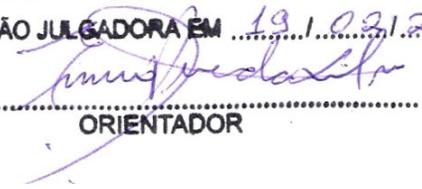


ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA POR Daniel Gabriel
Lopes..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM 19.1.02.2009

.....
ORIENTADOR

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

**Análise Técnica e Econômica da Inserção da
Tecnologia de Produção de Hidrogênio a Partir
da Reforma de Etanol para Geração de Energia
Elétrica com Células a Combustível**

Autor: **Daniel Gabriel Lopes**
Orientador: **Prof. Dr. Ennio Peres da Silva.**

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

Análise Técnica e Econômica da Inserção da Tecnologia de Produção de Hidrogênio a Partir da Reforma de Etanol para Geração de Energia Elétrica com Células a Combustível

Autor: **Daniel Gabriel Lopes**

Orientador: **Prof. Dr. Ennio Peres da Silva**

Curso: Planejamento de Sistemas Energéticos.

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

Campinas, 2009
SP - Brasil

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

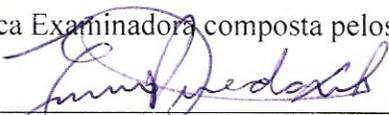
TESE DE DOUTORADO

**Análise Técnica e Econômica da Inserção da
Tecnologia de Produção de Hidrogênio a Partir
da Reforma de Etanol para Geração de Energia
Elétrica com Células a Combustível**

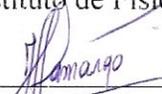
Autor: **Daniel Gabriel Lopes**

Orientador: **Prof. Dr. Ennio Peres da Silva**

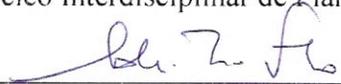
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Tese



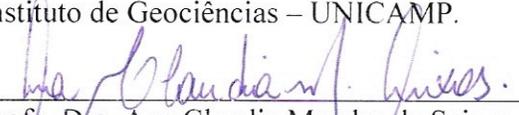
Prof. Dr. Ennio Peres da Silva, Presidente
Instituto de Física “Gleb Wataghin” – UNICAMP.



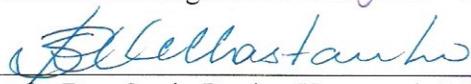
Dr. João Carlos Camargo
Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético – UNICAMP.



Prof. Dr. André Tosi Furtado
Instituto de Geociências – UNICAMP.



Profa. Dra. Ana Cláudia Mendes de Seixas
Faculdade de Engenharia Ambiental – PUC Campinas.



Profa. Dra. Sonia Regina Homem de Mello Castanho
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – USP.

Campinas, 19 de fevereiro de 2009.

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais Antonio e Valeria.

Agradecimentos

Ao Professor Ennio pela orientação e confiança depositadas durante todos os anos de trabalho e pela dedicação em aproveitar meus pontos fortes e tentar lapidar meus pontos fracos, inclusive durante a realização desta tese.

Ao amigo e colega de profissão Dr. João Camargo, pela co-orientação, mesmo que informal, pela paciência e dedicação em me mostrar o caminho para a melhor qualidade da tese.

Ao pessoal do Laboratório de Hidrogênio, especialmente a Ana Resende, Antônio, Augusto, André Furlan, Claudemir, Cristiano, Edgar, Edison, Fernando, Mirian, Newton Pimenta, Paulo e Pedro, amigos indispensáveis para a realização desta tese.

Aos meus irmãos Davi e Antonio Filho, que sempre me apoiaram e participaram diretamente da conquista dos meus sonhos.

A Sara, companheira incansável e sempre presente com seu carinho e apoio, principalmente nos momentos mais difíceis.

Aos amigos, Edson, Ester, Fabiana, André Frazão, Amabile, Fernanda, Luciano, Webster, Elizângela, Odacir, David Guedes e Agnaldo Martins, pelo suporte emocional, pela motivação constante e pelo apoio incondicional.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro.

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

*“Tudo o que um sonho precisa para ser realizado é
alguém que acredite que ele possa ser realizado.”*
Roberto Shinyashiki

Resumo

LOPES, Daniel Gabriel, *Análise técnica e econômica da inserção da tecnologia de produção de hidrogênio a partir da reforma de Etanol para a geração de energia elétrica com células a combustível*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 110 p. Tese (Doutorado).

Este trabalho apresenta uma análise técnica e econômica da utilização do processo de reforma de etanol para produção de hidrogênio e da utilização deste hidrogênio para produção de energia elétrica em uma célula a combustível do tipo PEMFC de 5,0 kW. A análise técnica se fundamenta em dados experimentais, inéditos, obtidos do protótipo de um reformador de etanol desenvolvido a partir de uma parceria entre o Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP e a empresa Hytron, levando-se em consideração as principais características do funcionamento real do que representa o estado da arte desta tecnologia no Brasil. A metodologia utilizada para realização da análise econômica foi desenvolvida para se determinar os valores de referência relativos ao custo do hidrogênio produzido (30,34 R\$/kg) e da energia elétrica gerada (2,30 R\$/kWh) e indicar metas para a inserção futura destas tecnologias. Os resultados obtidos permitiram que se concluísse que os atuais custos de geração do hidrogênio produzido pelo protótipo do reformador de etanol são economicamente competitivos, assim como o custo de geração da energia elétrica com utilização deste hidrogênio na célula a combustível quando comparado com a aplicação de outras tecnologias alternativas, mas não com os preços da eletricidade da rede de distribuição do Sistema Interligado brasileiro.

Palavras Chave: Análise técnica e econômica; hidrogênio; célula a combustível; reforma de etanol; planejamento energético, energia renovável e alternativa.

Abstract

LOPES, Daniel Gabriel, *Technical and economical analysis of the introduction of the technology of hydrogen production from ethanol reforming for the generation of electric energy with fuel cells*, Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008. 110 p. Thesis (Doctorate).

This work presents a technical and economical analysis of the use of the technology of hydrogen production by the process of autothermal reforming of ethanol and the use of the hydrogen for the production of electric energy in a 5 kW PEMFC. The technical analysis is founded in unpublished experimental data obtained from the prototype of a ethanol reformer developed by the Hydrogen Laboratory at UNICAMP and by Hytron, taking into account the main characteristics of its real functioning which represents the state of the art of this technology developed in Brazil. The methodology applied for the economical analysis was developed in order to determine the reference values concerning the cost (30,34 R\$/kg) of the hydrogen produced and the electric energy generated (2,30 R\$/kWh), and to indicate the milestones for the future introduction of these technologies. The results led to the conclusion that the present costs of hydrogen production by the prototype of the ethanol reformer are lower than the present prices practiced in the market, and that the cost of the electric energy generation with the hydrogen in a PEMFC is lower than those obtained by the use of other alternative technologies, except when compared to grid-connected power system in Brazil.

Keywords: Technical and economical analysis; hydrogen; fuel cell; ethanol reforming; energy resource planning, renewable and alternative energy.

Índice

Dedicatória	iv
Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract	viii
Índice	ix
Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xiii
Nomenclatura	xiv
Abreviações	xv
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Justificativa.....	5
1.2 Objetivos	7
1.3 Estrutura da Tese	7
Capítulo 2 Revisão Bibliográfica	9
2.1 A Produção do Hidrogênio.....	9
2.2 Aplicações Energéticas do Hidrogênio	12
2.2.1 Aplicações Estacionárias	13
2.2.2 Aplicações Veiculares	16
2.3 A Reforma de Etanol.....	19
2.3.1 Considerações Teóricas sobre o Reformador de Etanol LH2/Hytron.....	24
2.4 Análise Econômica.....	27
2.4.1 Análise Econômica de Investimento	27
2.4.2 Fluxo de Caixa	28
2.4.3 Valor Presente Líquido (VPL)	28
2.4.4 Taxa Interna de Retorno (TIR).....	30
2.4.5 Payback	30
2.4.6 Incertezas e riscos.....	31
2.4.7 Valores Comparativos Para Tecnologias de Produção de Hidrogênio e Geração de Energia Elétrica.	31
Capítulo 3 Metodologia	37
3.1 Descrição das Etapas Para Elaboração da Tese.	38
3.2 Metodologia Utilizada Para Elaboração da Análise Econômica do Reformador.	41
Capítulo 4 Materiais e Métodos	43

4.1	Visão Geral sobre os Sistemas Utilizados para o Fornecimento de Energia Elétrica a partir da Reforma de Etanol e Célula a Combustível.....	43
4.2	O Reformador de Etanol.....	46
4.2.1	Módulo de Processamento do Combustível.....	46
4.2.2	Módulo de Tratamento do Gás de Síntese.....	47
4.2.3	Módulo de Purificação.....	48
4.2.4	Módulo de Controle.....	50
4.3	Experimentos Realizados.....	50
4.3.1	Reformador de Etanol.....	50
4.3.2	Célula a Combustível.....	52
4.4	Considerações Finais.....	55
Capítulo 5	Análise Econômica.....	57
5.1	Análise Econômica do Sistema de Reforma Autotérmica do Etanol.....	57
5.1.1	Descrição dos Parâmetros do Sistema de Reforma ATR do Etanol.....	57
5.1.2	Consumo de Etanol.....	59
5.1.3	Consumo de Energia Elétrica.....	60
5.1.4	Custo com Material de Reposição.....	60
5.1.5	Fatores de Capacidade e Disponibilidade.....	62
5.1.6	Custo com o Etanol e Energia Elétrica.....	63
5.1.7	Custo anual com Manutenção e Operação.....	64
5.1.8	Cálculo do Custo de Produção de H ₂ do Reformador de Etanol.....	65
5.2	Análise Econômica da Energia Elétrica Produzida pelo Reformador de Etanol Acoplado à Célula a Combustível.....	67
5.2.1	Descrição dos Parâmetros do Sistema de Reforma ATR do Etanol.....	67
5.2.2	Custo com o Hidrogênio Gerado Pelo Reformador de Etanol.....	67
5.2.3	Custo com a Troca do Banco de Baterias.....	69
5.2.4	Custo com Manutenção e Operação.....	69
5.2.5	Cálculo do Custo de Produção da Energia Elétrica Gerada.....	70
Capítulo 6	Análise dos Resultados.....	73
6.1	Análise Comparativa do Custo do Hidrogênio Produzido Pelo Reformador de Etanol.....	73
6.2	Análise Comparativa do Custo da Energia Elétrica Produzida.....	77
6.3	Análise de sensibilidade.....	78
Capítulo 7	Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	81
7.1	Conclusões.....	81
7.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros.....	84
Capítulo 8	Referências Bibliográficas.....	85
Anexos	90

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Protótipo do reformador de etanol, para célula a combustível do tipo PEMFC de 500 W . Fonte: CAMARGO, 2004.	4
Figura 1.2 – Protótipo do reformador de etanol, para célula a combustível do tipo PEMFC de 5.000 W.	5
Figura 2.1 – Fontes, processos de produção e tecnologias de conversão e utilização do hidrogênio para fins energéticos. Fonte: CENEH, 2004.	10
Figura 2.2 – Unidade estacionária MCFC de 300 kW da <i>Full Cell Energy</i> . Fonte: (Fuel Cell Energy, 2007).	14
Figura 2.3 – Unidade estacionária SOFC de 220 kW da <i>Siemens</i> . Fonte: (Siemens, 2007).	14
Figura 2.4 – Sistema de <i>back-up</i> da empresa Plug Power. Fonte: (Plug Power, 2007).	15
Figura 2.5 – Distribuição de protótipos por montadora. Fonte: (Fuel Cell, 2007-b).	17
Figura 2.6 – (a) Protótipo FCX da Honda; (b) Ônibus Citaro da Mercedes-Benz. Fontes: (Honda, 2007; Evobus, 2007).	17
Figura 2.7 – Veículo de passeio Honda Clarity. Fonte: (HONDA, 2007).	18
Figura 2.8 – Representação gráfica do fluxo de caixa. Fonte: Elaboração própria.	28
Figura 3.1 – Fluxograma comparativo entre as atividades desenvolvidas em paralelo para realização do projeto de pesquisa do reformador de etanol e o desenvolvimento desta Tese. Fonte: Elaboração própria.	38
Figura 4.1 – Sistemas necessários para a produção e utilização de energia elétrica a partir da reforma de etanol e célula a combustível. Fonte: Elaboração própria.	44
Figura 4.2 – Sistemas necessários para a produção e utilização de energia elétrica a partir da reforma de etanol e célula a combustível: (a) Reformador de Etanol (b) Célula a combustível, inversor CC/CA e banco de baterias. Fonte: Elaboração própria.	45
Figura 4.3 – Sub-sistemas do reformador de etanol. Fonte: Elaboração própria.	46
Figura 4.4 – Resfriador-condensador do gás de síntese a alta pressão (esquerda) e compressor para o gás de síntese (direita). Fonte: Elaboração própria.	49
Figura 4.5 – (a) Potência desenvolvida pelo <i>stack</i> em ensaios de regime transiente e regime permanente; (b) Potência desenvolvida pelo conversor DC/DC em ensaios de regime transiente e regime permanente e (c) Vazão equivalente de hidrogênio para cada um dos valores de potência desenvolvidos. Fonte: Elaboração própria.	53
Figura 4.6 – (a) Eficiência do acoplamento do <i>stack</i> com o conversor DC/DC e deste como inversor de frequência; (b) Eficiências globais de geração de energia elétrica. Fonte: Elaboração própria.	54

Figura 5.1 – Comparação percentual dos valores apresentados no fluxo de caixa da tabela 5.4. Fonte: Elaboração própria.	65
Figura 5.2 – Comparação percentual dos valores apresentados no fluxo de caixa da tabela 5.8. Fonte: Elaboração própria.	70
Figura 6.1 – Análise comparativa do custo do H ₂ produzido pelo reformador de etanol.	74
Figura 6.2 –TIR para o preço de mercado do H ₂ e preço de H ₂ produzido pelo reformador de etanol para TIR de 100, 75, 50 e 25 %. Fonte: Elaboração própria.	75
Figura 6.3 –Período de <i>payback</i> para a TIR relativa ao preço de mercado do H ₂ e para TIR de 100, 75, 50 e 25 %. Fonte: Elaboração própria.	76
Figura 6.4 – Análise comparativa do custo da energia elétrica produzida. Fonte: Elaboração própria.	77
Figura 6.5 – Análise de sensibilidade para o custo do H ₂ produzido pelo reformador de etanol. Fonte: Elaboração própria.	78
Figura 6.6 – Análise de sensibilidade para o custo da energia elétrica produzida. Fonte: Elaboração própria.	79

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Produção mundial de hidrogênio para grandes consumidores segundo as fontes utilizadas.....	11
Tabela 2.2 – Principais processos de geração de hidrogênio.	21
Tabela 2.3 – Custo do hidrogênio produzido por uma EAH de $56,7 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de H_2 (2.000 scfh). ...	34
Tabela 2.4 – Custo do hidrogênio para uma EAH de $453 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ de H_2 (16.000 scfh).....	35
Tabela 4.1 – Composição do gás de síntese direcionado para o módulo de purificação (% em volume).....	51
Tabela 4.2 – Composição do hidrogênio na saída do módulo de purificação ($\mu\text{mol/mol}$).	52
Tabela 4.3 – Consumo dos insumos no reformador.....	52
Tabela 5.1 – Características técnicas solicitadas para o reformador de etanol.	58
Tabela 5.2 – Preço do reformador de etanol pela empresa Hytron.	58
Tabela 5.3 – Custo de material de reposição do sistema.	62
Tabela 5.4 – Custo total do reformador de etanol de acordo com valor presente do fluxo de caixa para um período de 10 anos.....	64
Tabela 5.5 – Valores adotados para o cálculo do fluxo de caixa.	65
Tabela 5.6 – Resultados do custo do hidrogênio a partir do etanol.	66
Tabela 5.7 – Composição do custo do hidrogênio gerado pelo reformador de etanol (valores atualizados pela taxa de desconto de 10% a.a.).....	66
Tabela 5.8 – Custo com o investimento inicial dos componentes para a geração de energia elétrica.	67
Tabela 5.9 – Custo do sistema de geração de energia elétrica de acordo com o fluxo de caixa (valores atualizados em 10% a.a.).....	69
Tabela 5.10 – Resultados do Custo da Energia Elétrica.	71
Tabela 5.11 – Composição do custo da Energia Elétrica.	71

Nomenclatura

CA_{EE}	Custo anual com energia elétrica	R\$
CA_{etanol}	Custo anual com etanol	R\$
CC_{ATR}	Custo de manutenção do catalisador ATR	R\$
CC_{LTS}	Custo de manutenção catalisador LTS	R\$
CH_{CaC}	Custo anual com a utilização do H ₂ para geração de energia elétrica anual pela célula a combustível	R\$
C_{H2}	Consumo máximo de H ₂ por hora	kg.h ⁻¹
Cm_{EE}	Consumo máximo de energia elétrica por hora	kWh
Cm_{etanol}	Consumo máximo de etanol por hora	L.h ⁻¹
$Cpt_{água}$	Custo com o pré-tratamento da água de processo	R\$
Cpt_{etanol}	Custo com o pré-tratamento do etanol	R\$
Ct_{EE}	Consumo total de energia elétrica em um ano	kWh
Ct_{etanol}	Consumo total de etanol em um ano	L
FP_{ee}	Fator de geração de energia elétrica pela utilização do reformador de etanol acoplado a célula a combustível	kWh
GEE_{CaC}	Geração de energia elétrica anual pela célula a combustível	kWh (ano)
P_{H2}	Produção mássica de H ₂ por hora	kg.h ⁻¹

Abreviações

ATR	<i>Autothermal Reforming</i> (Reforma Autotérmica)
BEM	Balanco Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CaC	Célula a Combustível
CENEH	Centro Nacional de Referencia em Energia do Hidrogênio
CEPEA	Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada
DFMA	<i>Desing for Manufacturing and Assembly</i>
DOE	<i>U.S Department of Energy</i> (Departamento de Energia dos EUA)
EAH	Estação de Abastecimento com Hidrogênio
FC	Fluxo de Caixa
GS	Gás de Síntese
IPHE	<i>International Partnership for the Hydrogen Economy</i>
LTS	<i>Low Temperature Shift</i> (<i>shift</i> de Baixa Temperatura)
MCI	Motor de Combustão Interna
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
MME	Ministério de Minas e Energia
O&M	Operação e Manutenção
PEMFC	<i>Proton Exchange Membrane Fuel Cell</i>
POX	<i>Partial Oxidation</i> (Oxidação parcial)
PROH2	Programa Brasileiro de Ciência Tecnologia e Inovação para Economia do Hidrogênio
PSA	<i>Pressure Swing Adsorption</i> (Adsorção por Variação de Pressão)
RAE	Reforma Autotérmica de Etanol

SMR	<i>Steam Reforming</i>
SOFC	<i>Solid Oxid Fuel Cell</i> (Célula a Combustível de Oxido Sólido)
TIR	Taxa Interna de Retorno
VF	Valor Futuro
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido

Capítulo 1

Introdução

Atualmente, pode-se observar um crescimento no número de pesquisadores e especialistas que relacionam o aumento da emissão de gases de efeito estufa, como por exemplo, o dióxido de carbono (CO₂) e o metano (CH₄), ao aumento da temperatura média anual da biosfera do planeta, fenômeno conhecido como Aquecimento Global. Este fator, associado à redução das reservas de fontes fósseis de energia, ao aumento do preço do petróleo e da demanda energética mundial, principalmente nos países em desenvolvimento como o Brasil, Índia e China, têm incentivado a utilização de fontes renováveis de energia.

O elevado potencial das fontes renováveis no mundo evidencia a oportunidade em se utilizar fontes com menores impactos ambientais. Em particular no Brasil, onde o potencial hidráulico, solar e eólico são elevados, 77 % da energia elétrica produzida é proveniente de hidroeletricidade, BEN (2008) e o etanol da cana-de-açúcar é produzido a preços competitivos.

Este etanol já substitui hoje metade da gasolina que seria consumida no Brasil e seu custo é competitivo sem os subsídios que viabilizaram a implementação deste biocombustível no seu início. Isso foi conseguido em cerca de 30 anos a partir da criação do Proálcool, programa lançado no país em meados da década de 1970 para reduzir a dependência da importação de petróleo, (BNDES, 2008).

Nos Estados Unidos, grande produtor mundial de etanol com base no milho, o programa é mais recente e suas justificativas são a eliminação de aditivos na gasolina e a redução das

emissões de gases que provocam o aquecimento global. Nos países da Europa Ocidental, o etanol produzido do trigo e da beterraba também é usado. Nesses países, o custo do etanol é duas a quatro vezes mais elevado do que no Brasil e subsídios internos e barreiras alfandegárias protegem as indústrias locais, impedindo a importação de etanol do Brasil. Isso tem criado resistências de alguns grupos, que associam o etanol (e o biodiesel, produzido em quantidades menores) ao dilema da produção de alimentos versus combustíveis. Esse argumento não se sustenta quando se dá conta de que a produção de etanol no mundo, de cerca de 50 bilhões de litros por ano, usa 15 milhões de hectares de área, ou seja, 1% da área em uso pela agricultura no mundo, que é de 1,5 bilhões de hectares (BNDES, 2008).

Diversos países têm mostrado interesse no desenvolvimento da produção e no uso de etanol. Além de procurar cobrir suas próprias necessidades energéticas, em muitos casos busca-se constituir um mercado mundial para esse biocombustível, que aproxime países em condições de produzi-lo sustentavelmente do mercado de países potencialmente importadores, com vantagens para ambos. Na atualidade, tal mercado ainda é incipiente, mas as demandas crescentes por um combustível renovável e ambientalmente adequado, associadas ao potencial que o etanol de cana-de-açúcar apresenta para atender a critérios objetivos de sustentabilidade, sinalizam a existência de perspectivas interessantes.

Neste mesmo sentido, a aplicação da tecnologia do hidrogênio (H_2) é considerada por muitos especialistas como uma opção alternativa à utilização dos atuais combustíveis fósseis utilizados nos transportes, já que se trata de uma opção que apresenta baixíssimos impactos ambientais locais. Entretanto, o H_2 não é encontrado na natureza na quantidade necessária para sua utilização em aplicações energéticas, devendo ser produzido por algum processo, uma vez que ele se encontra normalmente ligado a algum outro elemento ou composto (APOLINÁRIO, 2008).

A utilização do hidrogênio (H_2) como um vetor energético produzido a partir de um biocombustível como o etanol ou utilizando a energia elétrica produzida a partir de fonte renováveis (hidráulica, eólica e solar fotovoltaica), transformando eletricidade em energia

transportável e armazenável, vem sendo avaliada como uma das formas mais eficientes e ambientalmente interessantes, quando associada à utilização de células a combustível.

Num cenário atual, anterior a esta perspectiva comercial futura da aplicação energética do H₂ em células a combustível, já são produzidos mundialmente por volta de 41 bilhões de m³ de H₂ por ano e este número está dobrando cada década (ADDISON, 2006), sendo os maiores responsáveis por este crescimento as refinarias de petróleo, que utilizam o H₂ para produzir combustíveis a partir do hidrocrackeamento do petróleo, a utilização do H₂ na fabricação de fertilizantes, na indústria alimentícia, no processo de fabricação de semicondutores, dentre outras. Sendo que, 95% deste hidrogênio são produzidos a partir de fontes fósseis (TOLMASQUIM, 2003).

O Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP (LH2), desde a década setenta do Século XX, vem pesquisando a aplicação energética do H₂. Em muitos trabalhos o objetivo foi indicar as fontes de energia primária adequadas para a produção de hidrogênio, em acordo com a realidade brasileira. De maneira específica, e em sintonia com a crescente preocupação mundial com os danos ambientais relacionados ao uso da maioria das fontes de energia empregadas na atualidade, os esforços se concentram na aplicação das fontes renováveis disponíveis no país.

