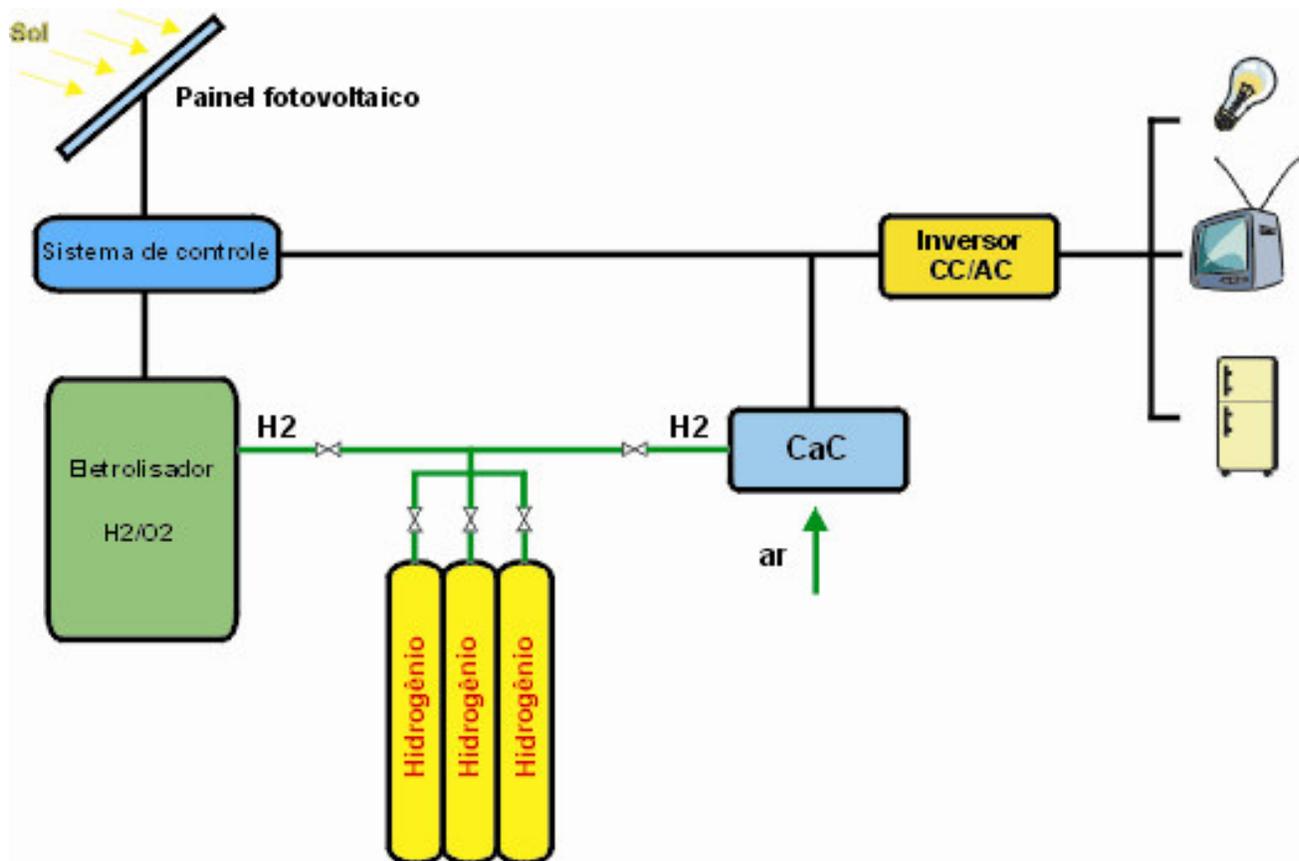


Figura 3.4 - Diagrama esquemático do sistema fotovoltaico com armazenamento de energia na forma de hidrogênio pressurizado e geração de energia elétrica por meio de célula a combustível.

Sistema para produção de hidrogênio: Eletrolisador

O sistema para produção de hidrogênio eletrolítico adotado como referência é um eletrolisador bipolar alcalino da empresa italiana *Piel* (Figura 3.5), o qual apresenta as características necessárias para a análise técnica e econômica proposta pelo modelo a ser simulado.

O sistema de eletrólise é composto por um módulo bipolar com 80 células justapostas preenchidas por uma solução aquosa de hidróxido de potássio (KOH; 28%g/g), o qual está acompanhado por dois estágios independentes de secagem dos gases. A Figura 3.6 mostra o sistema de secagem do hidrogênio (a) e de remoção de oxigênio (b).



Figura 3.5 - Eletrolisador bipolar alcalino da empresa italiana *Piel*. (Fonte: LH2/UNICAMP)

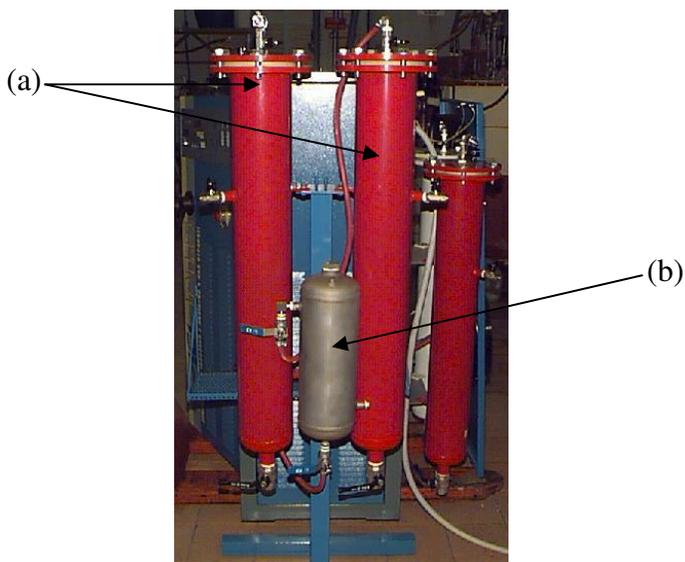


Figura 3.6 - Sistema de secagem e remoção de oxigênio. Legenda: a) sistemas de secagem do hidrogênio; b) sistema de remoção de oxigênio. (Fonte: LH2/UNICAMP)

Esta composição opera autonomamente através do controle de pressão do reservatório, conectado diretamente ao eletrolisador, o qual recebe hidrogênio com pureza de 99,999%mol/mol. Todavia, este sistema possui um módulo interno de controle de potência, uma vez que foi projetado para operar junto à rede de baixa tensão.

O eletrolisador tem capacidade de geração de até 1 m³/h de H₂, pressão máxima de operação de 10 bar (1,0 MPa) e temperatura de operação programável dentro do intervalo de 30 a 60°C.

Sistema de armazenamento de hidrogênio: Cilindros pressurizados

Para o armazenamento de gases em geral, os vasos de pressão ou reservatórios devem estar de acordo com as normas de segurança NR-13, da ABNT, e possuir certificado constando que o equipamento foi submetido e aprovado no teste hidrostático, sem vazamentos ou anomalias.

Célula a combustível

A célula a combustível adotada como referência para a reconversão do hidrogênio em energia elétrica é da empresa americana *PlugPower* (Figura 3.7), a qual apresenta as características necessárias para a análise técnica e econômica proposta pelo modelo teórico a ser simulado. Este modelo foi escolhido por que o LH2 dispõe de vários equipamentos desse tipo e conhece os parâmetros de operação, tais como o consumo de hidrogênio e energia elétrica produzida. A célula fornece 3 kW como máxima potência de saída, possui uma faixa de tensão ajustável de 24,9 a 27,5 VDC, utiliza hidrogênio como combustível com um grau de pureza 99,95%mol/mol operando a uma pressão de 2 bar (0,2 MPa), apresentando um consumo de hidrogênio de 0,75 m³/kWh, podendo trabalhar na faixa de temperatura de -40 a 50°C (PlugPower, 2007).

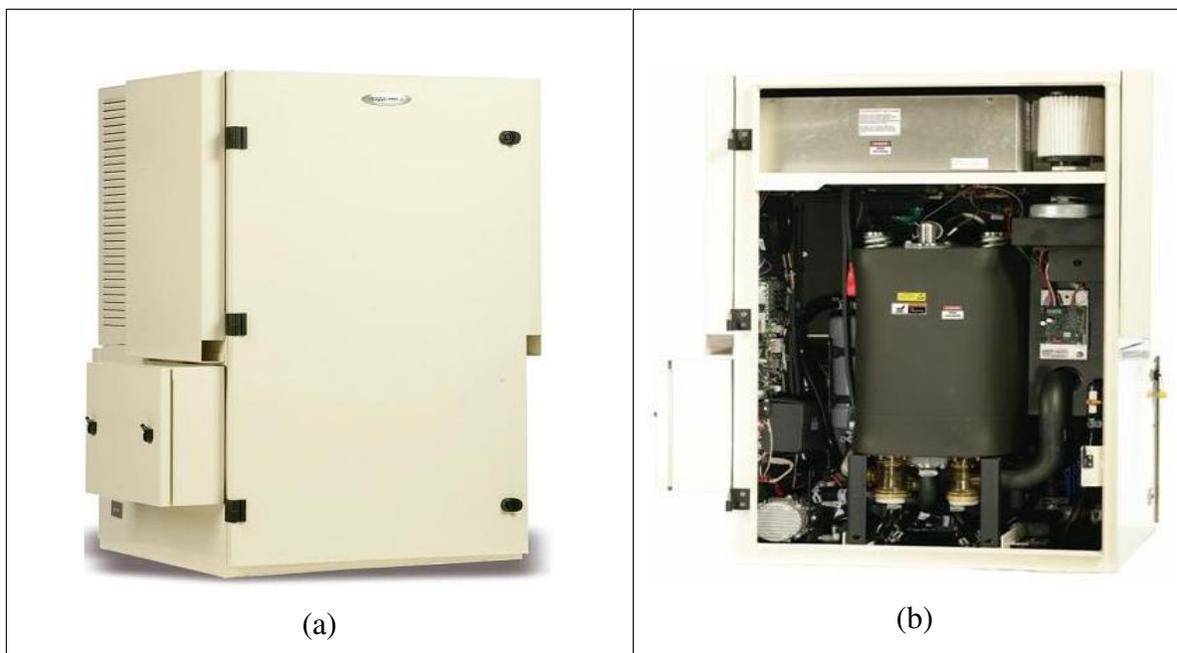


Figura 3.7 - Célula a combustível, (a) vista frontal e (b) vista interna. (Fonte: LH2/UNICAMP)

Sistema eletrônico de controle

O dispositivo eletrônico responsável pelo controle do eletrolisador, reservatório e célula a combustível é um Controlador Lógico Programável (CLP). Nele é introduzida, através de seu microprocessador, toda a lógica de controle e operação a ser realizada pelo sistema. A estratégia definida como padrão para este trabalho é baseada nos trabalhos de Ulleberg, (2004) e Glöckner et al., (2002), descrito na seção 2.6.1.

A estratégia introduzida no CLP seguirá três modos de operação:

1. Durante os períodos onde o recurso solar não está disponível, ou seja, os painéis fotovoltaicos não estão fornecendo energia elétrica, a demanda de carga deverá ser suprida apenas pela célula a combustível.

2. Durante os períodos onde os painéis fotovoltaicos estão fornecendo energia elétrica, mas ela não é suficiente para suprir a demanda de carga, o complemento dessa energia é fornecido pela célula a combustível.
3. Durante os períodos onde a energia elétrica produzida pelos painéis excede a demanda de carga, o excedente é encaminhado ao eletrolisador para a produção de hidrogênio.

O CLP também é responsável pela operação dos equipamentos dentro das condições especificadas pelo fabricante, conforme descrito a seguir.

4. O eletrolisador inicia seu funcionamento quando a energia elétrica disponível para sua operação for maior que a energia mínima requerida;
5. O eletrolisador tem seu funcionamento interrompido quando a condição anterior não for atendida ou quando o reservatório de hidrogênio atingir sua pressão máxima.
6. Para iniciar seu funcionamento a célula a combustível necessita que a pressão no reservatório de hidrogênio seja maior do que a pressão de operação mínima exigida por ela;
7. A célula a combustível tem seu funcionamento interrompido quando a condição anterior não for atendida ou a partir do instante em que a energia elétrica produzida pelos painéis fotovoltaicos supere a demanda de carga.

A partir dessas informações, o CLP executa toda a rotina de funcionamento do sistema, que pode ser visualizada no fluxograma da Figura 3.8.

Legenda:

PF = Energia elétrica fornecida pelos painéis fotovoltaicos

D = Demanda de energia

$E_{min,ELT}$ = Energia elétrica mínima para iniciar o funcionamento do eletrolisador

ELT ON = Eletrolisador inicia seu funcionamento

ELT OFF = Eletrolisador encerra seu funcionamento

P_{mr} = Pressão máxima do reservatório

P_r = Pressão do reservatório

P_{CaC} = Pressão de operação da célula a combustível

CaC = Célula a combustível

CaC ON = Célula a combustível inicia seu funcionamento

CaC OFF = Célula a combustível encerra seu funcionamento

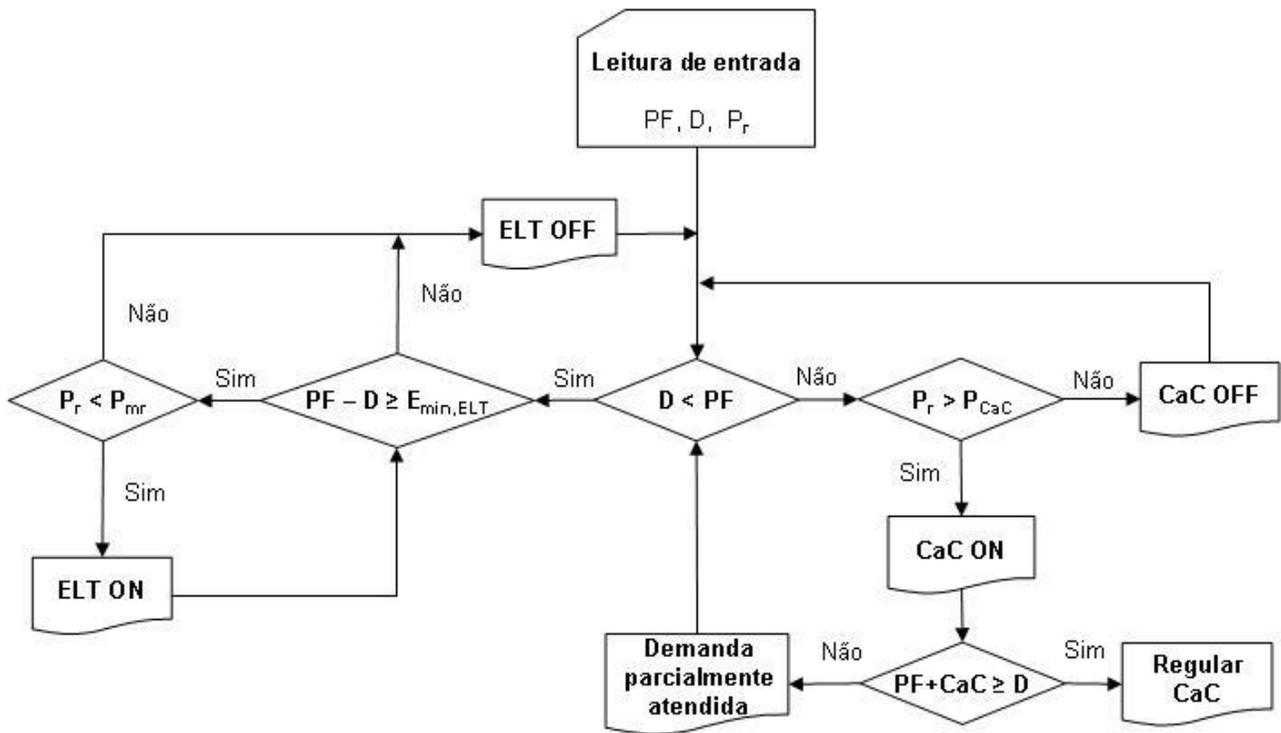


Figura 3.8 - Fluxograma da rotina de funcionamento do sistema introduzida no CLP.

