

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ - UNIOESTE
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**POTENCIAL E CUSTOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO
NO BRASIL JUNTO ÀS USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**

MARIA CRISTINA RODRIGUES HALMEMAN

**CASCADEL – Paraná - Brasil
FEVEREIRO – 2008**

MARIA CRISTINA RODRIGUES HALMEMAN

**POTENCIAL E CUSTOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO ELETROLÍTICO
NO BRASIL JUNTO ÀS USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração em **Engenharia de Sistemas Agroindustriais**.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson
Melegari de Souza

CASCADEL – Paraná – Brasil

FEVEREIRO – 2008

MARIA CRISTINA RODRIGUES HALMEMAN

POTENCIAL E CUSTOS DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO
ELETROLÍTICO NO BRASIL JUNTO ÀS USINAS DE AÇÚCAR E ÁLCOOL

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola em cumprimento parcial aos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, área de concentração Engenharia de Sistemas Agroindustriais, **aprovada** pela seguinte banca examinadora:

Orientador: Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. José Airton Azevedo dos Santos
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR

Prof. Dr. Antonio Gabriel Filho
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Prof. Dr. Jair Antônio Cruz Siqueira
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, UNIOESTE

Cascavel, 08 de fevereiro de 2008

DEDICATÓRIA

**A minha família,
pelo amor e apoio incondicionais.**

AGRADECIMENTOS

A Deus pela constante presença em minha vida.

A você Radames pelas palavras, amor e companheirismo.

A minha mãe pelo carinho, motivação e exemplo de vida.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza pela paciência, colaboração e apoio.

Aos membros da banca examinadora pelas valiosas contribuições.

Aos professores do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, *campus* Cascavel.

A todos representantes das usinas de açúcar e álcool pela atenção e colaboração. A José Eduardo Dalben, Tiago Augusto Pinheiro, Marco Andrei Konell e Luiz Perea pelas contribuições neste trabalho.

Aos amigos Paulo Oyama, Ana Lúcia Almeida, Larissa Mallmann, Tatiane Dal Bosco, Claudete Ferreira e José Hilário Ferreira, pelo apoio em todos os momentos.

A Capes, agradeço o suporte financeiro.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente, o meu sincero agradecimento.

SUMÁRIO

| | |
|---|-------------|
| LISTA DE TABELAS..... | vi |
| LISTA DE FIGURAS | vii |
| LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS | viii |
| ABSTRACT | x |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 3 |
| 2.1 Geração distribuída no setor sucroalcooleiro..... | 3 |
| 2.2 Biomassa e a geração de energia..... | 4 |
| 2.3 O bagaço da cana-de-açúcar | 6 |
| 2.4 Cogeração em usinas de açúcar e álcool | 8 |
| 2.4 Tecnologias de cogeração a partir da biomassa..... | 12 |
| 2.5 Hidrogênio | 14 |
| 2.6 Eletrólise da água | 16 |
| 2.6.1 Eletrolisadores | 17 |
| 2.7 Produção e consumo de hidrogênio | 20 |
| 2.8 Custo de produção do hidrogênio..... | 23 |
| 3 MATERIAL E MÉTODOS..... | 25 |
| 3.1. Localização..... | 25 |
| 3.2 Análise dos dados..... | 26 |
| 3.2.1 Cálculo do potencial de produção de hidrogênio utilizando o bagaço excedente | 26 |
| 3.2.2 Cálculo do custo da eletricidade | 27 |
| 3.2.3 Custo da planta de eletrólise..... | 29 |
| 3.2.4 Cálculo do custo de produção do hidrogênio utilizando a energia excedente..... | 29 |
| 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 32 |
| 4.1 Potencial de produção de hidrogênio via energia excedente nas usinas | |

| | |
|---|----|
| de cogeração | 32 |
| 4.2 Cálculo do custo da eletricidade | 36 |
| 4.3 Cálculo do custo da planta de eletrólise..... | 40 |
| 4.4 Custos de produção de hidrogênio a partir da energia excedente..... | 42 |
| 5 CONCLUSÕES..... | 46 |
| 7 REFERÊNCIAS | 47 |
| ANEXOS..... | 53 |
| ANEXO A ORÇAMENTO ELECTROLYSERS..... | 54 |
| ANEXO B ORÇAMENTO TELEDYNEES..... | 55 |
| ANEXO C ORÇAMENTO DISTRIBUTED-ENERGY | 56 |

LISTA DE TABELAS

| | | |
|------------------|---|----|
| Tabela 01 | Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca em relação à composição química elementar, imediata e o poder calorífico | 07 |
| Tabela 02 | Alternativas para geração de energia elétrica em usinas sucroalcoleiras | 13 |
| Tabela 03 | Tipos de eletrolisadores, consumo de energia, água e produção de hidrogênio conforme especificações dos fabricantes..... | 20 |
| Tabela 04 | Custos de produção do hidrogênio | 24 |
| Tabela 05 | Custos de produção do hidrogênio atualizados conforme variação do dólar nos últimos dez anos | 24 |
| Tabela 06 | Valores adotados para avaliar o custo da eletricidade, custo dos eletrolisadores e custo de produção de hidrogênio em função do total de cana-de-açúcar processada na safra 2006/2007 | 26 |
| Tabela 07 | Valores totais e a média referente ao total de cana-de-açúcar processada nas usinas no período de 2003 e 2007.. | 33 |
| Tabela 08 | Total de cana-de-açúcar processada por dia, total de bagaço produzido em kg h^{-1} , o total energia gerada em MWh ano^{-1} e a energia excedente em kWh h^{-1} para safra 2006/2007 | 34 |
| Tabela 09 | Potência, custo específico da planta de cogeração e o custo total do investimento para as usinas de açúcar e álcool na safra de 2006/2007 | 36 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|------------------|--|----|
| Figura 01 | Ciclo de vida do hidrogênio | 16 |
| Figura 02 | Esquema de um eletrolisador unipolar | 18 |
| Figura 03 | Esquema de um eletrolisador bipolar | 19 |
| Figura 04 | Representação do funcionamento básico da transformação de energia de fontes renováveis em hidrogênio e sua aplicação em veículos | 21 |
| Figura 05 | Localização das usinas de cogeração que utilizam o bagaço da cana de açúcar | 25 |
| Figura 06 | Total cana-de-açúcar processada e bagaço gerado pelas usinas de 2003 a 2007 | 32 |
| Figura 07 | Potencial de produção de hidrogênio e a quantidade de ônibus que poderiam ser abastecidos pelas usinas que utilizam bagaço de cana-de-açúcar | 35 |
| Figura 08 | Custo específico da planta de cogeração em relação à capacidade de processamento de cana-de-açúcar em toneladas por dia..... | 37 |
| Figura 09 | Custo da eletricidade gerada em função da capacidade de processamento da cana-de-açúcar nas usinas de açúcar e álcool..... | 38 |
| Figura 10 | Custo da eletricidade em função do preço do bagaço da cana-de açúcar | 39 |
| Figura 11 | Custo específico da planta de eletrólise em função da capacidade cana-de-açúcar processada | 40 |
| Figura 12 | Comparação do custo específico da planta de cogeração em relação ao custo específico da planta de eletrólise..... | 41 |
| Figura 13 | Custos do hidrogênio em relação à capacidade de produção de hidrogênio nas usinas de açúcar e álcool. | 42 |
| Figura 14 | Variação do custo do hidrogênio em relação à taxa anual de desconto..... | 43 |
| Figura 15 | Total de hidrogênio que poderia ser produzido e o custo do hidrogênio conforme potencial em cada usina..... | 44 |

LISTA DE ABREVIATURA E SIGLAS

| | |
|-----------------------|---|
| ANEEL..... | Agência Nacional Energia Elétrica |
| ARENA..... | Agência Regional da Energia da Região Autónoma dos Açores |
| BEN | Balanço Energético Nacional |
| BIG/GT..... | <i>Biomass Integrated Gasification-Gas Turbine</i> |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono |
| ELETRORAS. | Centrais Elétricas Brasileiras S.A |
| EPA..... | <i>Environmental Protection Agency</i> |
| EPRI..... | <i>Electric Power Research Institute</i> |
| FINEP | Financiadora de Estudos e Projetos |
| GD | Geração Distribuída |
| GEF | <i>Global Environment Facility</i> |
| H ₂ | Hidrogênio |
| IPHE..... | <i>International Partnership for the Hydrogen Economy</i> |
| km ² | Quilômetros quadrados |
| kW..... | Quilowatt |
| kWh | Quilowatt hora |
| MW | Megawatt |
| Nox | Óxidos de azoto |
| NREL | <i>National Renewable Energy Laboratory</i> |
| Nm ³ | Normal metro cúbico |
| NOx..... | Óxido de Azoto |
| O ₂ | Oxigênio |
| °C | Graus Celsius |
| PETROBRAS... | Petróleo do Brasil S.A |
| PCI..... | Poder calorífico inferior |
| PIE | Produtores independente de energia |
| PNUD..... | Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento |
| Pot | Potência |
| PROINFA..... | Programa de Incentivo a Fontes Renováveis de Energia |
| SOx | Óxidos de enxofre |
| TWh | Terawatt-hora |
| UNICA..... | União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo |
| USDA..... | <i>United States Department of Agriculture</i> |

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi verificar o potencial de produção de hidrogênio via eletrólise da água, aproveitando a energia elétrica excedente, resultante do processo de cogeração nas usinas de açúcar e álcool. O estudo foi realizado no período de julho a novembro de 2007, em usinas autorizadas pela ANEEL que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como combustível, para gerar energia térmica e elétrica. Os dados foram obtidos em cada usina. Verificou-se o histórico do processamento da cana-açúcar nos últimos cinco anos, sendo que os cálculos foram realizados com base nos valores da safra de 2006/2007. Considerou-se que o tempo de operação das usinas é, em média, 202 dias e foram calculados para cada usina: a quantidade de cana processada diariamente e o total de bagaço gerado, a energia elétrica gerada no ano e energia elétrica excedente. Com o custo dos eletrolisadores, obteve-se o valor médio de consumo de energia de 5,2 kWh para produzir 1 Nm³ de hidrogênio e o custo específico da planta de eletrólise de US\$ 1,555 kW a US\$ 2,510 kW. Os custos de produção do hidrogênio em função da capacidade de produção de hidrogênio são de US\$ 0,50 Nm⁻³ a US\$ 0,75 Nm⁻³. Os resultados apontaram que há um crescente potencial de geração de energia elétrica excedente que pode ser usada para produção de hidrogênio eletrolítico, visto que os custos de produção do hidrogênio apresentaram-se próximos aos encontrados em outros estudos realizados, porém utilizando-se outras fontes de energia.