Desde o final da década de 90, o LH2 vem realizando pesquisas relevantes no que se refere à implementação da economia do hidrogênio. Neste sentido, através de projetos de pesquisa e desenvolvimento, bem como de trabalhos acadêmicos, busca viabilizar as linhas de pesquisa em produção de hidrogênio a partir da reforma de etanol, reforma do gás natural e da eletrólise da água (utilizando as fontes solar eólica e hidrelétrica).

Dentro da linha de pesquisa em reforma de etanol, o LH2 concentrou inicialmente seus esforços em pesquisa de bancada, onde se pôde verificar experimentalmente a viabilidade técnica da produção de hidrogênio a partir deste bicomcombustível. Comprovada a viabilidade técnica, buscou ampliar a escala de seu experimento para o protótipo de um reformador de etanol, Figura 1.1, capaz de produzir hidrogênio com qualidade e quantidade necessárias para sua aplicação

numa célula a combustível do tipo PEMFC de 500 W. Os resultados obtidos a partir deste arranjo experimental podem ser observados em CAMARGO (2004).



Figura 1.1 – Protótipo do reformador de etanol, para célula a combustível do tipo PEMFC de 500 W . Fonte: CAMARGO, 2004.

Como foco no desenvolvimento de sistemas de produção de hidrogênio a partir da reforma de etanol, como uma alternativa para a utilização de hidrogênio e células a combustível em geração distribuída, continuou-se a linha de pesquisa com a proposta de ampliar em dez vezes a produção de hidrogênio do protótipo do reformador de etanol. Porém, para esta nova escala, seria necessário que o protótipo fosse concebido para que trabalhasse de forma autônoma, com o mínimo de intervenção humana em seu funcionamento.

Neste sentido, o LH2, em parceria com a empresa Hytron¹, vem desenvolvendo um protótipo de reformador de etanol (Figura 1.2), para produzir hidrogênio com qualidade e quantidade suficientes para sua aplicação em uma célula a combustível de 5.000 W. Tal desenvolvimento culminou nesta tese de doutorado, que apresenta além dos dados inéditos do funcionamento deste reformador, uma análise técnica e econômica do que representa o estado da arte desta tecnologia no Brasil.

¹ Hytron – Tecnologia em Hidrogênio. Empresa *spin-off* do Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP, criada em 2004, sediada em Campinas-SP. (www.hytron.com.br)



Figura 1.2 – Protótipo do reformador de etanol, para célula a combustível do tipo PEMFC de 5.000 W.

1.1 Justificativa

O Laboratório de Hidrogênio desenvolve a tecnologia de eletrólise da água desde sua criação, em 1975. Nesse período, muitos trabalhos (artigos, relatórios, dissertações e teses) foram publicados com resultados técnicos obtidos através das atividades de pesquisa e desenvolvimento realizadas no âmbito do LH2. Também diversos protótipos de eletrolisadores foram construídos, sendo que alguns encontram-se em operação. Com relação à produção de hidrogênio a partir da reforma de etanol (e também no caso do gás natural), essas pesquisas são bem mais recentes, iniciadas nos anos 90. Também nesse caso foram publicados inúmeros trabalhos, sem entretanto que tenham abordado de forma mais profunda os custos envolvidos, seja do sistema de reforma, seja do hidrogênio produzido e, menos ainda, do custo da energia elétrica a ser gerada através do emprego desse hidrogênio em células a combustível.

O LH2, em parceria com a empresa Hytron, vem desenvolvendo protótipos de reformadores para projetos de pesquisa e desenvolvimento, a custos variados, denotando a necessidade de avaliar com maior precisão os reais custos desses equipamentos. De fato, alguns projetos tiveram grandes dificuldades para serem conduzidos, em vista de estimativas equivocadas acerca dos custos reais dos sistemas projetados.

Cabe ainda mencionar que as intensas pesquisas que vêm sendo desenvolvidas nos principais países industrializados possuem metas bem definidas para os custos dos sistemas para produção de hidrogênio, para o custo final do hidrogênio produzido e também para a energia elétrica a ser gerada em aplicações estacionárias (geração distribuída). Por tudo isso, urge se conhecer no caso brasileiro, mais especificamente acerca da tecnologia desenvolvida no Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP, os valores atuais dessas grandezas, de forma a ser possível avaliar o estágio dessas tecnologias no país, bem como indicar valores de referência que possam ser utilizados nas estratégias de políticas científicas e tecnológicas dos órgãos do governo brasileiro.

De fato, este trabalho está inserido não apenas na pesquisa realizada no Laboratório de Hidrogênio, como também na sua participação no Programa Brasileiro de Ciência Tecnologia e Inovação para Economia do Hidrogênio (PROH2), especificamente na rede cooperativa de produção de hidrogênio. Nesta rede o LH2 responde como grupo de excelência na tecnologia de eletrólise da água, e como líder do grupo de engenharia e desenvolvimento de sistemas de produção de hidrogênio.

A esta atuação, realizada sob a coordenação do Ministério de Ciência e Tecnologia, é somada a participação direta do LH2 como consultor do Ministério de Minas e Energia na elaboração da política brasileira para a economia do hidrogênio. Tal política insere o Brasil como participante do IPHE (*International Partnership for the Hydrogen Economy*), junto a outros 15 países, para implantar a tecnologia do hidrogênio em sua utilização cotidiana prática.

1.2 Objetivos

Esta tese tem como objetivo geral determinar os valores do custo (R\$/kg) do hidrogênio produzido a partir do atual estágio tecnológico e econômico dos reformadores de etanol desenvolvidos em uma parceria entre o Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP e a Empresa Hytron e também determinar o custo da energia elétrica gerada (R\$/kWh) com a utilização desse hidrogênio em células a combustível do tipo PEMFC, para geração estacionária e distribuída de energia elétrica.

Os itens seguintes constituem objetivos específicos deste trabalho:

1. Apresentar o estado da arte dos sistemas desenvolvidos no Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP.
2. Indicar metas e valores (custos) de referência para a rede ProH₂/MCT.

1.3 Estrutura da Tese

Esta Tese é dividida em 7 capítulos, descritos a seguir:

Capítulo 1 - Introdução: representada por este capítulo.

Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica: Relativa à análise técnica, este capítulo trata da revisão bibliográfica das principais formas de produção de hidrogênio, das suas aplicações energéticas automotivas e estacionárias e dos processos de produção de hidrogênio a partir da reforma de combustíveis. Quanto à análise econômica, a revisão bibliográfica está focada na apresentação das principais ferramentas utilizadas para realização da análise econômica de investimentos; posteriormente são apresentados resultados encontrados por outros autores em análises econômicas equivalentes à realizada neste trabalho, que servirão de referência comparativa com os valores calculados.

Capítulo 3 - Metodologia: está apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 4 - Materiais e Métodos: Apresenta o estado da arte do sistema de geração de energia elétrica a partir da reforma de etanol acoplado à célula a combustível, bem como os parâmetros técnicos experimentais utilizados na análise econômica realizada no Capítulo 5.

Capítulo 5 - Análise Econômica: são apresentadas as considerações iniciais e os cálculos realizados para a análise econômica, que tem como base os valores técnicos apresentados ao longo do Capítulo 4..

Capítulo 6 - Análise dos Resultados: é apresentada a análise dos resultados técnicos e econômicos desenvolvidos principalmente nos Capítulos 4 e 5 e sua comparação com os resultados de outros trabalhos, apresentados no Capítulo 2.

Capítulo 7 - Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros: são apresentadas as principais conclusões obtidas neste trabalho, bem como as sugestões para trabalhos a serem realizados posteriormente.

Capítulo 2

Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica dos principais aspectos da tecnologia do hidrogênio, centrada em suas aplicações energéticas em células a combustível, com destaque para a produção de hidrogênio a partir do processo de reforma de etanol. Após esta explanação inicial, é apresentada também a revisão bibliográfica relativa à análise econômica da tecnologia em questão.

2.1 A Produção do Hidrogênio

A denominada tecnologia do hidrogênio envolve uma série de processos nas etapas de produção, conversão e utilização. A Figura 2.1 relaciona de forma resumida cada uma dessas etapas e as principais opções tecnológicas.

Com relação às fontes de energia empregadas na produção de hidrogênio, elas podem ser renováveis ou não-renováveis. As fontes renováveis são aquelas cuja taxa de produção do recurso na Natureza é maior ou igual à taxa de consumo desse recurso pelo homem, não havendo, portanto, esgotamento da fonte. Como exemplos de fontes renováveis podem ser citadas a energia hidráulica, a energia solar, a eólica e as biomassas, como a cana-de-açúcar. As fontes não-renováveis, por sua vez, apresentam taxas de consumo pelo homem superiores às taxas de produção na Natureza, caso do petróleo e seus derivados, gás natural e carvão mineral, recursos minerais cuja formação levou milhões de anos e o consumo tem ocorrido muito aceleradamente.

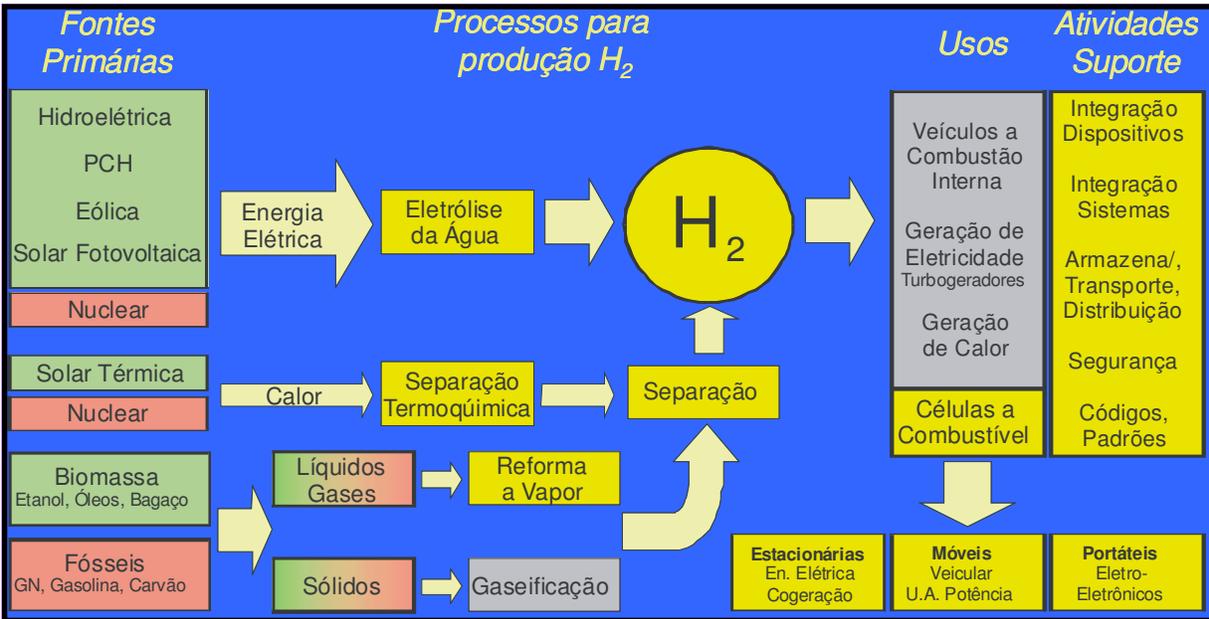


Figura 2.1 – Fontes, processos de produção e tecnologias de conversão e utilização do hidrogênio para fins energéticos. Fonte: CENEH, 2004.

Atualmente, as principais fontes utilizadas para a produção em grande escala do hidrogênio são não renováveis, conforme apresentado na Tabela 2.1. Como se pode verificar, as fontes primárias não renováveis ou fósseis são responsáveis por mais de 95% desta produção, significando que as tecnologias associadas aos processos que empregam estas fontes encontram-se dominadas, economicamente desenvolvidas e disponíveis caso a produção do hidrogênio venha a ser intensificada nos próximos anos. No caso da eletrólise, que utiliza energia elétrica para a decomposição da água, faz-se necessário considerar a fonte primária utilizada na produção desta eletricidade: sendo a termoeletricidade, em grande parte retorna-se ao uso das fontes fósseis, pois aqueles mesmos energéticos são os mais utilizados em todo mundo para esta produção; sendo a energia nuclear, tem-se uma nova fonte não renovável; no caso das renováveis, as principais fontes seriam a hidráulica, eólica e geotérmica.

Apesar da eletrólise da água ser um processo bastante conhecido e utilizado há mais de um século, quando a eletricidade é produzida por fontes alternativas, como solar fotovoltaica ou eólica, diretamente conectada aos eletrolisadores (geração distribuída ou em sistemas isolados),

ainda há dificuldades tecnológicas a serem superadas, existindo pesquisas em curso para a solução destas dificuldades (Camargo, 2000; Camargo, 2004; Apolinário, 2004).

Tabela 2.1 – Produção mundial de hidrogênio para grandes consumidores segundo as fontes utilizadas.

FONTE	VOLUME ($10^9 \text{ M}^3 \text{ ANO}^{-1}$)	PARTICIPAÇÃO
Gás natural	19,6	48%
Petróleo	12,2	30%
Carvão	7,3	18%
Eletrólise (fontes diversas)	1,6	4%
Total	40,7	100%

Fonte: TOLMASQUIM, 2003.

Considerando-se o tipo de fonte de produção para o hidrogênio, existem diferentes tecnologias para cada uma delas. Atualmente, a produção de hidrogênio ocorre principalmente pela reforma de combustíveis, em especial pela reforma-vapor do gás natural, e em menor escala também pela eletrólise da água. Os equipamentos utilizados nesses casos são os reformadores de combustíveis e os eletrolisadores de água, respectivamente.

Na reforma-vapor, a fonte de hidrogênio e o insumo energético são os próprios combustíveis utilizados (a princípio, qualquer hidrocarboneto pode ser processado para a produção de hidrogênio: etanol, Diesel, querosene, gasolina, etc.).

Na eletrólise, a fonte de hidrogênio é a água e o insumo energético é a eletricidade proveniente da rede elétrica de distribuição, cuja origem pode ser de fontes renováveis como, por exemplo, usinas hidrelétricas, painéis fotovoltaicos ou turbinas eólicas, ou de fontes não renováveis, como térmicas a gás natural, carvão ou reatores nucleares.

Outros processos alternativos de produção de hidrogênio podem ser considerados, como a gaseificação de carvão mineral, gaseificação de biomassa, especialmente resíduos de madeira, bagaço de cana e até mesmo resíduos de processo e lodos. Processos não convencionais de produção de hidrogênio, em estágio de pesquisa básica, incluem a bioprodução (a partir da decomposição de matéria orgânica por bactérias), a fotobioprodução (idêntica à anterior, mas na

presença de luz), a separação termoquímica da água (a altas temperaturas, provenientes de concentradores solares ou reatores nucleares, e na presença de catalisadores), entre outros.

Conforme exposto até agora, o hidrogênio pode ser obtido de muitas fontes, renováveis ou não estando, entretanto, fora do escopo deste trabalho analisar ou considerar todas as formas de produção deste combustível. O interesse aqui está em se considerar apenas a Reforma Autotérmica do Etanol (RAE), tecnologia utilizada pelo reformador em análise neste trabalho. Para maiores detalhes sobre os processos tecnologicamente disponíveis para a produção de hidrogênio, encontra-se extensa literatura técnica como, por exemplo, Silva (1985; 1991 e 2003), Tolmasquim (2003) e Larminie (2003).

2.2 Aplicações Energéticas do Hidrogênio

Uma vez produzido o hidrogênio, sua utilização energética pode ser feita em um grande número de sistemas e tecnologias, seja na produção de calor, na fabricação de outros combustíveis, em veículos ou na geração de eletricidade, havendo atualmente especial interesse nessa última aplicação, para a qual se dispõe de duas tecnologias principais: Motores de Combustão Interna (MCI) e Células a Combustível (CaC).

Os motores de combustão interna consistem numa tecnologia já bem dominada, apesar da necessidade de adaptações para operação com hidrogênio. Entretanto, como se tratam de motores do ciclo Otto, apresentam eficiências consideradas baixas para os padrões atuais, implicando em mau uso, ou desperdício, de combustíveis e impactos maiores ao meio ambiente local e global. (FERREIRA, 2007)

As células a combustível são dispositivos eletroquímicos que convertem diretamente em energia elétrica, calor e água o hidrogênio (H_2) e o oxigênio (O_2) do ar. Por este processo de conversão não utilizar a queima do combustível para a geração mecânica de trabalho, ele ocorre com alta eficiência quando comparado aos motores de combustão interna e permitem à célula a combustível utilizar a mesma quantidade de combustível para a geração de uma maior quantidade de energia e, assim, com menores impactos ao meio ambiente.

Outra característica fundamental das células a combustível é sua modularidade de atendimento, já que podem atender demandas de alguns décimos de watts (10^{-2} W), caso da geração portátil, a dezenas e centenas de quilowatts para a geração estacionária ou veicular de energia, bem como em instalações de megawatts em plantas industriais ou na rede de distribuição.

Neste trabalho serão consideradas exclusivamente as aplicações do hidrogênio em células a combustível, por representarem hoje a principal aplicação energética para esse gás (SANTOS, 2008).

2.2.1 Aplicações Estacionárias

As principais aplicações estacionárias das células a combustível de pequeno porte (até 10 kW) são para a geração de energia elétrica para uso residencial, sistemas ininterruptíveis (*back-up*) e remotos. A célula a combustível tipo PEMFC² é a mais adequada para essas aplicações. Ela pode ser alimentada com hidrogênio puro, produzido a partir do propano, metanol, etanol ou gás natural, principalmente para uso residencial, aproveitando a rede de distribuição desse último combustível. O calor rejeitado dos sistemas residenciais pode ser aplicado para o aquecimento de água e ambientes (TOLMASQUIM, 2003).

As células a combustíveis de óxido sólido (SOFC³) também podem ser utilizadas em aplicações que visem a geração elétrica estacionária de pequeno porte, com potência de cerca de 5 kW, mas principalmente quando se necessita elevadas potências, uma vez que elas apresentam uma vantagem competitiva em relação às PEMFC quando o aproveitamento de calor é mais necessário (FC HANDBOOK, 2004), pois operam em temperaturas em torno de 1.000 °C, permitindo o emprego de sistemas de co-geração.

Uma característica dos sistemas de células a combustível é que sua eficiência varia pouco em função de sua capacidade (potência). Isto significa que as plantas de geração de energia pequenas, de eficiência relativamente elevada em relação aos sistemas convencionais, podem ser

² PEMFC – *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* (Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons)

³ SOFC – *Solid Oxid Fuel Cell* (Célula a Combustível de Ácido Fosfórico)

instaladas junto aos pontos de maior demanda e, assim, evitar os altos custos associados com os sistemas de transmissão de eletricidade (FC HANDBOOK, 2004).

Algumas tecnologias de células a combustível, como a MCFC⁴ e SOFC, vêm sendo desenvolvidas para plantas de geração de energia elétrica e co-geração com potências entre 200 kW e 4 MW. Como exemplos do estágio atual desta aplicação são mostradas nas Figuras 2.2 e 2.3 duas unidades estacionárias de célula a combustível com essas tecnologias.



Figura 2.2 – Unidade estacionária MCFC de 300 kW da *Full Cell Energy*. Fonte: (Fuel Cell Energy, 2007).



Figura 2.3 – Unidade estacionária SOFC de 220 kW da *Siemens*. Fonte: (Siemens, 2007).

⁴ MCFC – *Molten Carbonate Fuel Cell* (Célula a Combustível de Carbonato Fundido).

À medida que as células a combustível vão sendo desenvolvidas e introduzidas no mercado seu custo vai diminuindo e nichos de mercado vão aparecendo. Apesar de seu custo de capital ainda ser alto em comparação com os sistemas tradicionais de geração de energia elétrica, certos nichos como os sistemas de *back-up* de energia elétrica já se tornaram atraentes para as células a combustível.

O desenvolvimento tecnológico atualmente alcançado pela tecnologia PEMFC colocou essa tecnologia em patamar superior aos sistemas de *back-up* de energia elétrica tradicionalmente utilizados. Setores que trabalham com informações, armazenamento de dados e telecomunicações, têm sérios prejuízos com interrupções de energia elétrica. As células a combustível tipo PEMFC já estão sendo usadas, pois se mostram tão confiáveis e com menos problemas de manutenção que as baterias eletroquímicas, implicando em menores custos de operação (PLUG POWER, 2007).

Sistemas de *back-up* com células a combustível vêm sendo instalados nos Estados Unidos e em outros países, inclusive no Brasil, Trata-se de um sistema de geração de energia elétrica através de célula a combustível tipo PEMFC com potência de 5 kW, abastecida com hidrogênio armazenado em cilindros (Figura 2.4).



Figura 2.4 – Sistema de *back-up* da empresa Plug Power. Fonte: (Plug Power, 2007).

Não faz parte do escopo deste trabalho apresentar detalhadamente as células a combustíveis, já que existe uma extensa literatura técnica disponível sobre os tipos, aplicações, vantagens e desvantagens. O interesse aqui está em se considerar apenas a utilização do hidrogênio produzido através da reforma do etanol em células a combustível do tipo PEMFC. Para maiores detalhes recomendam-se os seguintes trabalhos: Tolmasquim (2003), FC Handbook (2004) e Camargo (2004).

2.2.2 Aplicações Veiculares

Desde os anos 80 do século passado, houve um forte impulso no desenvolvimento da tecnologia de células a combustível para o uso na propulsão de veículos leves e pesados.

Os veículos com células a combustível são veículos de tração elétrica, pois a célula a combustível é o gerador que fornece energia elétrica para o motor elétrico que movimenta o veículo. Uma célula a combustível também pode ser utilizada em um veículo como uma unidade de força auxiliar, para gerar energia elétrica aos vários sistemas elétricos/eletrônicos dos veículos atuais. Os grandes fabricantes mundiais de veículos já desenvolveram quase uma centena de protótipos avançados de veículos leves desde 1994. A Figura 2.5 mostra a distribuição dos protótipos por montadora. Cerca de 30 ônibus com células a combustível rodam em caráter experimental no mundo. Todos os veículos citados utilizam células a combustível tipo PEMFC (FUEL CELLS, 2007-a).

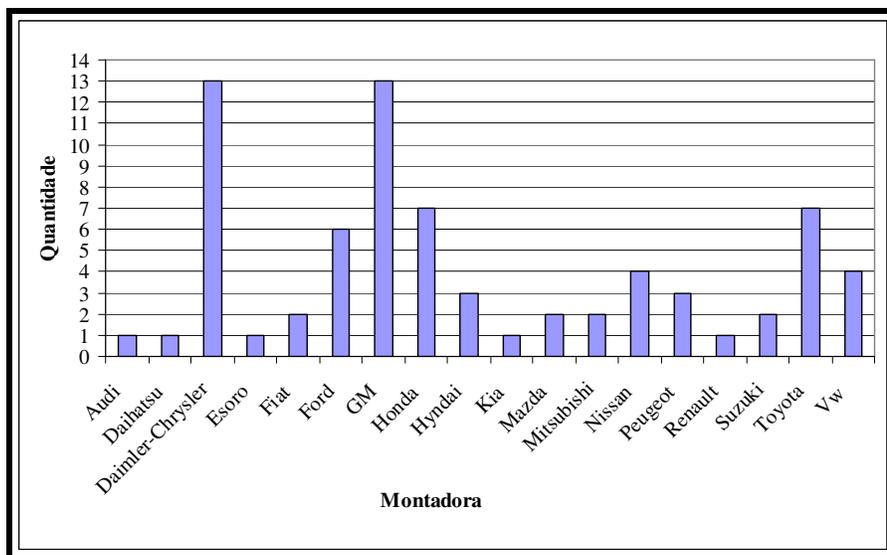


Figura 2.5 – Distribuição de protótipos por montadora. Fonte: (Fuel Cell, 2007-b).

Como exemplos do estágio atual desta tecnologia, a Figura 2.6 mostra um protótipo de veículo de passeio da Honda e um ônibus fabricado pela Mercedes-Benz.



(a)



(b)

Figura 2.6 – (a) Protótipo FCX da Honda; (b) Ônibus Citaro da Mercedes-Benz. Fontes: (Honda, 2007; Evobus, 2007).