3.5.1 Dados da radiação solar incidente

Como a análise a ser realizada levará em conta o perfil de demanda de carga ao longo de 24 h, também será necessário conhecer a radiação solar média horária ao longo do dia. Em geral, para

dimensionamento dos sistemas fotovoltaicos são utilizados os valores mínimos de radiação solar incidente.

Comparando a média mensal dos valores mínimos da radiação solar incidente das cidades de Benjamim Constante, Carauari, Tefé, Coari, Codajás, Fonte Boa e Itacoatiara, pertencentes à Região Amazônica, observou-se que os valores apresentaram um desvio médio de apenas 6,5%. Assim sendo, para os propósitos deste trabalho, pode-se considerar que a radiação solar incidente diária é constante e igual à média mensal de $(4,75 \pm 0,29)$ kWh/m². Logo, a partir dos dados fornecidos pelo Atlas Solarimétrico do Brasil e das equações (1), (3) e (4) é possível determinar os valores médios horários ao longo do dia da radiação solar incidente nas superfícies dos painéis fotovoltaicos, conforme valores expressos na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Valores médios horários da radiação solar ao longo de dia típico na região de interesse.

| Tempo (h) | Radiação Média (kWh/m²) |
|-----------------------|---|
| 06h00 as 07h00 | 0,079 |
| 07h00 as 08h00 | 0,234 |
| 08h00 as 09h00 | 0,373 |
| 09h00 as 10h00 | 0,487 |
| 10h00 as 11h00 | 0,567 |
| 11h00 as 12h00 | 0,608 |
| 12h00 as 13h00 | 0,608 |
| 13h00 as 14h00 | 0,567 |
| 14h00 as 15h00 | 0,487 |
| 15h00 as 16h00 | 0,373 |
| 16h00 as 17h00 | 0,234 |
| 17h00 as 18h00 | 0,079 |
| 18h00 as 19h00 | 0,057 |
| Total | 4,753 |

3.5.2 Perfil da demanda

O perfil de demanda de energia adotado para esse estudo é o da comunidade rural de Vila Campinas, que está localizada às margens do rio Manacapuru, próximo ao Paraná do Anamã, a aproximadamente 53 km da sede de seu município, Manacapuru, distante 80 km de Manaus, capital do Estado. O acesso à Vila só é possível por via fluvial. Possui uma área de aproximadamente

1.500 km², clima quente e úmido, e temperatura média de 30°C. A população fixa da Vila é de 1.010 habitantes, distribuídos em 124 domicílios, dos quais 75% eram atendidos com energia elétrica, e estavam concentradas nas proximidades da rua principal da vila (CARTAXO, 2002).

As comunidades isoladas da Região Amazônica dispõem de uma oferta de energia elétrica bem abaixo dos padrões encontrados nos centros urbanos. A demanda de energia elétrica está relacionada basicamente a eletrodomésticos, equipamentos para centros comunitários, postos de saúde e escolas.

Com base no estudo realizado por CARTAXO, (2002) envolvendo essa comunidade, é proposto um único sistema que atenda a uma escola (um televisor e cinco lâmpadas), um centro comunitário (um televisor, cinco lâmpadas e dois refrigeradores), um posto de saúde (três lâmpadas e um refrigerador) e três casas (três televisores, doze lâmpadas e dois refrigeradores) e mais uma carga adicional equivalente a 5 lâmpadas, totalizando um consumo de energia elétrica de 10,4 kWh/dia. A Tabela 3.2 apresenta a distribuição da energia consumida por aplicação, segundo o manual do Programa Anual de Combate ao Desperdício de Energia Elétrica (CASSOLINI, 2000).

Tabela 3.2 - Distribuição do consumo de energia elétrica por aplicação.

| Aplicação | Quantidade | Potência (kW) | Uso (h/dia) | Energia (kWh/dia) |
|------------------------|-------------------|----------------------|--------------------|--------------------------|
| Televisor | 5 | 0,05 | 4 | 1,0 |
| Refrigerador | 5 | 0,10 | 12 | 6,0 |
| Lâmpada | 25 | 0,02 | 6 | 3,0 |
| Outros | 5 | 0,02 | 4 | 0,4 |
| Total (kWh/dia) | | | | 10,4 |

A Figura 3.9 exibe o gráfico com um perfil de carga típico ao longo do dia.

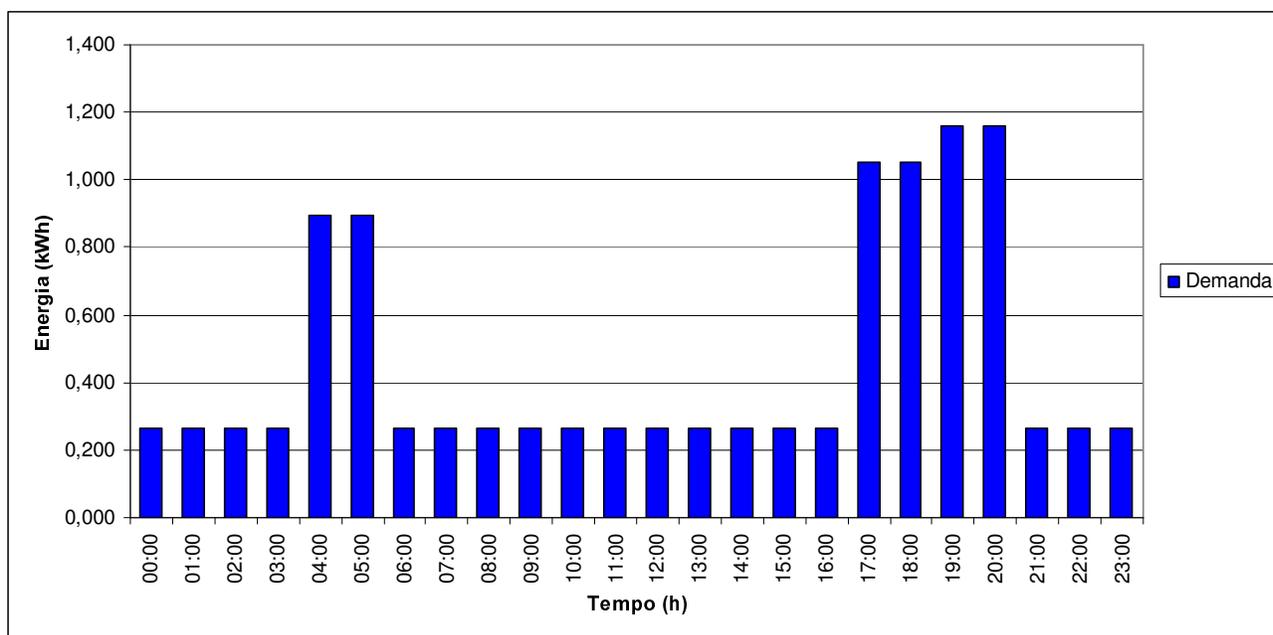


Figura 3.9 - Perfil típico da demanda ao longo do dia. Fonte: (Adaptado de CARTAXO, 2002)

3.5.3 Sistema fotovoltaico com armazenamento de energia em acumuladores eletroquímicos (bateria)

Uma vez conhecida a quantidade de radiação incidente e o perfil de consumo característico das comunidades estudadas pertencentes à Região Amazônica, os valores foram aplicados a planilha eletrônica, considerando as perdas de energia elétrica por meio da eficiência determinada pelos seus equipamentos, Figura 3.10.

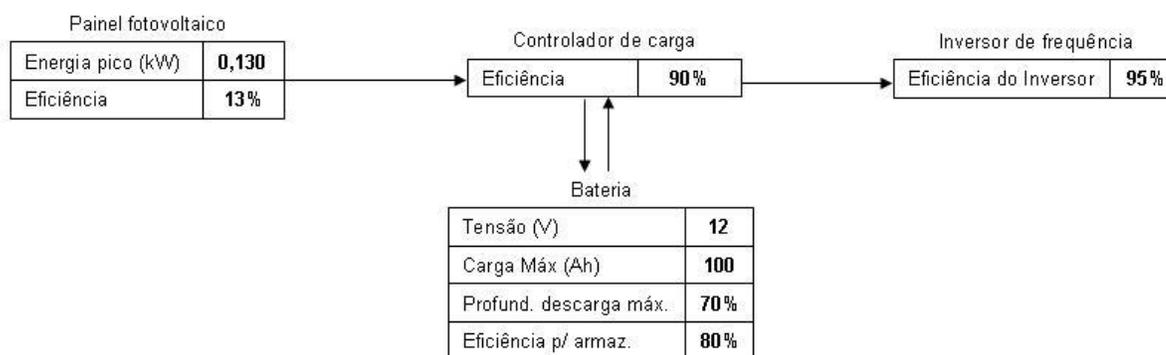


Figura 3.10 - Diagrama parcial do modelo matemático em planilha do Microsoft Excel proposto para o sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias.

Banco de Baterias

A quantidade de baterias deve ser capaz de fornecer energia elétrica suficiente para suprir a demanda de carga e garantir a autonomia do sistema nos dias sem energia solar. A planilha eletrônica possibilita, considerando a carga total máxima que a bateria pode fornecer, sua tensão e a sua máxima profundidade de descarga, variar o número de baterias até que se encontre a quantidade mínima suficiente para que o consumo ao longo desses dias seja suprido.

Painéis fotovoltaicos

O número de painéis é obtido através de suas características e do consumo previsto. Como é suposto um determinado padrão de consumo diariamente, após o início de fornecimento o sistema deverá se tornar estável. Após algumas simulações com a planilha, verificou-se que a estabilidade é alcançada quando no 2º dia de operação⁵ o número de painéis fotovoltaicos é suficiente para que a quantidade de energia armazenada no banco de bateria ao final das 24 horas seja igual ou ligeiramente superior à energia armazenada no início do dia. Quando isso acontece, é encontrado o número mínimo de painéis fotovoltaicos que o sistema necessita, conforme pode ser visualizado na Tabela 3.3.

⁵ Por convenção, no primeiro dia, as baterias iniciam o ciclo operacional com carga máxima.

Tabela 3.3 - Diagrama parcial da planilha de cálculo para o segundo dia de operação do sistema com baterias.

| | |
|--------------------|-----------|
| Número de painéis | 24 |
| Número de baterias | 66 |

| Dia_2 | Painel FV (kWh/m ²) | Controlador Carga (kWh) | Bateria Inicial (kWh) | Contr. Carga + Bateria (kWh) | Demanda Carga, por hora c/inversor (kWh) | Bateria Final (kWh) | Energia desperdiçada (kWh) |
|-------|---------------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|--|---------------------|----------------------------|
| 00:00 | 0,000 | 0,000 | 50,349 | 50,349 | -0,263 | 50,085 | 0,000 |
| 01:00 | 0,000 | 0,000 | 50,085 | 50,085 | -0,263 | 49,822 | 0,000 |
| 02:00 | 0,000 | 0,000 | 49,822 | 49,822 | -0,263 | 49,559 | 0,000 |
| 03:00 | 0,000 | 0,000 | 49,559 | 49,559 | -0,263 | 49,296 | 0,000 |
| 04:00 | 0,000 | 0,000 | 49,296 | 49,296 | -0,895 | 48,401 | 0,000 |
| 05:00 | 0,248 | 0,223 | 48,401 | 48,624 | -0,895 | 47,730 | 0,000 |
| 06:00 | 0,731 | 0,658 | 47,730 | 48,387 | -0,263 | 48,045 | 0,000 |
| 07:00 | 1,164 | 1,048 | 48,045 | 49,093 | -0,263 | 48,673 | 0,000 |
| 08:00 | 1,518 | 1,366 | 48,673 | 50,039 | -0,263 | 49,556 | 0,000 |
| 09:00 | 1,768 | 1,591 | 49,556 | 51,147 | -0,263 | 50,618 | 0,000 |
| 10:00 | 1,898 | 1,708 | 50,618 | 52,326 | -0,263 | 51,774 | 0,000 |
| 11:00 | 1,898 | 1,708 | 51,774 | 53,482 | -0,263 | 52,930 | 0,000 |
| 12:00 | 1,768 | 1,591 | 52,930 | 54,521 | -0,263 | 53,992 | 0,000 |
| 13:00 | 1,518 | 1,366 | 53,992 | 55,358 | -0,263 | 54,875 | 0,000 |
| 14:00 | 1,164 | 1,048 | 54,875 | 55,923 | -0,263 | 55,440 | 0,062 |
| 15:00 | 0,731 | 0,658 | 55,440 | 56,098 | -0,263 | 55,440 | 0,316 |
| 16:00 | 0,248 | 0,223 | 55,440 | 55,663 | -0,263 | 55,400 | 0,000 |
| 17:00 | 0,177 | 0,159 | 55,400 | 55,559 | -1,053 | 54,507 | 0,000 |
| 18:00 | 0,000 | 0,000 | 54,507 | 54,507 | -1,053 | 53,454 | 0,000 |
| 19:00 | 0,000 | 0,000 | 53,454 | 53,454 | -1,158 | 52,296 | 0,000 |
| 20:00 | 0,000 | 0,000 | 52,296 | 52,296 | -1,158 | 51,138 | 0,000 |
| 21:00 | 0,000 | 0,000 | 51,138 | 51,138 | -0,263 | 50,875 | 0,000 |
| 22:00 | 0,000 | 0,000 | 50,875 | 50,875 | -0,263 | 50,612 | 0,000 |
| 23:00 | 0,000 | 0,000 | 50,612 | 50,612 | -0,263 | 50,349 | 0,000 |

A planilha completa com todos os dados pode ser consultada no anexo I, pg. 99.

Controlador de carga

Para o dimensionamento do controlador de carga deve-se verificar a corrente máxima das aplicações. Para o perfil de consumo proposto essa corrente é de 30 A.

Inversor de frequência

O dimensionamento do inversor de frequência é feito com base no consumo máximo de energia ao longo do dia. Observando a Tabela 3.3 encontra-se o valor de 1,158 kW, portanto se necessita de um inversor que trabalhe nessa faixa de potência.