Palavras-chave: bagaço da cana-de-açúcar, cogeração, energia elétrica excedente.

ABSTRACT

Electrolytic hydrogen potential and production costs in brasil – focus on alcohol and sugar plants

The object of this project was to verify the potential for the hydrogen production via water electrolysis by using the exceeding electrical energy resulting from the cogeneration process in alcohol and sugar plants. The studies were made from July to November/2007 in plants authorized by the ANEEL that use the sugar cane bagasse as fuel for the generation of thermal and electrical energy. The data were taken from each plant. The processing history of sugar cane for the last five years was verified and the calculations were made based on the values of the 2006/2007 harvest. The operation time of the plants was considered to be 202 days in average. The amount of sugar cane processed daily and the total of bagasse produced, electrical energy generated in a year and exceeding electrical energy were calculated for each plant. Along with the cost of the electrolyzers, it was also obtained the energy consumption average value of 5.2 kWh to produce 1 Nm³ of hydrogen and a specific cost for the electrolysis plant that ranges from US\$ 1,555 kW⁻¹ to US\$ 2,510 kW⁻¹. The hydrogen production costs regarding the capacity of hydrogen production range from US\$ 0.50 Nm⁻³ to US\$ 0.75 Nm⁻³. The results show an increasing potential for the generation of exceeding electrical energy that can be used for the production of electrolytic hydrogen, since the costs for hydrogen production presented themselves to be similar to the ones found in other studies carried out, however, using other energy sources.

Key words: sugar cane bagasse, cogeneration, exceeding electrical energy.

1 INTRODUÇÃO

A busca por fontes de energia, econômicas e ambientalmente viáveis, tem impulsionado, mundialmente, o cultivo de plantações energéticas e colocaram os biocombustíveis (álcool e biodiesel) em posição de destaque. No Brasil, o governo federal lançou o Plano Nacional de Agroenergia em 2006, estimulando a produção de cana-de-açúcar. Além disso, há previsões de 50% de aumento na produção em relação às atuais 465 milhões toneladas por ano, conforme a União da Agroindústria Canavieira de São Paulo (UNICA, 2007). Esse aumento possibilita a criação de um mercado internacional para o combustível gerado a partir da cana-de-açúcar e, conseqüentemente, produz maiores quantidades de resíduos, como o bagaço da cana-de-açúcar, que pode ser utilizado para gerar energia.

Como o Brasil é um grande produtor de biomassa, a utilização do bagaço da cana-de-açúcar nas usinas fornece a energia necessária para o processo industrial e gera energia elétrica excedente. Essa energia excedente, como não pode ser estocada, precisa ser aproveitada para outras finalidades.

Uma possível solução é usar energia elétrica e um eletrolisador para converter essa energia excedente em energia química. Essa conversão é possível, pela eletrólise da água, processo pelo qual dissociam-se as moléculas da água e obtêm-se os gases hidrogênio e o oxigênio, sendo que o hidrogênio pode ser utilizado como combustível. Há diversas maneiras para se obter o hidrogênio, mas considerando sua obtenção por meio de fontes renováveis, destacam-se as biomassas, a energia solar, a eólica, a hidráulica, a geotérmica, entre outras, possibilitando energia limpa e abundante (GARMAN, 2004).

As aplicações do hidrogênio são bastante variadas. Ele pode ser usado como combustível para veículos, para gerar energia elétrica e também como insumo em diferentes áreas industriais, por exemplo: fabricação de gordura vegetal hidrogenada, tratamento de derivados de petróleo, produção de amônia para fertilizantes, nas indústrias metalúrgicas, farmacêuticas e outras (MIRANDA, 2001).

O objetivo geral deste trabalho consiste em verificar o potencial de produção de hidrogênio eletrolítico como forma de aproveitamento da energia

elétrica excedente, resultante do processo de cogeração nas usinas de açúcar e álcool.

Os objetivos específicos são: estudar o potencial de produção de hidrogênio via energia excedente do bagaço da cana-de-açúcar em usinas de açúcar e álcool; calcular o custo da eletricidade em função do total do bagaço; verificar o custo dos eletrolisadores comercialmente disponíveis; obter os custos de produção de hidrogênio a partir da energia excedente nas usinas de açúcar e álcool em função da capacidade de produção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Geração distribuída no setor sucroalcooleiro

No Brasil, no final do século XIX e na metade do século XX, a energia chegou a ser gerada próxima ao consumidor, chamada Geração Distribuída (GD). Com o desenvolvimento econômico brasileiro e a implantação de grandes centrais hidrelétricas, essa alternativa ficou bastante restrita. Além disso, decorrente de uma crise de energia em 2002, o Brasil enfrentou restrições no consumo de energia. Atrelado a esse fato, mudanças ocorreram para a melhoria do setor, encorajando o governo brasileiro a estimular o uso de fontes alternativas de energia e favorecendo a ruptura de paradigmas, já que aproximadamente 90% da eletricidade gerada no país são de hidroelétricas (CORRIA *et al.* 2005).

Entretanto, algumas transformações mundiais, como a crise de energia na Califórnia no período de 2000 a 2002, o ataque do dia 11 de setembro e apagões (blackouts) nos Estados Unidos, Canadá e toda Europa promoveram a retomada da GD, inclusive no Brasil (CLARK & ISHERWOOD, 2004)

Considera-se GD a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários ou autorizados, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador. Pode ser empreendimentos hidroelétricos com capacidade instalada menor ou igual a 30 MW, termoelétrica com fator de capacidade igual ou superior a 0,75 e termoelétrica de fonte de biomassa ou resíduos de processo (ESCOBAR, 2004)

BONA & RUPPERT (2004) abordaram que a GD é uma forma estratégica de se instalar pequenas unidades geradoras (de poucos kW até algumas dezenas de MW) próximas aos consumidores, possibilitando maior confiabilidade, melhor aproveitamento da energia gerada pela cogeração ou trigeração (produção simultânea de eletricidade, calor e frio) e a redução de perdas no transporte.

Para EL-KHATTAM & SALAMA (2004), a GD não é um novo conceito

de geração de energia, mas está emergindo de acordo com as necessidades do sistema. Esse sistema promove benefícios do ponto de vista econômico e operacional como: redução da necessidade de criação de novas usinas hidrelétricas, diminuição da dependência de um único tipo de combustível, redução de perdas de distribuição de energia e auxílio no gerenciamento dos picos de energia.

Outro ponto a ser considerado pelo autor é que a GD é uma ferramenta para preencher os nichos de mercado de geração de energia, respondendo de um modo flexível a condições de mercado variáveis, promovendo energia menos poluente por meio de soluções mais eficientes.

PELEGRINI (2002) abordou que a geração descentralizada de energia elétrica se caracteriza pelo atendimento de mercados locais por unidades de geração de pequeno ou médio porte próximas a estes mercados. Pode ser comercializada com uma concessionária pública ou privada de serviço de suprimento de energia elétrica, uma cooperativa de eletrificação ou mesmo um autoprodutor.

O setor sucroalcooleiro brasileiro destaca-se dentre as possibilidades de GD, pois a quantidade de biomassa oriunda deste setor é maior que as necessidades requeridas pelas usinas de produção de açúcar e álcool. A queima das palhas, das folhas e do bagaço da cana-de-açúcar favorecem a cogeração, possibilitando a geração de eletricidade com menor custo (HOLLANDA, 2005).

2.2 Biomassa e a geração de energia

Um quinto de toda energia mundial é gerada a partir de recursos renováveis, aproximadamente 13 a 14% a partir da biomassa. Acredita-se que por volta do ano 2050, aproximadamente 90% da população mundial estará vivendo em países em desenvolvimento. Provavelmente, o cultivo da biomassa para fins energéticos estará presente entre nós no futuro a não ser que haja mudanças drásticas nos padrões mundiais de comercialização de energia (HALL *et al.* 2002).

Ainda para esses autores, há um potencial considerável para a modernização do uso dos combustíveis de biomassa na produção de vetores

energéticos convenientes como a eletricidade, gases e combustíveis automotivos e ao mesmo tempo preservar uso tradicional da biomassa. A utilização da biomassa de forma adequada traz benefícios ambientais e sociais como: melhor manejo da terra, criação de empregos, uso de áreas agrícolas disponíveis, fornecimento de vetores energéticos modernos a comunidades rurais e redução dos níveis de emissão de CO₂.

Para MCKENDRY (2001), nos últimos dez anos, alguns fatores contribuíram para retomar o interesse na biomassa como fonte de energia. Entre eles, destacam-se: desenvolvimento tecnológico relativo à conversão da biomassa, alta produção de alimentos gerando grande quantidade de resíduos e alterações climáticas, decorrentes dos altos níveis de emissão de gases que provocam o efeito estufa.

Os recursos energéticos da biomassa podem ser classificados em três grupos principais de acordo com a origem da matéria que as constitui, são eles: os biocombustíveis da madeira (diretos, indiretos ou de madeira recuperada); agrocombustíveis (oriundos de plantações energéticas como a cana-de-açúcar, subprodutos agrícolas, animais e agroindustriais) e resíduos urbanos (NOGUEIRA & LORA, 2003).

Conforme o Atlas de Energia Elétrica, grande parte da biomassa é de difícil contabilização devido ao uso não-comercial. Acredita-se que ela possa representar cerca de 14% de todo o consumo mundial de energia primária. Em alguns países em desenvolvimento, essa parcela pode aumentar para 34% e chegar 60% (ANEEL, 2005). A utilização de fontes alternativas de energia contribui para aumentar a oferta de energia (elétrica e térmica), diminuir o uso de combustíveis fósseis e atenuar as emissões de gases poluentes (KIKUCHI, 2001).

A produção total de álcool alcançou 17,6 bilhões de litros, sendo 9,2 bilhões do tipo hidratado e 8,4 bilhões do anidro. A área da cultura agrícola aumentou 6%, passando de 5,84 milhões de hectares na safra 2005/2006 para 6,19 milhões de hectares. O crescimento se deve à ocupação de áreas não utilizadas pela pecuária e pelo plantio de grãos (JORNALCANA, 2006)

A escassez de terras é vista como uma limitação para a produção de biomassa, porém estudos realizados em alguns países tropicais revelam que há grandes áreas de terras desmatadas e degradadas que se beneficiariam com a plantação de biomassa para energia, não afetando a produtividade de

grãos. O Brasil possui grandes áreas em condições agrícolas e econômicas ideais para desenvolver e se beneficiar das tecnologias de utilização da biomassa para fins energéticos (HALL *et al.* 2002).