O ano de 2007 é um marco importante para a introdução dos veículos com célula a combustível, quando ocorreu o lançamento do Honda Clarity (Figura 2.7). Ele estará disponível para consumidores de 3 cidades americanas onde já existem postos de abastecimento com hidrogênio. Desde junho de 2008 o consumidor dessas localidades pode dispor do veículo através

do sistema de *leasing*, o que inaugurou a fase de comercialização desse tipo de veículo, apesar de poucas unidades disponíveis.

As perspectivas que estão sendo abertas com os nichos para as células a combustível destacados anteriormente apontam para a utilização de células a combustível de baixa temperatura, especialmente as do tipo PEMFC. A massificação da produção de veículos com células a combustível levará à redução do preço da energia gerada por esse tipo de dispositivo. De acordo com DOE (2002), para a geração estacionária de eletricidade, um custo de 1.500 dólares por kW já torna atraente este tipo de sistema; já para aplicação veicular esse custo deve ser muito inferior, cerca de 50 a 100 dólares por kW (DOE, 2002).

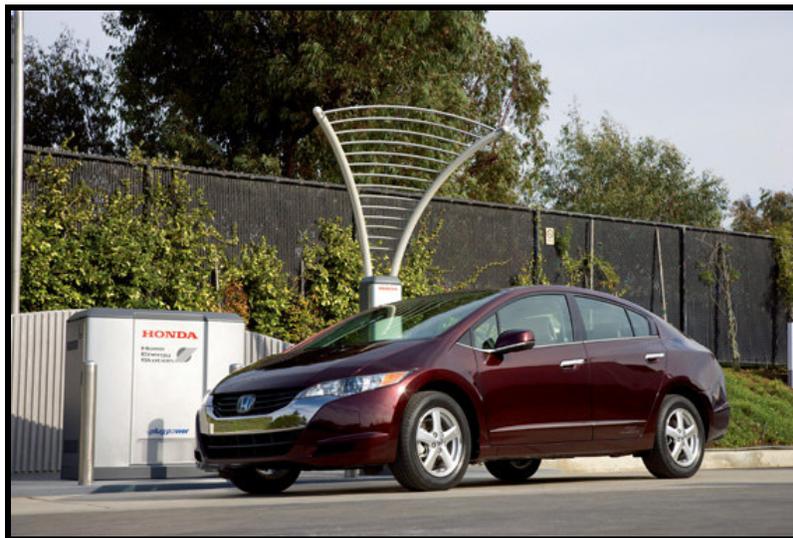


Figura 2.7 – Veículo de passeio Honda Clarity. Fonte: (HONDA, 2007).

Com a introdução dos veículos com célula a combustível no mercado, haverá necessidade de fornecimento de hidrogênio a custos competitivos e de forma distribuída (postos). As dificuldades técnicas de armazenamento de grandes quantidades de hidrogênio, os custos das redes de distribuição de gás e os aspectos de segurança associados a essa tecnologia, juntamente com as facilidades de geração do hidrogênio a partir dos processos de eletrólise e de reforma, levam a acreditar que sistemas descentralizados de produção de hidrogênio estarão presentes em centrais ou postos de abastecimento. Para esta aplicação, as opções para produção de hidrogênio

mais recomendada são; os eletrolisadores, ou reformadores de etanol, gás natural, Diesel, gasolina ou metanol.

Não faz parte do escopo deste trabalho apresentar detalhadamente as topologias e os detalhes técnicos referentes à aplicação das células a combustíveis para uso automotivo. O interesse aqui está em apresentar um possível nicho para a utilização do hidrogênio produzido através reforma do etanol, o abastecimento de veículos movidos a hidrogênio. Para maiores detalhes sobre essa aplicação recomendam-se os trabalhos: Ferreira (2008) e Araújo (2008). Assim sendo, pode-se perceber também que foge bastante aos objetivos deste trabalho abordar as tecnologias e as características das diferentes formas de armazenamento do hidrogênio, para as quais podem ser indicadas várias referências: Silva, 1991.

2.3 A Reforma de Etanol

O processo de reforma é genericamente definido como a conversão termoquímica, catalítica ou não, de um combustível líquido, sólido ou gasoso, numa mistura gasosa rica em hidrogênio, que é denominada gás de síntese.

A maioria dos processos utiliza hidrocarbonetos leves para a produção de hidrogênio, aqueles com pesos moleculares situados entre o metano e a nafta, com pontos de ebulição inferiores a 523 K (HÜBNER, 2002).

Como descrito a seguir na Tabela 2.2, os três métodos mais comuns de reforma são:

1) Reforma-vapor (*SMR – Steam-reforming*): o combustível pré-condicionado é injetado com vapor superaquecido num leito de reação. Salienta-se que o pré-condicionamento do combustível é determinado pelo seu aquecimento, e no caso dos combustíveis aditivados por odorificantes, em geral a base de compostos de enxofre, sua pré-purificação.

É uma reação endotérmica lenta, cujo calor necessário provém em geral da queima de parte do próprio combustível utilizado no processo de reforma em leito distinto, colocados em

contato térmico. Resultam geralmente em sistemas com maior volume devido às trocas térmicas necessárias e são aplicados para hidrocarbonetos leves e de peso molecular intermediário.

2) Oxidação parcial (*POX – Partial Oxidation*): compreende uma oxidação parcial, ou incompleta, do combustível. Uma quantidade sub-estequiométrica de oxidante, ar ou oxigênio, é utilizada. Esta reação de oxidação é exotérmica e conduz os insumos e o leito de processo a altas temperaturas, responsável pela reforma e decomposição térmica da fração não oxidada do combustível. Para algumas aplicações, pode-se utilizar catalisadores. Processos não-catalíticos para reforma de gasolina, por exemplo, necessitam temperaturas de aproximadamente 1.300 K (1.027 °C). Esse tipo de reação possui vantagens, como o uso de um reformador mais compacto e leve.

Tabela 2.2 – Principais processos de geração de hidrogênio.

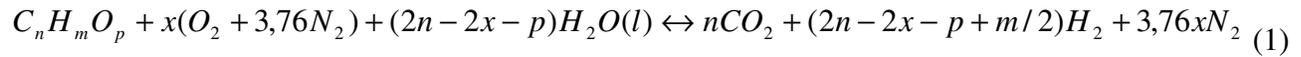
<i>Processo</i>	<i>Tipo</i>	<i>Sistema</i>	<i>Insumo básico</i>	<i>Fonte primária de energia</i>	<i>Aplicação</i>
Eletrólise	Alcalina	Monopolar ou Bipolar	Água	Eletricidade	
	Ácida	Monopolar ou Bipolar	Água	Eletricidade	
	Fotoeletroquímica	Monopolar	Água	Luz num comprimento de onda apropriado do espectro de radiação solar	
Termoquímica	Processamento Químico	Reforma-vapor	Hidrocarbonetos leves (metano, nafta), Álcoois, Amônia + Água	Calor gerado pela queima de hidrocarbonetos, em geral, o próprio insumo combustível	Insumo químico (indústria, petroquímica), Insumo energético (foguetes, célula a combustível)
		Oxidação parcial	Hidrocarbonetos Leves, Intermediários e Pesados, Carvão + Água (opcional, dependendo do combustível e produto buscado) + Oxidante	Calor gerado pela queima parcial do insumo combustível do processo	
		Reforma Autotérmica	Hidrocarbonetos leves (metano, nafta), Intermediários, Álcoois + Água + Oxidante	Calor gerado pela queima parcial do insumo combustível do processo	
		Decomposição Térmica	Catalítica ou Não-Catalítica	Água, Amônia	

Fonte: Elaboração Própria.

3) Reforma autotérmica (*ATR – Autothermal Reforming*): é a combinação dos processos anteriores em um único leito. A reforma-vapor absorve parte do calor e a água gerada pela reação de oxidação parcial, resultando em um processo levemente exotérmico, cuja característica está apenas atrelada à compensação das perdas térmicas de um sistema real.

O reformador é geralmente compacto, de partida mais rápida e mais eficiente quanto ao aproveitamento do calor, além de operar em temperaturas mais baixas, o que possibilita a utilização de materiais e ligas metálicas mais baratas, sendo necessário a utilização de isolamentos térmicos adequados. Este conceito de reforma vem sendo admitido para implementação de sistemas compactos e de menor custo, que podem viabilizar mais rapidamente a disseminação da tecnologia do hidrogênio.

A relação estequiométrica ideal para a conversão de um hidrocarboneto ou combustível oxigenado $C_nH_mO_p$, como é o caso do etanol, pode ser escrita como:



onde x é a relação molar entre o oxigênio empregado e o combustível ($O_2/EtOH$ para este caso). Esta importante variável de controle determina:

(a) A água necessária para converter a quantidade de carbono no combustível em

$$CO_2, \quad 2n - 2x - p;$$

(b) A máxima produção de hidrogênio possível, $2n - 2x - p + m/2$;

(c) A concentração máxima (percentual) de hidrogênio no produto,

$$\frac{2n - 2x - p + m/2}{n + (2n - 2x - p + m/2) + 3,76x} \times 100;$$

(d) O calor da reação, $\Delta H_r = n\Delta H_{f,CO_2} - (2n - 2x - p)\Delta H_{f,H_2O} - \Delta H_{f,combustível}$;

onde ΔH_f é denominado entalpia de formação.

Contudo, mesmo que esta reação ideal valha para a pré-determinação das quantidades dos insumos na entrada do processo, levando-se em consideração a temperatura na qual o processo é conduzido, vale destacar que na situação real um grande número de reações paralelas ocorrem simultaneamente, podendo-se destacar duas reações parciais importantes que envolvem a produção e o consumo de CO:



Onde a reação (03) é usualmente denominada como reação de *shift*, ou reação de simples-troca, entre o CO e a água produzindo hidrogênio adicional num processo exotérmico. Conforme as diferentes reações apresentadas para o processamento do etanol, muitos são os produtos possíveis e um grande desafio para o dimensionamento destes sistemas está em avaliar previamente a composição do gás de síntese na saída de cada um dos leitos, com relação às condições termodinâmicas de condução da reforma.

Com esta avaliação prévia pode-se determinar adequadamente os catalisadores empregados em sistemas práticos, com relação à seletividade alcançada para cada uma das espécies químicas admitidas, e a contribuição destes catalisadores em deslocar o equilíbrio químico buscado para as máximas conversões do combustível e maiores concentrações de hidrogênio no gás de síntese. Da mesma forma, permite a elaboração antecipada dos projetos dos leitos do sistema destinados ao processamento seletivo de determinadas espécies químicas, cuja utilização determine concentrações máximas admissíveis, como é o caso do CO para o uso em células a combustível do tipo PEMFC.

Desta forma, os catalisadores selecionados exercem bastante influência nos sistemas de reforma, já que interferem desde a configuração geométrica dos reatores até na eficiência de conversão do combustível reformado. Neste sentido, torna-se de elevada importância o incentivo ao desenvolvimento de pesquisas que possam viabilizar técnica e economicamente catalisadores

comerciais dedicados ao processo de reforma de etanol, que no contexto brasileiro pode vir a ser um importante diferencial tecnológico.

2.3.1 Considerações Teóricas sobre o Reformador de Etanol LH2/Hytron

2.3.1.1 Processamento do combustível

Um protótipo de sistema de pequena escala de processamento de etanol para a produção de hidrogênio através da reforma autotérmica, com capacidade nominal de produção de $0,41 \text{ kg}\cdot\text{h}^{-1}$ de hidrogênio ($5,0 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ de hidrogênio à $298,15 \text{ K}$; $101,325 \text{ kPa}$), foi dimensionado com base na termodinâmica descrita para o processo de reforma autotérmica e os produtos esperados para o processamento do etanol.

A reforma autotérmica foi definida como o processamento do combustível em questão utilizando-se para tal o calor gerado na oxidação sub-estequiométrica deste combustível, de forma que a água gerada nesta parcela oxidada do combustível, juntamente a uma quantidade de água complementar fornecida ao sistema, sejam utilizadas para a geração catalítica de um gás de síntese rico em hidrogênio.

Para o caso da utilização de ar como elemento oxidante do processo, os principais componentes deste gás de síntese, além do hidrogênio, são nitrogênio e monóxido de carbono, uma vez que sua formação é privilegiada termodinamicamente pelas altas temperaturas de processo.

No caso da reforma autotérmica, tanto os valores da temperatura de operação do reator ATR quanto os valores das temperaturas para operação dos reatores de *shift* viabilizam a utilização do gás de síntese para pré-condicionamento dos insumos do processo, permitindo a recuperação de calor e possibilitando se alcançar maiores eficiências térmicas para o processamento global do combustível.

Para que estas etapas de recuperação possam ser precisamente dimensionadas é necessário se estabelecer uma condição de operação do sistema de reforma. Esta condição é fundamental para o dimensionamento apropriado dos parâmetros de entrada dos insumos do sistema, o que é resultado

do balanço mássico do processo, numa relação entre a composição e quantidade dos insumos de entrada e os produtos, e suas quantidades, do processamento do etanol.

Estudos anteriores do processamento de etanol através de sua reforma autotérmica (MARIÑO, 1998), mostram que melhores balanços mássicos do processo são atingidos em temperaturas superiores a 1.033 K (760 °C), quando a formação de carbono e seu conseqüente acúmulo sobre os catalisadores são desprivilegiados. Deve-se ressaltar que a utilização de quantidades de água superiores àquelas encontradas em cálculos estequiométricos apresentados na Equação (1), também desloca o equilíbrio das reações de decomposição que levam à formação de carbono no sentido de sua menor ocorrência, mesmo que a um maior custo energético para pré-condicionamento dos insumos, dada a maior massa de água presente.

MARIM NETO et al. (2006) apresenta uma análise detalhada sobre as condições termodinâmicas mais adequadas para o processo de produção de hidrogênio pela rota autotérmica do etanol. Neste artigo, pode-se observar como a utilização de três leitos (*shift* de alta temperatura, *shift* de baixa temperatura e oxidação preferencial) para o tratamento do gás de síntese, consegue-se aumentar a proporção de H₂ e reduzir a de CO da mistura, mas não o suficiente para a aplicação deste gás de reforma em células a combustível do tipo PEMFC, fazendo-se necessária a utilização de um sistema de purificação de H₂.

2.3.1.2 Purificação do hidrogênio

Para a purificação do hidrogênio presente na mistura gasosa proveniente da reforma do etanol através da rota da reforma autotérmica utilizam-se leitos de adsorção molecular operando em ciclos PSA (*Pressure Swing Adsorption*). Tal sistema é composto por duas colunas de purificação operando a uma pressão de 6,0 bar, pressão na qual o hidrogênio purificado é fornecido, havendo as seguintes condições de entrada para o gás de síntese:

- O gás de síntese deve ser fornecido com a menor temperatura possível ao sistema de purificação, uma vez que a eficácia na purificação do hidrogênio, que se resume na quantidade residual dos contaminantes no gás de saída, está vinculada à diferença nos valores

dos parâmetros termodinâmicos de operação do sistema, em ciclo de purificação e em ciclo de regeneração;

- O gás de síntese deve ser fornecido seco ao sistema de purificação, sem condensáveis, visto que moléculas de líquidos polares determinam, na maioria dos casos, maiores afinidades às peneiras moleculares utilizadas, o que, no caso da saturação da coluna, ocasionaria a necessidade de um condicionamento das peneiras moleculares à alta temperatura, o que não poderia ser realizado na montagem do purificador;
- Cuidados com a manipulação do hidrogênio purificado e dos gases separados na mistura original, em geral concentrados com relação ao monóxido de carbono, devem ser ressaltados e a ventilação do local deve corresponder às exigências normatizadas;
- A pressão de entrada não deve exceder 1,5 bar_a;

Estão apresentadas no Capítulo 4, de uma forma mais detalhada, as características técnicas do sistema de reforma de etanol completo.

2.3.1.3 Controle e automação

Pode-se destacar que para se atingir alta confiabilidade e fácil operacionalidade no funcionamento desse tipo de sistema, um dos principais desenvolvimentos necessários diz respeito à lógica de controle.

Esta lógica prevê o acionamento automático da unidade, a qual poderá ser determinada remotamente; o condicionamento térmico do sistema, respeitando-se os limites de temperatura de todos os materiais e equipamentos utilizados em sua construção; a ação voluntária do sistema no caso de anomalias térmicas na operação, sempre em busca da condição de máximo desempenho no processamento do referido combustível e, finalmente, a saída de funcionamento no caso de emergências e paradas normais, sempre garantindo a segurança das pessoas em sua volta e a própria integridade do sistema.

2.4 Análise Econômica

Neste tópico é apresentada o embasamento teórico da análise econômica do reformador de etanol avaliado neste trabalho. O objetivo desta análise econômica (apresentada no Capítulo 5) é encontrar o custo do hidrogênio gerado pelo reformador de etanol (R\$/kg) desenvolvido pelo LH2 em parceria com a empresa Hytron e a determinação do custo da energia elétrica (R\$/kW) produzida por uma célula a combustível do tipo PEMFC com a aplicação deste H₂.

2.4.1 Análise Econômica de Investimento

Segundo Souza (2003), um dos pontos referentes à análise de projetos de investimentos sobre os quais existe unanimidade entre os autores é o entendimento sobre a importância da linha do tempo em relação aos cálculos utilizados para a análise. Para tanto, é necessária a compreensão da diferença entre o valor futuro (VF) e valor presente (VP) de um investimento. Entretanto a abordagem mais utilizada costuma ser a do valor presente, dado a necessidade da tomada de decisão ser no instante zero.

Em Kaplan (1983), investimentos devem ser analisados sobre três óticas que são relacionadas: do ponto de vista econômico, do ponto de vista financeiro e, também, do ponto de vista dos riscos associados. Avaliar os resultados econômicos de um investimento consiste em analisar a rentabilidade total do projeto, considerando todas as receitas e despesas ao longo de um determinado período de tempo.

A análise de viabilidade financeira é o passo seguinte, onde as questões relativas à atratividade econômica do projeto e de seus investidores são levadas em consideração.

Finalmente, a análise se completa com a análise de risco associado. Risco pode ser entendido como a possibilidade de obtenção de rentabilidade inferior àquela que foi anteriormente estimada, e que motivou a decisão de investir. Há riscos de natureza distinta: tecnológicos, operacionais, financeiros, etc..

Na análise econômica de uma tecnologia específica, como o caso avaliado neste trabalho, os conceitos utilizados para a análise de investimentos são válidos e devem ser utilizados. Porém, faz-se necessário observar algumas peculiaridades, já que esta avaliação não tem como objetivo a tomada de decisão entre aplicações financeiras distintas (análise comparativa), mas sim a avaliação econômica da utilização da tecnologia em questão.

2.4.2 Fluxo de Caixa

O conjunto das entradas e saídas de caixa é definido como fluxo de caixa (FC). O fluxo de caixa permite que se visualize no tempo o que ocorre com o capital de determinada empresa ou projeto de investimento (SOUZA, 2003).

É conveniente a representação gráfica do fluxo de caixa através de um traço horizontal que indica a extensão do período de análise, e no qual são demarcados os períodos discretos de análise. Receitas são indicadas por setas verticais orientadas para cima, enquanto despesas são indicadas por setas verticais orientadas para baixo, como exemplificado na Figura 2.8.

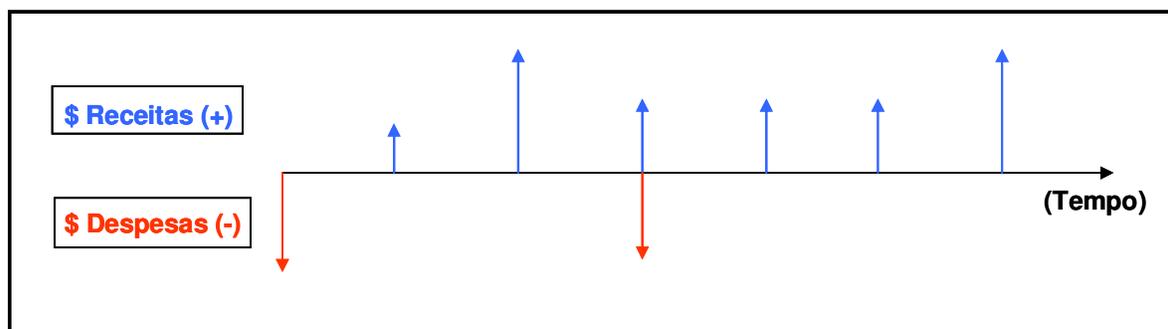


Figura 2.8 – Representação gráfica do fluxo de caixa. Fonte: Elaboração própria

2.4.3 Valor Presente Líquido (VPL)

Em uma operação financeira de investimento, várias situações terão interferência nos resultados finais que servirão para a análise das opções. De forma geral, conhece-se o valor econômico correspondente ao investimento inicial ($t=0$) e se deseja calcular os retornos econômicos desta alocação.

Desta forma, é necessário estabelecer as quantidades correspondentes aos fluxos de caixa anuais para todo o tempo de operação e corrigi-los para o valor presente líquido (VPL). O VPL é o somatório de todos os valores correspondentes ao fluxo de caixa da operação corrigidos para $t=0$, utilizando uma taxa que remunere todos os movimentos que ocorram em $t>0$.

O VPL então corresponderá à diferença entre o valor presente de todos os fluxos anuais (somatório de todo elemento isolado da operação) relacionados ao projeto e o valor referente ao investimento inicial. Cada elemento do fluxo de caixa é obtido fazendo-se a diferença entre as entradas e saídas, em termos financeiros, de cada ano. Matematicamente o VPL é definido através da seguinte relação (SOUZA, 2003):

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^n} \quad (4)$$

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.

Portanto, o 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:

$$VPL = \sum_{t=1}^n (FC_j) \cdot (1+i)^{-j} \quad (5)$$

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

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 economicamente (KAPLAN, 1983).

Uma outra abordagem para utilização do VPL refere-se à necessidade da determinação do custo unitário de um determinado fator que compõe o fluxo de caixa. Para esta determinação, considera-se VPL como sendo zero na Equação (3), restando na equação apenas a variável relativa ao custo procurado.

2.4.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)

A Taxa Interna de Retorno, ou taxa de rentabilidade interna, é igual à taxa de desconto que “zera” o VPL, ou seja, iguala receitas e despesas observadas nos vários períodos de um fluxo de caixa. A TIR exprime a rentabilidade média do capital investido em um projeto e só depende das características econômicas do mesmo. (WALTER, 2005)

Calculada a TIR, o valor encontrado deve ser comparado com a taxa mínima de atratividade arbitrada pelo empreendedor para as condições de viabilização do projeto considerado. Se TIR for maior que $(i)_{\text{mínimo}}$, o investimento é considerado viável; caso contrário, inviável.

Um dos procedimentos de solução é por tentativa e erro, ou seja, arbitrando valores de taxas de desconto até que se encontre aquela que representa a solução. Outra alternativa é resolver o problema graficamente, encontrando o valor que iguala receitas e despesas (WALTER, 2005).

2.4.5 Payback

O período de *payback* é um indicador que mostra o prazo de retorno do investimento total de recursos financeiros aplicados no empreendimento. Este método é útil na análise de projetos, para mensuração do risco (SOUZA, 2003).

O *payback* clássico é definido como o número de períodos necessários para que o investidor possa recuperar, através das receitas líquidas, o investimento inicial. Em princípio, um projeto tem

mais mérito quanto menor o período de recuperação do investimento inicial. Quanto menor o *payback*, menor o risco do investimento (WALTER, 2005).

2.4.6 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).

2.4.7 Valores Comparativos Para Tecnologias de Produção de Hidrogênio e Geração de Energia Elétrica.

2.4.7.1 Análise Econômica de Sistemas de Reforma de Gás Natural Realizado Pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos da América (DOE)

Para calcular o custo de produção do hidrogênio obtido pelo reformador de etanol desenvolvido pelo LH2 e Hytron foi utilizado como referência principal o relatório: “*Cost and Performance Comparison Of Stationary Hydrogen Fueling Appliances*” desenvolvido pelo “*The Hydrogen Program Office of Power Technologies - U.S Department of Energy*” (DOE, 2002).