Os parâmetros e valores típicos utilizados neste sistema são apresentados na tabela abaixo.

Tabela 3.4 - Características dos equipamentos utilizados no sistema com baterias.

| Bateria | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| Modelo | Moura 12MC100 |
| Tensão (V) | 12 |
| Carga Max. (Ah) | 100 |
| Eficiência p/ armazenamento | 80% |
| Autonomia (dias) | 5 |
| Profundidade Descarga máx. | 70% |
| Energia max. disponível (kWh) | 55,4 |
| Painéis Fotovoltaicos | |
| Modelo | Kyocera KC130 |
| Tecnologia | Silício policristalino |
| Área (m ²) | 0,93 |
| Potência pico (W) | 130 |
| Tensão de máxima potência (V) | 17,6 |
| Corrente de máxima potência (A) | 7,39 |
| Eficiência | 13% |
| Controlador de Carga | |
| Modelo | Xantrex |
| Corrente máxima (A) | 30 |
| Eficiência | 90% |
| Inversor de Frequência | |
| Modelo | Xantrex |
| Potência (W) | 2.000 |
| Eficiência | 95% |

3.5.4 Sistema fotovoltaico com armazenamento de energia na forma de hidrogênio pressurizado

Para este sistema também foi utilizada a planilha eletrônica, considerando desta vez as perdas de energia elétrica relacionadas à eficiência dos equipamentos, conforme apresentada na Figura 3.11.

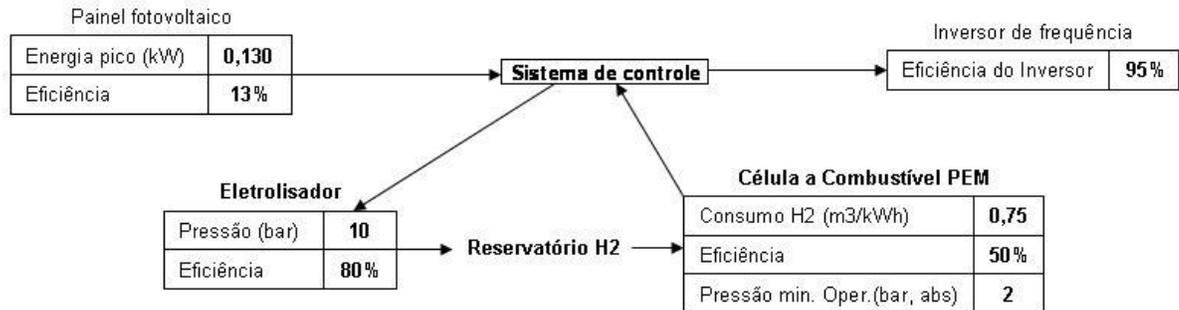


Figura 3.11 - Diagrama parcial da planilha eletrônica do modelo matemático proposto para o sistema fotovoltaico com armazenamento na forma de hidrogênio pressurizado.

Reservatório de Hidrogênio

A quantidade de hidrogênio no reservatório deve garantir uma autonomia de 5 dias. Para simular os dias sem insolação, adota-se o valor zero para a quantidade de radiação incidente ao longo do dia. O próximo passo é alterar as variáveis, pressão e volume do reservatório, até que a quantidade de hidrogênio seja suficiente para manter o sistema operante durante os dias de autonomia especificada. A atenção a ser tomada é em relação à escolha da pressão, pois ela não deverá ser menor que a pressão de funcionamento da célula a combustível (2 bar) nem maior que a pressão determinada pelo eletrolisador, já que o sistema não contará com um compressor para que se possa atingir maiores pressões. Feitas essas considerações encontrou-se um reservatório com um volume físico de 5 m³ e pressão máxima de 10 bar (10×10⁵ Pa).

Painéis fotovoltaicos

O número de painéis é determinado após algumas simulações com a planilha, a partir do momento em que é verificada a estabilidade do sistema em relação à quantidade de hidrogênio contido no reservatório. Esta estabilidade ocorre no instante em que o volume de gás no início do dia

for igual ao volume de gás contido no reservatório ao final do mesmo dia, observada na Tabela 3.5 (elipses vermelhas). Essa estabilidade fornece o número mínimo de painéis fotovoltaicos necessários e garante a autonomia do sistema.

Tabela 3.5 - Diagrama parcial da planilha de cálculo para o segundo dia de operação do sistema a hidrogênio.

| | |
|-------------------|-----------|
| Número de painéis | 58 |
|-------------------|-----------|

| Dia_2 | Painel FV Total (kWh) | Energia disponível ao eletrolisador (kWh) | Energia utilizada pelo eletrolisador (kWh) | H ₂ possível de produzir (m ³) | H ₂ no reservatório (m ³) | Energia desperdiçada (kWh) |
|-------|-----------------------|---|--|---|--|----------------------------|
| 00:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,610 | 0,000 |
| 01:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,413 | 0,000 |
| 02:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,216 | 0,000 |
| 03:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,018 | 0,000 |
| 04:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 45,821 | 0,000 |
| 05:00 | 0,599 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 45,150 | 0,000 |
| 06:00 | 1,767 | 1,503 | 1,503 | 0,247 | 45,174 | 0,000 |
| 07:00 | 2,814 | 2,550 | 2,550 | 0,418 | 45,593 | 0,000 |
| 08:00 | 3,669 | 3,405 | 3,405 | 0,558 | 46,151 | 0,000 |
| 09:00 | 4,273 | 4,010 | 4,010 | 0,658 | 46,809 | 0,000 |
| 10:00 | 4,586 | 4,323 | 4,323 | 0,709 | 47,518 | 0,000 |
| 11:00 | 4,586 | 4,323 | 4,323 | 0,709 | 48,227 | 0,000 |
| 12:00 | 4,273 | 4,010 | 4,010 | 0,658 | 48,884 | 0,000 |
| 13:00 | 3,669 | 3,405 | 3,405 | 0,558 | 49,443 | 0,000 |
| 14:00 | 2,814 | 2,550 | 2,550 | 0,418 | 49,861 | 0,000 |
| 15:00 | 1,767 | 1,503 | 0,847 | 0,247 | 50,000 | 0,657 |
| 16:00 | 0,599 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 50,000 | 0,336 |
| 17:00 | 0,428 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 50,000 | 0,000 |
| 18:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 49,531 | 0,000 |
| 19:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 48,742 | 0,000 |
| 20:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 47,874 | 0,000 |
| 21:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 47,005 | 0,000 |
| 22:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,808 | 0,000 |
| 23:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,610 | 0,000 |

A planilha completa com todos os dados pode ser consultada no anexo II, pg. 100.

Sistema para produção de hidrogênio: eletrolisador

A quantidade de energia disponível para o eletrolisador é uma das características relevantes para escolha do eletrolisador ideal, pois irá influenciar a sua faixa de operação. Para este sistema a energia disponível é proveniente do excedente de energia fornecida pelos painéis fotovoltaicos, após o suprimento da carga demandada. Portanto, a escolha deve levar em conta esse valor.

Através da planilha verifica-se a demanda de hidrogênio ao longo do dia, outra característica importante. A faixa de pressão deve ser selecionada de acordo com as necessidades do sistema. Como neste sistema não será utilizado compressor, é interessante utilizar um eletrolisador que forneça o gás a uma pressão superior a atmosférica. Com base nos equipamentos comerciais que se tem conhecimento, um valor considerado razoável, neste caso, é 10 bar. Pressões menores implicarão em reservatórios maiores. Caso fosse utilizado um compressor, o eletrolisador poderia operar e fornecer o gás à pressão atmosférica, mas, como desvantagem, haveria um maior consumo de energia para a compressão e mais um componente no sistema que necessitaria de manutenção. A Tabela 3.6 resume as características do eletrolisador.

Célula a Combustível e Inversor de frequência

A célula a combustível será utilizada sempre que necessário para complementar o fornecimento de energia dos painéis fotovoltaicos ou, na falta total de luz solar, para suprir toda a demanda energética do sistema. Por esse motivo, a sua potência deverá ser equivalente ao pico de consumo ao longo de 24 h, o que poderá ser verificado na planilha de cálculo desenvolvida.

O pico de consumo fornecido pelo modelo indica uma potência de 1,158 kW, logo a célula a combustível para este sistema deverá estar apta a operar nessa faixa de potência. Os mesmos argumentos são válidos para dimensionamento do inversor de frequência.

Os parâmetros e valores típicos utilizados neste sistema são apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 - Características dos equipamentos utilizados no sistema fotovoltaico-hidrogênio estudado.

| Painéis Fotovoltaicos | |
|---------------------------------------|-------------------------------|
| Modelo | Kyocera KC130 |
| Tecnologia | Silício policristalino |
| Área (m ²) | 0,93 |
| Potência pico (W) | 130 |
| Tensão de máxima potência (V) | 17,6 |
| Corrente de máxima potência (A) | 7,39 |
| Eficiência | 13% |
| Eletrolisador Bipolar Alcalino | |
| Nº células | 80 |
| Tensão (V) | 177 |
| Corrente (A) | 40 |
| Pressão (bar) | 10 |
| Eficiência | 80% |
| Quantidade máx. H2 Produzida (m3) | 1,0 |
| Energia mín. Operação (kWh) | 1,0 |
| Energia máx. Operação (kWh) | 5,0 |
| Reservatório H2 | |
| Volume (m3) | 5,0 |
| Pressão máxima (bar) | 10 |
| Volume máx. de gás (m3) | 50 |
| Célula a Combustível PEM | |
| Potência (W) | 3.000 |
| Consumo H2 (m3/kWh) | 0,75 |
| Pressão mínima operação (bar, abs) | 2,0 |
| Inversor de Freqüência | |
| Modelo | Xantrex |
| Potência (W) | 2.000 |
| Eficiência | 95% |

Capítulo 4

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através da metodologia proposta e a análise comparativa entre os dois sistemas estudados.

4.1 Comparação entre os sistemas

Os dois sistemas considerados envolvem tecnologias diferentes para o armazenamento de energia elétrica. Enquanto um utiliza uma forma tradicional, por meio de baterias, a outra utiliza um método alternativo que propõe o armazenamento de energia na forma de hidrogênio eletrolítico, que será reconvertido em energia elétrica por meio de uma célula a combustível. A comparação entre os sistemas se dará através dos equipamentos que mais se diferenciam, seja pela quantidade ou pela tecnologia, conforme será discutido nas seções seguintes.

As Tabela 4.1 e Tabela 4.2 resumem algumas das principais características dos sistemas utilizados neste estudo. Utilizando as equações propostas por ROBERTS, 1991, na seção 3.2.2, que utiliza valores médios, calculou-se que 21 painéis fotovoltaicos e 62 baterias seriam necessários para atender a demanda de energia e garantir uma autonomia de 5 dias sem radiação solar. Pela metodologia desenvolvida os resultados foram 24 painéis (+14%) e 66 baterias (+6%). A diferença deve estar relacionada às eficiências consideradas na metodologia desenvolvida e não consideradas no modelo anterior.

Tabela 4.1 - Número de painéis fotovoltaicos e baterias calculadas para o sistema fotovoltaico-bateria.

| Equipamento | Potência Unitária de pico (W) | Qtd calculada (unid.) | Qtd (Roberts, 1991) (unid.) | Potência Nominal Total de pico (W) | Eficiência | Vida Útil (anos) | Referência |
|-----------------------------|--------------------------------------|------------------------------|------------------------------------|---|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Painel Fotovoltaico | 130 | 24 | 21 | 3.120 | 13% | 20 | Kyocera |
| Controlador de Carga | ----- | 1 | ----- | ----- | 90% | 10 | SMA |
| Bateria | ----- | 66 | 62 | ----- | 80% | 4 | Moura |
| Inversor | 2.000 | 1 | ----- | 2.000 | 95% | 10 | SMA |

Tabela 4.2 - Número de painéis fotovoltaicos, eletrolisador, reservatório e célula a combustível calculados para o sistema fotovoltaico-hidrogênio.

| Equipamento | Potência Unitária de pico (W) | Qtd calculada (unid.) | Potência Nominal Total de pico (W) | Eficiência | Vida Útil (anos) | Referência |
|--------------------------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Painel Fotovoltaico | 130 | 58 | 7.540 | 13% | 20 | Kyocera |
| Eletrolisador de Água | 5.000 | 1 | 5.000 | 80% | 20 | Piel |
| Reservatório (5m³) | ----- | 1 | ----- | 100% ⁶ | 20 | Dynatec |
| Célula a Combustível | 3.000 | 1 | ----- | 50% | 6 | PlugPower |
| Inversor | 2.000 | 1 | 2.000 | 95% | 10 | SMA |

4.1.1 Painéis fotovoltaicos

De acordo com os cálculos, o sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio necessita de uma quantidade maior de painéis fotovoltaicos em relação ao sistema com bateria, 58 e 24 respectivamente. Essa diferença está relacionada à energia mínima de operação do eletrolisador (1 kWh), abaixo da qual o eletrolisador não inicia seu funcionamento. Esse fato não se verifica com

⁶ A pressão de operação do reservatório depende da pressão de operação do eletrolisador, que é de no máximo 10 bar para o sistema proposto. A alimentação da célula a combustível ocorre a pressão de 2 bar. Portanto, assume-se que não há perdas de eficiência devido a reduções na vazão ou pressão do gás e que o sistema encontra-se livre de vazamentos.

o sistema a bateria, pois a bateria não apresenta uma quantidade mínima de energia para iniciar o processo de armazenamento, desde que seu estado de carga esteja abaixo de sua capacidade total.

4.1.2 Produção, Armazenamento e Reconversão do H₂

Diferente do sistema fotovoltaico que utiliza baterias como meio armazenador de energia elétrica, o sistema que utiliza o hidrogênio necessita de vários equipamentos para realizar as funções cumpridas pelas baterias. Portanto, as baterias deverão ser substituídas por um equipamento capaz de: i) transformar a energia elétrica oriunda dos painéis fotovoltaicos em hidrogênio, ou seja, o eletrolisador; ii) um reservatório para armazenar o hidrogênio; iii) um equipamento para reconversão do hidrogênio em energia elétrica, ou seja, a célula a combustível.

Essa substituição acarreta em algumas comparações em relação às baterias:

- Vida útil: A vida útil dos equipamentos responsáveis pela substituição (Eletrolisador/Reservatório/Célula a Combustível) apresentam respectivamente 20, 20 e 6 anos, enquanto que as baterias, considerando um regime de carga/descarga diário não ultrapassam os 4 anos.

A vida útil das células a combustível é determinada considerando certo número de horas de operação, neste trabalho foi adotado 6 anos uma vez que a potência média de operação é cerca de 18% da potência nominal indicada pelo fabricante e o hidrogênio utilizado por ela é de origem eletrolítica com elevado grau de pureza, diminuindo a contaminação da membrana polimérica da célula a combustível. Um cálculo mais conservador deveria considerar uma vida útil de 2,1 anos, o que corresponderia a 10.000 h de operação, num regime de 13 h/dia⁷.