A matriz energética possui 271 empreendimentos de biomassa em operação, dos quais 228 referem-se a empreendimentos que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar como combustível. Do total de nove empreendimentos em construção, cinco correspondem à utilização do bagaço da cana-de-açúcar como combustível (ANEEL, 2007).

No Brasil, há potencial de geração elétrica em usinas termoelétricas que utilizam a biomassa como o resíduo de madeira, casca de arroz e bagaço da cana-de-açúcar.

2.3 O bagaço da cana-de-açúcar

A produção brasileira de cana-de-açúcar, na safra de 2006/2007, atingiu o total de 425 milhões de toneladas, ou seja, um quarto da produção mundial. Aproximadamente, 53 milhões foram produzidas na região norte-nordeste e 372 milhões na região centro-sul. Com, aproximadamente, 355 unidades industriais, a produção de cana-de-açúcar, no Brasil, aumentou de 120 para 250 milhões de toneladas entre os anos de 1975 e 1985. O sistema de produção envolve usinas com capacidades diferentes. As usinas produzem aproximadamente 70% da cana-de-açúcar em terras próprias, arrendadas ou parcerias agrícolas. Os 30 % restantes são supridos por cerca de 45 mil produtores independentes (UNICA, 2007).

De acordo com MACEDO (2005) a produção em larga escala da cana-de-açúcar apresenta grande potencial inexplorado com os resíduos. Estudos apontam que usando somente o bagaço, é possível gerar excedentes de cerca de 3 GW de energia elétrica no país.

Conforme BEN (2006), o consumo térmico de bagaço de cana-de-açúcar cresceu 4,6%, chegando a 106,5 milhões de toneladas, resultante do crescimento da produção de álcool, já que a produção de açúcar não apresentou grande crescimento em 2005. Os produtos energéticos da cana-de-açúcar representaram 13,8% da Matriz Energética Brasileira para 2005 em

relação a 13,5 % em 2004.

Na maioria das agroindústrias, o aproveitamento de resíduos energéticos contribui para a redução da dependência da energia comprada, gerando vapor ou eletricidade. O bagaço da cana-de-açúcar é um exemplo de recurso energético empregado em indústrias de açúcar e álcool, frigoríficos, indústrias de papel e celulose e outras (NOGUEIRA & LORA 2003).

Para os autores, do ponto de vista energético, as características técnicas importantes na biomassa são em relação à composição química elementar: valores referentes ao carbono (C), hidrogênio (H), oxigênio (O), nitrogênio (N), enxofre (S) e cinzas (A). Para a composição química imediata: materiais voláteis (V), cinzas (A) e carbono fixo (F) e poder calorífico. Assim, na Tabela 1, verifica-se composição química elementar e imediata e o poder calorífico para diferentes biomassas (NOGUEIRA & LORA 2003).

Tabela 01 Características técnicas de diferentes tipos de biomassa em base seca em relação à composição química elementar, imediata e o poder calorífico

| Tipo de biomassa | Composição elementar (%) | | | Composição imediata (%) | | | | | PCI MJ Kg ⁻¹ | |
|------------------|--------------------------|------|-------|-------------------------|------|-------|-------|-------|----------------------------|-------|
| | C | H | O | N | S | A | V | A | | F |
| Pinheiro | 49,29 | 5,99 | 44,36 | 0,06 | 0,03 | 0,300 | 82,54 | 0,290 | 17,70 | 20,00 |
| Eucalipto | 49,00 | 8,87 | 43,97 | 0,30 | 0,01 | 0,720 | 81,42 | 0,790 | 17,82 | 19,4 |
| Casca de arroz | 40,96 | 4,30 | 35,86 | 0,40 | 0,02 | 18,34 | 65,47 | 17,89 | 16,67 | 16,1 |
| Bagaço de cana | 44,80 | 5,35 | 39,55 | 0,38 | 0,01 | 9,790 | 73,78 | 11,27 | 14,95 | 17,3 |
| Casca de coco | 48,23 | 5,23 | 33,19 | 2,98 | 0,12 | 10,25 | 67,95 | 8,250 | 23,80 | 19,0 |
| Sabugos de milho | 46,58 | 5,87 | 45,46 | 0,47 | 0,01 | 1,400 | 80,10 | 1,360 | 18,54 | 18,8 |
| Ramas de algodão | 47,05 | 5,35 | 40,97 | 0,65 | 0,21 | 5,890 | 73,29 | 5,510 | 21,20 | 18,3 |

Fonte: Nogueira & Lora (2003)

O caldo da cana-de-açúcar passa por várias unidades de moagem. O processo de adição de água ao bagaço é chamado de embebição e é usado para diluir o caldo remanescente no bagaço, aumentando a extração da sacarose. Geralmente, os caldos produzidos nas duas últimas unidades (moagem) são misturados e constituem o “caldo misturado”. Com esse sistema é possível obter um rendimento na extração de 92 a 97% e um teor de umidade final do bagaço de, aproximadamente, 50% (base seca). A composição média da cana-de-açúcar, quando entra na indústria, é de 8 a 14% de fibras, 12 a 23% de sólidos solúveis e de 65 a 75% de água. Após a extração do caldo, o bagaço da cana-de-açúcar é constituído de 46% de fibra, 50% de umidade e

4% de sólidos dissolvidos. Para cada tonelada de cana-de-açúcar, podem ser obtidos de 240 a 280 quilos de bagaço, suficientes para suprir a demanda de energia elétrica nas usinas e gerar excedentes (MACEDO & CORTEZ, 2002).

PELLEGRINI (2002) afirmou que o poder calorífico, o grau de umidade (50%) e o teor de açúcar residual são características fundamentais do bagaço. Como o teor de açúcar é normalmente baixo, tem-se a umidade como principal fator limitante do poder calorífico, o qual interfere diretamente no rendimento da combustão. A temperatura de ignição do bagaço, que está entre 500°C e 600°C com 50% de umidade, caindo para 300°C a 400 °C quando a umidade está em torno de 35% a 40%.

Algumas alternativas de potencializar a geração de eletricidade, pela produção fora do período de safra, podem ser viabilizadas com adequações e ampliação da estocagem de bagaço, palhas e pontas da cana verde. A palha proveniente da colheita da cana-de-açúcar é descartada ou deixada como cobertura nas lavouras, mas pode ser aproveitada energeticamente no sistema de geração de energia, colaborando para o aumento da eficiência do processo e comercialização de excedentes de energia no setor sucroalcooleiro (SOUZA & AZEVEDO, 2006a).

2.4 Cogeração em usinas de açúcar e álcool

Conhecida desde o início do século XX e implementada nos EUA por volta dos anos oitenta, a cogeração tornou-se uma alternativa atrativa, já que combina o uso eficiente da energia com vantagens tecnológicas ambientais e econômicas (BRANDÃO, 2004).

A cogeração se caracteriza pelo aproveitamento do calor produzido pelos geradores termoelétricos e representa mais de dois terços da energia originalmente contida no combustível. Grande parte desta energia acaba sendo transformada em calor e a vantagem é o aproveitamento dela, que normalmente seria dispersa, no meio ambiente (OLIVEIRA *et.al.* 2006).

Os sistemas de cogeração têm sido implementados em indústrias que dispõem de subprodutos do processo industrial e que podem ser utilizados como fonte de combustível, como o setor sucroalcooleiro e de papel e celulose,

configurando o conceito de bioeletricidade (SOUZA & AZEVEDO, 2006b).

Conforme ANEEL (2007), cogeração é o processo operado numa instalação específica, para fins da produção combinada das utilidades do calor e energia mecânica, geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia disponibilizada por uma fonte primária. A cogeração qualificada é um atributo concedido a cogeradores que atendem aos requisitos, segundo aspectos de racionalidade energética.

O aumento na demanda de álcool disponibilizará uma maior quantidade de bagaço de cana-de-açúcar e, conseqüentemente, oferecerá maior oferta de eletricidade pela cogeração (TERCIOTE, 2006). A alta produtividade alcançada pela lavoura canavieira, juntamente com ganhos sucessivos nos processos de transformação da biomassa sucroalcooleira têm disponibilizado enorme quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar, que interligadas aos principais sistemas elétricos, atendem a grandes centros de consumo das regiões Sul e Sudeste.

Para BRANDÃO (2004), as centrais termoelétricas convencionais convertem apenas um terço da energia do combustível em energia elétrica e o restante é perdido sob a forma de calor. Por esse motivo, faz-se necessário aumentar a eficiência do processo de produção de eletricidade e a cogeração é um dos métodos para se conseguir isto. Pela cogeração de energia elétrica e calor, converte-se 4/5 da energia do combustível em energia utilizável, resultando em benefícios financeiros e ambientais. Assim, cogeração pode ser então definida como um processo de produção e exploração consecutiva (simultânea) de duas fontes de energia, elétrica (ou mecânica) e térmica, a partir de um sistema que utiliza o mesmo combustível, permitindo a otimização e o acréscimo de eficiência nos sistemas de conversão e utilização de energia.

Segundo RAMOS *et.al.* (2000), nas indústrias a cogeração é uma forma mais econômica para atender as necessidades internas de vapor e de eletricidade, para reduzir custos operacionais e aumentar a confiabilidade de suprimento elétrico. Uma instalação de cogeração é uma usina termelétrica em que o calor produzido é usado de diferentes formas no processo produtivo (vapor, eletricidade, força motriz, refrigeração, etc.) e pode-se aproveitar 90% da energia contida no combustível, sendo que a eficiência de uma termelétrica convencional não ultrapassa os 50%.

Os principais parâmetros a serem determinados para a indústria que deseja implantar a GD com cogeração são: determinação das necessidades (eletricidade e calor), disponibilidade de fontes de energia, custo de investimento e de operação e a confiabilidade proporcionada.