Este relatório foi escolhido devido às semelhanças entre a análise técnico-econômica realizada pelo DOE e a necessária para a realização desta tese, bem como pela disponibilidade de dados comparativos entre as tecnologias utilizadas pelo DOE e os obtidos pelo reformador de etanol. Neste tópico será apresentado um resumo do que é discutido pelo trabalho do DOE e, no Capítulo 5 desta tese, são apresentados os cálculos do reformador de etanol considerado segundo essa metodologia.

Em vários estudos, a *Directed Technologies, Inc.* tem avaliado o custo e desempenho de Estações de Abastecimento com Hidrogênio (EAH) para o suprimento de uma frota inicial de veículos movidos a célula a combustível, com o foco no custo do hidrogênio. Em trabalhos anteriores foram realizados estudos prévios com a avaliação dos impactos da utilização de veículos com células a combustível considerando-se o custo de capital das instalações, sua dimensão, a quantidade de postos de abastecimento com hidrogênio, a infra-estrutura de manutenção e os vários combustíveis com os quais o hidrogênio pode ser obtido.

No relatório em estudo foi analisado o custo para a produção de 250 EAH dimensionadas para abastecer uma comunidade de 183 veículos cada⁵ (cerca de 12,5% do tamanho médio de um posto de gasolina convencional nos Estados Unidos da América). Estas pequenas EAH foram escolhidas para permitir uma viabilidade econômica para produção de hidrogênio nos primeiros anos, quando ainda não existem números consideráveis de veículos com esta tecnologia numa área geográfica. Embora o foco do relatório seja uma análise econômica da produção de hidrogênio em unidades de pequena escala, vale ressaltar a redução significativa do custo do hidrogênio produzido em unidades de maior escala.

No relatório são comparados o custo e eficiência de duas tecnologias para a produção de hidrogênio, a reforma a vapor e a reforma autotérmica do metano e duas tecnologias de purificação do gás de síntese, adsorção por variação de pressão (PSA) e membranas metálicas.

⁵ Estas EAH são dimensionadas para permitir o reabastecimento de 20 veículos com células a combustível por dia já que os veículos não precisam ser reabastecidos diariamente. Cada EAH tem a capacidade para atender uma frota de 183 veículos.

Fundamentado neste estudo, concluiu-se que as melhores opções de custo do hidrogênio e eficiência são encontradas nos sistemas que utilizam a reforma a vapor do metano, com purificação do hidrogênio pelo processo PSA, sendo o custo inicial de instalação de um sistema com reforma a vapor e PSA para suportar 183 veículos de US\$ 253.014,00. O custo de venda do hidrogênio para esta opção, incluindo o armazenamento, mas excluindo os impostos, é de US\$ 3,38/kg de H₂. Já a reforma autotérmica do gás natural possui um menor custo inicial, mas o custo do hidrogênio gerado é maior, US\$ 3,59/kg, por causa da sua menor eficiência.

O custo de capital para as duas tecnologias avaliadas com purificação PSA, assumindo um ciclo de vida de 10 anos, é apresentado mais abaixo na Tabela 2.3. Como uma referência, a produção máxima de hidrogênio requerida para abastecer 183 veículos é de 115 kg/dia.

O custo de capital varia de US\$ 225.000,00 a 275.000,00 dependendo do tipo da EAH, correspondendo a um valor anual de US\$ 59,25 a US\$ 98,75 milhões para suportar uma introdução de 50.000 novos veículos com células a combustível por ano.

De acordo com este estudo, com a tecnologia existente, o processo de purificação de hidrogênio por variação de pressão (PSA) é mais barato e mais confiável que o processo de purificação de hidrogênio por membranas metálicas.

Para obter estas estimativas de custos foi utilizado o *Desing for Manufacturing and Assembly* (DFMA). Esta metodologia é bastante utilizada pela indústria para estimar o custo de produtos e para comparar custos relativos de fabricação e montagem. A metodologia DFMA é tanto uma técnica rigorosa de estimativa de custo como um método para redimensionar um produto tendo em vista uma redução de custos. A aproximação pela DFMA utilizada no relatório fornece uma sólida estrutura para o estudo, sendo a única maneira de comparar o custo entre as tecnologias avaliadas (DOE, 2002)

A combinação entre os custos de compressão, armazenamento e distribuição do hidrogênio são equivalentes ao custo do sistema de purificação e do reformador. Recuperação de capital (ou seja, amortização do investimento inicial ao longo da vida do EAH) corresponde a aproximadamente

48% do custo do hidrogênio para a reforma a vapor e 40% do custo do hidrogênio para a reforma autotérmica.

Outros fatores que contribuem para o custo do hidrogênio são: o custo do gás natural, o custo da eletricidade, as despesas com operação e manutenção (O & M). As contribuições de cada um na composição final do custo do hidrogênio estão apresentadas na Tabela 2.3.

O relatório conclui que os custos de produção de hidrogênio para os primeiros anos, considerando uma introdução de 250 EAH por ano, seja competitivo com o preço da gasolina no varejo para uma mesma base de consumo de combustível por veículo. Considera-se que esta comparação entre o custo do hidrogênio sem impostos, com o preço da gasolina tributada seja válida para o médio prazo, quando será necessário um estímulo à utilização de veículos com célula a combustível e conseqüentemente um maior número de EAH. Espera-se que o custo do hidrogênio venha a diminuir significativamente com uma economia de escala.

Tabela 2.3 – Custo do hidrogênio produzido por uma EAH de 56,7 m³.h⁻¹ de H₂ (2.000 scfh).

Custo em US\$/kg de H₂	SMR/PSA	ATR/PSA
Custo do Hidrogênio	3,15	3,39
Recuperação do Capital	1,66	1,5
Gás Natural	0,95	1,17
Eletricidade	0,23	0,41
O&M	0,33	0,31

Fonte: DOE, 2002.

Um anexo ao relatório descreve uma breve análise do impacto do aumento de escala no custo do hidrogênio, projetando este custo para diferentes dimensões de EAH (de 56,7 a 453,0 m³/h de H₂). Para uma EAH com capacidade para abastecer 1.464 veículos, o que é comparável às atuais estações de combustível, o seu custo inicial seria em torno de US\$ 1,16 milhões. O custo do hidrogênio gerado por esta EAH seria de US\$ 1.87 a US\$ 2.48/kg (dependendo dos pressupostos sobre descontos para a utilização do hidrogênio, o custo do gás natural e a vida útil dos equipamentos), consideravelmente menor que os custos de US\$3.38/kg para o hidrogênio produzido nas EAH de menor escala (Tabela 2.4). Porém, vale ressaltar que para a etapa inicial de implementação de uma

frota com veículos com células a combustível seria mais interessante a utilização de uma maior quantidade de EAH de pequeno porte, para facilitar a logística de abastecimento.

Tabela 2.4 – Custo do hidrogênio para uma EAH de 453 m³.h⁻¹ de H₂ (16.000 scfh).

Custo em US\$/kg de H₂	SMR/PSA
Custo do Hidrogênio	1,74
Recuperação do Capital	0,77
Gás Natural	0,59
Eletricidade	0,15
O&M	0,24

Fonte: DOE, 2002.

2.4.7.2 Custo de Produção do Hidrogênio a Partir da Eletrólise

Em uma análise técnico-econômica semelhante a realizada neste trabalho, Furlan (2008), avaliou e comparou a produção de energia elétrica produzida por painéis solar-fotovoltaicos e o seu armazenamento em dois sistemas: em banco de baterias; e em hidrogênio, a partir da eletrólise da água e sua aplicação em célula a combustível.

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 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 (FURLAN, 2008).

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. 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 PEMFC apenas recentemente atingiram o estágio de comercialização, sendo utilizadas 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 (FURLAN, 2008).

Ferreira (2007) analisou os custos de unidades de produção de hidrogênio (entre 40 e 160 m³/h de hidrogênio) a partir da eletrólise da água utilizando a rede elétrica de distribuição. Assim como no estudo do DOE, a análise em questão tinha como objetivo apresentar os custos de geração de hidrogênio para aplicação automotiva em pequenas unidades de abastecimento.

Segundo Ferreira (2007), o custo do hidrogênio produzido pode variar de 11,79 a 15,35 US\$/kg de H₂ de acordo com o porte da estação de abastecimento. O que, em valores atuais⁶, representa uma faixa de 25,34 a 33,00 R\$/kg de H₂.

⁶ Cotação do dólar em 06/11/2008 em R\$ 2,15 BC (2008)

Capítulo 3

Metodologia

Como comentado nos capítulos anteriores, esta tese se enquadra dentro de um conjunto de projetos teóricos e experimentais desenvolvidos Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP – LH2. Desta forma, a metodologia adotada incluiu, além dos estudos e dados bibliográficos, dados experimentais obtidos ao longo do desenvolvimento de um projeto de pesquisa do LH2 em parceria com a empresa Hytron. Este projeto de pesquisa, que viabilizou a realização da análise técnica e econômica realizadas nesta tese, teve como objetivo a construção e realização de testes num reformador de etanol para produção de hidrogênio com qualidade e quantidade necessárias para sua aplicação em uma célula a combustível do tipo PEMFC de 5 kW.

Considerando-se que o objetivo principal desta tese é a análise técnica e econômica do reformador de etanol, faz-se necessária a utilização de uma metodologia adequada para determinação do custo total do sistema (dos equipamentos, componentes, materiais e serviços de terceiros), dos custos de operação e manutenção (O&M); Bem como, de uma metodologia de análise econômica que permitisse obter o custo final do hidrogênio.

Neste capítulo está apresentada a metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho, que foi dividida em dois tópicos como apresentado a seguir:

3.1 Descrição das Etapas Para Elaboração da Tese.

No caso da determinação do custo do sistema e dos custos relativos à operação e manutenção, não foram feitas estimativas de preços, mas sim utilizadas os valores efetivamente praticados pelo projeto de pesquisa mencionado com a utilização de dados reais. Assim, com o objetivo de organizar o desenvolvimento desta tese tal como previsto e de aproveitar os dados reais no decorrer do projeto de pesquisa, organizou-se as atividades em algumas etapas paralelas às etapas do projeto, como apresentado no fluxograma da figura 3.1 e descritas a seguir:

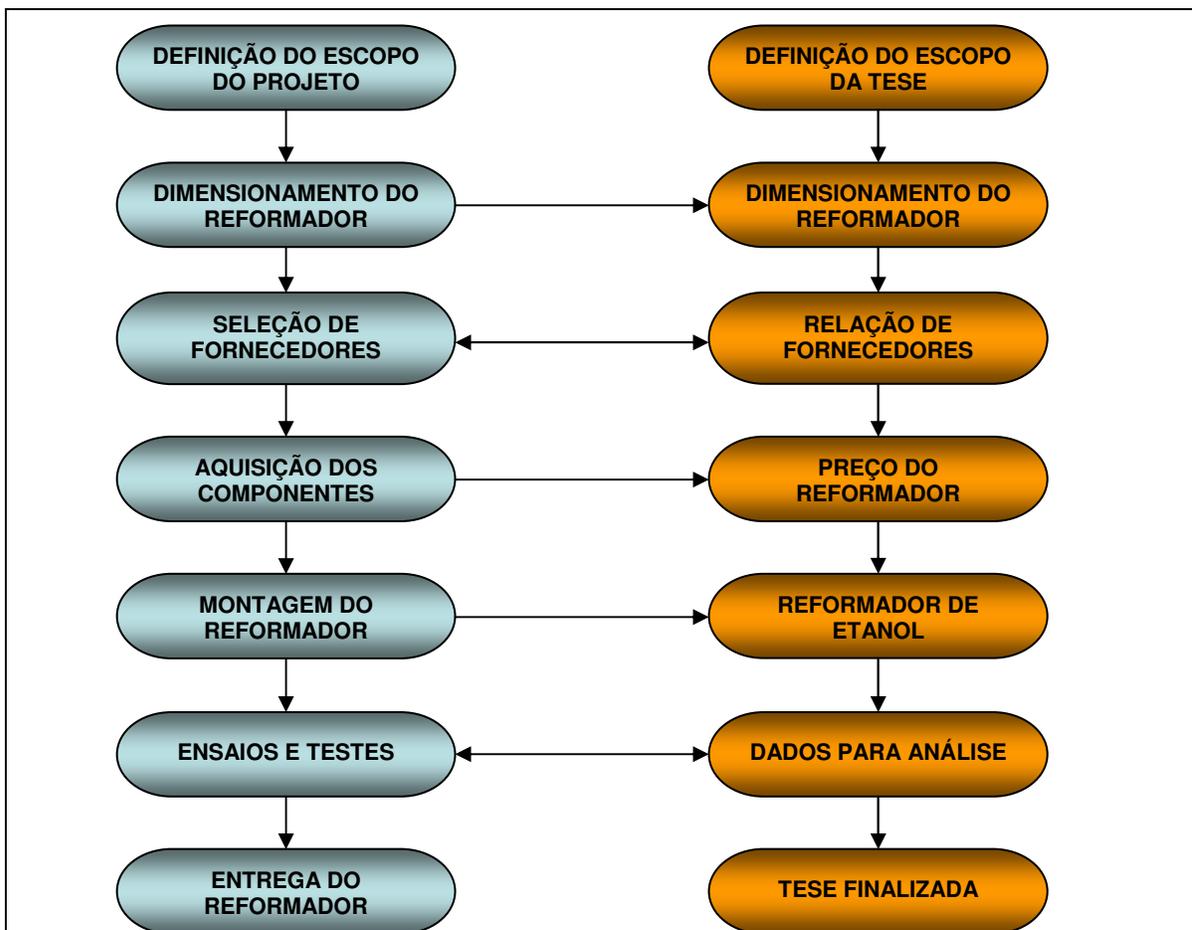


Figura 3.1 – Fluxograma comparativo entre as atividades desenvolvidas em paralelo para realização do projeto de pesquisa do reformador de etanol e o desenvolvimento desta Tese.

Fonte: Elaboração própria.

ETAPA 1: Definição do escopo da tese.

O trabalho se iniciou com uma revisão da literatura relacionada aos temas envolvidos direta ou indiretamente no desenvolvimento do reformador de etanol. O objetivo dessa etapa foi definir os conceitos envolvidos em toda a linha de pesquisa e atualizar as informações sobre o estado-da-arte dos reformadores de etanol.

Foram elaborados os textos iniciais sobre os sistemas de reforma de etanol existentes, o aproveitamento do hidrogênio produzido e sua aplicação nas células a combustível.

No final desta etapa, além do conhecimento técnico buscou-se determinar teoricamente uma sistemática preliminar para o dimensionamento deste tipo de reformador, com base nos parâmetros práticos de utilização desta tecnologia. Da mesma forma, ao final desta etapa, iniciou-se o acompanhamento do projeto e dimensionamento do reformador de etanol.

ETAPA 2: Acompanhamento do dimensionamento dos sistemas de reforma de etanol.

Nesta etapa foi acompanhado o projeto e dimensionamento de um reformador de etanol com todos seus subsistemas (reforma, purificação, controle e compressão), constituído por materiais e tecnologias definidas na etapa anterior.

No final desta etapa foram selecionados os fornecedores dos componentes comerciais que compõem o reformador de etanol, bem como os prestadores de serviços necessários para execução de componentes sob encomenda.

ETAPA 3: Classificação dos componentes, acessórios e materiais

Para realização desta tese fez-se necessária a classificação dos componentes, acessórios e materiais para que se pudesse definir a relevância de cada um no custo final do reformador de etanol. Nesta etapa foi definida essa classificação.

ETAPA 4: Composição do custo de fabricação do reformador de etanol.

Nesta etapa foi acompanhado o processo de compras dos componentes, acessórios e materiais, a contratação dos serviços de terceiros, bem como a construção do reformador de etanol autotérmico, com purificação PSA e fornecimento de hidrogênio a 6 bar (manométrica) executado pela empresa Hytron, de acordo com o projeto realizado na Etapa 2. Essas informações foram essenciais para a análise econômica do projeto, no caso o custo do sistema completo, cujo resultado, como se verá adiante, foi bastante diferente daquele que seria obtido com um trabalho meramente teórico, a partir de informações de catálogos e de supostos fornecedores de peças, componentes e serviços.

Também nesta etapa foram acompanhados os tempos de montagem com o objetivo de quantificar o custo de mão de obra para montagem do reformador de etanol.

ETAPA 5: Acompanhamento dos testes e ensaios do reformador para a coleta de dados necessários para elaboração do custo de utilização do reformador de etanol.

Com o término da construção do reformador foram realizados os testes e ensaios para a avaliação qualitativa e quantitativa do hidrogênio produzido e dos insumos utilizados. Nesta etapa foram acompanhados todos os ensaios e determinado o estado-da-arte real da tecnologia em funcionamento.

Através dos dados coletados foi feito o balanço energético de todo o sistema, definindo-se os parâmetros de interesse que descrevem o funcionamento e que são úteis para se analisar a eficiência global do sistema. Durante esta mesma etapa foram calculados os custos relacionados ao hidrogênio produzido. Novamente aqui os resultados experimentais mostraram uma realidade diversa daquela que seria obtida apenas através de análises teóricas, computacionais, simulando-se resultados e estimando-se parâmetros de desempenho.

ETAPA 6: Finalização da tese.

Nesta etapa foi realizada uma análise global dos resultados experimentais obtidos e dos custos verificados, determinando-se os impactos relativos de cada subsistema e mesmo dos principais componentes no custo final do hidrogênio. Os resultados da análise constituem as conclusões dessa tese.

3.2 Metodologia Utilizada Para Elaboração da Análise Econômica do Reformador.

Para se chegar aos custos do H₂ produzido pelo reformador de etanol e da energia elétrica produzida pela célula a combustível, foram realizados os ensaios experimentais e levantados os principais parâmetros de funcionamento de ambos os equipamentos. Nesta etapa, atentou-se para o consumo dos insumos necessários para os seus funcionamentos. Os detalhes técnicos referentes a esta etapa encontram-se no Capítulo 4 deste trabalho.

Com os dados técnicos pôde-se realizar a análise econômica na seguinte seqüência:

Primeiramente quantificaram-se os parâmetros relativos aos cálculos do custo de investimento inicial, custo com operação e manutenção e custo com insumos, relativos ao reformador de etanol e a aplicação do H₂ produzido na célula a combustível em questão.

Com estes dados, calcularam-se os valores referentes a cada um destes custos o que culminou na elaboração do fluxo de caixa para o funcionamento dos dois sistemas ao longo de uma vida útil de 10 anos. A partir deste fluxo de caixa aplicou-se a teoria econômica apresentada no Capítulo 2, obtendo-se como resultado inicial os custos de produção do H₂ (R\$/kg) e o da energia elétrica gerada (R\$/kW), impondo um VPL igual a zero. Os detalhes da aplicação desta metodologia, bem como a discriminação da composição destes custos estão apresentados no Capítulo 5.

Obtidos os valores dos custos do H₂ e da energia elétrica gerada, fez-se uma análise comparativa entre os custos calculados e os de outras tecnologias apresentadas nas referências indicadas no Capítulo 2.

Com o preço de mercado do hidrogênio vendido comercialmente na região de Campinas-SP, realizaram-se os cálculos da Taxa Interna de Retorno (TIR), do período de *payback* para o reformador de etanol e a análise de sensibilidade da variação dos custos do H₂ e da energia elétrica. Estes resultados estão apresentados no Capítulo 6.

Capítulo 4

Materiais e Métodos

O escopo desse capítulo é apresentar, pela primeira vez, o desempenho de um Protótipo de Reformador de Etanol⁷ desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio da Unicamp – LH2 em parceria com a empresa Hytron, cujo atual estágio de desenvolvimento representa o estado da arte dessa tecnologia no país. Os parâmetros técnicos aqui apresentados serão utilizados na análise econômica desse protótipo, no próximo capítulo.

Como mostrado no Capítulo 3, o desenvolvimento deste trabalho de doutorado seguiu em paralelo ao projeto, coordenado pelo LH2. Dessa forma, optou-se neste capítulo em apresentar no tópico 4.1, sem maiores detalhes, os principais sistemas que envolviam este projeto, já que isto caracteriza o reformador, e a partir do tópico 4.2 retoma-se a apresentação do reformador de etanol, com enfoque nas características técnicas importantes para a elaboração da avaliação econômica, que é o foco do estudo deste trabalho.

4.1 Visão Geral sobre os Sistemas Utilizados para o Fornecimento de Energia Elétrica a partir da Reforma de Etanol e Célula a Combustível.

Para a produção e utilização da energia elétrica produzida pela reforma de etanol e célula a combustível faz-se necessário a utilização de basicamente 3 sistemas: o Reformador de Etanol, a

⁷ Para facilitar a leitura do texto, denominou-se o Protótipo do Reformador de Etanol apenas como Reformador.

Célula a Combustível e o Sistema de Condicionamento da Energia Elétrica, como apresentado na Figura 4.1.

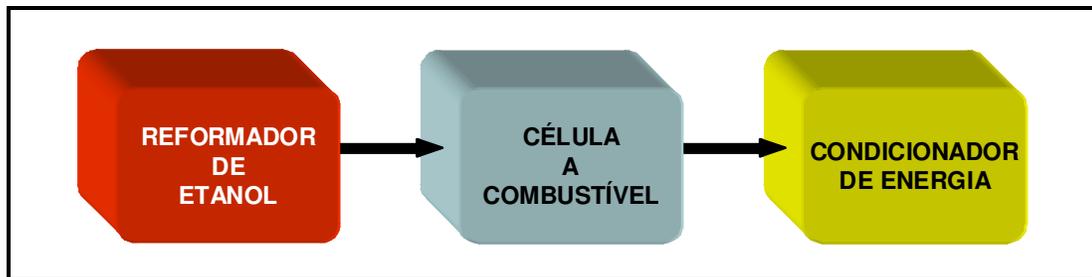


Figura 4.1 – Sistemas necessários para a produção e utilização de energia elétrica a partir da reforma de etanol e célula a combustível. Fonte: Elaboração própria.

Sendo a célula a combustível o equipamento desenvolvido comercialmente com características de entrada e saídas de insumos impostas pela sua tecnologia, os sistemas a ela acoplados devem seguir as suas recomendações técnicas. Desta forma, o trabalho realizado constituiu no desenvolvimento do protótipo de um reformador de etanol para produção de hidrogênio e uso numa célula a combustível do tipo PEMFC, denominada comercialmente *GenCore System*, fabricada pela empresa *Plug Power*, com potência nominal de 5 kW que, para isso, requer uma quantidade mínima de 3,7 m³ de H₂ com um nível de CO abaixo de 30 μmol.mol⁻¹, de acordo com especificações técnicas do fabricante. A Figura 4.2 apresenta a montagem dos sistemas em seus módulos.

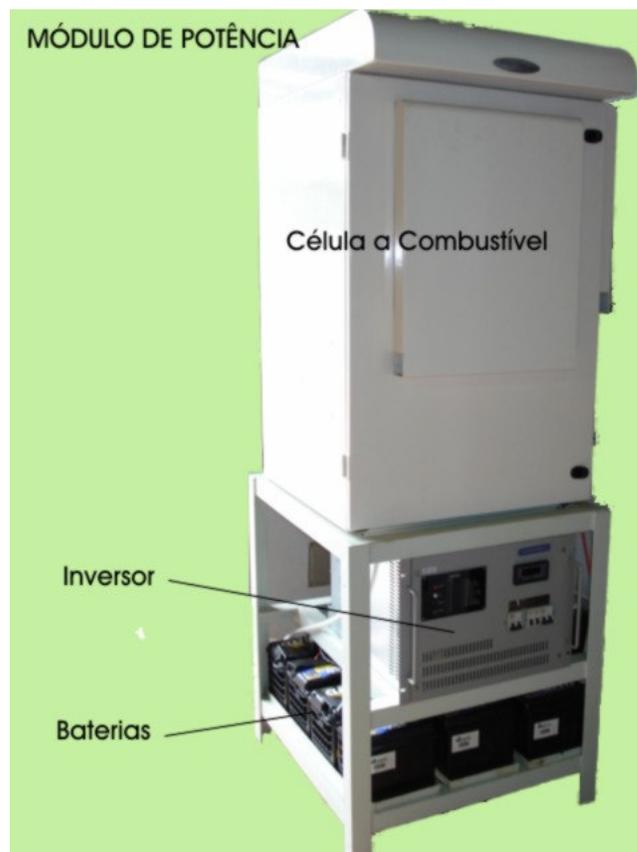
O sistema de condicionamento da energia elétrica produzida por esta célula a combustível está dimensionado para aplicações estacionárias, desconectadas da rede elétrica. É composto por um banco de baterias e um inversor de frequência. O banco de baterias é utilizado como um *buffer*, armazenando a energia elétrica gerada pela CaC e fornecendo esta energia elétrica para o inversor de frequência, de acordo com a demanda real. Já o inversor de frequência é utilizado para adequar a energia elétrica fornecida pelo banco de baterias aos padrões exigidos pela instalação, onde esta energia será utilizada.