- Eficiência: A eficiência do conjunto (Eletrolisador/Reservatório/Célula a Combustível), considerando uma eficiência de 80% do eletrolisador (Piel, 2007) e 50% da célula a combustível (PlugPower, 2007), é de 40%, enquanto a das baterias chega a 80% (Moura, 2007). A menor eficiência do sistema fotovoltaico-hidrogênio deve-se à inclusão de vários equipamentos para simular as funções da bateria.

⁷ Conforme Figura 4.2 na pág 78.

- Ambiental: As baterias de chumbo-ácido possuem metal pesado, o chumbo, e ácido sulfúrico, portanto necessitam de um cuidado especial no momento de realizar seu descarte, pois podem provocar danos ambientais. No sistema a hidrogênio, a vida útil de seus principais componentes é longa e a ocorrência de trocas é bem menor. Por isso, os equipamentos podem ser reciclados e apresentam reduzida possibilidade de provocar danos ambientais.

4.1.3 Sistema de controle

O sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias é um sistema relativamente simples do ponto de vista operacional e sua operação pode ser controlada apenas por um controlador de carga.

O sistema fotovoltaico com armazenamento de hidrogênio, no entanto, é um sistema mais complexo do ponto de vista operacional, que necessita de um equipamento específico para realizar o controle e operação de todo o processo, neste caso, o Controlador Lógico Programável (CLP).

Os inversores devem integrar ambos os sistemas e apresentam características técnicas similares. Portanto, contribuem da mesma forma para a complexidade dos sistemas.

4.1.4 Energia produzida, excedente e autonomia dos sistemas

Uma característica importante a ser analisada nestes sistemas é a quantidade de energia produzida e armazenada. A Figura 4.1 mostra o perfil típico de produção de energia elétrica no sistema com painéis fotovoltaicos e baterias, e o consumo de eletricidade apresentado por uma comunidade isolada do porte considerado, num dia típico. Na figura também pode-se verificar facilmente a existência de demanda de energia fora dos horários de fornecimento dos painéis, o que justifica a necessidade de sistemas de armazenamento de energia para suprir esses horários.

Para melhor visualização, a demanda apresentada na Figura 4.1 está com os seus valores no mesmo sentido da energia produzida pelos painéis fotovoltaicos, o inverso aritmético dos valores contidos na Tabela 3.3, o que torna possível verificar o perfil típico de produção, armazenamento e consumo de energia elétrica no sistema com painéis fotovoltaicos e baterias.

Caso o banco de baterias atinja seu estado de carga máximo e o painel fotovoltaico ainda supere a demanda, a energia excedente não será aproveitada, o que é verificado as 14 e 15 horas na Figura 4.1. Neste sistema a energia excedente foi de 0,378 kWh/dia.

Na Figura 4.2, referente ao sistema com armazenamento de hidrogênio, observa-se uma maior produção de energia elétrica devido ao maior número de painéis fotovoltaicos instalados. A utilização da célula a combustível ocorre nos momentos em que não se dispõe de energia solar ou quando ela é insuficiente para satisfazer a demanda.

Nos horários em que a energia produzida pelos painéis fotovoltaicos supera a demanda, tal como no outro sistema, pode-se iniciar o funcionamento do eletrolisador, desde que essa energia seja maior que a energia mínima de operação do eletrolisador e o reservatório não esteja completamente cheio de hidrogênio.

Pela Figura 4.2 é possível verificar a quantidade de energia elétrica armazenada na forma de hidrogênio ao longo do período de 24 horas, onde foi considerado o poder calorífico superior do hidrogênio para transformar a quantidade de gás em energia. A mesma visualização pode ser feita para a energia excedente, que neste caso é da ordem de 0,993 kWh/dia.

A energia fotovoltaica não utilizada pelos dois sistemas pode ser utilizada em benefício das comunidades, por exemplo, para o aquecimento ou bombeamento de água, ou na geração de frio ou calor.

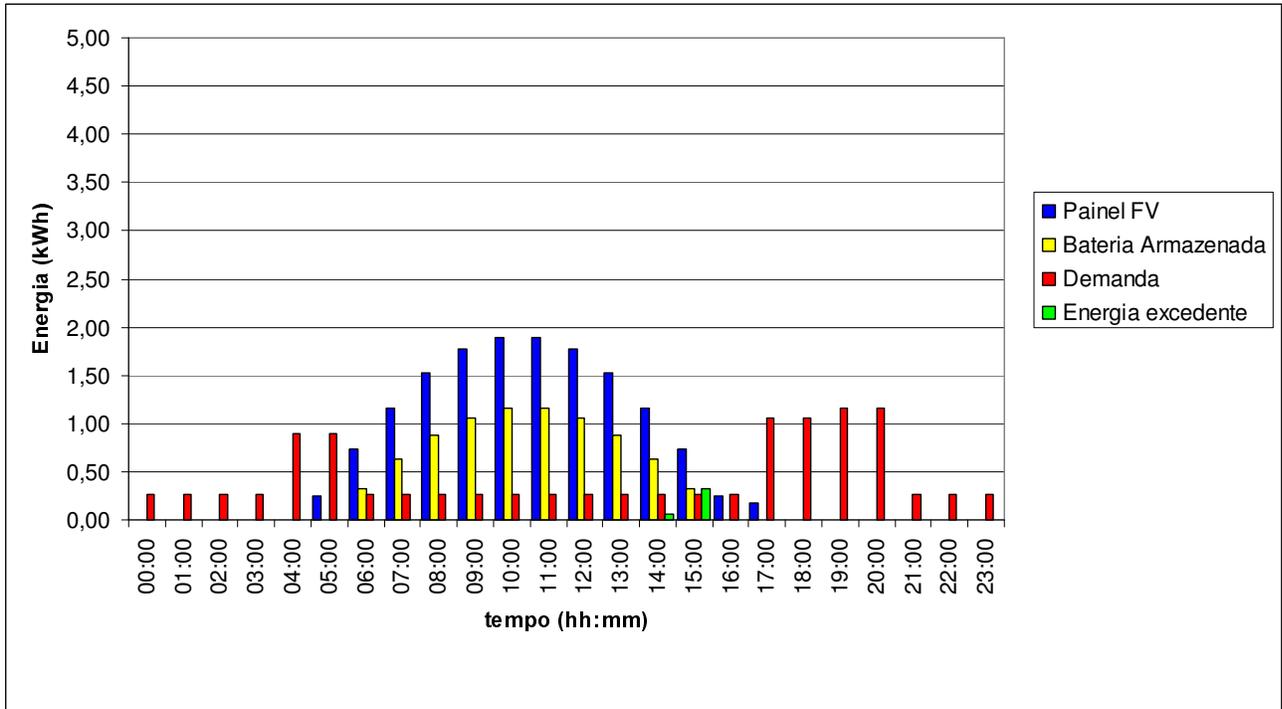


Figura 4.1 - Perfil típico de produção, armazenamento, consumo e excedente de energia elétrica no sistema com painéis fotovoltaicos e baterias.

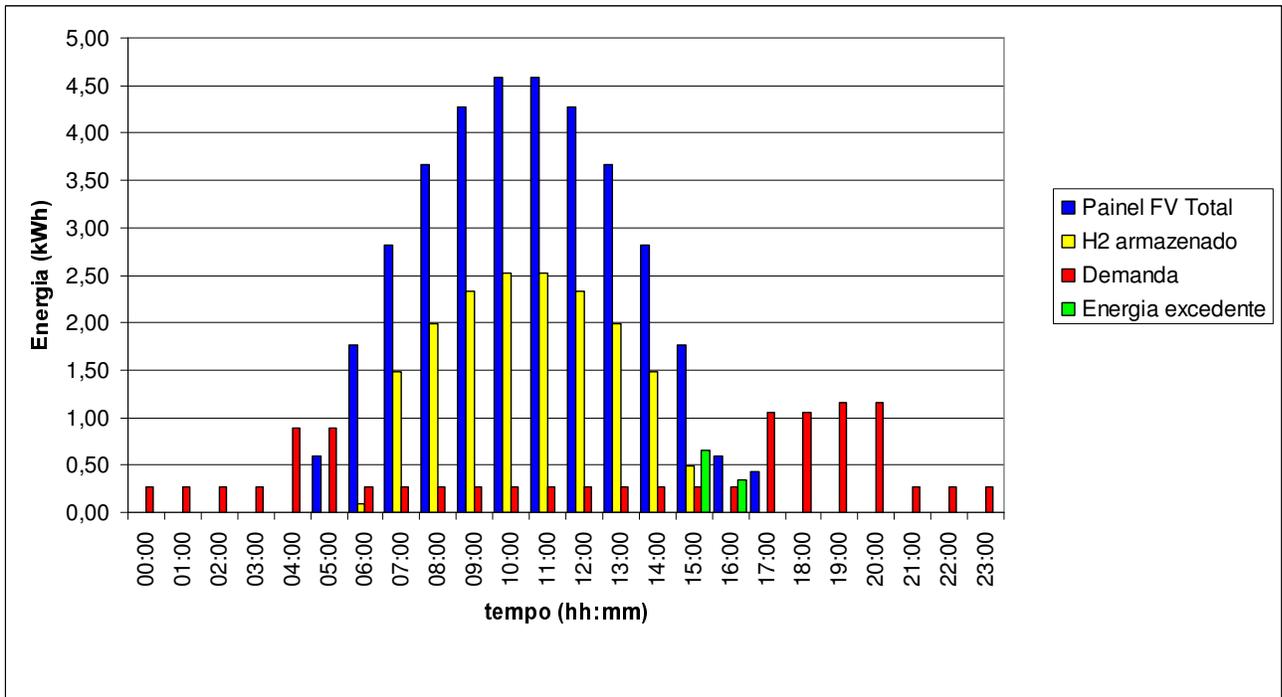


Figura 4.2 - Perfil típico de produção, armazenamento, consumo e excedente de energia elétrica no sistema fotovoltaico com armazenamento na forma de hidrogênio eletrolítico.

O gráfico apresentado na Figura 4.3 apresenta a energia armazenada no banco de baterias em função da autonomia do sistema. Nele é possível verificar que nas condições estipuladas o banco de baterias tem energia suficiente para suprir a demanda de carga do sistema por 5 dias. Observa-se, ainda, que ao final do período de 5 dias o banco de baterias contém 23,8 kWh de energia, equivalente a 30% da energia total que pode ser armazenada, necessária para preservar a integridade das baterias.

Na Figura 4.4 observa-se a quantidade de hidrogênio que deve ser armazenada para que o período de 5 dias de autonomia seja alcançado. Nota-se também que ao término do quinto dia, a quantidade de hidrogênio não se esgota completamente. Isto se justifica pelo fato da célula a combustível somente operar com pressão do gás superior a 2 bar (2×10^5 Pa). Portanto, o hidrogênio restante no reservatório está aproximadamente a essa pressão.

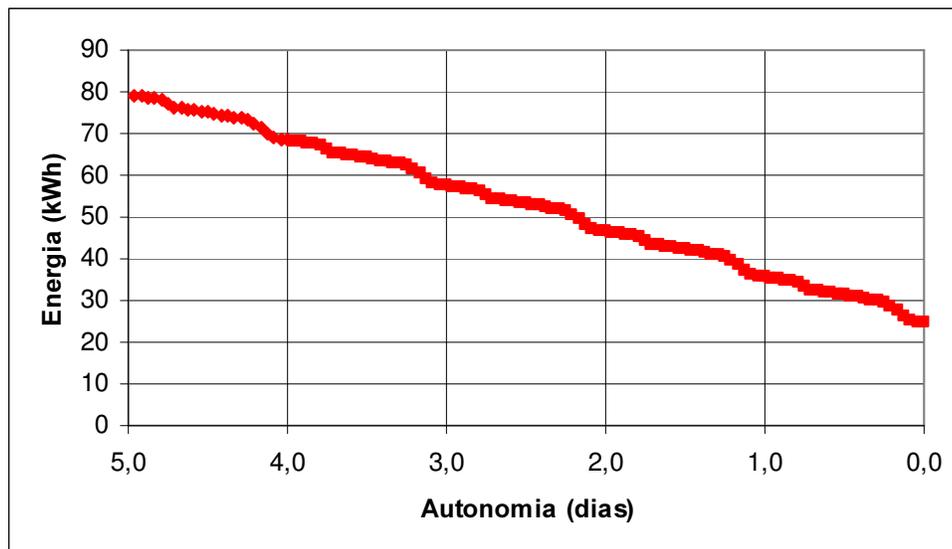


Figura 4.3 - Quantidade de energia armazenada em função da autonomia do sistema fotovoltaico com armazenamento em bateria.

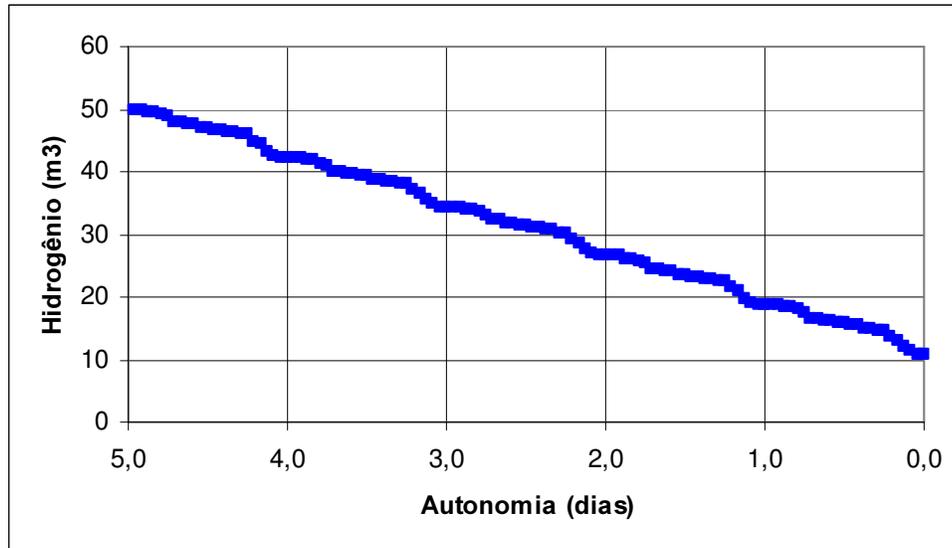


Figura 4.4 - Quantidade de hidrogênio armazenado em função da autonomia do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio.

4.2 Análise econômica dos sistemas

Nesta seção serão analisados os aspectos econômicos de acordo com a abordagem descrita na seção 2.6.

4.2.1 Custos dos sistemas

Os custos dos sistemas estão apresentados nas tabelas a seguir, onde estão relacionados os valores de cada equipamento que compõe os sistemas, os gastos relativos à reposição programada dos equipamentos, custos de operação e manutenção e o custo com a estrutura física necessária para instalação de cada sistema, considerando uma taxa de desconto de 10% e uma inflação de 3,5% ao ano.

A Tabela 4.3 apresenta o fluxo de caixa do sistema fotovoltaico com baterias calculado com o auxílio da Eq. 32, pg. 46. A vida útil do sistema foi considerada igual a 20 anos, portanto nesse

período serão necessárias 4 trocas do banco de baterias, 1 troca do inversor de frequência⁸ e 1 troca do controlador de carga. Desta forma, os gastos relativos a essas trocas tornam-se altos.