De acordo com *World Alliance of Decentralized Energy*, pela cogeração, os principais benefícios identificados são: viabilidade econômica com oferta de energia limpa, produzir energia segura para consumidores locais e atenuar impactos ambientais. Alguns países, com potencial de cogeração, como o Brasil, Cuba, Índia, Colômbia, México, Paquistão, Tailândia e Filipinas, podem ter uma significativa contribuição à balança de energia, com capacidade total de 70% da produção global de cana-de-açúcar. Do total de 945 milhões de toneladas de cana-de-açúcar processadas em 2005, 385 milhões correspondem à produção brasileira de cana-de-açúcar (WADE, 2005).

A criação do Programa de Incentivo as Fontes Alternativas de Energia (PROINFA) é uma alternativa para impulsionar a geração de energia, conforme a Lei 10.438, de 26 de abril de 2002, revisada pela lei 10.762, de 11 de novembro de 2003, contemplando os empreendimentos com base em fontes de biomassa, cogeração qualificada, solar, eólica, cuja potência seja menor ou igual a 30 MW.

Esses empreendimentos poderão comercializar energia elétrica com o consumidor, ou em conjunto com consumidores reunidos por comunhão de interesses ou de direito cuja carga seja maior ou igual a 500 kW (ANEEL, 2007). Os contratos serão celebrados pelas Centrais Elétricas Brasileiras S. A (ELETROBRÁS) com prazo de quinze anos. Será assegurada a compra de energia produzida no prazo de vinte anos, a partir da entrada em operação definida em contrato.

A Lei 10.848, de 15 de março de 2004 e o decreto 5.163 de 30 de julho deste mesmo ano consolidaram o marco para a regulamentação da GD no Brasil. Um dos pontos favoráveis é que não havia restrições para esse tipo de geração, todavia não existia mercado. Como fator de integração ao processo de comercialização também surgiu a figura das comercializadoras. Entidades que agem no mercado promovendo a venda e aquisição de energia entre seus diversos agentes, podendo servir, portanto, de elo entre os produtores independentes de energia (PIEs), ou seja, toda pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio com concessão ou autorização para a geração de

energia elétrica destinada ao comércio total ou parcial de sua capacidade de produção (ANEEL, 2007).

Conforme OLIVEIRA *et al.* (2006), a busca por fontes alternativas de energia, por meio da GD, possibilitou melhorar a quantidade e qualidade da energia produzida no país. Do total de empreendimentos autorizados de cogeração, utilizando o bagaço da cana-de-açúcar, no período de 1999 a 2005, 82% correspondem aos PIEs.

Embora o setor sucroalcooleiro demonstre um grande potencial de cogeração de energia, apresentando atrativos econômicos e ambientais, devido à utilização do bagaço de cana-de-açúcar como combustível, a produção de energia elétrica para a venda às concessionárias ainda é incipiente e medidas, como a adoção de tecnologias para o aumento da eficiência e expansão destes sistemas de geração de energia, devem ser tomadas (RAMOS *et al.* 2003).

ROMAGNOLI & CAMARGO (2005) analisam algumas barreiras em relação à GD, como a falta de procedimentos, padrões técnicos de conexão e atendimento na rede de distribuição que estão pouco explicitados na legislação brasileira. A falta de reconhecimento dos benefícios potenciais da GD por parte das concessionárias, também pode atuar como desestímulo aos novos Investimentos, já que a GD é vista como complementaridade energética,

Para SOUZA & AZEVEDO (2006a) as usinas que exploram mais intensamente a comercialização de excedentes de energia planejam a expansão futura da atividade sucroalcooleira, aumentando a oferta de energia. Em relação à estratégia de venda de excedentes, interferem: os custos associados à venda de energia excedente e a volatilidade no preço da energia elétrica. O preço do MWh produzido pelo setor sucroalcooleiro, ainda não incorpora externalidades positivas, profusão de instituições e regulamentações, o que gera incertezas quanto ao cumprimento restrito do contrato de venda de energia elétrica como um dos usos alternativos para o bagaço e a palha.

Como não existe uma forma viável de estocar energia elétrica em grandes quantidades, a ela precisa ser consumida imediatamente ou injetada na rede de transmissão. Uma possível solução é transformar energia elétrica em energia química, por exemplo, hidrogênio.

Segundo os mesmos autores, considerando a colheita mecanizada e a utilização de palhas e pontas, em 2001, o potencial de cogeração de energia

pelo setor sucroalcooleiro seria de 18.200 MW, podendo chegar a 21.300 MW em 2010.

2.4 Tecnologias de cogeração a partir da biomassa

Conhecida e aplicada desde o final do século XIX, a tecnologia das turbinas a vapor dominou o panorama mundial de geração termoelétrica com eficiência de 38 a 40% em centrais com centenas de MW's de potência e complexas configurações com temperaturas de vapor máximas na faixa dos 540 a 560 °C. Nas usinas de açúcar e álcool, a geração termoelétrica é realizada em ciclos Rankine de contrapressão, ou seja, nestes sistemas a biomassa é queimada diretamente em caldeiras de queima direta e a energia térmica resultante é utilizada na produção de vapor. Este vapor acionará uma turbina para geração de energia elétrica e ao sair da turbina será encaminhado para aproveitamento das necessidades térmicas do processo de produção do açúcar e álcool (NETO, 2001).

Conforme BRANDÃO (2004), as turbinas a vapor dividem-se em dois grandes grupos: as turbinas de condensação e turbinas de contrapressão. Nas turbinas de condensação a pressão de saída do vapor é menor que a pressão atmosférica e algumas vezes requer o acréscimo de um condensador. Nas turbinas de contrapressão a pressão do vapor de saída é superior à pressão atmosférica.

A produção de energia elétrica a partir da queima do bagaço de cana-de-açúcar teve seu impulso em 1973, durante a primeira crise do petróleo, surgindo as primeiras unidades de cogeração pelo acoplamento de turbinas de contrapressão no circuito de vapor das indústrias do setor sucroalcooleiro.

Essa alternativa tornou-se limitada sob o ponto de vista da comercialização da energia elétrica excedente, motivo pelo qual, os empreendimentos atuais passaram a adotar o conceito de turbina de condensação com operação independente do processo de industrialização da cana-de-açúcar (COELHO, 1999).

Verifica-se, na Tabela 2, o potencial de geração de energia elétrica na indústria sucroalcooleira.

Tabela 2 Alternativas para geração de energia elétrica em usinas sucroalcooleiras.

| Tecnologia Pressão e temperatura | Período de operação | Consumo de vapor no Processo kg t ⁻¹ | Excedente Energia kWh t ⁻¹ | Potencial Brasil | |
|--|---------------------------|--|---|------------------|-------|
| | | | | GWh | MWh |
| Contrapressão 22 bar 300 °C | safra | 500 | 0 – 10 | 3600 | 900 |
| Contrapressão 80bar- 480°C | safra | 500 | 40-60 | 22000 | 5500 |
| Condensação 80bar 480°C | Ano todo | 340 | 100-150 | 54000 | 7200 |
| BIG/Gt | Ano todo | <340 | 200-300 | 110000 | 14500 |

Fonte: LAMONICA (2007)

Para PROKNOR (2007), dependendo do grau tecnológico, o potencial de geração varia entre 60 e 80 kWh por tonelada de cana-de-açúcar. Para PELEGRINI (2002), estima-se que o bagaço possa gerar cerca de 100 kWh por tonelada de cana-de-açúcar, o que representa um significativo potencial de energia elétrica produzida, principalmente, no período da safra.

Conforme KOBLITZ (2007), o setor sucroalcooleiro, utilizando-se de caldeira com pressão de operação a 60 bar e temperatura a 520 °C, tem capacidade para gerar 132 kWh por tonelada de cana-de-açúcar.

Já para BEN (2006), o consumo térmico do bagaço chegou a 121,1 milhões de toneladas, resultante do crescimento de 12% no processamento de cana-de-açúcar em 2006.

Segundo estimativas da União da Indústria de cana-de-açúcar das 355 unidades de produção sucroalcooleiras existentes na safra 2004/2005, as cinco maiores foram responsáveis por 8% da cana esmagada no país, ou seja, 383 milhões de toneladas. Com relação à produção de energia elétrica, caso seja atingida a meta de processamento de 610 milhões de toneladas de cana na safra 2012/2013, haverá uma disponibilidade de 160 milhões de toneladas de bagaço, possibilitando gerar 16,5 mil megawatts, utilizando-se de caldeiras de alta pressão MAPA (2007)

Maiores quantidades de bagaço e com a substituição de caldeiras poderão gerar maiores quantidades de energia. O custo do bagaço da cana-de-açúcar em uma termoeletrica que utiliza o bagaço para gerar energia elétrica é aproximadamente US\$ 5 por tonelada PELLISARI (2007)

Para MELO & SILVA (2006), o custo estimado da planta é complexo e difícil de ser calculado. Segundo os autores, foi desenvolvido um custo médio para plantas de cogeração, conforme alguns trabalhos desenvolvidos por representantes do *National Renewable Energy Laboratory* (NREL), *Electric Power Research Institute* (EPRI), *Princeton Center for Energy e Environmental Studies*, *Environmental Protection Agency* (EPA), *United States Department of Agriculture* (USDA) e o *Colorado School of Mines*.

TORQUATO & FRONZAGLIA (2005) afirmaram que o custo de investimento na unidade tradicional de cogeração de energia elétrica varia de acordo com a tecnologia (caldeira de alta pressão e baixa pressão), portanto os custos de cogeração podem variar em cada planta.

2.5 Hidrogênio

Para ARAÚJO *et al.* (2005), o hidrogênio, que é utilizado como combustível na maioria das células, não se encontra livre na natureza. É necessário retirá-lo de alguma substância. A eletrólise é o meio mais limpo de se obter hidrogênio, principalmente se a eletricidade for obtida de uma fonte renovável, como energia da biomassa, a hidroeletricidade, energia eólica ou fotovoltaica. No entanto, a eletrólise responde atualmente por apenas 4% da produção mundial de hidrogênio e o restante é obtido de hidrocarbonetos e do carvão.

Conforme SILVA (1991), o emprego energético do hidrogênio ainda é bastante reduzido, sendo utilizado principalmente como insumo químico ou em processos industriais. Devido a questões ambientais, altas eficiências de processos e sem perspectivas de esgotamento, há uma tendência mundial favorecendo o uso do hidrogênio como fonte de energia.