No arranjo final, o banco de baterias é composto por 10 baterias chumbo-ácido de 12 V e 45 Ah, marca Moura, modelo 12MF45. As baterias são conectadas em série, perfazendo 120 V. Essa é a

tensão de fornecimento da célula a combustível que abastece o banco de baterias. A tensão do banco de baterias é então convertida para corrente alternada através do inversor de frequência marca Powerbras de 6 kVA, 4,8 kW, tensão de entrada de 105-125 V_{CC} e tensão de saída senoidal monofásica de 220 V, 60 Hz.



(a)



(b)

Figura 4.2 – Sistemas necessários para a produção e utilização de energia elétrica a partir da reforma de etanol e célula a combustível: (a) Reformador de Etanol (b) Célula a combustível, inversor CC/CA e banco de baterias. Fonte: Elaboração própria.

Para produzir o hidrogênio com as características exigidas pela célula a combustível, o reformador de etanol foi projetado com 4 sub-sistemas: o Módulo de Processamento de Combustível, Módulo do Tratamento do Gás de Reforma, Módulo de Purificação e Módulo de Controle; como apresentado na Figura 4.3.

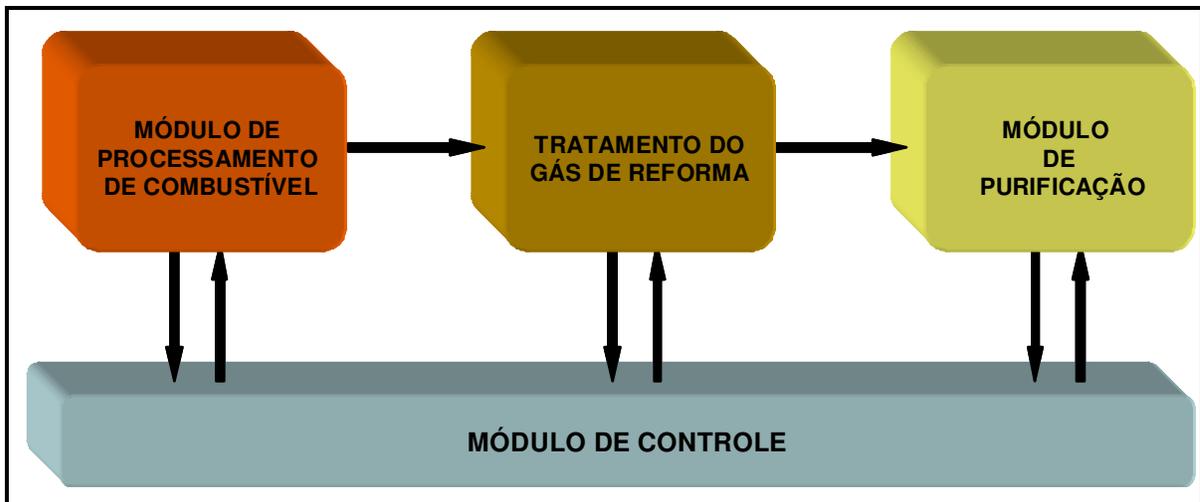


Figura 4.3 – Sub-sistemas do reformador de etanol. Fonte: Elaboração própria.

4.2 O Reformador de Etanol.

De forma geral, o reformador é um dispositivo que processa o etanol em um gás rico em hidrogênio, denominado gás de síntese (GS). Em seguida, este gás é purificado à qualidade exigida pela célula a combustível utilizada no sistema, que converte a energia química de seu combustível, o hidrogênio, diretamente em energia elétrica e água.

4.2.1 *Módulo de Processamento do Combustível*

É neste módulo que é processado o etanol e produzido o gás de síntese. Para isto, ele conta com todas as entradas de insumos necessárias e com seus respectivos sistemas de purificação e condicionamento. Também estão presentes o reator de reforma, onde os insumos são processados; os trocadores de calor, onde é realizado o pré-aquecimento dos insumos de entrada e os sopradores de ar e as bombas de etanol e água, que forçam a circulação dos insumos.

O reator construído para este reformador está fundamentado na rota de reforma autotérmica do etanol, uma vez que esta rota pode trazer vantagens tais como:

- Redução do tamanho do reator devido à geração de calor, etapa oxidativa, no mesmo leito na qual a reforma, etapa endotérmica, é desenvolvida. Este fato exclui a necessidade de

trocadores de calor internos ao reator para a manutenção do processo, os quais, em geral, determinam o volume do sistema. A menor geometria é também proporcionada pela temperatura de operação mais elevada, em relação aos reatores de reforma-vapor, e pelos menores tempos de residência proporcionados pelos catalisadores de processo utilizados;

- Operação do reator de reforma sem a utilização de ligas especiais geralmente utilizadas para a implementação de reatores de reforma-vapor, expostas a elevadas temperaturas, principalmente a face do leito térmico (combustão), e expostas a atmosferas oxidantes e redutoras ao mesmo tempo, nas faces onde ocorre as reações de reforma;
- Dada a menor geometria e a utilização de materiais com menor complexidade, esta tecnologia está mais propensa a menores custos iniciais.

O gás de síntese produzido neste módulo é encaminhado para o módulo de tratamento do gás de síntese.

4.2.2 Módulo de Tratamento do Gás de Síntese

Neste módulo, o gás de síntese produzido pelo módulo de processamento de combustível é tratado para elevar, em sua composição, a proporção de hidrogênio e reduzir a de monóxido de carbono.

O módulo de tratamento do Gás de Síntese pode compreender a utilização de três leitos catalíticos, a saber, *shift* de alta temperatura (380°C), *shift* de baixa temperatura (220 °C) e oxidação preferencial, todos para o processamento seletivo do monóxido de carbono. Porém, após vários resultados experimentais optou-se por utilizar, na implementação final, apenas o reator de *shift* de baixa temperatura, já que a utilização dos reatores de *shift* de alta temperatura e de oxidação preferencial, não se mostra energeticamente vantajosa, quando se faz necessário a utilização de um sistema de purificação específico para o hidrogênio como na aplicação da célula a combustível em questão.

A operação de um sistema de reforma de hidrocarbonetos tem sua eficiência intimamente atrelada ao projeto dos reatores, à capacidade de recuperação de calor, assim como ao balanço de

planta da implementação, ou seja, à razão entre seu consumo energético intrínseco e sua capacidade de geração. Assim, a utilização de trocadores de calor para a recuperação de energia térmica contida no gás de síntese e o pré-aquecimento dos insumos de entrada do sistema de reforma também foi implementada, o que significou um acréscimo na eficiência do processamento do combustível. Desta forma, o aumento da concentração de hidrogênio na corrente gasosa, principalmente devido à operação sob menores razões O_2 /Etanol, resulta diretamente na menor diluição do gás de síntese por N_2 , quando ar é utilizado como agente oxidante do processo.

A condição termodinâmica de operação destes leitos, a expectativa física de desempenho, assim como os equipamentos sugeridos para a construção do sistema com vista a um apropriado balanço de planta, resultou na topologia básica do módulo de processamento do combustível e do módulo de tratamento do gás de síntese aqui reportados, conforme representada na Figura 4.2(a).

4.2.3 Módulo de Purificação

É neste módulo que o gás de síntese é tratado para garantir a qualidade do hidrogênio exigida pela célula a combustível. Para isto, o gás de síntese gerado no módulo de processamento de combustível, depois de tratado, resfriado e condensado no módulo de tratamento do gás de síntese, é pressurizado e encaminhado para as colunas de purificação.

Para a purificação do hidrogênio presente na mistura gasosa proveniente da reforma do etanol através da rota da reforma autotérmica, optou-se por utilizar leitos de adsorção molecular operando em ciclos PSA (*Pressure Swing Adsorption*). Tal sistema é composto por duas colunas de purificação operando a uma pressão de 6,0 bar_m, pressão na qual o hidrogênio purificado é fornecido, havendo as seguintes condições de entrada para o gás de síntese:

- O gás de síntese deve ser fornecido com a menor temperatura possível ao sistema de purificação, uma vez que a eficácia na purificação do hidrogênio, que se resume na quantidade residual dos contaminantes no gás de saída, está vinculada à diferença nos valores dos parâmetros termodinâmicos de operação do sistema, em ciclo de purificação e em ciclo de regeneração;

- O gás de síntese deve ser fornecido seco ao sistema de purificação, sem condensáveis, visto que moléculas de líquidos polares determinam, na maioria dos casos, maiores afinidades às peneiras moleculares utilizadas, o que, no caso da saturação da coluna, ocasionaria a necessidade de um condicionamento das peneiras moleculares à alta temperatura, o que não poderia ser realizado na montagem do purificador;
- Cuidados com a manipulação do hidrogênio purificado e dos gases separados na mistura original, em geral concentrados com relação ao monóxido de carbono, devem ser ressaltados e a ventilação do local deve corresponder às exigências normatizadas;
- A pressão de entrada não deve exceder 0,5 bar_m;

Para a implementação do sistema de purificação de hidrogênio por ciclos PSA, utilizou-se um compressor para a elevação da pressão do gás de reforma de sua pressão de fornecimento pelo sistema de reforma, aproximadamente 0,4 bar_m, à pressão de operação do sistema PSA, 6 bar_m.

Foram incorporados também um resfriador – condensador, com purga temporizada dos líquidos residuais, e um leito de sílica-gel, secador do vapor residual após a referida secagem mecânica. A Figura 4.4 apresenta respectivamente o resfriador – condensador e o compressor utilizados no módulo de purificação.



Figura 4.4 – Resfriador-condensador do gás de síntese a alta pressão (esquerda) e compressor para o gás de síntese (direita). Fonte: Elaboração própria.

4.2.4 *Módulo de Controle*

Para se atingir alta confiabilidade e independência no funcionamento do reformador, faz-se necessária a implementação de um sistema de controle capaz de monitorar e atuar em todos os módulos. Um dos principais desenvolvimentos neste tipo de equipamento diz respeito à lógica de controle.

Esta lógica prevê o acionamento automático da unidade, a qual poderá ser determinada remotamente; o condicionamento térmico do sistema, respeitando-se os limites de temperatura de todos os materiais e equipamentos utilizados em sua construção; a ação voluntária do sistema no caso de anomalias térmicas na operação, sempre em busca da condição de máximo desempenho no processamento do referido combustível e, finalmente, o seu desligamento no caso de emergências e paradas normais, sempre garantindo a segurança das pessoas em sua volta e a própria integridade do sistema.

4.3 Experimentos Realizados

Como o objetivo deste trabalho é indicar os fatores técnicos que influenciam na análise econômica do reformador de etanol desenvolvido, optou-se por selecionar de forma objetiva os resultados experimentais que são úteis para esta finalidade, estando fora do escopo deste trabalho apresentar de forma detalhada os estágios de desenvolvimento desta tecnologia, bem como os resultados de todos os experimentos realizados.

4.3.1 *Reformador de Etanol*

Superadas as dificuldades relativas ao dimensionamento mecânico dos leitos catalíticos, a escolha do suporte mais adequado para a montagem dos módulos, a melhor disposição dos componentes e acessórios e sua integração mecânica e elétrica, os esforços no reformador foram concentrados em seu funcionamento.

Primeiramente os módulos foram caracterizados experimentalmente de forma individual. Nessa etapa verificou-se o comportamento real de cada um deles, comparando com os valores

teóricos de projeto. Durante os experimentos com os módulos de processamento do combustível e de tratamento do gás de síntese, ficou claro que a maior dificuldade residia na homogeneização térmica dos reatores. Já no módulo de purificação as maiores dificuldades encontradas relacionavam-se com a determinação do tempo de saturação das colunas de purificação.

Em ambos os casos os ajustes necessários requeriam uma melhor avaliação dos parâmetros termodinâmicos utilizados pela rotina de controle e automação implementada no módulo de controle. Assim, os esforços foram concentrados nesta melhor parametrização e, posteriormente na integração de todos os módulos.

Teoricamente, a reforma autotérmica do etanol prevê uma relação entre o consumo de etanol e a produção de hidrogênio de 0,75 L/h de etanol para cada 1,0 m³/h de H₂ (MARIM NETO et al., 2006). Os resultados experimentais mostraram a proporção volumétrica etanol:água (EtOH:H₂O) = 1:0,75 como aquela de melhor desempenho do sistema com relação à minimização do teor de CO à saída do reator de *shift* de baixa temperatura (LTS), sem prejuízos na operação estável do reator ATR. Tal constatação foi observada pela estabilidade térmica dos reatores ATR e LTS e pelos resultados das análises cromatográficas realizadas no gás de síntese.

Os ensaios realizados com os módulos de processamento de combustível e de tratamento do gás de síntese mostraram, na entrada do módulo de purificação, um gás de síntese com aproximadamente 37% de H₂ e 2,0% de CO. Porém, o melhor resultado na composição do G.S, após a implementação do módulo de purificação, está apresentado na Tabela 4.1. Já os melhores resultados relativos à qualidade do hidrogênio purificado estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.1 – Composição do gás de síntese direcionado para o módulo de purificação (% em volume).

H ₂	O ₂	N ₂	CO	CH ₄	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
27,7%	0	49,5	5,38	0,64	14,5	0,18	0

Fonte: Elaboração própria

Tabela 4.2 – Composição do hidrogênio na saída do módulo de purificação ($\mu\text{mol/mol}$).

Procedência	Hora	O ₂	N ₂	CH ₄	CO	CO ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	Soma	Pureza H ₂
PSA - Col.2	12 :15	2,40	8,99	34,90	2,63	60,30	0	0	0,15	99,9%
PSA - Col.1	12 :31	2,69	8,18	41,80	4,32	52,50	0	0	0,16	99,8%
PSA - Col.2	13 :21	3,41	8,94	15,80	18,6	652,0	0	0	0,15	99,8%
PSA - Col.1	13 :38	3,35	7,77	19,40	2,86	646,0	0	0	0,15	99,8%
PSA - Col.2	15:29	3,21	8,28	426,0	1,23	613,0	0	0	0,13	99,9%
PSA - Col.1	15:45	2,94	7,31	6.260,0	1,69	559,0	0	0	0,13	99,9%

Fonte: Elaboração própria.

Além dos parâmetros qualitativos do gás de síntese e do hidrogênio produzido, foram avaliados também os parâmetros quantitativos, principalmente os relativos ao consumo de etanol para a produção do hidrogênio e ao consumo elétrico do reformador. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Consumo dos insumos no reformador..

Fator de consumo de etanol (L de etanol / kg de H ₂)	12,5
Consumo elétrico sem purificação (Wh)	220
Consumo elétrico com purificação (Wh)	2.220

Fonte: Elaboração própria

Pode-se observar a partir da Tabela 4.3 que o principal responsável pelo consumo energético intrínseco do reformador é sistema de compressão do gás de síntese (90 % dos 2.220 Wh demandados internamente pela unidade de geração), o que configura o principal problema a ser superado.

4.3.2 Célula a Combustível

O principal resultado buscado no ensaio do sistema de célula a combustível, além da verificação de sua conformidade, foi determinar as curvas relevantes de eficiência do sistema com relação à potência elétrica gerada e, assim, a curva normalizada de consumo de hidrogênio. Estes são os principais parâmetros de interesse para o acoplamento do reformador de etanol com a célula a combustível.

No período de avaliação do sistema de célula a combustível, a demanda de energia e a quantidade de hidrogênio necessário para tal, estiveram conforme mostra a Figura 4.5.

Para a máxima capacidade de geração elétrica, condição na qual o *stack* do sistema desenvolve aproximadamente 5,4 kW, o consumo de hidrogênio, verificado através de monitoramento do próprio *GenCore*, foi de 71,25 L/min (CNTP), o que em regime permanente deve corresponder à máxima vazão de saída do sistema de reforma de etanol (4,3 m³/h de hidrogênio).

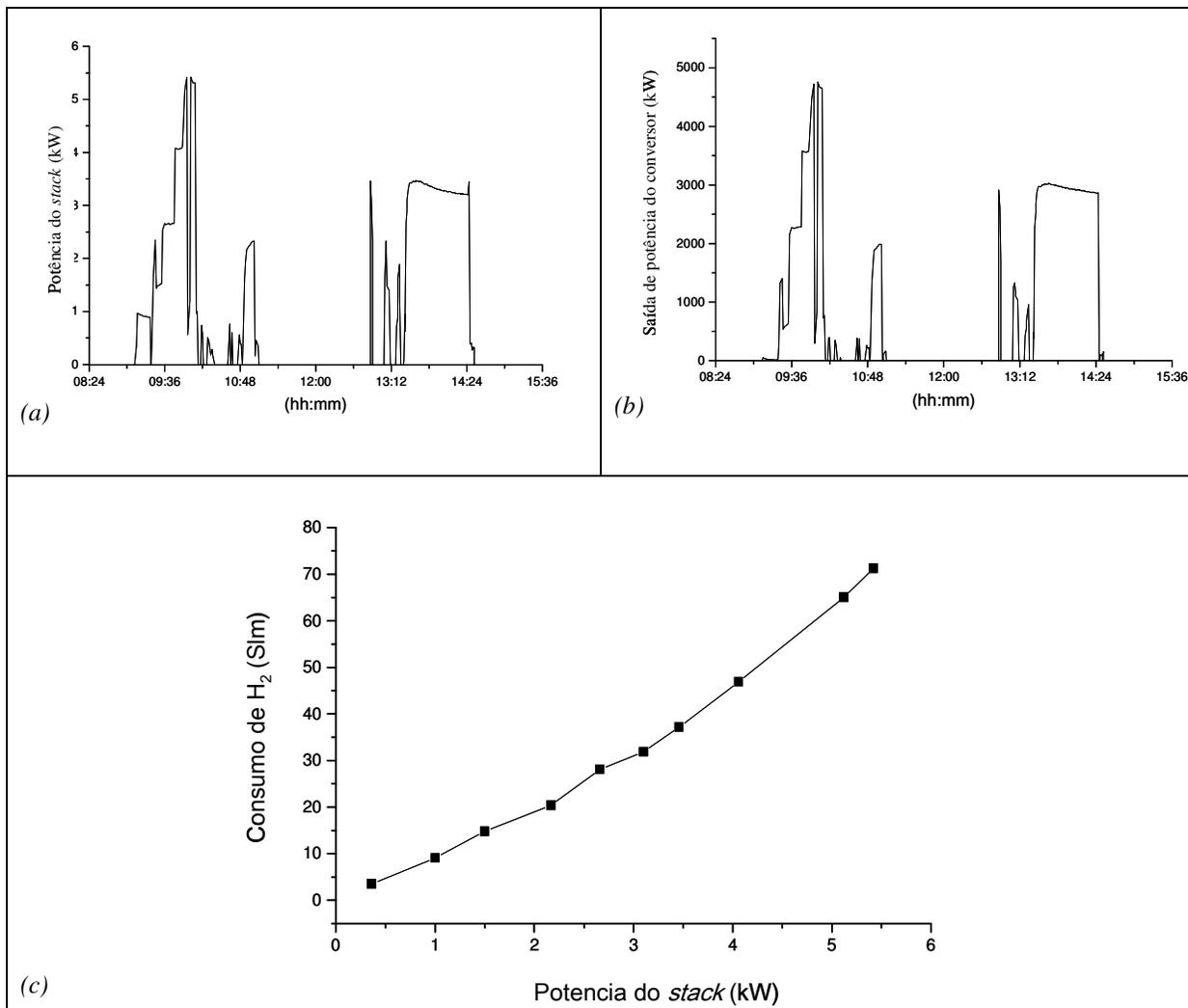
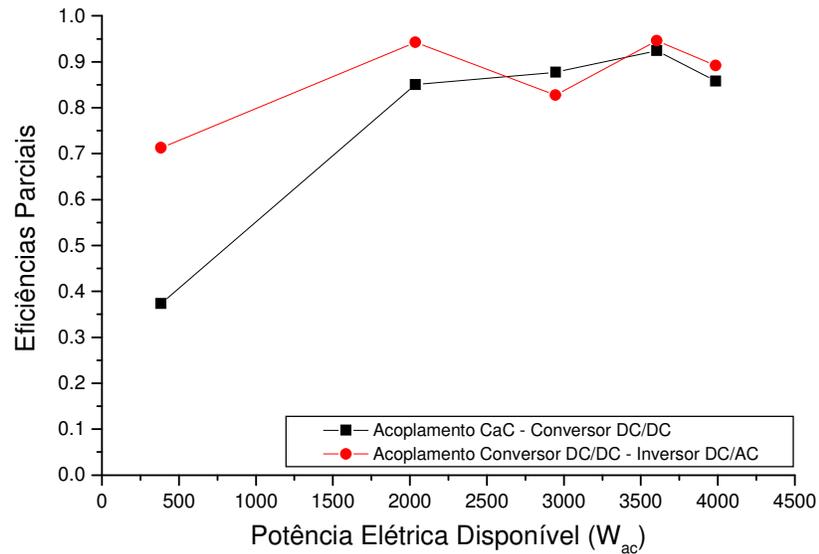
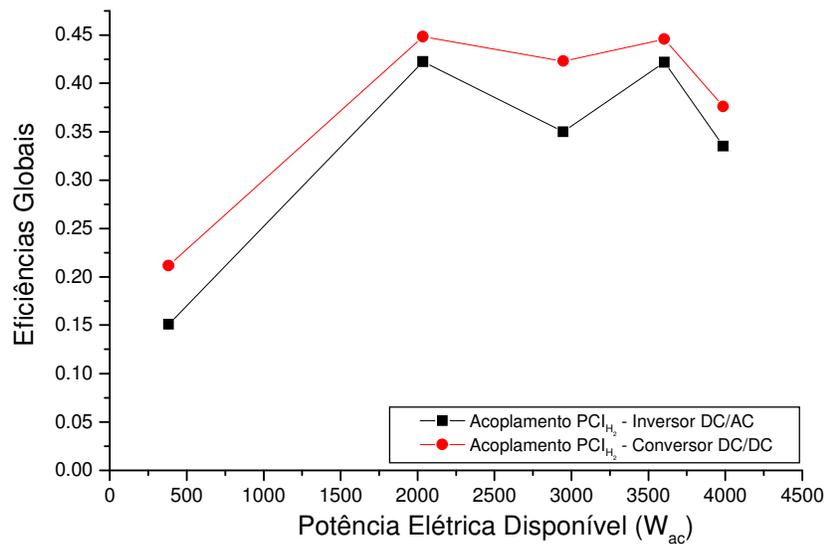


Figura 4.5 – (a) Potência desenvolvida pelo *stack* em ensaios de regime transiente e regime permanente; (b) Potência desenvolvida pelo conversor DC/DC em ensaios de regime transiente e regime permanente e (c) Vazão equivalente de hidrogênio para cada um dos valores de potência desenvolvidos. Fonte: Elaboração própria.

Para o acoplamento de todos os principais componentes do sistema ensaiado, célula a combustível, conversor DC/DC e o inversor de frequência adquirido, foram constatadas as eficiências parciais de acoplamento assim como as eficiências globais de geração, como apresentado na Figura 4.6.