Tabela 4.3 - Custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias de acordo com o fluxo de caixa.

| <i>Equipamento</i> | <i>Investimento Inicial</i> | | | <i>Investimento complementar</i> | | | <i>Total Geral (%)</i> | <i>Referência</i> |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|--------------------------|------------------------|-------------------|
| | <i>Qtd (unid.)</i> | <i>Preço Unitário (R\$)</i> | <i>Valor Total (R\$)</i> | <i>Qtd Troca (unid.)</i> | <i>Troca de equipamentos (R\$)</i> | <i>Total Geral (R\$)</i> | | |
| <i>Painel Fotovoltaico</i> | 24 | 1.580 | 37.920 | ----- | ----- | 37.920 | 49% | Solar Brasil |
| <i>Controlador de Carga</i> | 1 | 675 | 675 | 1 | 924 | 1.599 | 1% | Solar Brasil |
| <i>Bateria</i> | 66 | 450 | 29.700 | 264 | 164.404 | 194.104 | 38% | Moura |
| <i>Inversor</i> | 1 | 1.300 | 1.300 | 1 | 1.781 | 3.081 | 2% | Solar Brasil |
| <i>Estrutura</i> | ----- | ----- | 7.584 | ----- | ----- | 7.584 | 10% | ----- |
| <i>Custo Total</i> | | | 77.179 | | 167.109 | 244.288 | | |

Para esse sistema não foram considerados gastos com operação e manutenção porque seus equipamentos praticamente não requerem cuidados especiais. Portanto o custo total do sistema é constituído pelo investimento inicial para a aquisição dos equipamentos, mais os gastos com as trocas dos equipamentos ao longo dos 20 anos. A Figura 4.5 apresenta a contribuição percentual de cada equipamento no investimento inicial (a) e no custo total (b), de acordo com o fluxo de caixa da Tabela 4.3.

⁸ Apesar do inversor ser trocado a cada 5 anos em alguns sistemas instalados, os utilizados nos projetos do LH2 não apresentaram nenhum tipo de problema ou dano, portanto neste trabalho será utilizado como vida útil o recomendado pelo fabricante, 10 anos.

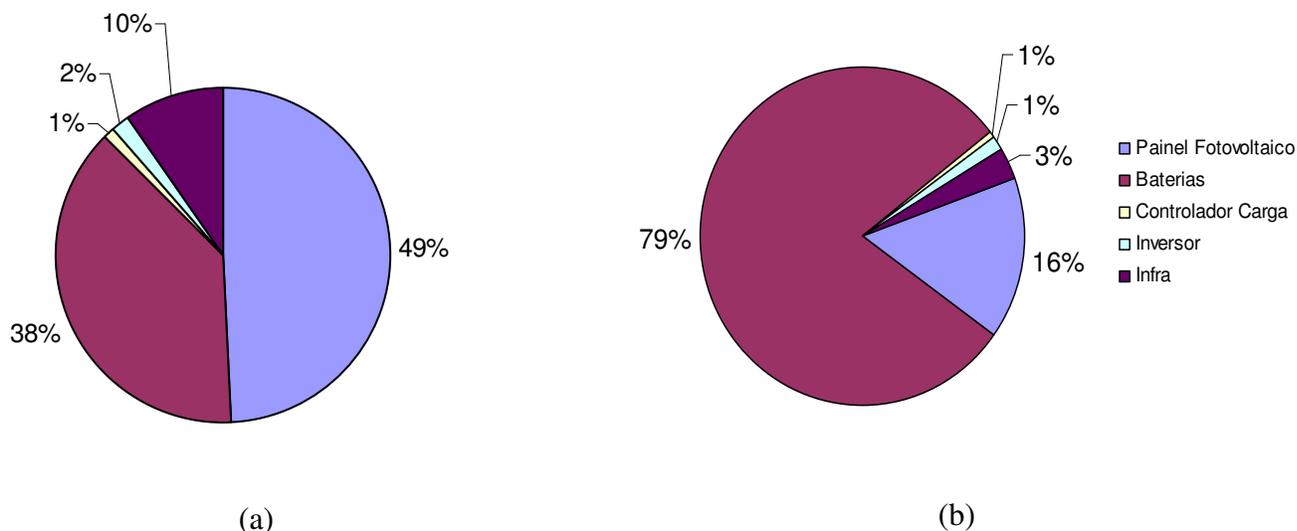


Figura 4.5 - Contribuição percentual de cada equipamento no investimento inicial (a) e no custo total (b), de acordo com o fluxo de caixa, do sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias.

Como era previsto o custo relativo às baterias e aos painéis fotovoltaicos foram responsáveis por 49% e 38% respectivamente, dos investimentos iniciais. Já com relação ao custo total do sistema ao longo de toda sua vida útil, as trocas das baterias são responsáveis por 79% do custo.

A Tabela 4.4 apresenta o custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio, de acordo com o fluxo de caixa. Também neste caso é considerado um período de 20 anos para a vida útil do sistema. A maioria dos seus equipamentos apresenta essa mesma duração, com exceção da célula a combustível e do inversor de frequência com 6 e 10 anos de vida útil, respectivamente. Logo, esses equipamentos são os únicos responsáveis pelos gastos relativos às trocas dos equipamentos. Como o número maior de equipamentos é maior neste caso, um cuidado adicional é necessário, o que agrega um gasto com operação e manutenção. Os valores utilizados neste trabalho, 2%, 2%, 0,5% ao ano, relativos ao custo inicial do eletrolisador, célula a combustível e reservatório respectivamente, foram obtidos no trabalho de LYMBEROPOULOS, 2005.

Os preços do eletrolisador bipolar alcalino e da célula a combustível PEM (incluindo impostos) foram estimados a partir das últimas cotações ou compras realizadas pelo Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP, com o dólar a uma taxa de câmbio de R\$1,75.

Tabela 4.4 - Custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio de acordo com o fluxo de caixa.

| <i>Equipamento</i> | <i>Investimento inicial</i> | | | <i>Investimento complementar</i> | | | | <i>Total Geral (%)</i> | <i>Referência</i> |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|----------------------|--------------------------|------------------------|---------------------|
| | <i>Qtd (unid.)</i> | <i>Preço Unitário (R\$)</i> | <i>Preço Total (R\$)</i> | <i>Qtd Troca (unid.)</i> | <i>Troca de equipamentos (R\$)</i> | <i>O&M (R\$)</i> | <i>Total Geral (R\$)</i> | | |
| <i>Painel Fotovoltaico</i> | 58 | 1.580 | 91.640 | ----- | ----- | ----- | 91.640 | 51% | Solar Brasil |
| <i>Eletrolisador</i> | 1 | 32.760 | 32.760 | ----- | ----- | 13.104 | 45.864 | 19% | Lymberopoulos, 2005 |
| <i>Reservatório</i> | 1 | 10.000 | 10.000 | ----- | ----- | 2.000 | 12.000 | 6% | Lymberopoulos, 2005 |
| <i>Célula a Combustível</i> | 1 | 21.000 | 21.000 | 3 | 93.036 | 8.400 | 122.436 | 12% | Lymberopoulos, 2005 |
| <i>Inversor</i> | 1 | 1.300 | 1.300 | 1 | 1.781 | ----- | 3.081 | 1% | Solar Brasil |
| <i>CLP</i> | 1 | 10.000 | 10.000 | ----- | ----- | ----- | 10.000 | 6% | |
| <i>Estrutura</i> | ----- | ----- | 9.164 | ----- | ----- | ----- | 9.164 | 5% | ----- |
| <i>Custo Total (R\$)</i> | | | 175.864 | 94.817 | | 23.504 | 294.185 | | |

O cálculo do custo total desse sistema é análogo ao sistema anterior acrescido dos gastos com operação e manutenção.

Neste sistema os painéis fotovoltaicos representaram 51% dos custos de investimento inicial, já a célula a combustível contribuiu 42% com custo total do sistema, relativo às trocas e operação e manutenção dos equipamentos, o que pode ser visualizado na Figura 4.6.

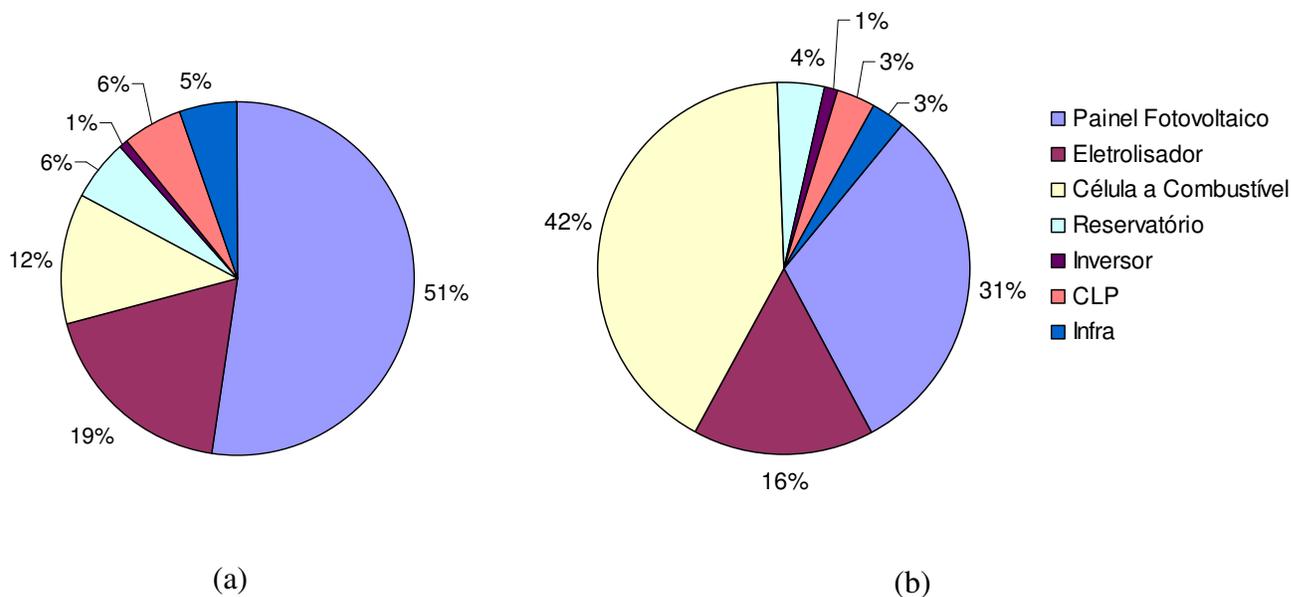


Figura 4.6 - Contribuição percentual de cada equipamento no investimento inicial (a) e no custo total (b), de acordo com o fluxo de caixa, do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio.

4.3 Custo da energia elétrica produzida pelos sistemas

Para calcular o custo da energia elétrica produzida pelos sistemas foi utilizada a Equação 32, descrita na seção 2.6, impondo o valor do VPL igual a zero. Pela análise do cálculo do fluxo de caixa ao longo dos 20 anos, foi calculado o custo mínimo da energia elétrica produzida por cada sistema em R\$/kWh. Nestes cálculos foi utilizada uma taxa de desconto de 10% e inflação de 3,5% ao ano (IPEA, 2008) para ambos os sistemas. Quanto à produção anual total de energia elétrica, considerou-se um valor de 4.077 kWh/ano para o sistema fotovoltaico a bateria, e de 4.358 kWh/ano para o sistema hidrogênio.

Com base nos parâmetros definidos anteriormente, o custo da energia elétrica calculado para o sistema fotovoltaico com armazenamento em bateria foi de R\$ 4,19/kWh, enquanto que para o sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio o valor foi de R\$ 5,88/kWh, o que representa uma diferença de 40%. Deve-se observar, no entanto, que não foi possível encontrar um valor apropriado para alguns custos importantes no caso do sistema à bateria como, por exemplo, os

custos relacionados ao transporte e descarte das baterias, o que sem dúvida iria reduzir a diferença observada com relação ao sistema com armazenamento em hidrogênio.

Logo, utilizando como critério comparativo o custo da energia elétrica produzida por cada sistema, pode-se concluir que o sistema fotovoltaico com armazenamento em bateria ainda mostra-se mais competitivo economicamente que o sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio. A expectativa, no entanto, é que com o aumento na escala de produção das células a combustível e do eletrolisador, ocorra uma queda nos seus valores de mercado a ponto de viabilizar a utilização deste tipo de sistema. É interessante lembrar ainda, que as células a combustível do tipo PEM apenas recentemente atingiram o estágio de comercialização, sendo utilizada com sucesso como back-up em aplicações que requerem alta confiabilidade do fornecimento de energia elétrica, tais como antenas de telecomunicação, e que por esse motivo podem suportar os custos mais altos dessa tecnologia.

A título de comparação, o custo da energia elétrica proveniente de geradores diesel em Vila Campinas é de R\$ 1,17/kWh (CAMARGO, 2004 apud SOUZA, 2000). Além desse valor encontrar-se desatualizado, essa grande diferença pode ser relacionada à tecnologia extremamente consolidada da geração de energia elétrica com motores a diesel e, principalmente, pelo fato do combustível ter o preço fortemente subsidiado. Deve-se ressaltar que essa tecnologia é uma das mais poluentes do ponto de vista das emissões atmosféricas, pelo fato de estar baseada no uso de um combustível fóssil. Além disso, vazamentos de combustível representam um perigo constante de danos ambientais relacionados à poluição dos cursos d'água utilizados no seu transporte. Por esse motivo, a substituição de sistemas geradores a diesel por tecnologias utilizando células a combustível, painéis fotovoltaicos e eletrolisadores, apresenta ganhos ambientais importantes, que deverão ser cada vez mais valorizados.

4.4 Análise da sensibilidade dos sistemas

A análise da sensibilidade do sistema fotovoltaico com bateria foi feita a partir da variação dos custos do painel fotovoltaico, a autonomia e o custo das baterias.