Como a energia elétrica produzida não pode ser armazenada em

grandes quantidades, faz-se necessário promover condições viáveis para seu armazenamento. O hidrogênio obtido por eletrólise da água apresenta-se como uma possibilidade, já que pode ser produzido localmente, utilizado em células

combustíveis para a produção de energia, bem como, estocado em cilindros, comercializado, ou disponibilizado como vetor energético (AGARUSSI & ESPÍNOLA, 2006).

A produção do hidrogênio pela eletrólise da água é uma tecnologia demonstrada há mais de um século. Possibilita vantagens como a utilização da energia elétrica disponível, redução nas emissões de CO₂ e possibilidade de interação com fontes renováveis (SERRA *et al.* 2005).

O hidrogênio pode ser produzido por diferentes métodos, destaca-se, aqui, a eletrólise direta da água. Este método utiliza células eletrolíticas alcalinas, que usam como eletrólito soluções de hidróxido de potássio ou sódio e operam a temperaturas moderadas, entre 66 a 81 °C, possibilitando a produção de hidrogênio gasoso com uma eficiência que varia entre 60 a 100%. Neste caso, o custo dessa produção depende, basicamente, da fonte primária de energia utilizada (PADILHA *et al.* 2006).

Conforme Agência Regional da Energia da Região Autónoma dos Açores (ARENA, 2007), o hidrogênio, quando produzido por fontes de energia renováveis, não produz quaisquer emissões de partículas, monóxido de carbono, dióxido de carbono (CO₂), óxidos de azoto (NO_x) e óxidos de enxofre (SO_x), responsáveis por problemas ambientais como chuvas ácidas, problemas respiratórios e pelo aquecimento global.

Assim, o hidrogênio possui um ciclo de vida limpo, tornando-se um possível candidato a substituir os combustíveis fósseis mesmo que sua produção em maiores quantidades seja complexa e dispendiosa. Na Figura 01, é mostrado o ciclo de vida do hidrogênio.

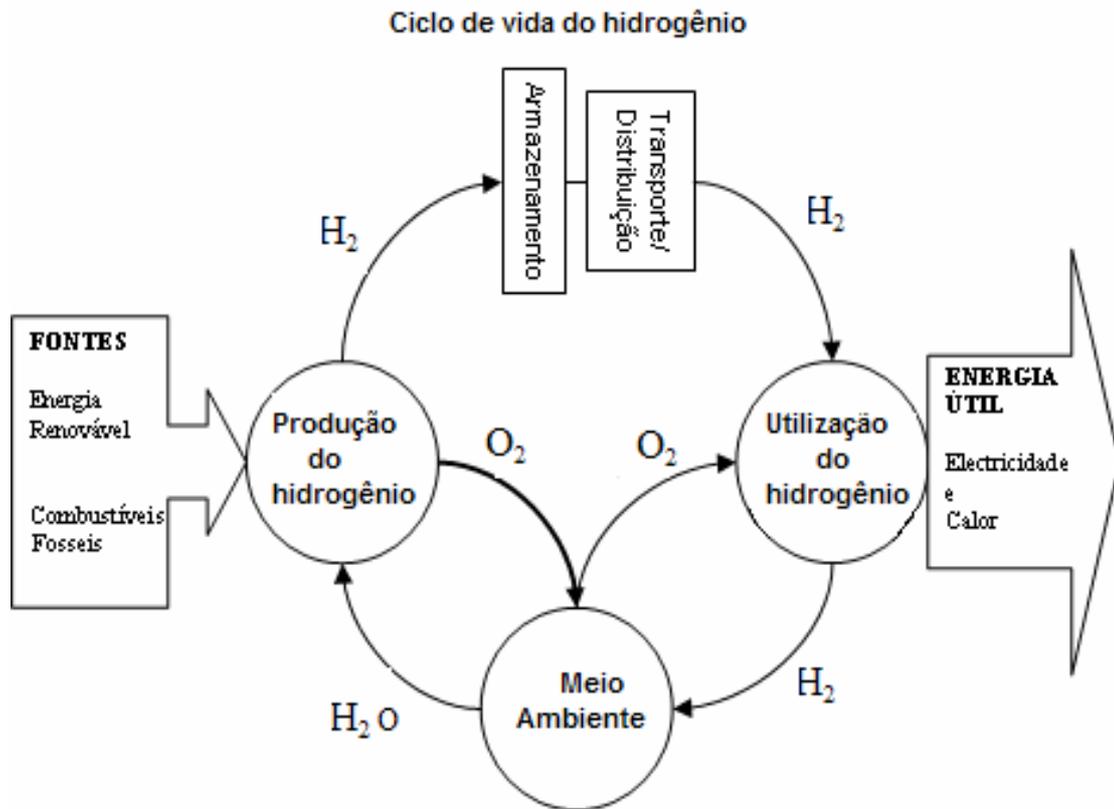


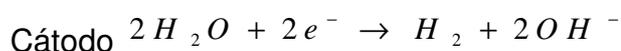
Figura 01 Ciclo de vida do hidrogênio.
Fonte: Arena (2007)

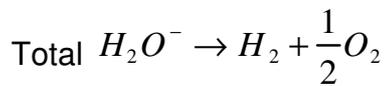
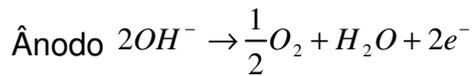
2.6 Eletrólise da água

Conforme SOUZA (1998), a eletrólise da água é o processo eletroquímico de dissociação da água em hidrogênio e oxigênio por meio de reações químicas desencadeadas a partir de uma fonte eletromotriz (gerador).

Assim, tensão e corrente são fornecidas aos eletrodos (cátodo e ânodo) existindo um meio condutor iônico líquido ou sólido. Quando se aplica uma força eletromotriz acima de um determinado potencial, a passagem de corrente entre os eletrodos produz no cátodo hidrogênio e no ânodo oxigênio.

As reações que ocorrem nos eletrodos são:





O aparelho no qual o hidrogênio é gerado é denominado eletrolisador, sendo necessários aproximadamente 4,4 kWh de energia elétrica para produzir 1Nm³ de hidrogênio, com eficiência de 81% (SOUZA, 1998).

2.6.1 Eletrolisadores

Os eletrolisadores convencionais ainda são os mais utilizados e podem ser de dois tipos: unipolar (tipo tanque) e bipolar (filtro prensa). Ambos são compostos por células individuais justapostas (cátodo e ânodo interligados), conectadas em paralelo, no tipo unipolar e em série no tipo bipolar (SILVA, 1991).

No Brasil, foram desenvolvidas plantas de pequena capacidade, com produção de até 25 Nm³ h⁻¹ de hidrogênio com eletrolisadores unipolares e de até 50 Nm³ h⁻¹ com eletrolisadores bipolares. Desenvolvidos nas décadas de 70 e 80, alguns deles ainda estão em operação (MME, 2005).

Na Figura 2, é mostrado um eletrolisador tipo unipolar, com os eletrodos de mesma polaridade da célula eletrolítica, associados eletricamente em paralelo, fazendo com que a voltagem total da célula seja a mesma de um par de células, aproximadamente 2,0 volts (SILVA, 1991).

Na configuração unipolar, um tanque grande de aço aloja um eletrólito alcalino. Os eletrodos são lâminas planas com uma única polaridade (negativa ou positiva); cada um deles processa apenas uma reação, produzindo um gás (H₂ ou O₂) em ambos os lados do eletrodo.

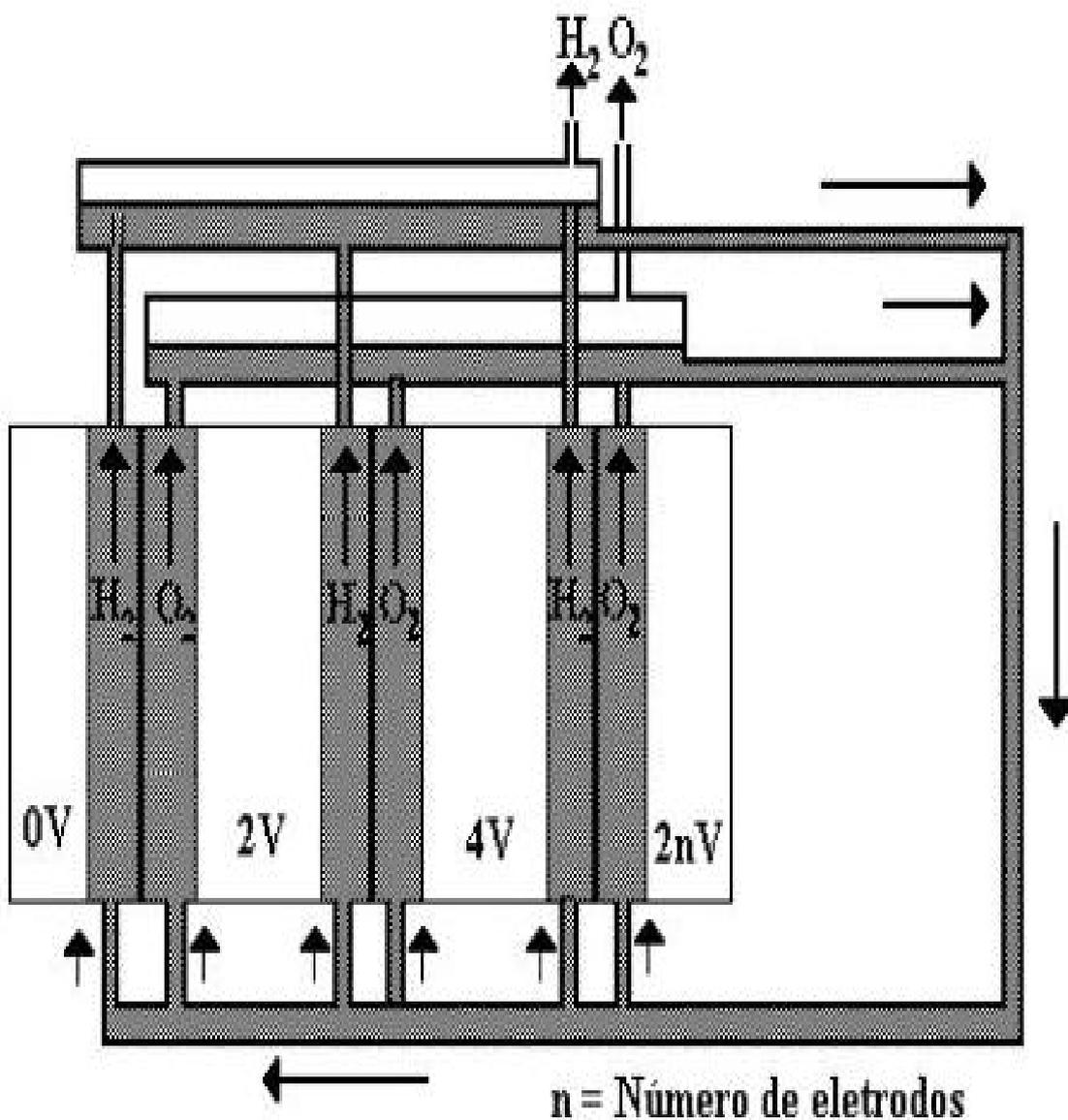


Figura 02 Esquema de um eletrolisador unipolar.
 Fonte: SILVA (1991)

Nos eletrolisadores bipolares, todos os eletrodos (exceto o das extremidades) têm duas polaridades, funcionando como ânodos (produção O_2) e como cátodos (produção de H_2). O arranjo é por meio de placas paralelas na posição vertical. Cada eletrodo está eletricamente em série, mas isolados de seus vizinhos (SOUZA, 1998). Na Figura 03, encontra-se um esquema de eletrolisador modelo bipolar.