(a)



(b)

Figura 4.6 – (a) Eficiência do acoplamento do *stack* com o conversor DC/DC e deste como inversor de frequência; (b) Eficiências globais de geração de energia elétrica. Fonte: Elaboração própria.

Deve-se salientar o fato que para baixos fatores de capacidade do sistema, as eficiências de acoplamento dos componentes, assim como as eficiências globais de geração, ficam seriamente prejudicadas num patamar de aproximadamente 37% para a primeira e 15% para a segunda.

Para potências elétricas superiores a 2 kW, essas eficiências estabelecem-se numa constância com alta eficiência de acoplamento e conversão, conforme apresentado sucessivamente pelas Figuras 4.6 (a) e 4.6 (b).

4.4 Considerações Finais

A finalização do projeto original desse sistema permitiu concluir sobre topologias e componentes que propiciam ao sistema maior eficiência energética e menores custos de fabricação, conhecimento este que está sendo agregado às futuras gerações da planta de geração de energia elétrica em questão. Assim, com estes parâmetros, a redução do volume do sistema ou acréscimo da capacidade de geração por unidade de volume é questão em desenvolvimento a partir de novos *layouts* propostos para o sistema.

O balanço de planta desse protótipo possibilita a geração útil de 3 kW_e, uma vez que o consumo energético de fundo de todo o sistema é responsável pela utilização de parte da energia elétrica gerada. Melhores balanços de planta, associados principalmente ao consumo elétrico com o sistema de compressão do gás de síntese, às melhorias nos projetos dos componentes customizados do sistema, tais como reatores e trocadores de calor, e a equipamentos melhores adaptados às condições de funcionamento da planta, também devem ser trabalhados.

Para garantir o funcionamento contínuo deste sistema, faz-se necessário um período de ensaios ininterruptos simulando a carga a ser contemplada, sendo estes os próximos passos a serem realizados pela equipe técnica do Laboratório de Hidrogênio da Unicamp e da empresa Hytron.

Capítulo 5

Análise Econômica

Este capítulo tem como objetivo apresentar uma análise técnico-econômica do hidrogênio produzido através do reformador de etanol desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP e pela empresa Hytron. A metodologia utilizada, conforme salientado no Capítulo 2, foi uma adaptação do trabalho: “*Cost and Performance Comparison of Stationary Hydrogen Fueling Appliances*” desenvolvido pelo “*The Hydrogen Program Office of Power Technologies - U.S Department of Energy*” (DOE, 2002).

Tal metodologia foi escolhida devido às semelhanças entre a análise técnico-econômica realizada pelo DOE e a necessária para a realização deste trabalho, bem como pela disponibilidade de dados comparativos entre as tecnologias utilizadas pelo DOE e os obtidos pelo reformador de etanol.

No decorrer deste capítulo são apresentados os cálculos realizados para avaliação econômica, que tem como base os valores técnicos apresentados ao longo do Capítulo 4.

5.1 Análise Econômica do Sistema de Reforma Autotérmica do Etanol

5.1.1 Descrição dos Parâmetros do Sistema de Reforma ATR do Etanol

Para o cálculo do custo de produção do hidrogênio a partir do reformador de etanol analisado, os seguintes parâmetros foram quantificados:

- i. custo de investimento, relativo ao valor de compra de um reformador;
- ii. custo de operação e manutenção;
- iii. custo dos insumos

Para definição do custo de investimento foi realizada a cotação de preço de um reformador de etanol com as características técnicas apresentadas na tabela 5.1. O valor recebido pela cotação realizada em maio de 2008 está apresentado na tabela 5.2.

Tabela 5.1 – Características técnicas solicitadas para o reformador de etanol.

Capacidade de produção:	3,5 Nm ³ .h ⁻¹ H ₂
Teor mínimo de H ₂ :	99 %
Teor máximo de Monóxido de Carbono (CO):	50 μmol.mol ⁻¹ (ppm)
Pressão do H ₂ gerado:	4,0 bar _a

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5.2 – Preço do reformador de etanol pela empresa Hytron.

Protótipo de sistema de produção de hidrogênio através de reforma de etanol e purificação por processo PSA, de acordo com as características técnicas solicitadas na Tabela 5.1.	
Total	R\$ 250.000,00

Fonte: Elaboração própria.

Vale ressaltar que no preço indicado não está incluso o serviço de comissionamento do equipamento no local de instalação.

Para a definição dos custos de operação e manutenção do reformador os seguintes pontos foram avaliados:

- i. consumo de etanol para a máxima produção de hidrogênio;
- ii. consumo de energia elétrica para a máxima produção de hidrogênio;
- iii. custos com material de reposição;
- iv. definição dos fatores de capacidade e disponibilidade;
- v. determinação dos custos com etanol e energia elétrica.
- vi. determinação do custo com mão de obra

Para facilitar a compreensão dos fatores analisados para cada um destes pontos, optou-se por apresentá-los em tópicos específicos:

5.1.2 Consumo de Etanol

Teoricamente, a reforma autotérmica do etanol prevê uma relação entre o consumo de etanol e a produção de hidrogênio de 0,75 L/h de etanol para cada 1,0 m³/h de H₂ (MARIM NETO et al., 2006). Entretanto, o consumo de etanol do reformador, medido experimentalmente, mostra que: 1,54 L/h de etanol produzem 5,5 m³/h de gás de síntese. Neste gás de síntese a proporção de hidrogênio é de aproximadamente 30%, ou seja: 1,54 L/h de etanol geram aproximadamente 1,5 m³/h de H₂ (1,03 L/h de etanol para cada 1,0 m³/h de H₂):

$$1,54 \text{ L/h de etanol} \Rightarrow 1,5 \text{ m}^3/\text{h de H}_2 \quad (6)$$

Como a densidade do H₂ é de 0,08146 kg/m³ (a 24°C e 101,3 kPa) tem-se que:

$$P_{H_2} = 1,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 0,08146 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,123 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (7)$$

Onde, P_{H_2} é a produção mássica de H₂ por hora para um consumo de 1,54 L/h de etanol.

Os dados experimentais da célula a combustível mostram que para a produção máxima de energia (5,42 kWh) seu consumo máximo de H₂ é de 4,3 m³/h (CNTP). Ou seja:

$$C_{H_2} = 4,3 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} \times 0,08146 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 0,35 \frac{\text{kg}}{\text{h}} \quad (8)$$

Onde, C_{H_2} é o consumo máximo de H₂ por hora, na célula a combustível.

De acordo com a Equação (2), para se produzir esses 0,35 kg/h de H₂ são necessários 4,4 L/h de etanol:

$$Cm_{etanol} = 4,4 \frac{L}{h} \quad (9)$$

Onde, Cm_{etanol} é o consumo máximo de etanol por hora, no reformador.

5.1.3 Consumo de Energia Elétrica

De acordo com os dados experimentais, para a máxima produção de H_2 o consumo elétrico máximo do reformador é de 2.220 Wh, onde 220 Wh correspondem ao consumo elétrico do módulo de processamento de combustível e do módulo de controle. Os 2.000 Wh restantes correspondem ao consumo elétrico do sistema de compressão do gás de síntese no módulo de purificação. Portanto

$$Cm_{EE} = 2,22 \text{ kWh} \quad (10)$$

Onde, Cm_{EE} é o consumo máximo de energia elétrica por hora, no reformador.

5.1.4 Custo com Material de Reposição

5.1.4.1 Custo de reposição dos catalisadores

A experimentação do sistema demonstrou que as velocidades espaciais para as quais os catalisadores demonstraram o desempenho esperado foram 30.000 h^{-1} para o leito ATR e 15.000 h^{-1} para o leito LTS. De acordo com estes fatores, determinou-se que os volumes necessários de catalisadores são de 840 ml para o ATR e 1.148 ml para o LTS.

Como os catalisadores são vendidos em monolitas de 1.677 ml com um custo de 600€ ⁸ por monolita, conclui-se que:

⁸ Cotação do euro em 21/10/2008: $1,0\text{€} = \text{R\$ } 2,88$. Fonte: BC, 2008

$$C_{c_{ATR}} = \text{R\$ } 864,00 \quad (11)$$

$$C_{c_{LTS}} = \text{R\$ } 1.728,00 \quad (12)$$

Onde, $C_{c_{ATR}}$ é o custo de manutenção do catalisador ATR.

$C_{c_{LTS}}$ é o custo de manutenção catalisador LTS.

Como ainda não se pôde testar ininterruptamente o reformador durante um elevado período, não se pode afirmar o tempo de duração real dos catalisadores utilizados. Como a expectativa de duração deste tipo de catalisador é de aproximadamente 5 anos (DOE, 2002), estipulou-se como plausível, de acordo com os ensaios realizados, que a substituição do catalisador ATR e LTS ocorreria após 01 ano (8.600 h, 20% do tempo esperado inicialmente).

5.1.4.2 Custo com o pré-tratamento do etanol ($C_{pt_{etanol}}$)

Para o pré-tratamento do etanol, são utilizados leitos de passagem associados em série, composto por filtro de polipropileno e um leito monolítico de carvão ativado, todos com substituição prevista a cada 06 meses de operação (4.380 h). O custo unitário destes elementos é, respectivamente, R\$ 17,00 e R\$ 52,00.

5.1.4.3 Custo com o pré-tratamento da água de processo ($C_{pt_{água}}$)

Os componentes de purificação de água de processo correspondem a um filtro de polipropileno, um leito monolítico de carvão ativado e um leito misto de resinas iônicas, todos com substituição programada a cada 06 meses de operação (4.380 h). O custo unitário destes elementos é, respectivamente, R\$ 17,00, R\$ 52,00 e R\$ 47,00.

A tabela 5.3 apresenta um resumo do custo anual com material de reposição.

Tabela 5.3 – Custo de material de reposição do sistema.

Item	Mês		Total Anual
	6	12	
C_{ATR}	-----	864,00	864,00
C_{CLTS}	-----	1.728,00	1.728,00
$C_{pt_{etanol}}$	69,00	69,00	138,00
$C_{pt_{água}}$	117,00	117,00	234,00
			2.964,00

Fonte: Elaboração própria.

5.1.5 Fatores de Capacidade e Disponibilidade

O fator de capacidade é a fração da capacidade nominal que em média é utilizada. Um fator de capacidade de 69% foi determinado no relatório da *Directed Technologies*, baseado em estudos prévios para fornecer a flexibilidade necessária entre o pico e a falta de demanda em um posto de abastecimento.

Neste trabalho, o fator de capacidade é considerado como 90%, já que se trata de uma aplicação específica para a geração de hidrogênio e energia elétrica, diferentemente do caso em estudo pela *Directed Technologies*, que trata de abastecimento veicular.

O fator de disponibilidade é a fração de horas no ano em que a planta está operacional. Um fator de disponibilidade de 98% permite desligar a planta 22 vezes durante o ano (DOE,2002). No caso do reformador em estudo, por se tratar de um equipamento ainda em desenvolvimento, o fator de disponibilidade adotado foi de 90%.

Um período de 10 anos foi assumido para a análise do custo. O cálculo econômico a partir do VPL considera que o investimento inicial e os custos associados à utilização da tecnologia acontecem no ano 0. A vida útil do reformador é considerada como 10 anos.

5.1.6 Custo com o Etanol e Energia Elétrica

O valor médio do etanol anidro⁹ combustível, sem frete e sem impostos, entre julho de 2007 e novembro de 2008 foi de R\$ 0,798 (CEPEA, 2008). De acordo com a Equação (7), o consumo máximo de etanol no reformador é de 4,4 L/h. Considerando-se os fatores de capacidade e disponibilidade, o consumo anual de etanol é de:

$$Ct_{etanol} = 4,4 \frac{L}{h} \times 8760h \times 0,90 \times 0,90 = 31.221L \quad (13)$$

Onde, Ct_{etanol} é o consumo total de etanol em um ano.

Desta forma, o custo anual com etanol é de:

$$CA_{etanol} = 31.221 \frac{L}{ano} \times 0,798 \frac{R\$}{L} = R\$ 24.914,35^{10} \quad (14)$$

Onde, CA_{etanol} é o custo anual com etanol.

O preço da energia elétrica para o setor comercial e de serviço na região sudeste é de R\$ 0,275 / kWh (SAD, 2008). Desta forma, de acordo com a Equação (8) e considerando os fatores de capacidade e disponibilidade, tem-se que o consumo anual de energia elétrica é de:

$$Ct_{EE} = 2,22kWh \times 8760h \times 0,90 \times 0,90 = 15.752kWh \quad (15)$$

Onde, Ct_{EE} é o consumo total de energia elétrica em um ano.

Desta forma, o custo anual com energia elétrica é de:

⁹ Utilizou-se o etanol anidro para diminuir as incertezas relativas a utilização do etanol com menor qualidade. Porém, para aplicação em escala deste tipo de reformador, poderá se considerar a utilização do etanol hidratado.

¹⁰ O valor relativo ao custo anual do etanol encontrado no Anexo I é de R\$ 24.772,51. Esta diferença de 1% no valor da Equação 14 é relativo a aproximação das casas decimais no cálculo realizado pela planilha no Anexo I.

$$CA_{EE} = 15.752 \times 0,275 = \text{R\$ } 4.331,80 \quad (16)$$

Onde, CA_{EE} é o custo anual com energia elétrica.

5.1.7 Custo anual com Manutenção e Operação

O custo anual com manutenção e operação foi considerado como sendo 12% do custo anual com o combustível (etanol). Este é considerado um valor padrão de acordo com DOE (2002).

A tabela 5.4 apresenta uma síntese dos custos levantados pela análise do fluxo de caixa para a aplicação do reformador. Os valores apresentados são relativos ao Valor Presente (VP) do fluxo de caixa. Desta forma, pode-se analisar qual seria a quantia necessária se todas as despesas tivessem que ser realizadas no ano 0, considerando uma vida útil do reformador de 10 anos.

A Figura 5.1 apresenta a comparação percentual entre os valores apresentados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Custo total do reformador de etanol de acordo com valor presente do fluxo de caixa para um período de 10 anos.

Item	Valor Individual (R\$)
Custo Fixo	
Reformador	250.000,00
Custo Variável	
Custo etanol	152.216,37
Custo eletricidade	26.617,43
Operação e Manutenção	15.930,34
Troca catalisador LTS	10.617,81
Troca catalisador ATR	5.839,80
Purificação água	1.425,54
Purificação etanol	847,95
Sub-Total	213.495,24
Total	463.495,24

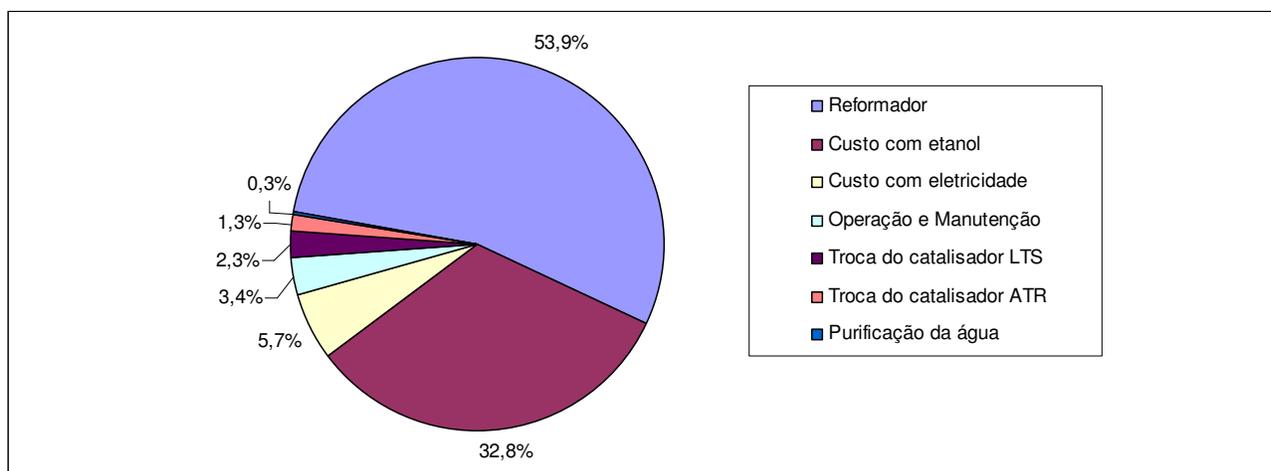


Figura 5.1 – Comparação percentual dos valores apresentados no fluxo de caixa da tabela 5.4. Fonte: Elaboração própria.

5.1.8 Cálculo do Custo de Produção de H_2 do Reformador de Etanol

Assim como apresentado nos Capítulos 2 e 3, a análise de Fluxo de Caixa (FC) foi usada para determinar o custo do hidrogênio produzido pelo reformador de etanol, calculando-se o custo que resulta em um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 0 para o reformador em dez anos de operação. Nesse caso, produz-se o custo no qual o operador do reformador realiza um retorno de investimento após imposto igual ao custo de capital (isto é, a taxa de desconto). Os valores assumidos para o cálculo do FC estão apresentados na Tabela 5.5. No Anexo I é apresentado o FC detalhado para o cálculo do custo de hidrogênio produzido.

Vale ressaltar que na análise em questão não foram considerados os impostos relativo à venda do hidrogênio produzido e os preços dos insumos, materiais de reposição e mão de obra foram considerados constante ao longo da vida útil do reformador.

Tabela 5.5 – Valores adotados para o cálculo do fluxo de caixa.

Taxa de desconto	10%
Depreciação ¹¹	10% ao ano (10 anos)
Fator de Capacidade	90%
Fator de Disponibilidade	90%

Fonte: Elaboração própria.

¹¹ A instrução normativa da Secretaria da Fazenda n° 192 classifica o equipamento como gerador de gás (classificação n° 8.405 da instrução) com prazo de vida útil de 10 anos e taxa anual de depreciação de 10%.

Tabela 5.6 – Resultados do custo do hidrogênio a partir do etanol.

Suposições Básicas	
Preço reformador (R\$)	250.000,00
Taxa de Desconto	10%
Preço etanol (R\$/L)	0,798
Preço energia elétrica (R\$/kWh)	0,275
Produção de H ₂ no Reformador (kgH ₂ /dia)	8,40
Produção anual de H ₂ no Reformador (kgH ₂ /ano)	2.483
Fator de Consumo de etanol (L de etanol/kg de H ₂)	12,5
Fator Utilização	90%
Fator de Disponibilidade	90%
PCI etanol	20.200 kJ/L
RESULTADO	
Custo do hidrogênio (R\$/kg)	30,34
VPL	0

Fonte: Elaboração própria.

Para determinar a influência dos custos fixos e variáveis, apresentados na Tabela 5.4, na composição do custo do H₂ optou-se por igualar a zero individualmente cada componente dos custos fixos e variáveis e recalculer o novo custo do H₂ sem o valor referente a variável dos custos anulada. Este novo custo do H₂ foi subtraído do custo inicial (30,34 R\$/kg), restando assim o custo relativo a esta variável anulada. Os resultados obtidos com esta metodologia estão apresentados abaixo na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Composição do custo do hidrogênio gerado pelo reformador de etanol (valores atualizados pela taxa de desconto de 10% a.a.).

Custo em R\$/kg de H₂	ATR/LTS/PSA
Custo do H₂	30,34
Reformador	16,38
Custo etanol	9,98
Custo eletricidade	1,75
Operação e Manutenção	1,05
Troca catalisador LTS	0,70
Troca catalisador ATR	0,35
Purificação água	0,09
Purificação etanol	0,06

Fonte: Elaboração própria.

5.2 Análise Econômica da Energia Elétrica Produzida pelo Reformador de Etanol Acoplado à Célula a Combustível.

5.2.1 Descrição dos Parâmetros do Sistema de Reforma ATR do Etanol

Para o cálculo do custo de produção de energia elétrica gerada pela célula a combustível e condicionada para utilização, os seguintes parâmetros foram quantificados:

- i. custo de investimento, relativo ao valor de compra dos componentes;
- ii. custo com o hidrogênio gerado pelo reformador de etanol;
- iii. custo com a troca do banco de baterias e
- iv. custo com manutenção e operação.

Para definição do custo de investimento foi realizada a cotação de preço dos componentes necessários com as características técnicas apresentadas no Capítulo 4. A Tabela 5.8 apresenta o custo de investimento inicial com estes componentes.

Tabela 5.8 – Custo com o investimento inicial dos componentes para a geração de energia elétrica.

Item	Quantidade (UND)	Preço Unitário (R\$)	Custo Total (R\$)
Célula a Combustível (5 kW*)	1	70.000,00	70.000,00
Banco de baterias (12 V)	10	238,00	2.380,00
Inversor (4,8 kW)	1	7.000,00	7.000,00
		Total	79.380,00

* Preço da célula a combustível incluindo as taxas de importação e o transporte.

Fonte: Elaboração própria.

5.2.2 Custo com o Hidrogênio Gerado Pelo Reformador de Etanol

Uma vez calculado o custo unitário do hidrogênio produzido pelo reformador de etanol (R\$/kg), pode-se calcular o custo da energia elétrica (R\$/kWh) gerada pela integração dos dois sistemas. A seqüência de cálculos para se chegar a este valor é apresentada a seguir.

Primeiramente, foi determinada qual a produção de energia elétrica anual na célula a combustível para a quantidade de H₂ produzido anualmente. De acordo com a tabela 5.6 a produção anual de hidrogênio produzido pelo reformador é de 2.483 kg/ano.

De acordo com os resultados experimentais da célula a combustível apresentados na Equação (6), cada 0,35kg/h de H₂ gera 5,42 kW; daqui obtém-se o fator de geração de energia elétrica pelos dois sistemas:

$$FP_{EE} = 1 \text{ kg de H}_2 \text{ gera } 15,5 \text{ kWh} \quad (17)$$

Onde FP_{EE} é o fator de geração de energia elétrica pela utilização do reformador de etanol acoplado a célula a combustível.

Com o FP_{EE} e com a quantidade de hidrogênio gerada anualmente pelo reformador obtém-se a capacidade de geração de energia elétrica:

$$GEE_{CaC} = 2.483 \text{ kg de H}_2 \text{ gera } 38.487 \text{ kWh/ano} \quad (18)$$

Onde, GEE_{CaC} é a geração de energia elétrica anual pela célula a combustível, para a produção anual de H₂ pelo reformador.

Para determinar o custo total do H₂ consumido pela a CaC, utiliza-se o custo unitário do H₂ gerado pelo reformador e multiplica-se pela quantidade de H₂ utilizada pela célula a combustível em 1 ano (ambos os valores encontram-se na tabela 5.6); logo:

$$CH_{CaC} = 2.483 \text{ kg de H}_2 \times 30,34 \text{ R\$/kg} = \text{R\$ } 75.334,22 \quad (19)$$

Onde, CH_{CaC} é o custo total anual do H₂ utilizado na geração de energia elétrica anual pela célula a combustível.

5.2.3 Custo com a Troca do Banco de Baterias

Um valor médio considerado aceitável para utilização de um banco de baterias com o regime de funcionamento imposto por esta aplicação gira em torno de 4 anos (FURLAN, 2008). Como a vida útil de todo o sistema está sendo considerada com 10 anos, serão necessárias 2 trocas do banco de baterias ao longo da vida útil do sistema. Esta troca ocorrerá no ano 4 e no ano 8. Estes valores estão apresentados na tabela 5.8, mais adiante.

5.2.4 Custo com Manutenção e Operação

Como os componentes utilizados para esta aplicação são comerciais, com um custo de manutenção baixo, considerou-se como plausível que o custo de manutenção e operação utilizado no cálculo do custo do H₂ gerado pelo reformador fosse suficiente para realizar também a manutenção destes componentes. Assim, o custo de manutenção e operação já está incluso no preço do hidrogênio utilizado.

A tabela 5.9 apresenta uma síntese dos custos levantados pela análise do fluxo de caixa para a geração de energia elétrica, considerando uma vida útil de 10 anos e a Figura 5.2 apresenta a comparação percentual entre os valores obtidos.