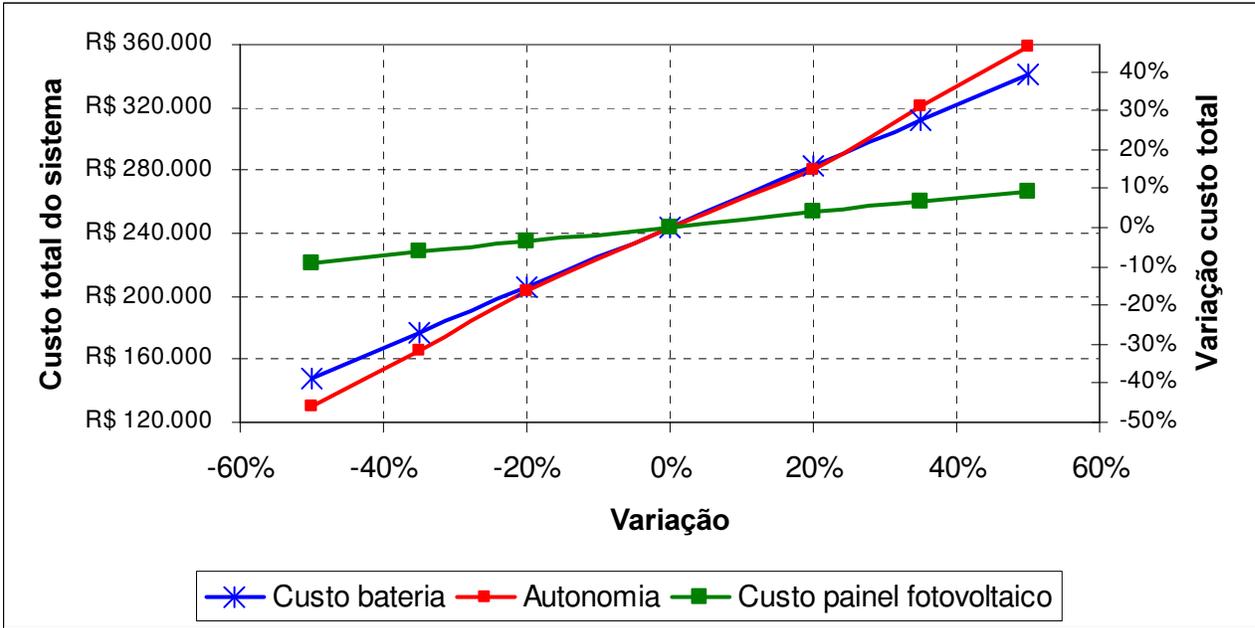


Figura 4.7 - Sensibilidade do custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em bateria com relação ao custo do painel, a autonomia e o custo das baterias.

Observando a Figura 4.7 verifica-se que o custo do painel fotovoltaico, o custo das baterias e a autonomia do sistema apresentam relações diretamente proporcionais ao custo total do sistema. No entanto, o número de dias relativos à autonomia e o custo das baterias apresentam uma taxa de variação maior do que o custo dos painéis, pois uma redução de 20% na autonomia ou no custo das baterias implica num decréscimo de 18% no custo total do sistema, enquanto que uma redução de 20% no custo do painel fotovoltaico implica numa redução de apenas 3% no custo total do sistema.

Na análise da sensibilidade envolvendo o sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio foi feita a variação do custo do painel fotovoltaico, o custo da célula a combustível e do eletrolisador, e a vida útil da célula a combustível. A primeira análise pode ser observada na Figura 4.8, considerando a variação do custo dos painéis fotovoltaicos e o custo do eletrolisador.

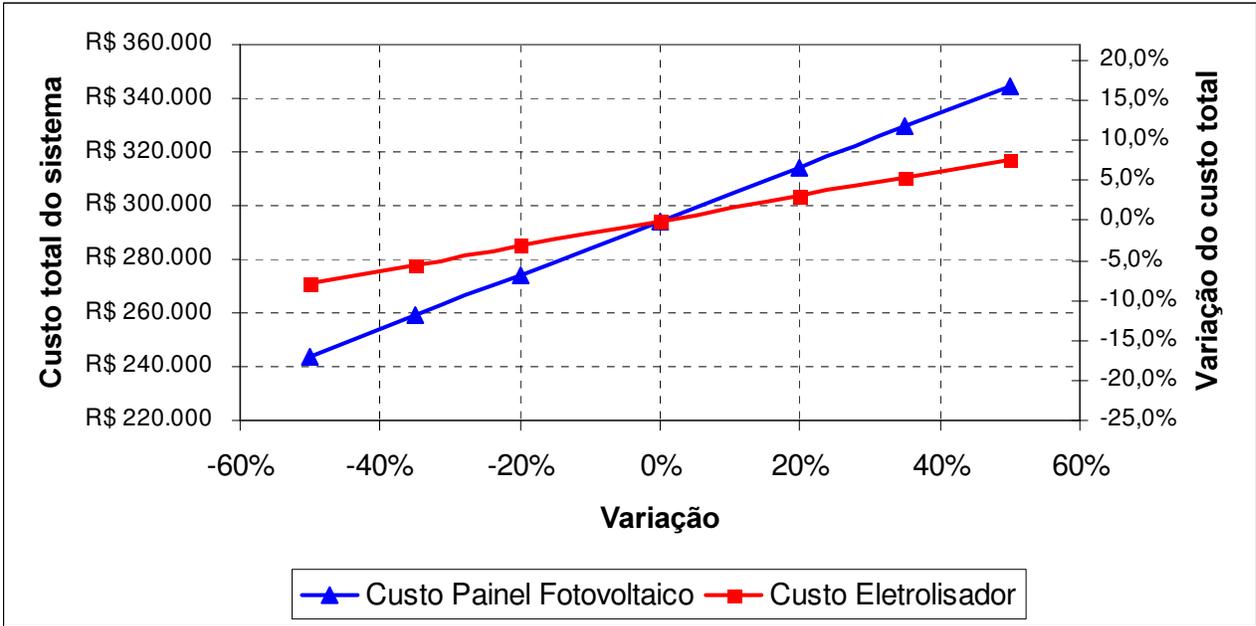


Figura 4.8 - Sensibilidade do custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio com a variação do custo do painel e o custo do eletrolisador.

As duas curvas apresentadas na Figura 4.8 mostram uma variação linear tanto do custo dos painéis fotovoltaicos quanto do eletrolisador, mas a curva referente ao painel fotovoltaico indica uma sensibilidade um pouco maior em relação à variação do custo do sistema. Uma redução de 20% no custo do painel fotovoltaico implica numa redução de 7% no custo total do sistema, enquanto essa mesma redução no custo do eletrolisador implica em 4% a menos no custo total.

A segunda análise levará em consideração a variação do custo e vida útil da célula a combustível.

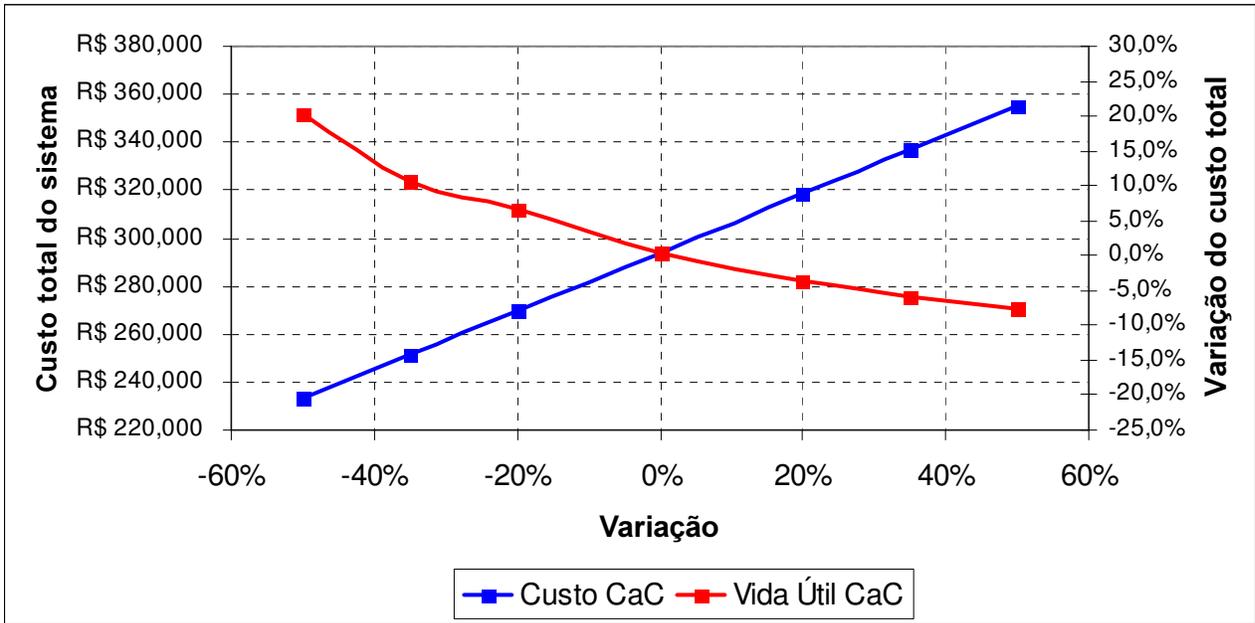


Figura 4.9 - Sensibilidade do custo total do sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio com a variação do custo e vida útil da célula a combustível (CaC).

Nesta análise a variação tanto do custo da célula a combustível quanto a sua vida útil apresentam uma relação aproximadamente linear com o custo total do sistema, mas as curvas possuem inclinações diretamente proporcionais e inversamente proporcionais. Assim, para ocorrer uma redução no custo total do sistema é necessário um aumento na vida útil da célula a combustível, o que corresponderia à redução do número de trocas ao longo da vida útil do sistema, ao passo que deve haver uma redução no custo da célula a combustível para que ocorra redução no custo total do sistema. Observando a Figura 4.9 verifica-se que uma redução de 50% no custo da CaC representaria uma redução no custo total do sistema de 22%, enquanto um aumento em 50% na vida útil da CaC implica numa redução de apenas 8% no custo total. Portanto, esta análise de sensibilidade mostra que o maior impacto sobre o custo total do sistema pode ser obtido pela redução do custo da CaC e não pelo aumento de sua vida útil.

Já a última análise considerará as variações dos custos do conjunto eletrolisador/reservatório/célula a combustível e da bateria, verificando como eles interferem no custo final do sistema, conforme pode ser visto na Figura 4.10.

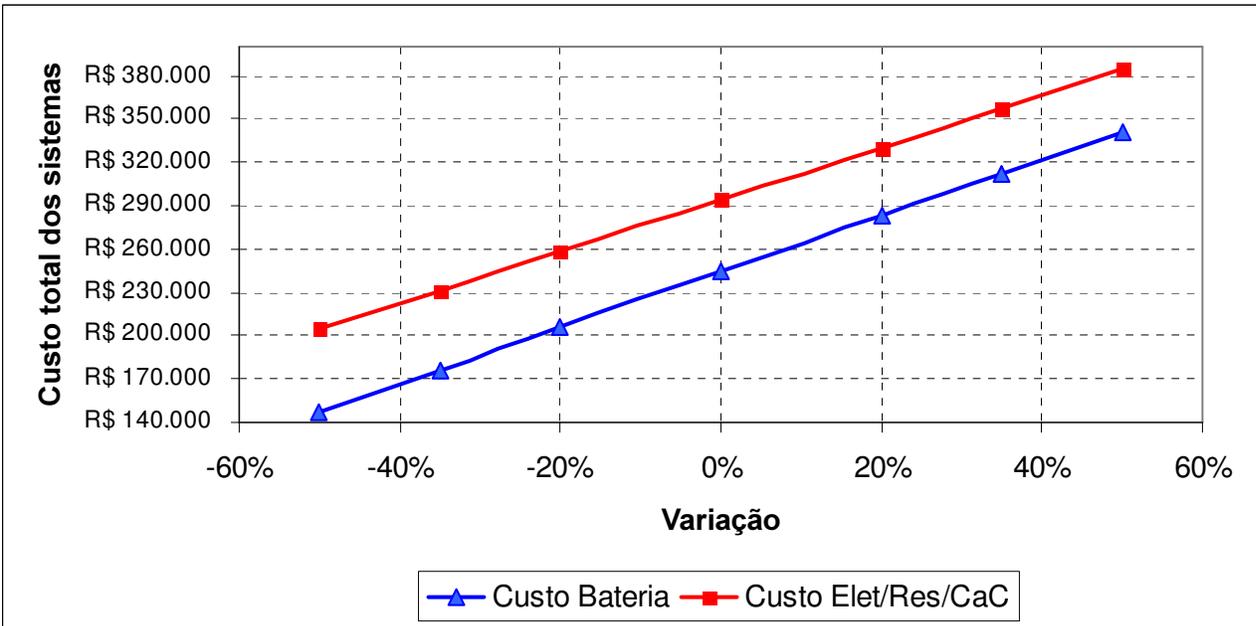


Figura 4.10 - Sensibilidade do custo total dos sistemas fotovoltaicos com as variações do conjunto eletrolisador/reservatório/célula a combustível e da bateria.

É possível verificar que uma redução de aproximadamente 35% no valor do conjunto Eletrolisador/Reservatório/Célula a Combustível praticamente igualaria os custos totais de ambos os sistemas. A redução do custo das baterias é uma situação pouco provável, dado o grau de maturidade tecnológica alcançado por este tipo de bateria. Na realidade, frente aos problemas ambientais relacionados ao descarte desse tipo de dispositivo, o mais provável é que os custos aumentem ao longo do tempo. Já para o caso do eletrolisador e da célula a combustível pode-se considerar que é bastante provável a redução de seus custos, pois essas tecnologias ainda estão em processo de grande evolução tecnológica.

Capítulo 5

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

5.1 Conclusões

As principais conclusões obtidas neste trabalho podem ser resumidas como segue:

1 - Os números de painéis fotovoltaicos e de baterias calculados pela metodologia desenvolvida foram um pouco superiores, +14% e +6% respectivamente, aos propostos por ROBERTS, 1991. Esse aumento pode ser creditado ao refinamento do modelo proposto no qual são consideradas as eficiências dos equipamentos utilizados e às diversas etapas de conversão de energia. O modelo mostrou-se também bastante versátil uma vez que é possível alterar com facilidade os diversos parâmetros de operação dos equipamentos que compõem os sistemas fotovoltaicos utilizados neste estudo e, imediatamente, visualizar os resultados.

A boa proximidade entre os valores calculados e a literatura valida o modelo desenvolvido tornando-o mais uma ferramenta capaz de dimensionar um sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias através da simulação do consumo de energia elétrica baseado em um perfil de carga associado à aplicação desejada.

Apresentou-se também como uma ferramenta capaz de dimensionar os principais equipamentos utilizados na instalação de um sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio pressurizado.

2 - Os dois sistemas estudados apresentaram o painel fotovoltaico como o equipamento que mais contribuiu para os gastos com investimento inicial, 49% para o sistema com armazenamento em baterias e 51% para o sistema com armazenamento em hidrogênio. De forma similar, as baterias foram responsáveis por 38% do investimento inicial no seu sistema, enquanto o conjunto eletrolisador/reservatório/célula a combustível representou 37%, evidenciando a equivalência no investimento inicial desses equipamentos nos seus respectivos sistemas. Dessa forma o custo total do sistema fotovoltaico a bateria foi de R\$ 244.288,00 e o a hidrogênio R\$ 294.185,00, ou seja, 20% maior.

3 - O gasto com investimento inicial no sistema a hidrogênio foi 2,3 vezes maior que o do sistema a bateria, o que pode ser creditado à aquisição dos painéis fotovoltaicos, do eletrolisador e da célula a combustível. Por outro lado, os gastos com as trocas dos equipamentos no sistema fotovoltaico a bateria foram 1,4 vezes superiores aos do sistema a hidrogênio, sendo as baterias as maiores responsáveis neste caso. De forma similar, as células a combustível foram as maiores responsáveis pelos gastos com troca de equipamentos em seu sistema.