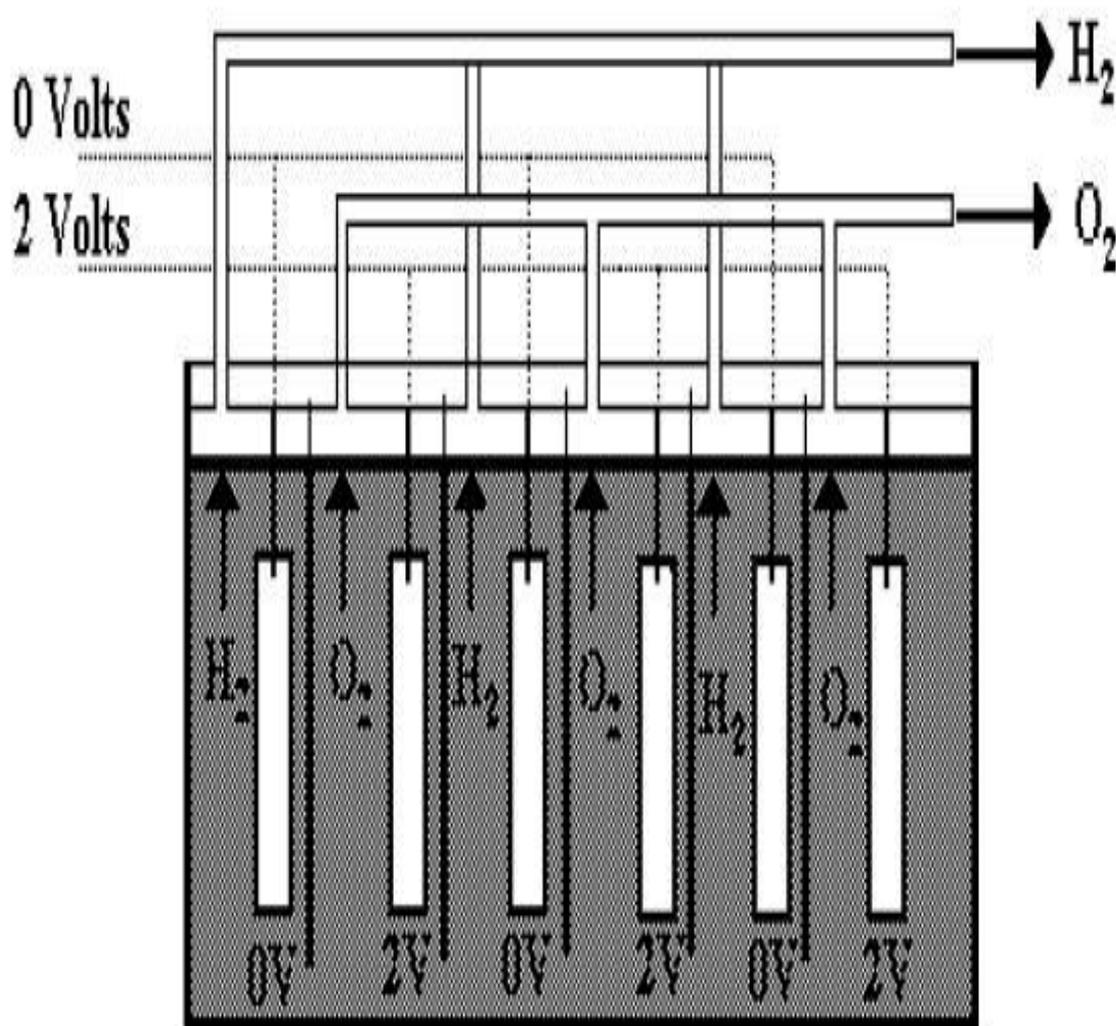


Figura 03 Esquema de um eletrolisador bipolar.
Fonte: (SILVA, 1991)

Conforme NEWBOROUGH (2004), os eletrolisadores comercialmente disponíveis têm eficiência entre 70% e 90%. Mundialmente, há aproximadamente 20 fabricantes de eletrolisadores, destacando-se: *Norsk Hydro* (Noruega), *Stuart Energy Systems* (Canadá), *Teledyne Energy Systems* (Estados Unidos), *Hamilton Sundstrand* (Estados Unidos), *Proton Energy Systems* (Estados Unidos), *Shinko Pantec* (Japão) e *Wellman-CJB* (Reino Unido).

Na Tabela 03, estão algumas especificações dos eletrolisadores disponíveis no mercado, consumo de energia em kWh e a quantidade de hidrogênio produzido em $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$, conforme especificações dos fabricantes.

Tabela 3 Tipos de eletrolisadores, consumo de energia, água e produção de hidrogênio conforme especificações dos fabricantes

| Informações | Fabricantes | | |
|--|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | Norsk Hydro | Teledyne | Próton Energy |
| Eletrolisador | 5040 | EC1000 | Hogen 6m |
| Tipo célula | Filtro prensa | — | Filtro prensa |
| Pressão de saída | 200-500 mm | — | 4.2 to 8.1 kg/cm^2 |
| Consumo de energia | 4,30 kWh Nm^{-3} | 5,6 kWh Nm^{-3} | 6,8 kWh Nm^{-3} |
| Consumo de água (litros) | 1 L Nm^{-3} | 56 Lh^{-1} | 5.50 L h^{-1} |
| Grau de pureza do hidrogênio | 99,9 | 99,9 | 99,9 |
| Produção de H_2 ($\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$) | 485 | 56 | 6 |

Fonte: Especificações conforme fabricantes.

2.7 Produção e consumo de hidrogênio

De acordo com SACRAMENTO *et al.* (2006), o hidrogênio é um vetor energético com as seguintes características:

- Pode ser produzido e convertido em eletricidade numa eficiência relativamente alta;
- Pode ser produzido utilizando fontes renováveis, como a água, ou eletricidade gerada de fontes renováveis;

Na Figura 04, é mostrado o funcionamento básico da transformação de energia oriunda de fontes renováveis para o hidrogênio.

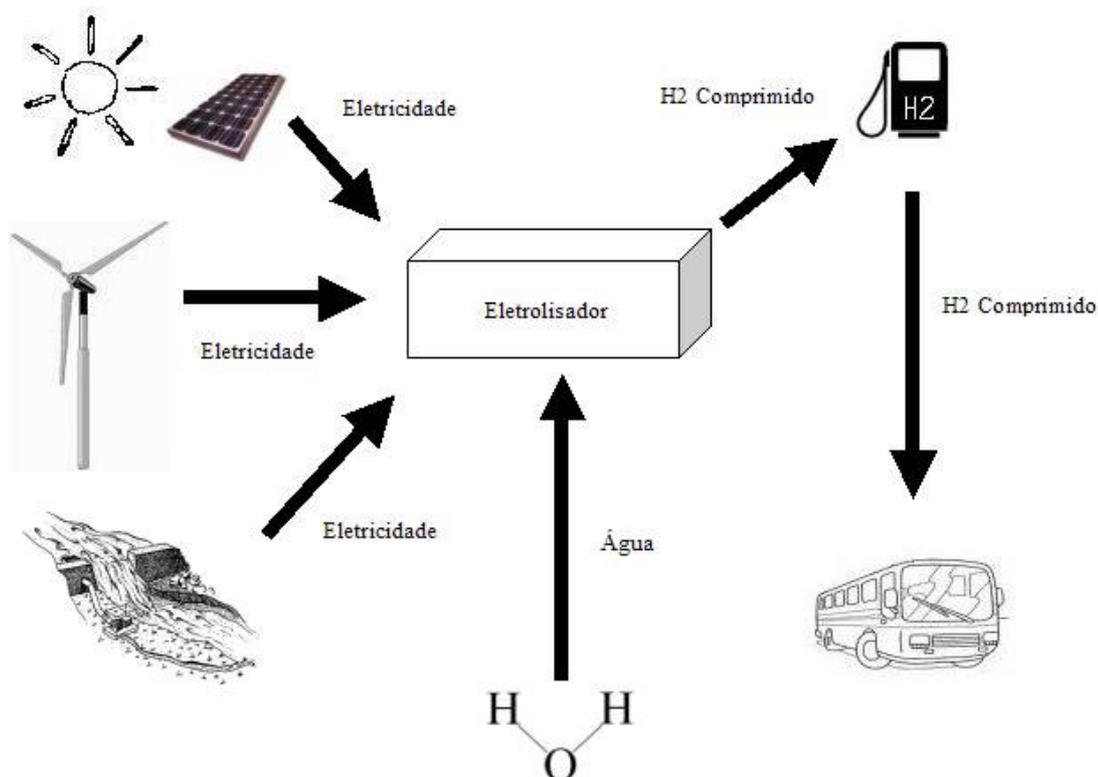


Figura 04 Representação do funcionamento básico da transformação de energia de fontes renováveis em hidrogênio e sua aplicação em veículos.

Fonte: SACRAMENTO *et al.* (2006).

A utilização de sistemas convencionais, como exemplo, a reforma da Nafta, reforma do gás natural, quando comparadas a uso de fontes renováveis de energia para produção de hidrogênio apresentam menores custos. Para os autores, do ponto de vista ambiental, este sistema de produção de hidrogênio não é considerado sustentável, devido às emissões de CO_2 , que contribuem para o efeito de estufa.