Tabela 5.9 – Custo do sistema de geração de energia elétrica de acordo com o fluxo de caixa (valores atualizados em 10% a.a.).

Item	Valor Individual (R\$)
Custo Variável	
Hidrogênio	462.964,35
Custo Fixo	
Investimento Inicial:	
• Célula a Combustível	70.000,00
• Inversor	7.000,00
• Banco de baterias	2.380,00
Custo com as duas trocas do banco de baterias	2.735,86
Sub-total	82.115,86
Total	545.080,21

Fonte: Elaboração própria.

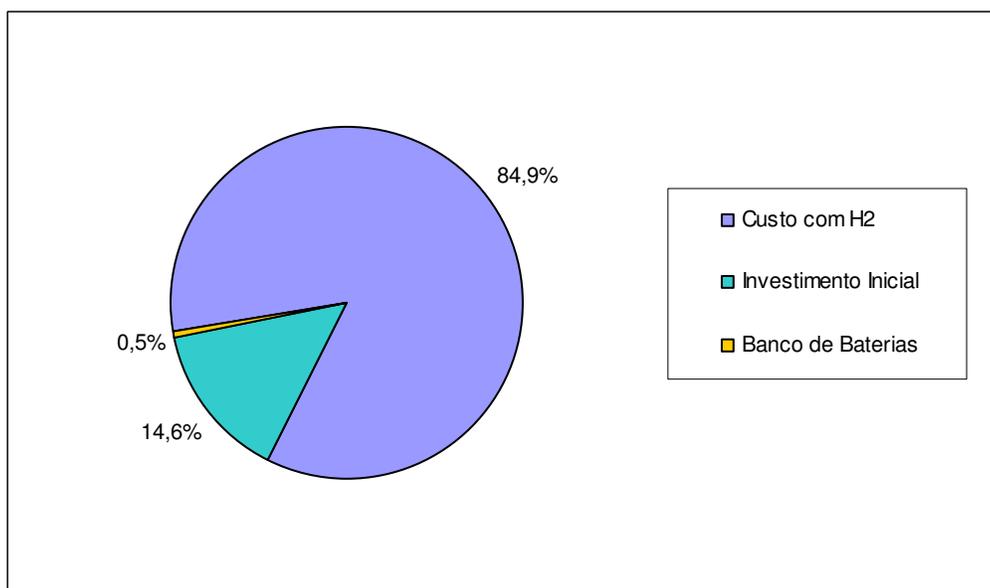


Figura 5.2 – Comparação percentual dos valores apresentados no fluxo de caixa da tabela 5.8. Fonte: Elaboração própria.

5.2.5 Cálculo do Custo de Produção da Energia Elétrica Gerada

Assim como apresentado nos Capítulos 2 e 3, o custo unitário da energia elétrica foi determinado igualando-se Valor Presente Líquido (VPL) a zero para o sistema com a célula a combustível e condicionador de energia elétrica, em dez anos de operação. Nesse caso, chega-se ao custo no qual o sistema realiza um retorno de investimento igual ao custo de capital (isto é, a taxa de desconto). Os valores assumidos para o cálculo do FC estão apresentados na Tabela 5.5. No Anexo II é apresentado o FC detalhado para o cálculo do custo da energia elétrica produzida.

Vale ressaltar que na análise em questão não foram considerados os impostos relativo à venda da energia elétrica produzida e os preços dos insumos e materiais de reposição foram considerados constante ao longo da vida útil.

A tabela 5.10, a seguir, apresenta os resultados obtidos no cálculo do custo da energia elétrica gerada.

Tabela 5.10 – Resultados do Custo da Energia Elétrica.

Suposições Básicas	
Investimento inicial (R\$)	79.380,00
Taxa de Desconto	10%
Custo anual com o H ₂ (R\$)	75.334,22
Energia elétrica gerada em um ano (kWh)	38.494
Fator Utilização	90%
Fator de Disponibilidade	90%
RESULTADOS	
Custo da energia elétrica gerada (R\$/kWh)	2,30
VPL	0

Fonte: Elaboração própria.

Assim como na análise da composição do custo do hidrogênio produzido pelo reformador de etanol, calculou-se também a interferência dos fatores que influenciam na composição do custo final da energia elétrica. Para isso, considerou-se como zero cada item da Tabela 5.9 individual e separadamente. Ao zerar o valor de cada item, calculou-se novamente o custo da energia elétrica e subtraiu-se este novo valor do encontrado do resultado final (R\$ 2,30). Os resultados obtidos com esta metodologia estão apresentados abaixo na Tabela 5.11 e na Figura 5.4.

Tabela 5.11 – Composição do custo da Energia Elétrica.

Custo em R\$/kWh	CaC / B.B / Inversor
Custo da E.E.	2,30
Custo com H ₂	1,95
Célula a Combustível	0,29
Inversor	0,03
Banco de baterias	0,02

Fonte: Elaboração própria.

Capítulo 6

Análise dos Resultados

Este capítulo tem como objetivo apresentar a análise dos resultados técnicos e econômicos da produção de hidrogênio através do reformador de etanol desenvolvido pelo Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP e pela empresa Hytron e da energia elétrica gerada com a utilização deste H_2 na célula a combustível do tipo PEMFC da empresa *Plug Power*.

6.1 Análise Comparativa do Custo do Hidrogênio Produzido Pelo Reformador de Etanol

Para contextualizar o custo do H_2 produzido pelo reformador de etanol nas condições apresentada neste trabalho, realizou-se uma análise comparativa entre o preço de mercado do hidrogênio 4.0¹² vendido em cilindros do tipo T¹³, disponibilizado na região de Campinas-SP; o custo de produção do H_2 produzido pelo processo de eletrólise da água realizado por Ferreira (2008) e finalmente o custo de produção apresentado pelo trabalho do DOE (2002), ambos apresentados no Capítulo 2.

De acordo com cotação de preço realizada pelo LH2 à empresa White Martins em maio de 2008, o hidrogênio 4.0 vendido em cilindros do tipo T, disponibilizado na UNICAMP em Campinas-SP é vendido comercialmente por 298,90 R\$/kg de H_2 .

¹² Hidrogênio com qualidade de 99,99% de pureza.

¹³ Cilindro com 7,2 m³, a uma pressão de 16475.17 kPa (168 kgf/cm²) e peso bruto de 68,5 kg.

A Figura 6.1 apresenta o resultado da análise comparativa realizada.

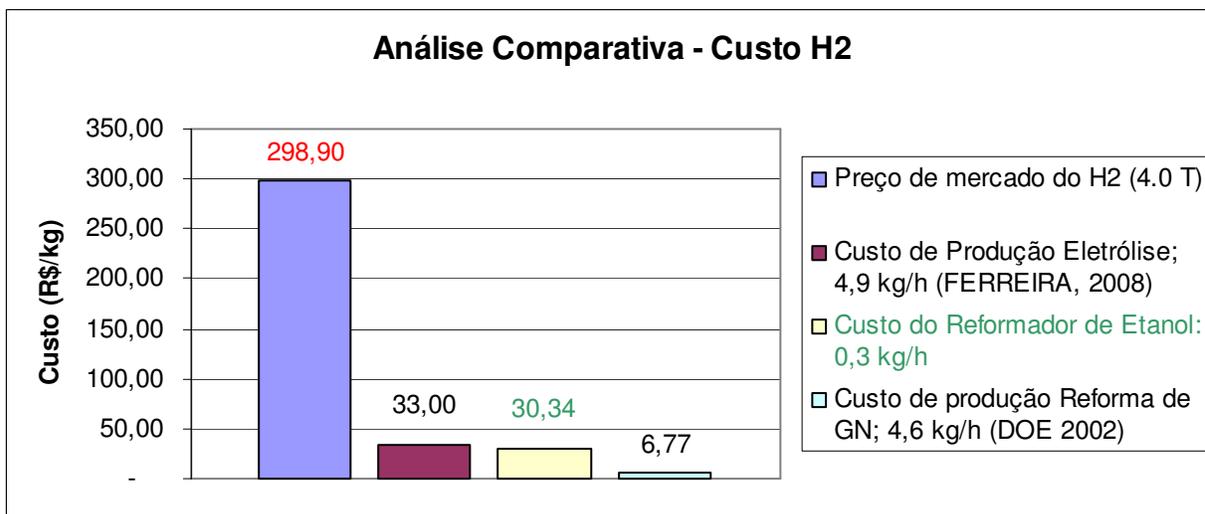


Figura 6.1 – Análise comparativa do custo do H₂ produzido pelo reformador de etanol.
Fonte: Elaboração Própria.

Pode-se observar na Figura 6.1. que apesar do reformador de etanol ser um protótipo, o seu custo de produção do H₂ é competitivo com o preço de mercado do H₂ para região de Campinas-SP. É importante salientar-se aqui que o valor de mercado é preço e não custo, ou seja, apresenta-se acrescido de todos os impostos e o lucro de todos os setores envolvidos na produção do hidrogênio. Não há como se obter dados confiáveis dos custos de produção desse gás pelas empresas que atuam no mercado.

Com relação ao processo de eletrólise apresentado em Ferreira (2008), pode-se observar uma pequena diferença do custo entre estes dois processos de produção do H₂, mas deve-se levar em conta que mesmo para uma produção aproximadamente 17 vezes menor, o custo do hidrogênio gerado pelo reformador de etanol ainda é cerca de 10% menor que o custo do H₂ produzido pela eletrólise. Já comparando com o custo de produção pelo processo de reforma do gás natural apresentado em DOE (2002), pode-se verificar a influência não só da escala de produção do hidrogênio, mas também do menor custo do insumo principal, o gás natural. Mesmo assim, com uma produção em torno de 16 vezes maior que a do reformador de etanol, o custo de produção do H₂ nesse caso encontra-se aproximadamente 4,5 vezes menor para o caso da reforma de gás natural.

Buscando-se avaliar o custo do H₂ produzido pela reforma de etanol e a viabilidade econômica da utilização do H₂ produzido por este reformador em um contexto de mercado, realizou-se o cálculo da Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período de *payback*, para um estudo de caso onde o H₂ produzido pelo reformador seja vendido ao preço de mercado para região de Campinas-SP. Calculou-se também o valor do H₂ e o período de *payback* para uma variação da TIR de 100, 75, 50 e 25%. Estes resultados estão apresentados respectivamente nas Figuras 6.2 e 6.3.

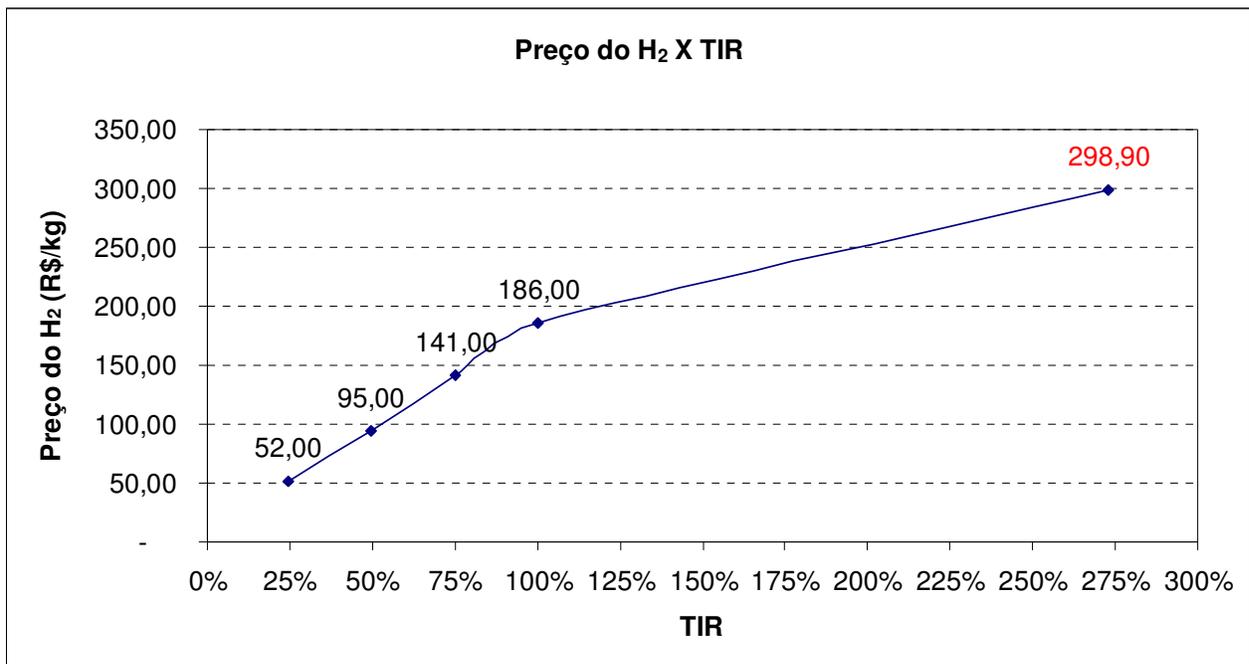


Figura 6.2 –TIR para o preço de mercado do H₂ e preço de H₂ produzido pelo reformador de etanol para TIR de 100, 75, 50 e 25 %. Fonte: Elaboração própria.

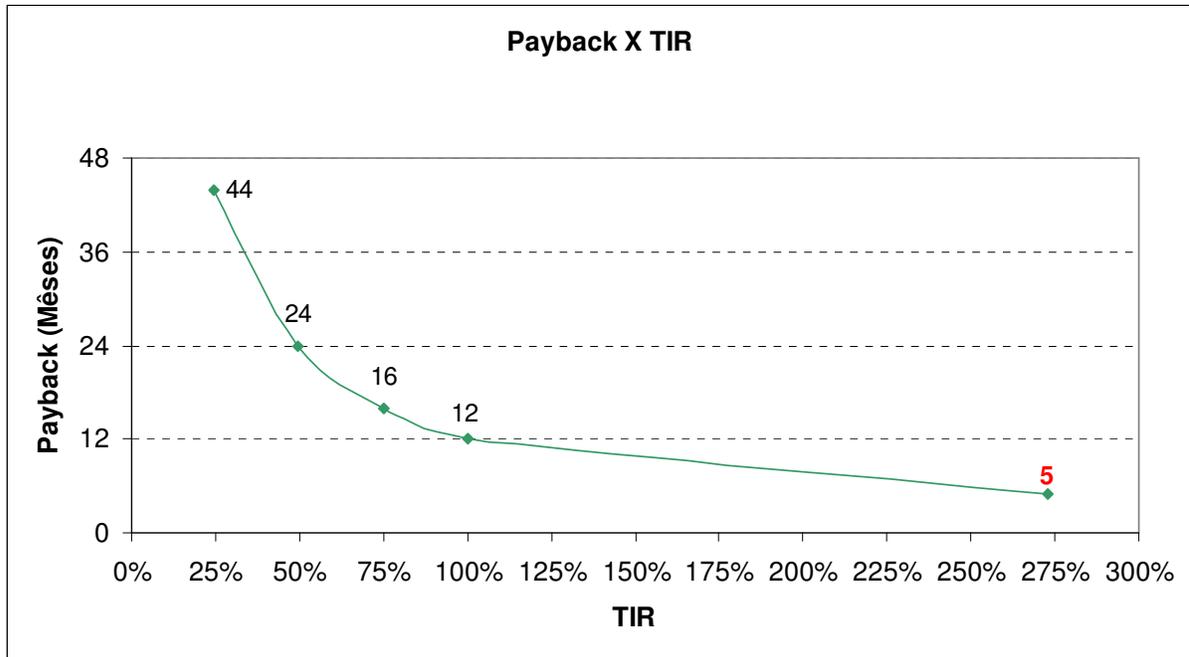


Figura 6.3 –Período de *payback* para a TIR relativa ao preço de mercado do H₂ e para TIR de 100, 75, 50 e 25 %. Fonte: Elaboração própria.

É importante aqui reforçar os extremos dos resultados apresentados nas duas figuras. De acordo com o apresentado na Figura 6.2, a TIR do reformador de etanol para o preço de mercado do H₂ é de 273%. Analisando o *payback* para essa TIR, pode-se observar a partir da Figura 6.3 que investimento inicial no reformador de etanol seria pago em apenas 5 meses. Por outro lado, considerando-se a menor TIR apresentada na figura, para 25%, o preço do H₂, sem impostos¹⁴, seria de R\$ 52,00 e o *payback* de 44 meses.

Pode-se observar com esta análise comparativa que a tecnologia de produção de hidrogênio pelo processo de reforma de etanol é promissora, já que mesmo se tratando apenas um protótipo com uma pequena produção de H₂ 0,3 kg/h (3,5 m³/h), os custos relativos a sua produção são bastantes competitivos. Além disto, levando-se em consideração o efeito de uma escala de produção, sua curva de aprendizado, ou mesmo se pudesse avaliar experimentalmente um novo protótipo com uma capacidade de produção em torno de 4,0 kg/h (50 m³/h) de H₂, esperar-se-ia uma redução nestes custos.

¹⁴ Vale ressaltar que os valores considerados para o cálculo da TIR e do *payback*, não estão levando em consideração os impostos relativos à venda do H₂ produzido pelo reformador, a não ser para o caso do preço de mercado do H₂ para região de Campinas-SP.

6.2 Análise Comparativa do Custo da Energia Elétrica Produzida

Para contextualizar o custo da energia elétrica produzida pela célula a combustível e pelo sistema de condicionamento de energia elétrica, realizou-se uma análise comparativa entre o custo da energia elétrica produzido por dois sistemas, o primeiro constituído por um conjunto de painéis fotovoltaicos acoplados a um banco de baterias e o segundo constituído por um conjunto de painéis fotovoltaicos acoplados a um eletrolisador de água e uma célula a combustível do tipo PEMFC, ambos apresentados no Capítulo 2. A escolha desses dois sistemas se deu em função das suas aplicações atuais, principalmente em localidades isoladas, para as quais o sistema de reforma considerado também poderia atender. Dessa forma, está-se comparando sistemas equivalentes, para aplicações semelhantes.

A Figura 6.4 apresenta o resultado da análise comparativa realizada.

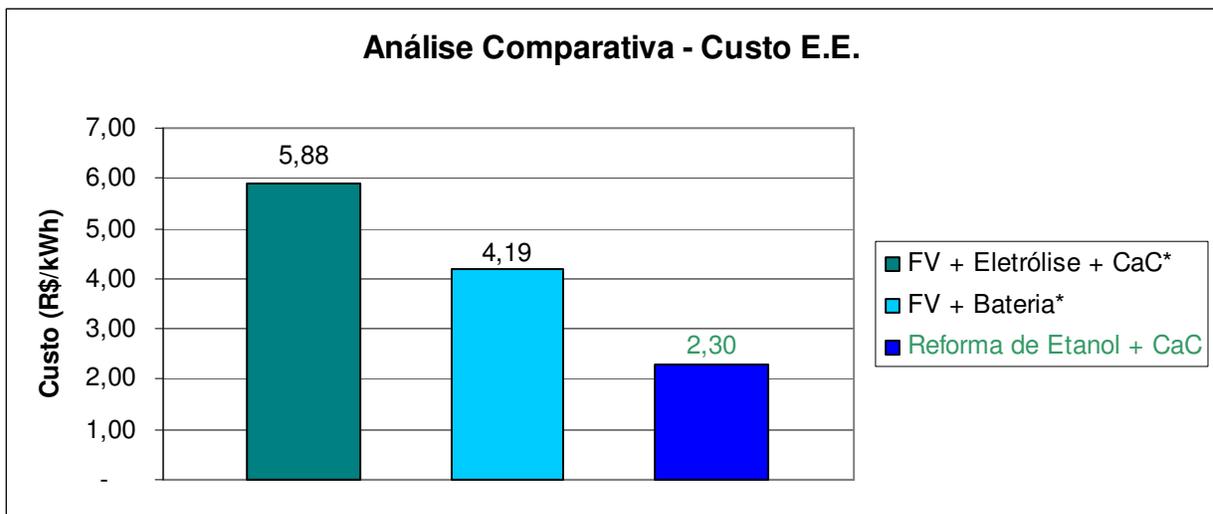


Figura 6.4 – Análise comparativa do custo da energia elétrica produzida. Fonte: Elaboração própria.
*Fonte: FURLAN (2008).

Pode-se observar na Figura 6.4. que o custo de produção da energia elétrica a partir da utilização do hidrogênio produzido pelo reformador de etanol na célula a combustível e no sistema de condicionamento de energia é o menor dentre as tecnologias apresentadas, sendo aproximadamente 2,5 vezes menor que a energia elétrica produzida pelo sistema com painéis fotovoltaicos, eletrolisador e célula a combustível apresentado em Furlan (2008).

Em contrapartida, o custo da energia elétrica produzida pelo sistema em estudo encontra-se bastante elevado (7,8 vezes maior) se comparado com o preço de venda da energia elétrica disponibilizada na rede elétrica de distribuição para o setor residencial, que é de 0,296 R\$/kWh (SAD, 2008).

6.3 Análise de sensibilidade

As análises de sensibilidade do custo do H₂ gerado pelo reformador de etanol e do custo da energia elétrica produzida foram realizadas a partir da variação do preço do reformador, do custo do etanol, custo com eletricidade, taxa de desconto e do fator de utilização como apresentadas respectivamente nas Figuras 6.5 e 6.6.

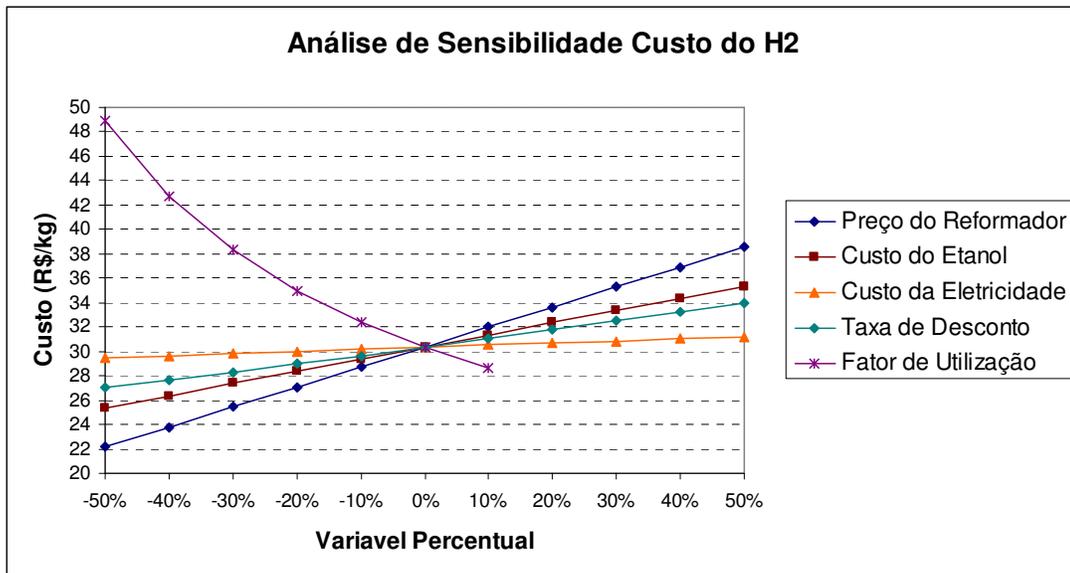


Figura 6.5 – Análise de sensibilidade para o custo do H₂ produzido pelo reformador de etanol. Fonte: Elaboração própria.