4 - O custo da energia elétrica do sistema fotovoltaico a bateria, R\$ 4,19/kWh, ainda se mostra mais competitivo em relação ao apresentado pelo sistema fotovoltaico a hidrogênio, R\$ 5,88/kWh. Mas, embora não se tenha realizado uma avaliação aprofundada acerca dos aspectos ambientais relacionados, pode-se afirmar que o sistema com armazenamento em hidrogênio é potencialmente bem menos agressivo quanto à poluição local do que o sistema a bateria.

5 - A análise da curva de sensibilidade representada pela Figura 4.7, indica que a autonomia desejada e o custo das baterias são as variáveis que mais interferem no custo total do sistema fotovoltaico a bateria dada a acentuada inclinação de suas retas, indicando, conforme esperado, que quanto maior a autonomia desejada, maior a quantidade de baterias necessárias, aumentando o custo total do sistema. Portanto, a autonomia e o custo das baterias são parâmetros fundamentais na tomada de decisão para a implantação desse sistema.

6 - As curvas de sensibilidade apresentadas na Figura 4.8 e Figura 4.9, referentes ao sistema fotovoltaico a hidrogênio, indicam que o custo dos painéis fotovoltaicos apresenta uma influência maior no custo total do sistema do que o custo do eletrolisador. Por outro lado, verifica-se que para

reduzir o custo total do sistema seria mais eficiente reduzir o custo da célula a combustível do que aumentar a sua vida útil.

7 - A figura 4.10 mostra que uma redução de aproximadamente 35% nos custos do eletrolisador/reservatório/célula a combustível, torna comparável economicamente a utilização do hidrogênio como armazenador de energia elétrica em substituição às baterias.

8 - Um cálculo mais conservador para o sistema fotovoltaico-hidrogênio, consideraria uma vida útil de 2,1 anos para a célula a combustível num regime de 13 h/dia, o que tornaria inviável a implantação desse sistema. Mas, como a célula a combustível foi operada sempre a uma potência abaixo da nominal (1,16 kW contra 3 kW) e com hidrogênio de elevado grau de pureza, considerou-se que sua vida útil seria prolongada, tornando plausível esta análise.

9 - Deve-se atentar para o fato que os custos com operação, manutenção e transporte das baterias em locais remotos devem elevar consideravelmente o custo total do sistema fotovoltaico a bateria bem como o custo da energia elétrica produzida, o que não foi avaliado neste estudo. Outro aspecto relevante que poderia aumentar consideravelmente o custo deste sistema diz respeito aos problemas relacionados a possíveis vazamentos e descarte das baterias, bem como o seu transporte até o ponto de reciclagem.

A preocupação cada vez maior em preservar o meio ambiente e reduzir as emissões de gases de efeito estufa são importantes incentivos à utilização de fontes renováveis de energia, tal como a solar. Da mesma forma, a utilização do hidrogênio como vetor energético começa a ser encarada como uma opção economicamente viável em médio prazo, para mitigação dos gases de efeito estufa.

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

1 - Aprofundamento da análise de viabilidade econômica, uma vez que este trabalho não levou em consideração os efeitos sobre os custos da produção em escala de eletrolisadores e células a combustível de porte adequado para geração estacionária de energia, similares às utilizadas neste estudo.

2 - Analisar a viabilidade técnica e econômica da instalação de sistemas fotovoltaicos híbridos onde poderão ser combinados o armazenamento de energia na forma de hidrogênio e por meio de baterias, e nos quais a reconversão do hidrogênio em energia elétrica poderá ocorrer por meio de células a combustível ou grupos geradores. A utilização de sistemas híbridos com essas características é de grande interesse uma vez que poderão ser atingidas maiores eficiências globais uma vez que cada componente do sistema atuará dentro de sua melhor faixa de eficiência.

3 – Tendo em vista a dificuldade na obtenção do custo real da energia elétrica produzida a partir de um sistema gerador a diesel de pequeno porte em áreas isoladas, seria importante calcular esses valores levando-se em consideração, dentre outros fatores, o custo do transporte do diesel até essas localidades. Dessa forma haveria maior clareza na comparação econômica entre essa forma de geração e os sistemas fotovoltaicos a bateria e a hidrogênio utilizados neste estudo.

Capítulo 6

Referências Bibliográficas

BALLARD, Disponível em www.ballard.com. Acesso dia 12/04/2006.

BATERIAS MOURA, Catálogo Técnico das famílias MF e MC das baterias Moura Clean, 2007.

BOCKRIS, J. O'M. AND REDDY, A. K. N., Modern electrochemistry. V.2. 2 ed..Kluwer Academic, 1998.

BRINGMANN J.C. et al; “Analysis of the Process Advantages and Application Fields for Alkaline High-Pressure Electrolysis”; Proceedings of the World Renewable Energy Congress VII – Vol. 26, technical session: Fuel Cell Systems; Forschungszentrum Jülich GmbH, ISBN 3-89336-332-7, Jülich, 2003.

CAMARGO, J. C., O etanol como fonte de hidrogênio para células a combustível na geração distribuída de energia elétrica, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Tese de Doutorado, 2004.

CARTAXO, E. F.; JANNUZZI, G. M., Análise técnica de um sistema híbrido solar-diesel, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. 2000.

CASSOLINI, M.S.D., Shel Solar: Eletrificação Rural e Desenvolvimento Sustentável; AGRENER 2000 (Terceiro Encontro de Energia no Meio Rural), Campinas, SP, 2000.

- CASTAÑER, L., MAS, A. Consideraciones sobre el diseño de sistemas fotovoltaicos. *Energia Solar Fotovoltaica. Série Mundo Electrónico* Barcelona: Marcombo Boixareu Editores.1985. p . 158–162.
- CAVALIERO, C. K. N., Inserção de mecanismos regulatórios de incentivo ao uso de fontes renováveis alternativas de energia no setor elétrico brasileiro e no caso específico da região Amazônica, FEM – UNICAMP, Tese de Doutorado, 2003.
- CHAMBOULEYRON, I. “*Eletricidade solar*”, *Revista Ciência Hoje*, vol. 9, nº 54, pg 33-39, Junho de 1989.
- CHESF - Companhia Hidrelétrica do São Francisco. *Fontes Energéticas Brasileiras*, Inventário de Tecnologias. Vol. IV. 1987.
- COELHO, K. D. “Estudo de uma fonte Ininterrupta de corrente contínua de baixa potência gerenciada por um microcontrolador”. Dissertação. Universidade Federal de Santa Catarina - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2001.
- CULVER, B. B., Jager C. “*Estimation of the energy output of a photovoltaic power plant in the austrian alps*”, *Solar Energy* 5, 62 , pg 319-324, 1998.
- DINIZ, A. S. C. Manual de treinamento em energia solar fotovoltaica. CEMIG, 1999.
- DUFFIE, J.A., BECKMAN, W.A.” *Solar engineering of thermal processes* “2.ed., Wiley, New York, 1991.
- FERREIRA, P.F.” *Análise da Viabilidade de Sistemas de Armazenamento de Energia Elétrica na Forma de Hidrogênio utilizando Células a Combustível* ”, 94p. Dissertação. FEM - UNICAMP, 2003.

GARCIA-CONDE, A G. e ROSA, F. “*Solar hydrogen producion : A spanish experience*”, Int. J. Hydrogen Energy, 18(12), 995-1000, 1992.

GALLI, S, STEFANONI, M. “*Development of a solar-hydrogen cycle in Italy*“, Int. J. Hydrogen Energy, 22(5), 453-458, 1997.

GLÖCKNER, R. HYDROGEMS - hydrogen energy models. In: Proceedings of WHEC 2002 - 14th World Hydrogen energy Conference, Montreal, 2002.

GREEN, M.A. “*Photovoltaics: technology overview*”, Energy Policy, 28, pg 989-998, 2000.

GREEN, M.A. “*Recent developments in photovoltaics*”, Solar Energy, 76, pg 3-8, 2004.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Censo 2000. Disponível em: www.ibge.gov.br.

IPEA, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, Disponível em www.ipea.gov.br. Acesso dia 10/01/2008.

KAPLAN, S. *Energy Economics – Quantitative methods for energy and environmental decisions*. McGraw Hill, Nova York, 1983.

KLEIN, S.A., Solar Energy, 19, 325 (1977). “*Calculation of Monthly Average Insolation on Tilted Surfaces.*”

KYOCERA, Manual Técnico: Manual de instalação, 2007. Disponível em www.kyocera.com.br. Acesso dia 13/06/2007.

LASNIER, F. E ANG, T.G. “*Photovoltaic engineering handbook*”, pg.227-232, 1990.

LEROY, R.L.; “*Industrial Water Electrolysis: Present and Future*”; International Journal of Hydrogen Energy (IJHE); v.08 (06); pp. 401-407; 1983.

LIU, B Y. H. AND R. C. JORDAN, Solar Energy, 4(3), 1 (1960). “The Interrelationship and Characteristic Distribution of Direct, Diffuse and Total Solar Radiation.”

LOF, P.;“Elsevier’s Periodic Table of the Elements”; Elsevier Science Publishers B.V.; 1987.

LYMBEROPOULOS, N. Hydrogen production from renewables. Centre for Renewable Energy Sources, C.R.E.S, 2005.

MAYCOCK, P. D. PV review: World Solar PV Market Continues Explosive Growth. Refocus, v. 6, n. 5, p. 18-22, 2005/06.

MSPC, Artigos e informações periodicamente ampliadas ou atualizadas sobre áreas técnicas diversas. Disponível em: <http://www.mspc.eng.br/>. Acesso em 07/05/2007.

OLIVEIRA, S. H. F. & Zilles, R. Edificações Fotovoltaicas Conectadas à Rede de Distribuição de Eletricidade (EFCR); Situação Atual no País. IV Encontro do Fórum permanente de Energias Renováveis, Recife – PE, Outubro/1998.

PLUGPOWER, Fuel Cell products for backup power. Disponível em www.plugpower.com. Acessado em 10/09/2007

POMPERMAYER , M. L., O Gerenciamento da Demanda de Eletricidade em Centros Urbanos da Região Amazônica: Possibilidades e Estratégias para o Setor Residencial, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 1998. Tese (Doutorado)

ROBERTS, S., Solar electricity: a practical guide to designing and installing small photovoltaic systems. Prentice Hall Europe, 1991.

ROSA, D. J. M., Caracterização da radiação solar: O Caso da Cidade Universitária/USP e da Ilha do Cardoso/Cananéia. Dissertação (Mestrado) – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo – PIPGE/USP, 2003.

SAMUELSON, PA, Nordhaus, WD. Economia. 17ª edição, McGraw-Hill, 2004

SAUER, I.L et all. Energias Renováveis: ações e perspectivas na Petrobrás, Bahia Análise & Dados Salvador, v.16, n.1, pg. 9-22, 2006.

SCIENTIA, “*Estudo de Oportunidade de Implantação de uma Indústria de Eletrolisadores no Brasil: Fundamentos Conceituais de Eletrólise*”, Relatório Final, P-7934, FINEP, Dezembro, 1980

SHAYANI, R.A. et all. Políticas públicas para a energia. V CBPE - Congresso brasileiro de planejamento energético, 2006.

SILVA, E. P. “*Introdução a Tecnologia e Economia do Hidrogênio*”, Editora da UNICAMP, 1991.

SILVA, E.P.; CAVALIERO, C. K. N, Regulação energética e meio ambiente: propostas para a região amazônica isolada, Campinas, NIPE, UNICAMP, 2001.

SOLARBUZZ. Relatório anual da indústria solar fotovoltaica. Disponível em: www.solarbuzz.com. Acesso em 29/06/2006.

SOUZA, R. C. R., Planejamento o suprimento de eletricidade dos sistemas isolados na Região Amazônica: uma abordagem multiobjetiva, FEM – UNICAMP, Tese de Doutorado, 2000.

SMA AMÉRICA INC. Catálogo de produtos. Disponível em www.sma-america.com. Acesso em 10/09/2007.

TEIXEIRA, A.F; CAVALIERO, C.K.N., A Geração de Energia Elétrica em um Modelo de Desenvolvimento Endógeno. Campinas. Agrener, 2006.

TIBA, C. *et al*, “Atlas Solarimétrico do Brasil: Banco de dados terrestres”, UFPE, Recife/PE, 2000.

TOLMASQUIM, M.T., Fontes Renováveis de Energia no Brasil, CENERGIA, 2003.

ULLEBERG. O, The importance of control strategies in PV-hydrogen systems. Solar Energy v.76, 2004.

ULLMANN'S; “Hydrogen” in “Encyclopedia of Industrial Chemistry”; v.A13; pp. 297-443; Federal Republic of Germany; 1989.

UNIPOWER, Manual técnico: Bateria Chumbo-Ácida Regulada por Vávuia, 2000.

VINCENT, C. A., Scrosati, B., Lazzari, M. and Bonino, F., Modern Batteries: An introduction to electrochemical power sources. pp. 2-14, Published in Great Britain, 1986.

WENDT, H.; PLZAK, H.; “Hydrogen Production by Water Electrolysis”; Kerntechnik; v.56 (1); 22-8; 1991.

ZWEIBEL, K “Thin film PV manufacturing: Materials costs and their optimization”, Solar Energy Materials & Solar Cells, 63, pg. 375-386, 2000.

Anexos

Anexo I - Diagrama completo da planilha de cálculo para o segundo dia de operação do sistema com baterias.