De acordo com o relatório da *Hydrogen Implementing Agreement*, em 2001 mais de 540 bilhões Nm^3 de hidrogênio foram produzidos mundialmente. Desse total, 51% foram utilizados em plantas de síntese de amônia, 41% em refinarias de óleo, 3% em indústrias químicas e 5% para outras aplicações (LUZZI *et al.* 2006)

Para FORSBERG (2007), existe um mercado potencial para o hidrogênio nos veículos, nas indústrias (produção de fertilizantes) e para armazenamento de energia. A União Européia investe em programas que utilizam recursos públicos e privados para incentivos em pesquisas de

produção e aplicação do hidrogênio.

O Brasil, por meio do Ministério de Minas e Energia é membro do *International Partnership for the Hydrogen Economy* (IPHE), Programa de Cooperação Internacional para desenvolvimento da economia do hidrogênio criado em 2003. Esse programa tem como objetivo principal organizar as atividades de pesquisa e inserção do hidrogênio e células combustíveis no mercado (DUARTE, 2006).

O Brasil possui uma significativa produção de hidrogênio para consumo industrial. Em 2002, foram 425 mil toneladas para abastecer companhias de petróleo, indústria alimentícia, de fertilizantes e de aço. Em 2004, a Petrobras produziu 180 mil toneladas de hidrogênio em seu parque de refino, quantidade suficiente para gerar mais de 2,4 TWh de energia elétrica.

Conforme MME (2005), o Brasil é o maior produtor mundial de ônibus, com aproximadamente 19 mil unidades por ano. Na região metropolitana de São Paulo, há aproximadamente nove mil ônibus movidos por motores diesel.

Esses veículos contribuem significativamente com a poluição atmosférica. Caso fossem substituídos os motores a diesel por motores a hidrogênio, haveria consideráveis benefícios ambientais. Divulgar e promover incentivos e pesquisas em hidrogênio contribui para o desenvolvimento do mercado e traz benefícios ambientais.

O automóvel sempre foi visto como um dos principais poluentes mundiais, Conforme MOTTA & SARMENTO (2006), a queima do petróleo libera, dentre outros gases, dióxido de carbono (CO_2), um dos principais causadores do efeito estufa. Automóveis movidos a hidrogênio, liberam vapor d' água, não poluente.

SOUZA (2002) estudou o potencial de energia elétrica excedente de bagaço da cana-de-açúcar para gerar hidrogênio eletrolítico. Segundo seus cálculos, uma usina com moagem de 4 mil toneladas por dia poderia produzir $1351.2 \text{ kg dia}^{-1}$ de hidrogênio, essa quantidade é suficiente para abastecer 45 ônibus com autonomia de 200 a 300 km.

O Projeto Ônibus Brasileiro a Hidrogênio, desenvolvido pelo Ministério das Minas e Energia desde 2000 em parceria com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD), *Global Environment Facility* (GEF) e Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), prevê tração elétrica híbrida (célula mais bateria). O protótipo encontra-se em fabricação em Caxias do Sul

(RS) e seu desempenho será acompanhado ao longo de 2008. Em função dos resultados obtidos, outras unidades serão fabricadas em 2009 (MME, 2007).

2.8 Custo de produção do hidrogênio

Considerando as fontes renováveis de energia, alguns estudos ressaltaram a necessidade de buscar a auto-suficiência em sistemas energéticos com soluções eficientes e não poluentes para geração de energia elétrica.

CONTRERAS *et al.* (2007) analisaram a produção de hidrogênio usando a hidroeletricidade na Venezuela e salientaram que na América Latina não há muitos programas de pesquisa e desenvolvimento em hidrogênio utilizando-se de fontes alternativas de energia, porém destacaram que o Brasil é líder em pesquisas de produção do hidrogênio utilizando-se da hidroeletricidade.

Na produção em grande escala do hidrogênio, são necessários altos investimentos, como aquisição de eletrolisadores, retificadores, refrigeradores entre outros. Também há o custo com infra-estrutura ou local de instalação da planta. Conforme SOUZA (1998), estes gastos denominam-se custos de capital de investimento ou custo fixo e geralmente dependem da escala de produção da planta. Também existem os custos de operação e manutenção que envolve gastos com mão-de-obra, reposição de peças, gerenciamento e outros. Considera-se, também, o custo com a eletricidade que é principal insumo para produção do hidrogênio eletrolítico.

Os custos na produção do hidrogênio eletrolítico são: investimentos na montagem da planta eletrolítica, sistemas de controle, refrigeração, assim como o custo com infra-estrutura que são chamados custos de capital de investimento. Destacam-se, também, os custos de operação e manutenção (mão-de-obra, equipamentos e outros) e insumos como a água deionizada e eletricidade.

Na Tabela 04, têm-se custos de produção do hidrogênio para capacidades de 1 a 100 mil $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ considerando a eletrólise da água, reforma da Nafta, reforma do gás natural e a gaseificação de carvão SOUZA (1998).

Tabela 04 Custos de produção do hidrogênio

| Capacidade da Planta (1000 Nm ³ h ⁻¹) | Eletrólise da água (US\$ Nm ⁻³) | Reforma da Nafta (US\$ Nm ⁻³) | Reforma do Gás Natural (GN) (US\$ Nm ⁻³) | Gaseificação do Carvão (US\$ Nm ⁻³) |
|--|---|---|--|---|
| 1,0 | 0,144 | 0,114 | 0,106 | 0,119 |
| 5,0 | 0,114 | 0,109 | 0,100 | 0,102 |
| 10,0 | 0,103 | 0,107 | 0,098 | 0,095 |
| 20,0 | 0,095 | 0,104 | 0,096 | 0,088 |
| 81,0 | 0,084 | 0,100 | 0,091 | 0,073 |
| 100,0 | 0,0860 | 0,099 | 0,090 | 0,071 |

Fonte: Souza (1998).

SOUZA (1998), verificou o custo de produção de hidrogênio via eletrólise da água, reforma do gás natural, gaseificação do carvão para plantas de 1 a 100 Nm³ h⁻¹. A maneira mais econômica de produzir hidrogênio é utilizando o processo de gaseificação do carvão, que apresenta desvantagens ambientais, uma vez que neste processo emitem-se poluentes como o Sox. Ainda para o autor, para produzir hidrogênio entre 7 a 200 mil Nm³ h⁻¹, o custo utilizando-se do processo de produção via o uso da reforma da nafta é mais barato, porém o hidrogênio derivado da nafta, carvão e reforma do gás natural, emitem CO₂, o que implica em custo ambiental adicional.

Atualizando os valores em dólar de 1998 até 2006, segundo o Índice de preços ao Consumidor dos Estados Unidos da América e com o auxílio do programa de computador disponibilizado na internet (MeasuringWorth.Com) por WILLIAMSON (2007) obteve-se a Tabela 05.

Tabela 5 Custos de produção do hidrogênio atualizados conforme variação do dólar nos últimos nove anos

| Capacidade da Planta (1000 Nm ³ h ⁻¹) | Eletrólise da água (US\$ Nm ⁻³) | Reforma da Nafta (US\$ Nm ⁻³) | Reforma do Gás Natural (GN) (US\$ Nm ⁻³) | Gaseificação do Carvão (US\$ Nm ⁻³) |
|--|---|---|--|---|
| 1 | 0,179 | 0,141 | 0,131 | 0,148 |
| 5 | 0,141 | 0,135 | 0,124 | 0,126 |
| 10 | 0,128 | 0,133 | 0,122 | 0,118 |
| 20 | 0,118 | 0,129 | 0,119 | 0,109 |
| 81 | 0,104 | 0,124 | 0,113 | 0,091 |
| 100 | 0,110 | 0,123 | 0,112 | 0,088 |

Fonte: Williamson (2007)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização

A pesquisa foi realizada nas usinas de cogeração que utilizam como combustível o bagaço da cana-de-açúcar e que estão regulamentadas na Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), localizadas na região centro-sul do Brasil, sendo que quinze localizam-se no estado de São Paulo, duas em Minas Gerais e uma no Paraná, conforme Figura 05. O período de coleta de informações sobre as safras foi durante os meses de julho a novembro de 2007.



- | | |
|------------------------|-----------------------|
| 1. Ariranha SP | 10. Novo Horizonte SP |
| 2. Macatuba - SP | 11. Sud Menuci - SP |
| 3. Lençóis Paulista SP | 12. Catanduva - SP |
| 4. Leme - SP | 13. Guaíra -SP |
| 5. Sertãozinho - SP | 14. Tapejara -PR |
| 6. Lucélia - SP | 15. Sertãozinho - SP |
| 7. Jaboticabal - SP | 16. Sertãozinho - SP |
| 8. Guaíra - SP | 17. Iturama - MG |
| 9. Olímpia - SP | 18. Campo Florido -MG |

Figura 05 Localização das usinas de cogeração que utilizam o bagaço da cana-de-açúcar.

3.2 Análise dos dados

3.2.1 Cálculo do potencial de produção de hidrogênio utilizando o bagaço excedente

Obteve-se o total de cana-de-açúcar processada nos últimos cinco anos e o período de operação de cada usina durante o ano, junto aos responsáveis pela produção e geração de energia de cada usina, via contato telefônico.

Para os cálculos do potencial de produção de hidrogênio via energia excedente em usinas que cogeram, do custo da eletricidade e dos custos de produção do hidrogênio, utilizou-se planilha eletrônica e os dados referentes à safra de 2007.

Os cálculos foram realizados em função do total de cana-de-açúcar processada e calculou-se a média do tempo total de operação em cada usina.

As principais premissas, variáveis e condições adotadas para calcular o total de bagaço gerado, o total de bagaço e energia excedente, entre outros se encontram na Tabela 06.