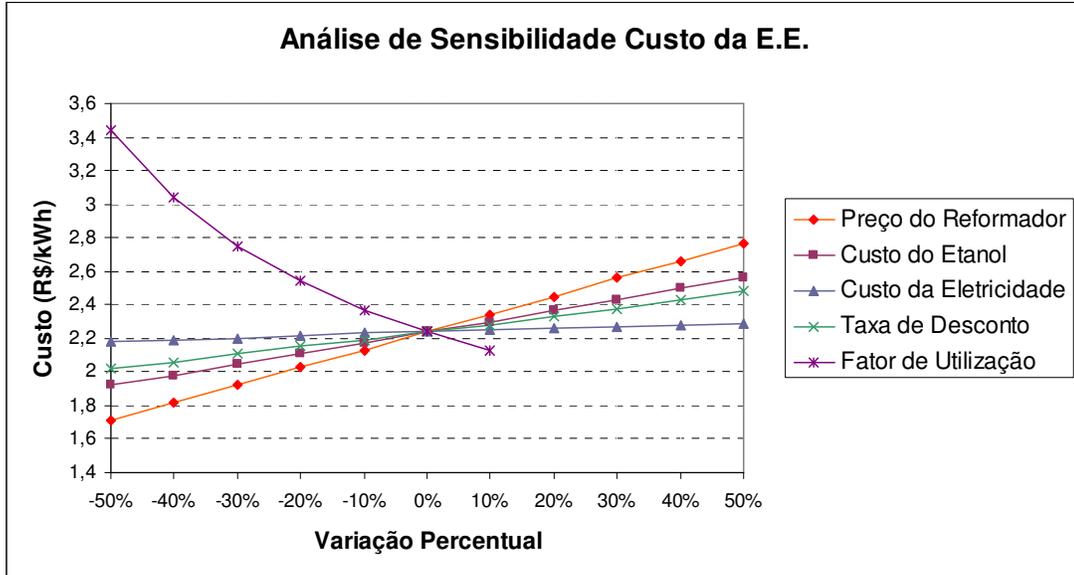


Figura 6.6 – Análise de sensibilidade para o custo da energia elétrica produzida. Fonte: Elaboração própria.

Nas Figuras 6.5 e 6.6 pode-se observar que o fator de utilização do reformador de etanol é o componente que produz uma maior variação do custo do H₂; desta forma, deve-se atentar para esta característica de funcionamento do reformador, procurando tornar o seu valor o mais próximo da unidade, o que significa uma operação do sistema com pouquíssimas interrupções. No cálculo do custo do H₂ produzido, o valor do fator de consumo foi considerado com 0,9, como apresentado no Capítulo 5. Porém, faz-se necessária a realização de ensaios de longa duração do reformador de etanol, para se obter o valor real desta grandeza.

Dentre os demais fatores analisados, o preço do reformador de etanol é o que possui maior contribuição no custo do H₂ gerado. Pode-se observar que uma redução do preço do reformador em 50%, reduziria em 27% o custo de produção do H₂ (de 30,34 para 22,00 R\$/kg de H₂) e em 26 % o custo de produção da energia elétrica (de 2,30 para 1,7 R\$/kWh). Apesar de menos significativas, as contribuições no custo do H₂ relativas ao consumo do etanol e da energia elétrica consumidos pelo reformador de etanol indicam que um aumento na eficiência do reformador de etanol acarretaria uma redução no custo do H₂ produzido e, conseqüentemente, na energia elétrica gerada.

Capítulo 7

Conclusões e Sugestões Para Trabalhos Futuros

7.1 Conclusões

A pesquisa desenvolvida pelo Laboratório de Hidrogênio da UNICAMP e pela empresa Hytron, apresentada neste trabalho de tese, caracteriza-se hoje como o estado da arte nacional no desenvolvimento de um reformador de etanol para produção de H₂ com qualidade e quantidade para sua aplicação em células a combustível do tipo PEMFC. Neste trabalho mostrou-se os custos envolvidos nessa tecnologia e as condições nas quais existem a viabilidade técnica e econômica da utilização deste tipo de sistema para a produção de hidrogênio e energia elétrica.

O valor de referência encontrado com os cálculos do custo do hidrogênio produzido pelo reformador de etanol, em 30,34 R\$/kg, mostrou-se inferior aos preços praticados atualmente no mercado, próximos de 300,00 R\$/kg. Com a análise comparativa realizada, observou-se que a tecnologia de produção de hidrogênio pelo processo de reforma de etanol é promissora, já que mesmo se tratando apenas de um protótipo com uma pequena produção de H₂ 0,3 kg/h (3,5 m³/h), os custos relativos à sua produção são bastante competitivos. Além disto, levando-se em consideração o efeito de uma escala de produção, sua curva de aprendizado, ou mesmo uma avaliação experimental de um novo protótipo com uma capacidade de produção em torno de 4,0 kg/h (50 m³/h) de H₂, espera-se uma redução nesses custos. Isso indica a possibilidade de se inserir a reforma de etanol como uma alternativa interessante para a produção renovável de H₂, não somente para a produção de energia elétrica em células a combustível, mas principalmente em outros nichos como de produção de alimentos e de fertilizantes, dentre outros.

Entretanto é forçoso se observar que os preços do hidrogênio no mercado atual variam sobremaneira, em função da quantidade contratada, da qualidade exigida, do local de entrega e outros fatores. Os preços apresentados nesse trabalho referem-se ao hidrogênio de qualidade para aplicação em células a combustível e fornecido em pequena escala, da ordem da produção mensal do reformador de etanol. Além disso, esses valores são dos preços praticados, o que significa a inclusão de impostos e taxas, além do lucro de todos os segmentos envolvidos da produção ao usuário final. Foi impossível obter os custos de produção do hidrogênio das empresas que comercializam esse gás no mercado nacional.

Portanto, pode-se concluir que a aquisição de um sistema como o aqui analisado para a geração de hidrogênio para consumo próprio, a partir do uso de etanol, pode ser economicamente interessante para os usuários desse gás, que o adquirem em pequenas quantidades (em torno de 200 kg/mês) no mercado. No caso de se pretender produzir hidrogênio para o fornecimento a outras empresas e usuários, competindo com as empresas estabelecidas, a incidência da carga de impostos e a obtenção de um lucro atrativo podem tornar o negócio inviável, sendo necessária aqui a realização de análises econômicas mais aprofundadas.

No caso da energia elétrica gerada com a utilização do H_2 produzido pelo reformador de etanol e sua utilização em células a combustível do tipo PEMFC, o valor de referência obtido para este caso, 2,30 R\$/kWh, ficou 2,5 vezes menor que a utilização de hidrogênio eletrolítico com fornecimento elétrico por painéis fotovoltaicos. Porém, este valor de referência é quase 8 vezes mais elevado que a energia elétrica disponibilizada pela rede de distribuição (0,296 R\$/kWh).

Portanto, com relação à produção de energia elétrica o sistema analisado somente poderá ser competitivo quando comparado com outras alternativas que se encontram igualmente em desenvolvimento, como a produção de eletricidade com a gaseificação de biomassa ou biogás, ou que são mais caras, como no caso dos painéis fotovoltaicos. Nesse último caso deve-se destacar que apesar de seus custos, essa tem sido a melhor alternativa para pequenas comunidades isoladas, onde não compensa a extensão da rede existente ou simplesmente não existe rede de distribuição.

Outra conclusão importante desse trabalho foi obtida a partir das análises de sensibilidade realizadas (Figuras 6.5 e 6.6), onde se pode observar que o fator de utilização do reformador de etanol é o que produz uma maior variação do custo do H₂ e da energia elétrica gerada. Portanto, deve-se priorizar esta característica de funcionamento do sistema, ou seja, sua operação deve se dar de forma contínua, com pouquíssimas interrupções. Isso significa que, seja na geração de hidrogênio ou de eletricidade, deve haver uma demanda contínua desses produtos.

A partir da comparação percentual dos valores apresentados no fluxo de caixa (Figuras 5.1 e 5.2) tem-se que aproximadamente 54% do custo total do H₂ são devido ao reformador de etanol, 33% ao custo com etanol e 6% à energia elétrica consumidos. Das análises de sensibilidade, pode-se observar que uma redução do preço do reformador em 50%, reduziria em 27% o custo de produção do H₂ (de 30,34 para 22,00 R\$/kg de H₂) e em 26 % o custo de produção da energia elétrica (de 2,30 para 1,70 R\$/kWh). O preço do reformador considerado refere-se a um protótipo e, portanto, esse preço é bastante superior ao que se pode esperar de um produto já acabado e com alguma escala de produção. Portanto, uma redução de preço de 50% mostra-se razoável. Contudo, para a aplicação energética do H₂ na escala apresentada, considera-se importante uma equivalência entre o preço do reformador e preço da célula a combustível (R\$ 70.000,00), o que significaria uma redução do preço do reformador de etanol em torno de 70%.

De acordo com DOE (2006), as metas dos Estados Unidos da América até o ano de 2010 para o custo do H₂ e para a potência gerada por células a combustível são respectivamente de 6,45 R\$/kg e 96,75 R\$/kWh.¹⁵

Assim sendo, este trabalho indica como conclusão final a necessidade de um amplo programa para o desenvolvimento da tecnologia dos reformadores de etanol, caso se pretenda que ela venha a ser uma importante alternativa para a produção renovável do vetor energético hidrogênio, conforme indicado no Roteiro Brasileiro para Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil elaborado pelo MME e que integra o Programa Brasileiro de Ciência Tecnologia e Inovação para Economia do Hidrogênio (ProH₂). Em ambos os casos, para máquinas de pequeno porte, têm-se que o custo de referência do H₂ produzido e da energia elétrica gerada são de 30,34 R\$/kg de H₂ e 2,30 R\$/kWh,

¹⁵ Vale ressaltar que estes valores são para aplicação automotiva do H₂ em células a combustível do tipo PEMFC.

respectivamente; que há a necessidade de se reduzir os custos de fabricação dos reformadores, como meta de curto prazo, em pelo menos 50% dos valores atuais (o que resultaria em um custo de 22,00 R\$/kg de H₂ e de 1,70 R\$/kWh para a energia elétrica), sendo que, como meta de médio prazo, esses custos devam ser da ordem de 70% menores (respectivamente 18,87 R\$/kg de H₂ e 1,56 R\$/kWh), aproximando os preços de comercialização desses equipamentos aos das respectivas células a combustível a serem utilizadas em associação aos reformadores para a produção de energia elétrica.

7.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros recomendam-se:

- A avaliação da curva de aprendizado com a produção em escala do reformador de etanol;
- Realização de um balanço de planta detalhado com o foco no aumento da eficiência do reformador de etanol.
- Análise e desenvolvimento de um reformador pressurizado para avaliar a redução do consumo de energia elétrica do sistema relativos ao processo de purificação do gás de síntese.
- Análise técnica e econômica de um reformador de etanol com uma capacidade de 50 m³/h de H₂. Para verificar a contribuição referente ao aumento de escala.
- Análise prospectiva sobre a implementação da tecnologia de reforma de etanol, como uma inovação tecnológica, para as atuais aplicações químicas do hidrogênio, destacando os nichos estratégicos destas aplicações para o Brasil.

Capítulo 8

Referências Bibliográficas

ADDILSON, J. **Big Oil is the Biggest User of Hydrogen**. Disponível em <http://www.cleantechblog.com/2006/02/big-oil-is-biggest-user-of-hydrogen.html>. Acessado em 27/03/2007.

APOLINÁRIO, F. R., **Análise do desempenho de um sistema de conversão de energia solar fotovoltaica em hidrogênio**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Dissertação de Mestrado, 2004.

APOLINÁRIO, F. R., **Análise técnica e econômica da geração eólica e fotovoltaica para a produção de hidrogênio eletrolítico**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Tese de Doutorado, 2008.

BC, Banco Central do Brasil. Disponível em <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/batch/taxas.asp?id=txdolar&id=txdolar>. Acessado em 06/11/2008.

BEN, Balanço Energético Nacional. Disponível em www.ben.epe.gov.br. Acessado em 20/10/2008.

BNDES, Banco Nacional de desenvolvimento Econômico e Social. **Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável**; Organização BNDES e CGEE, Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

CAMARGO, J. C., **Medidas do potencial fotovoltaico na região das bacias dos rios Piracicaba e Capivari**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Dissertação de Mestrado, 2000.

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.

CENEH, Centro Nacional de Referencia em Energia do Hidrogênio. **Apresentação sobre a experiência da UNICAMP e do Brasil em Tecnologia do Hidrogênio**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por danielg@fem.unicamp.br em 21/07/2004.

CEPEA, Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Disponível em http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool/?id_page=407 .Acessado em 22/10/2008.

DOE. (USA). Department of Energy **Cost and Performance Comparison Of Stationary Hydrogen Fueling Appliances**. The Hydrogen Program Office of Power Technologies - U.S Department of Energy, 2002. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/hydrogenandfuelcells/pdfs/32405b2.pdf>. Acessado em 12/11/2008.

ARAÚJO, P. D., **O uso energético do hidrogênio produzido por fontes renováveis para a aplicação veicular no contexto do mecanismo de desenvolvimento limpo: estudo de caso na cidade de São Paulo**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Tese de Doutorado, 2008.

EVOBUS (2007). Disponível em: www.evobus.com. Acessado em 14/07/2007.

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.

FERREIRA, P.F. **“Infra-estrutura para Uso Energético do Hidrogênio: Estações de Abastecimento para Veículos”**, 148p. Tese. FEM - UNICAMP, 2007.

FUEL CELL ENERGY (2007), Disponível em www.fuelcellenergy.com. Acessado em 08/11/2007.

FUEL CELLS (2007-a), Disponível em: <http://www.fuelcells.org/info/charts/buses.pdf>. acessado em 14/07/2007.

FUEL CELLS (2007-b). Disponível em: <http://www.fuelcells.org/info/charts/carchart.pdf>. Acessado em 14/07/2007.

FURLAN, A. L., **Análise comparativa de sistemas de armazenamento de energia elétrica fotovoltaica por meio de baterias e hidrogênio, em localidades isoladas da região amazônica**. 116p. Dissertação. FEM - UNICAMP, 2008.

HONDA (2007). Disponível em: <http://world.honda.com/FuelCell/> Acessado em: 14/07/2007.

HOOGERS, G. **Fuel cell technology handbook**. CRC Press. Boca Raton, Flórida, EUA.

HÜBNER, P., **Research on the reforming of ethanol**, in Proceedings of 3rd LAMNET Workshop, pp. 69-74, Brasília, Brasil, Dezembro de 2002.

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

LARMINIE, J. **Fuel Cell Systems Explained**. Editora John Willey & Sons. West Sussex, Inglaterra. 2003. 2^a ed. 405p.

MARIÑO, F.; CERELLA, E. G.; DUHALDE, S.; JOBBAGY, M. & LABORDE, M.; **Hydrogen from steam reforming of ethanol. Characterization and performance of copper-nickel supported catalysts**, IJHE, vol. 23, pp. 1095-1101, 1998;

MARIM NETO, A. J., LOPES, D. G., CAMARGO, J. C., SILVA, E. P., NEVES JR., N. P., **Simulação do processo de reforma autotérmica de etanol para a produção de hidrogênio em unidade integrada**. Artigo apresentado no III WICaC. Disponível em <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/WICaC2006/PDF/11-AntonioMarin.pdf>.

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

SANTOS, A. M. R., **Tendências tecnológicas das células a combustível para uso do hidrogênio derivado do gás natural**, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP. Tese de Doutorado, 2008.

SAD, Sistema de Apoio a Decisão – ANEEL. Disponível em http://rad.aneel.gov.br/reportserverSAD?%2fSAD_REPORTS%2fSAMP_TarifaMedCConsumoRegiao&rs:Command=Render. Para o período de agosto de 2008. Acessado em 23/10/2008.

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

SOUZA, A. B. de, **Projetos de Investimentos de Capital: Elaboração, análise, tomada de decisão**, São Paulo: Atlas, 2003.

SILVA, E. P., **Introdução a Tecnologia e Economia do Hidrogênio**, Campinas: Editora da UNICAMP, 1991, 204 p.

SILVA, E. P., **Hidrogênio: Geração, Armazenamento e Conservação**. In: E. L. La Rovere; L. P. Rosa; A. P. Rodrigues. (Org.). Hidrogênio: Geração, Armazenamento e Conservação. Rio de Janeiro: Marco Zero/FINEP, 1985, v. , p. 402-420.

SIEMENS (2007). Disponível em:

http://www.siemens.com/index.jsp?sdc_p=11o1169191u20mcn1210742s4pFE. Acessado em 14/04/2007.

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

WALTER, A. C. S., **Economia de energia II**. Notas de aula da disciplina economia de energia II. Campinas Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 2005.

Anexos

Anexo I - Planilha de Cálculo do Custo do Hidrogênio Produzido pelo Reformador de Etanol.

REFORMADOR DE ETANOL

Suposições Básicas		
Taxa de desconto	10%	10%
Taxa de inflação	0,00%	-
Impostos	0%	-
Custo Etanol	0,798	R\$/L
Custo Eletricidade	0,275	R\$/kWh
Fator utilização	0,90	
Fator de disponibilidade	0,9	
PCI Etanol	20.200,00	kJ/L
Consumo de H2 por Hora	0,35	kg/h de H2
Produção diária de H2 no Reformador	8,40	kgH2/dia
Produção anual de H2	2.483	kgH2/ano
Fator de Consumo de Etanol	12,5	LEtOH/kgH2
Consumo Diário de Etanol	105,00	Letanol/dia
Consumo Anual de Etanol	31.043,25	Litros
Consumo de E.E. por Hora	2,22	kWh
Consumo Anual de E.E	15.752,23	kWh ano

RESULTADOS	
Preço Hidrogênio	30,34 R\$/kg
NPV	0 R\$
Periodo Payback	7 anos (não descontado)
Custo reformador	100,67 R\$/kg.ano

SOLVER
0

NESTA PLANILHA FORAM RETIRADOS OS IMPOSTOS E A INFLAÇÃO AO LONGO DOS ANOS. AUMENTADA O FATOR DE UTILIZAÇÃO PARA 0.9 E REDUZIDO O FATOR DE DISPONIBILIDADE PARA 0.9; SEGUINDO A

INVESTIMENTOS		BASE	ANO										
Capital Inicial		R\$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Reformador de Etanol	R\$	250.000,00	1										
Infra-estrutura													
CaC													
Condicionamento da E.E													
Outros													

DESPESAS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Capital inicial		250.000										
Custo Etanol			24.772,51	24.772,51	24.772,51	24.772,51	24.772,51	24.772,51	24.772,51	24.772,51	24.772,51	24.772,51
Custo eletricidade			4.331,86	4.331,86	4.331,86	4.331,86	4.331,86	4.331,86	4.331,86	4.331,86	4.331,86	4.331,86
Pur. EtOH	138,00		138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00	138,00
Troca catalisador LTS	1.728,00		1.728,00	1.728,00	1.728,00	1.728,00	1.728,00	1.728,00	1.728,00	1.728,00	1.728,00	1.728,00
Troca catalisador ATR	864,00		864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00	864,00
Troca Leito DI	232,00		232,00	232,00	232,00	232,00	232,00	232,00	232,00	232,00	232,00	232,00
Operação e Manutenção Seguro	2.592,59		2.592,59	2.592,59	2.592,59	2.592,59	2.592,59	2.592,59	2.592,59	2.592,59	2.592,59	2.592,59
Taxa propriedade												
Total			34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97

Ganho/Custo poupados		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Produção Hidrogênio (kg/ano)			2.483,46	2.483,46	2.483,46	2.483,46	2.483,46	2.483,46	2.483,46	2.483,46	2.483,46	2.483,46
Venda hidrogênio			75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32
Fluxo caixa antes do imposto			40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35
Depreciação			25.000,00	25.000,00	25.000,00	25.000,00	25.000,00	25.000,00	25.000,00	25.000,00	25.000,00	25.000,00
Taxa			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Despesa Operacional		(250.000,00)	59.658,97	59.658,97	59.658,97	59.658,97	59.658,97	59.658,97	59.658,97	59.658,97	59.658,97	59.658,97
Fluxo de caixa pós-imposto			40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35	40.686,35
Fluxo de caixa acumulado líquido												
Fluxo de caixa descontado		(250.000,00)	36.987,59	33.625,08	30.568,26	27.789,32	25.263,02	22.966,38	20.878,53	18.980,48	17.254,98	15.686,35
FCD acumulado												

Valores Calculados		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Multiplificador inflação		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Preço Vendas Hidrogênio (R\$/kg)												
Tabela depreciação (%)	10,00		0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Horas de operação anual		7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
X	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97	34.658,97
Y	1,10	1,21	1,33	1,46	1,61	1,77	1,95	2,14	2,36	2,59

Anexo II - Planilha de Cálculo do Custo da Energia Elétrica Produzida Pela Aplicação do Hidrogênio Gerado Pelo Reformador de Etanol e Sua Aplicação em Célula a Combustível.

REFORMADOR DE ETANOL

Suposições Básicas		
Taxa de desconto	10%	0,10
Taxa de inflação	0,00%	-
Impostos	0%	-
Custo Etanol	0,86	R\$/L
Custo Eletricidade	0,275	R\$/kWh
Fator utilização	0,9	
Fator de disponibilidade	0,9	
PCI Etanol	20.200,00	kJ/L
Consumo de H2 por Hora	0,35	kg/h de H2
Produção diária de H2 no Reformador	8,40	kgH2/dia
Produção anual de H2	2.483	kgH2/ano
Fator de Consumo de Etanol	12,5	LEtOH/kgH2
Consumo Diário de Etanol	105,00	Letanol/dia
Consumo Anual de Etanol	31.043,25	Litros
Consumo de E.E por Hora	-	kWh
Consumo Anual de E.E	-	kWh ano
Fator de produção de E.E na CaC	15,50	kWh/kgH2
Produção de E.E na CaC (ano)	38.493,63	kWh ano

RESULTADOS	
Preço E.E	2,30 R\$/kWh
NPV	0 R\$
25 Período Payback	7 anos (não descontado)
Custo reformador	2,06 R\$/kg.ano

SOLVER
0

0,35
2010
2,22

NESTA PLANILHA FORAM RETIRADOS OS IMPOSTOS E A INFLAÇÃO AO LONGO DOS ANOS. AUMENTADA O FATOR DE UTILIZAÇÃO PARA 0,9 E REDUZIDO O FATOR DE DISPONIBILIDADE PARA 0,9; SEGUINDO A

INVESTIMENTOS	BASE	ANO												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
Capital Inicial		R\$ 79.380,00												
Reformador de Etanol	R\$ -													
Celula a Combustível	R\$ 70.000,00													
Banco de baterias	R\$ 2.380,00													
Inversor	R\$ 7.000,00													
Outros														

DESPESAS		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Capital inicial		79.380										
Custo com H2			75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32
Banco de baterias	2.380,00					2.380,00				2.380,00		
Seguro												
M&O												
Total			75.345,32	75.345,32	75.345,32	77.725,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	77.725,32	75.345,32	75.345,32

Ganho/Custo poupados		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Produção de E.E (kwh ano)			38.493,63	38.493,63	38.493,63	38.493,63	38.493,63	38.493,63	38.493,63	38.493,63	38.493,63	38.493,63
Venda da E.E			88.709,29	88.709,29	88.709,29	88.709,29	88.709,29	88.709,29	88.709,29	88.709,29	88.709,29	88.709,29
Fluxo caixa antes do imposto			13.363,98	13.363,98	13.363,98	10.983,98	13.363,98	13.363,98	13.363,98	10.983,98	13.363,98	13.363,98
Depreciação			7.938,00	7.938,00	7.938,00	7.938,00	7.938,00	7.938,00	7.938,00	7.938,00	7.938,00	7.938,00
Taxa			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fluxo de caixa pós-imposto			13.363,98	13.363,98	13.363,98	10.983,98	13.363,98	13.363,98	13.363,98	10.983,98	13.363,98	13.363,98
Fluxo de caixa acumulado líquido												
Fluxo de caixa descontado		(79.380,00)	12.149,07	11.044,61	10.040,55	7.502,20	8.297,98	7.543,62	6.857,83	5.124,11	5.667,63	5.152,39
FCD acumulado												

Valores Calculados		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Multiplicador inflação		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Preço Vendas Hidrogênio (R\$/kg)												
Tabela depreciação (%)	10,00	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Horas de operação anual		7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00	7.884,00

	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10
X	75.345,32	75.345,32	75.345,32	77.725,32	75.345,32	75.345,32	75.345,32	77.725,32	75.345,32	75.345,32
Y	1,10	1,21	1,33	1,46	1,61	1,77	1,95	2,14	2,36	2,59