Baterias

| | |
|-----------------------------|------|
| No baterias | 66 |
| Tensão (V) | 12 |
| Carga Máx (Ah) | 100 |
| Profund. Descarga máx.% | 70% |
| Autonomia (dias) | 5 |
| Carga Max (kWh) | 79,2 |
| Carga Min (kWh) | 55,4 |
| Eficiência p/ armazenamento | 80% |
| Carga Max Disponível (kWh) | 23,8 |

Painéis Fotov.

| | |
|-------------------|-------|
| No painéis | 24 |
| Energia pico (kW) | 0,130 |
| Energia (kWh) | 3,1 |
| Eficiência | 0,13 |

| | |
|------------------------------|-----|
| Eficiência do Control. Carga | 90% |
| Eficiência do Inversor | 95% |

| Dia_2 | Carga Disponível (+) (kWh) | | | | | Carga Demandada (-) (kWh) | | | | | Balanco de Cargas (kWh) | | | Energia desperd. | | |
|--------------------|----------------------------|-----------------|---------------|-------------------|-----------------|---------------------------|--------|---------|--------|--------|-------------------------------------|---|---|------------------|---------------------|--------------|
| | Energia Solar | Painel Unitário | Painel FV | Controlador Carga | Bateria Inicial | Contra. Carga + Bateria | Telev. | Refrig. | Lâmp. | Outros | Demanda Carga, por hora c/inverso r | Contra Carga + Demanda >0 FV dá conta, apenas 80% pode ir para Bat <0 FV não é suficiente | Contra Carga + Demanda + Bat >0 FV+Bat dão conta-> há energia desperdiçada <0 FV+Bat não dão conta-> ajustar demanda real | | Bateria Final (kWh) | |
| 00:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 50,349 | 50,349 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 50,085 | 50,085 | 0,000 | |
| 01:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 50,085 | 50,085 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 49,822 | 49,822 | 0,000 | |
| 02:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 49,822 | 49,822 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 49,559 | 49,559 | 0,000 | |
| 03:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 49,559 | 49,559 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 49,296 | 49,296 | 0,000 | |
| 04:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 49,296 | 49,296 | -0,250 | -0,250 | -0,500 | -0,100 | -0,895 | -0,895 | 48,401 | 48,401 | 0,000 | |
| 05:00 | 0,079 | 0,010 | 0,248 | 0,223 | 48,401 | 48,624 | -0,250 | -0,250 | -0,500 | -0,100 | -0,895 | -0,672 | 47,730 | 47,730 | 0,000 | |
| 06:00 | 0,234 | 0,030 | 0,731 | 0,658 | 47,730 | 48,387 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,316 | 48,045 | 48,045 | 0,000 | |
| 07:00 | 0,373 | 0,049 | 1,164 | 1,048 | 48,045 | 49,093 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,628 | 48,673 | 48,673 | 0,000 | |
| 08:00 | 0,487 | 0,063 | 1,518 | 1,366 | 48,673 | 50,039 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,882 | 49,556 | 49,556 | 0,000 | |
| 09:00 | 0,567 | 0,074 | 1,768 | 1,591 | 49,556 | 51,147 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 1,063 | 50,618 | 50,618 | 0,000 | |
| 10:00 | 0,608 | 0,079 | 1,898 | 1,708 | 50,618 | 52,326 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 1,156 | 51,774 | 51,774 | 0,000 | |
| 11:00 | 0,608 | 0,079 | 1,898 | 1,708 | 51,774 | 53,482 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 1,156 | 52,930 | 52,930 | 0,000 | |
| 12:00 | 0,567 | 0,074 | 1,768 | 1,591 | 52,930 | 54,521 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 1,063 | 53,992 | 53,992 | 0,000 | |
| 13:00 | 0,487 | 0,063 | 1,518 | 1,366 | 53,992 | 55,358 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,882 | 54,875 | 54,875 | 0,000 | |
| 14:00 | 0,373 | 0,049 | 1,164 | 1,048 | 54,875 | 55,923 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,628 | 55,502 | 55,502 | 0,062 | |
| 15:00 | 0,234 | 0,030 | 0,731 | 0,658 | 55,440 | 56,098 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,316 | 55,756 | 55,440 | 0,316 | |
| 16:00 | 0,079 | 0,010 | 0,248 | 0,223 | 55,440 | 55,663 | -0,250 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | -0,040 | 55,400 | 55,400 | 0,000 | |
| 17:00 | 0,057 | 0,007 | 0,177 | 0,159 | 55,400 | 55,559 | -0,250 | -0,250 | -1,053 | -0,500 | -1,053 | -0,893 | 54,507 | 54,507 | 0,000 | |
| 18:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 54,507 | 54,507 | -0,250 | -0,250 | -1,053 | -0,500 | -1,053 | -0,893 | 53,454 | 53,454 | 0,000 | |
| 19:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 53,454 | 53,454 | -0,250 | -0,250 | -1,158 | -0,500 | -1,158 | -1,158 | 52,296 | 52,296 | 0,000 | |
| 20:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 52,296 | 52,296 | -0,250 | -0,250 | -1,158 | -0,500 | -1,158 | -1,158 | 51,138 | 51,138 | 0,000 | |
| 21:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 51,138 | 51,138 | -0,250 | -0,250 | -1,158 | -0,500 | -1,158 | -1,158 | 50,875 | 50,875 | 0,000 | |
| 22:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 50,875 | 50,875 | -0,250 | -0,250 | -1,158 | -0,500 | -1,158 | -1,158 | 50,612 | 50,612 | 0,000 | |
| 23:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 50,612 | 50,612 | -0,250 | -0,250 | -1,158 | -0,500 | -1,158 | -1,158 | 50,349 | 50,349 | 0,000 | |
| Total (24h) | 4,753 | 0,618 | 14,831 | 13,348 | | | | | | | | | | | | 0,378 |

0,378

0,378

-10,947

13,348

14,831

0,618

4,753

Anexo II - Diagrama completo da planilha de cálculo para o segundo dia de operação do sistema a hidrogênio.

Reservatório H2

| | |
|------------------------|-----------|
| Volume (m3) | 5 |
| Pressão Máxima (bar) | 10 |
| Volume max de gás (m3) | 50 |

Painéis Fotov.

| | |
|---------------------|--------------|
| No painéis | 58 |
| Potência pico(kW) | 0,130 |
| Eficiência | 13% |
| Potência total (kW) | 7,540 |

Célula a Combustível PEM

| | |
|-----------------------------|-------------|
| Potência (W) | 3000 |
| Consumo H2 (m3/kWh) | 0,75 |
| Pressão min. Op. (bar, abs) | 2,00 |

Eletrolisador

| | |
|----------------------------|------------|
| Pressão (bar) | 10 |
| Eficiência | 80% |
| Quant. Max H2 Prod. (m3) | 1 |
| Energia Min Operação (kWh) | 1 |
| Energia Max Operação (kWh) | 5 |

| | |
|------------------------|------------|
| Eficiência do Inversor | 95% |
|------------------------|------------|

| Dia_2 | Carga Disponível (+) (kWh) | | | | | | | | | | Carga Demandada (-) (kWh) | | | | | Balanço de Cargas (kWh) | | Energia desperd. |
|-------------|----------------------------|-----------------|-----------------|---|--|------------------------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------|----------------------|---------------------------|----------------------|-------------------------------------|---|--|-------------------------|--|------------------|
| | Energia Solar (kWh) | Painel Unitário | Painel FV Total | Energia disponível do Eletrolisador (kWh) | Energia Utilizada pelo eletrolisador (kWh) | H2 Possível de Produzir (m3) | H2 no reservatório (m3) | Pressão Reservatório (bar, abs) | Consumo H2 (m3) | Célula a Combustível | Telev. | Refrig. Lâmp. Outros | Demanda Carga, por hora c/inverso r | Painel FV + Demanda >0 FV dá conta, excedente pode ir para ELT <0 FV não é suficiente | Painel FV + CaC + Demanda >0 FV+CaC dão conta -> pode haver energia desperdiçada <0 FV+CaC não dão conta -> ajustar demanda real | Energia desperd. | | |
| 00:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,610 | 9,322 | -0,197 | -0,263 | | -0,250 | -0,263 | -0,263 | 0,000 | 0,000 | | |
| 01:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,413 | 9,283 | -0,197 | -0,263 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,000 | 0,000 | | |
| 02:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,216 | 9,243 | -0,197 | -0,263 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,000 | 0,000 | | |
| 03:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,018 | 9,204 | -0,197 | -0,263 | -0,250 | -0,263 | -0,263 | -0,263 | 0,000 | 0,000 | | |
| 04:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 45,821 | 9,164 | -0,197 | -0,263 | -0,250 | -0,100 | -0,895 | -0,895 | 0,000 | 0,000 | | |
| 05:00 | 0,079 | 0,010 | 0,599 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 45,150 | 9,030 | -0,222 | -0,296 | -0,250 | -0,100 | -0,895 | -0,895 | 0,000 | 0,000 | | |
| 06:00 | 0,234 | 0,030 | 1,767 | 1,503 | 1,503 | 0,247 | 45,174 | 9,035 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 1,503 | 1,503 | 0,000 | | |
| 07:00 | 0,373 | 0,049 | 2,814 | 2,550 | 2,550 | 0,418 | 45,593 | 9,119 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 2,550 | 2,550 | 0,000 | | |
| 08:00 | 0,487 | 0,063 | 3,669 | 3,405 | 3,405 | 0,558 | 46,151 | 9,230 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 3,405 | 3,405 | 0,000 | | |
| 09:00 | 0,567 | 0,074 | 4,273 | 4,010 | 4,010 | 0,658 | 46,809 | 9,362 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 4,010 | 4,010 | 0,000 | | |
| 10:00 | 0,608 | 0,079 | 4,586 | 4,323 | 4,323 | 0,709 | 47,518 | 9,504 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 4,323 | 4,323 | 0,000 | | |
| 11:00 | 0,608 | 0,079 | 4,586 | 4,323 | 4,323 | 0,709 | 48,227 | 9,645 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 4,323 | 4,323 | 0,000 | | |
| 12:00 | 0,567 | 0,074 | 4,273 | 4,010 | 4,010 | 0,658 | 48,884 | 9,777 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 4,010 | 4,010 | 0,000 | | |
| 13:00 | 0,487 | 0,063 | 3,669 | 3,405 | 3,405 | 0,558 | 49,443 | 9,889 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 3,405 | 3,405 | 0,000 | | |
| 14:00 | 0,373 | 0,049 | 2,814 | 2,550 | 2,550 | 0,418 | 49,861 | 9,972 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 2,550 | 2,550 | 0,000 | | |
| 15:00 | 0,234 | 0,030 | 1,767 | 1,503 | 0,847 | 0,247 | 50,000 | 10,000 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 1,503 | 1,503 | 0,657 | | |
| 16:00 | 0,079 | 0,010 | 0,599 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 50,000 | 10,000 | 0,000 | 0,000 | -0,250 | | -0,263 | 0,336 | 0,336 | 0,336 | | |
| 17:00 | 0,057 | 0,007 | 0,428 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 50,000 | 10,000 | -0,469 | -0,625 | -0,250 | -0,500 | -1,053 | -0,625 | 0,000 | 0,000 | | |
| 18:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 49,531 | 9,906 | -0,789 | -1,053 | -0,250 | -0,500 | -1,053 | -1,053 | 0,000 | 0,000 | | |
| 19:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 48,742 | 9,748 | -0,868 | -1,158 | -0,250 | -0,500 | -1,158 | -1,158 | 0,000 | 0,000 | | |
| 20:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 47,874 | 9,575 | -0,868 | -1,158 | -0,250 | -0,500 | -1,158 | -1,158 | 0,000 | 0,000 | | |
| 21:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 47,005 | 9,401 | -0,197 | -0,263 | -0,250 | | -0,263 | -0,263 | 0,000 | 0,000 | | |
| 22:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,808 | 9,362 | -0,197 | -0,263 | -0,250 | | -0,263 | -0,263 | 0,000 | 0,000 | | |
| 23:00 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,000 | 46,610 | 9,322 | -0,197 | -0,263 | -0,250 | | -0,263 | -0,263 | 0,000 | 0,000 | | |
| Total (24h) | 4,753 | 0,618 | 35,941 | 31,584 | 30,928 | 5,180 | 46,610 | 9,322 | -5,269 | -7,026 | -10,947 | | -10,947 | 24,894 | | 0,992 | | |

Anexo III - Cálculo do custo da energia elétrica para o sistema fotovoltaico com armazenamento em baterias.

Suposições Básicas

| | |
|----------------------|----------------|
| Taxa de desconto | 10% |
| Taxa de inflação | 3,50% |
| Potencia Inst. (kW) | 3,1 |
| Produção anual (kWh) | 4077,21 |
| Custo EE (R\$/kWh) | 4,19 |

Capital inicial

| | |
|-------------------------|----------------------|
| Painel Fotovoltaico | R\$ 37.920,00 |
| Baterias 100Ah | R\$ 29.700,00 |
| Controlador Carga kW | R\$ 675,00 |
| Inversor kW | R\$ 1.300,00 |
| Estrutura para montagem | R\$ 7.584,00 |
| Total | R\$ 77.179,00 |

| Despesas | ANOS | 4 | 8 | 10 | 12 | 16 |
|-----------------------|------|------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|
| Troca Inversores | | | | 1.833,78 | | |
| Troca Controlador | | | | 952,15 | | |
| Troca de Baterias | | 34.081,43 | 39.109,23 | | 44.878,74 | 51.499,39 |
| Operação e Manutenção | | | | | | |
| TOTAL | | 34.081,43 | 39.109,23 | 2.785,93 | 44.878,74 | 51.499,39 |

Receitas

| | | | | | | |
|---------------------------------|--|--------------------|--------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| Prod. Ener. Elét. (kWh) | | 4.077,21 | 4.077,21 | 4.077,21 | 4.077,21 | 4.077,21 |
| Prod.EE (kWh) x Custo (R\$/kWh) | | 17.064,94 | 17.064,94 | 17.064,94 | 17.064,94 | 17.064,94 |
| Fluxo de caixa | | (17.016,50) | (22.044,29) | 14.279,01 | (27.813,80) | (34.434,45) |

Anexo IV - Cálculo do custo da energia elétrica para o sistema fotovoltaico com armazenamento em hidrogênio.

Suposições Básicas

| | |
|---------------------------|----------------|
| Taxa de desconto | 10% |
| Taxa de inflação | 3,50% |
| Potencia Instalação (kW) | 7,5 |
| Produção anual (kWh) | 4357,98 |
| Custo EE Gerada (R\$/kWh) | 5,88 |

Capital inicial

| | |
|---------------------------|-----------------------|
| Painel Fotovoltaico | R\$ 91.640,00 |
| Eletrolisador | R\$ 32.760,00 |
| Célula a Combustível 3 kW | R\$ 21.000,00 |
| Reservatório | R\$ 10.000,00 |
| Inversor kW | R\$ 1.300,00 |
| CLP | R\$ 10.000,00 |
| Estrutura para montagem | R\$ 9.164,00 |
| Total | R\$ 175.864,00 |

| Depesas | ANOS | 5 | 6 | 10 | 12 | 15 | 18 | 20 |
|----------------------------|------|-------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|----------------------|---------------------|
| Troca Inversores | | | | R\$ 1.833,78 | | | | |
| Troca Célula a Combustível | | | R\$ 25.814,36 | | R\$ 31.732,44 | | R\$ 39.007,27 | |
| O&M Eletrolisador | | | R\$ 3.931,20 | R\$ 2.620,80 | R\$ 1.310,40 | | R\$ 3.931,20 | R\$ 1.310,40 |
| O&M CaC | | | R\$ 2.520,00 | R\$ 1.680,00 | R\$ 840,00 | | R\$ 2.520,00 | R\$ 840,00 |
| O&M Reservatório | | R\$ 500,00 | | R\$ 500,00 | | R\$ 500,00 | | R\$ 500,00 |
| Total | | R\$ 500,00 | R\$ 32.265,56 | R\$ 6.634,58 | R\$ 33.882,84 | R\$ 500,00 | R\$ 45.458,47 | R\$ 2.650,40 |

Ganho/Custo poupados

| | | | | | | | |
|---------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Produção Energia Elétrica (kWh) | 21789,22 | 4357,98 | 17431,94 | 8715,97 | 13073,95 | 13073,95 | 8715,97 |
| Prod.EE (kWh) x Custo (R\$/kWh) | R\$ 128.120,61 | R\$ 25.624,92 | R\$ 102.499,81 | R\$ 51.249,90 | R\$ 76.874,83 | R\$ 76.874,83 | R\$ 51.249,90 |
| Fluxo caixa | R\$ 127.620,61 | R\$ (6.640,64) | R\$ 95.865,23 | R\$ 17.367,06 | R\$ 76.374,83 | R\$ 31.416,35 | R\$ 48.599,50 |