Tabela 06 Valores adotados para avaliar o custo da eletricidade, custo dos eletrolisadores e custo de produção de hidrogênio em função do total de cana-de-açúcar processada na safra 2006/2007

| Premissas | Valor | Unidade | Referência |
|---|-------|-------------------------|------------------------|
| Energia gerada por tonelada de cana | 132,3 | kWh | (KOBLOITZ, 2007) |
| Sobra do bagaço (excedente) | 7 | % | (LAMONICA, 2007) |
| Quantidade de bagaço por tonelada de cana | 250 | kg | (MACEDO & CORTEZ 2002) |
| Taxa anual de desconto | 12 | (ao ano) | (SOUZA, 1998) |
| Vida útil dos equipamentos | 20 | anos | (SOUZA, 1998) |
| Eficiência do eletrolisador | 81 | % | (SOUZA, 1998) |
| Eficiência do equipamento elétrico | 94 | % | (SOUZA, 1998) |
| Disponibilidade da planta | 4848 | (h) | Usinas analisadas |
| Taxa de Operação e Manutenção | 4% | (ano) | Usinas analisadas |
| Custo do bagaço | 9 | (US\$ t ⁻¹) | Usinas analisadas |

Baseando-se nos valores da Tabela 06, calculou-se a quantidade de bagaço, a potência, a quantidade de energia gerada ao ano e a energia

excedente disponível para produzir hidrogênio.

3.2.2 Cálculo do custo da eletricidade

Conforme SOUZA (1998), a eletricidade é o principal insumo para a produção do hidrogênio, o custo da eletricidade pode ser calculado por meio da equação 01:

$$C_e = \frac{C_{g_1}}{E_{g_3}} + C_{bagaço} \quad (01)$$

Em que:

C_e - custo eletricidade (US\$ kWh⁻¹);

C_{g_1} - Custo total do investimento (US\$ ano⁻¹);

E_{g_3} - Total de energia gerada no ano (kWh ano⁻¹);

$C_{bagaço}$ - Custo do bagaço (US\$ kWh⁻¹);

sendo

$$E_{g_3} = P_{ot} \times t \quad (02)$$

t - tempo de operação da unidade (horas ano⁻¹);

P_{ot} - Potência (kW);

$$P_{ot} = B_g \times Q_e \quad (03)$$

Em que:

B_g - Bagaço gerado (kg h^{-1});

Q_e - Total de energia gerada por quilograma de bagaço (kWh kg^{-1});

Assim o custo total do investimento é calculado utilizando a equação:

$$C_{g_1} = C_{P_{cog}} \times P_{ot} \times (Frc + OM) \quad (04)$$

Em que:

$C_{P_{cog}}$ - Custo específico da planta de cogeração ($\text{US\$ kW}^{-1}$);

P_{ot} - Potência (kW);

O&M – Taxa de operação e manutenção;

Frc – fator de recuperação de capital.

Para o cálculo do custo da planta de cogeração ($C_{P_{cog}}$), utiliza-se, conforme MELO & SILVA (2006), a equação abaixo que estima o investimento na planta de cogeração.

$$C_{P_{cog}} = 3.315,1 \times (Pot)^{-0,2227} \quad (05)$$

Em que Pot é a potência em kW

Para SHORT *et.al.* (1995), para calcular o fator de recuperação de capital levou-se em consideração o tempo necessário para recuperação dos custos de investimento, representada pela equação 05:

$$Frc = \frac{d(1+d)^n}{(1+d)^n - 1} \quad (06)$$

Em que:

d - taxa anual de desconto (%);

n - número de anos para amortização do capital investido na planta (anos).

3.2.3 Custo da planta de eletrólise

Para SOUZA (1998), CONTRERAS *et.al.* (2007) o custo específico do eletrolisador na planta de eletrólise (C_{EL}).

Com base no preço dos eletrolisadores, estima-se o custo específico do eletrolisadores de diferentes capacidades conforme equação 06:

$$C_{EL} = 1905,1 \times (C_p)^{-0,2697} \quad (07)$$

$$R^2 = 0,97$$

Em que C_p = capacidade de produção em Nm^3 e R^2 é o coeficiente de determinação que é uma medida da proporção da variabilidade em uma variável que é explicada pela variabilidade da outra.

3.2.4 Cálculo do custo de produção do hidrogênio utilizando a energia excedente.

Conforme PLASS (1989), o custo do hidrogênio é expresso pela razão entre a soma dos custos anuais com investimento, O&M e eletricidade e o total de hidrogênio produzido durante o ano, obtido de acordo com a equação 07:

$$C_h = \frac{(C1 + C2 + C3)}{C4} \quad (08)$$

Em que:

C_h - custo teórico do hidrogênio (US\$ Nm^{-3});

$C1$ - custo capital de investimento (US\$ ano⁻¹);

C2 - custo anual com operação e manutenção – O&M (US\$ ano⁻¹);

C3 - custo anual com eletricidade (US\$ ano⁻¹);

C4 - produção anual de hidrogênio (Nm³ ano⁻¹);

Tem-se a equação:

$$C1 + C2 = (Frc + O\&M).C_{EL}.W \quad (09)$$

Em que:

Frc - Fator anual de recuperação de capital para vida útil econômica da planta e taxa anual de operação e manutenção, conforme equação 06

C_{EL} - custo da planta de eletrólise (US\$ kW⁻¹);

Pot - potência da planta de eletrólise (kW);

Assim, o custo anual com eletricidade é calculado pela equação 09:

$$C3 = Pot.t.C_e \left(\frac{1}{\eta r} \right) \quad (10)$$

Em que:

C3 - custo anual com eletricidade (US\$ ano⁻¹);

C_e - custo da eletricidade (US\$ kWh⁻¹);

t - disponibilidade da planta (horas ano⁻¹);

ηr - eficiência do equipamento elétrico;

A produção anual de hidrogênio (kWh ano⁻¹) é determinada pela equação 10:

$$C4 = Pot.\eta e.l.t \quad (11)$$

Em que:

C_4 - produção anual de hidrogênio ($\text{Nm}^3 \text{ano}^{-1}$);

Pot - potência da planta de eletrólise (kW);

η_{el} - eficiência do eletrolisador;

t - disponibilidade da planta (horas ano^{-1});

Com o uso das equações 06, 09, 10 e 11, o custo do hidrogênio é representado pela equação 12:

$$C_h = (A + B) \cdot 3,556 \quad (12)$$

Em que resultam as equações:

$$A = \frac{(\text{Frc} + \text{OM}) \times C_{EL}}{(t \cdot \eta_{el})} \quad (13)$$

$$B = \frac{C_e}{(\eta_{el} \eta_r)} \quad (14)$$

Observa-se que o fator 3,556 na equação 9 tem a função de converter o custo do hidrogênio de $\text{US\$ kWh}^{-1}$ para $\text{US\$ Nm}^{-3}$, levando em conta que o poder calorífico do hidrogênio que é $12,8 \times 10^6 \text{ JNm}^{-3}$, ou $3,556 \text{ kWh Nm}^{-3}$ conforme (SOUZA,1998).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Potencial de produção de hidrogênio via energia excedente nas usinas de cogeração

Na Figura 06, tem-se o total de cana-de-açúcar processada e a quantidade de bagaço gerado nas safras de 2003 a 2007.

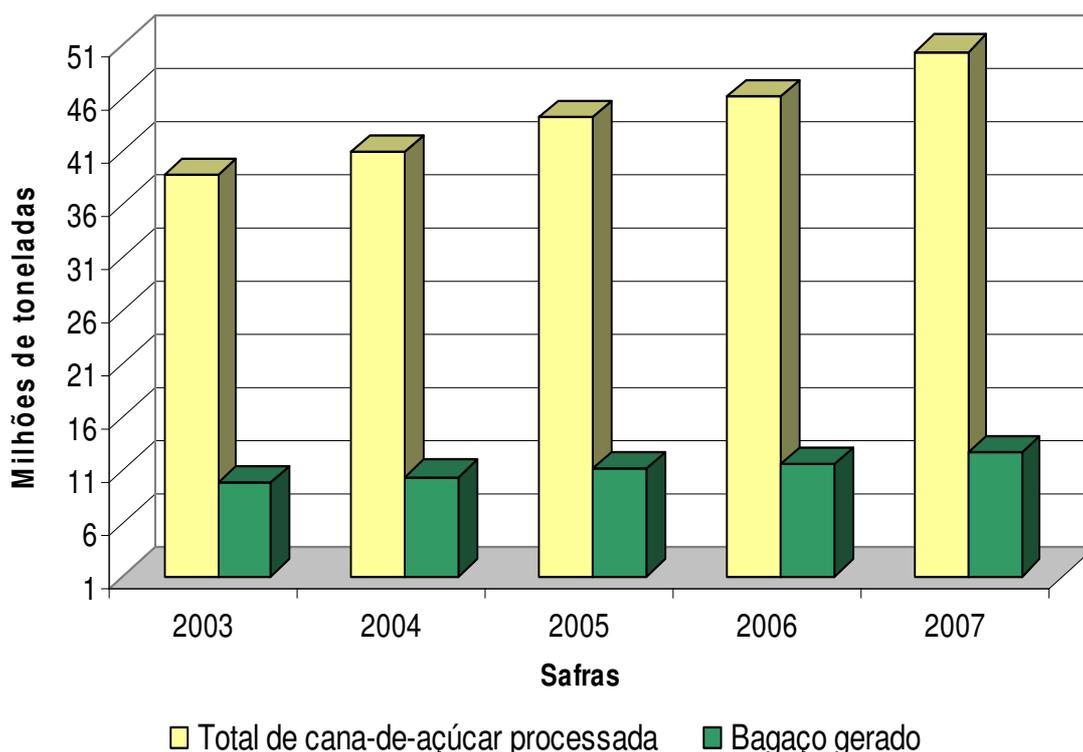


Figura 06 Total cana-de-açúcar processada e bagaço gerado pelas usinas de 2003 a 2007.

Houve um crescimento médio de 7% ao ano na quantidade de cana-de-açúcar processada por essas usinas. Na safra de 2006/2007, as usinas processaram mais de 50 milhões de toneladas, o que significa um acréscimo de 9% em relação ao ano anterior, produzindo 13 milhões de toneladas de bagaço.

Conforme Balanço Energético Nacional (2006), isso aconteceu em decorrência da maior produção de álcool. Conseqüentemente, houve uma maior oferta de bagaço que pôde ser utilizado para gerar energia.

Alguns fatores também contribuíram para esse crescimento, entre eles, destacaram-se a criação do PROINFA em 2002, com o objetivo de incentivar as fontes alternativas de energia no país e a lei 10.848 em 2004, que consolida a geração distribuída de energia e favorece a figura do PIE de energia.

Na Tabela 07, constam os valores médios da quantidade de cana-de-açúcar processada entre 2003 a 2007.

Tabela 07 Valores totais e a média referente ao total de cana-de-açúcar processada nas usinas no período de 2003 e 2007.

| Usinas | Cana-de-açúcar em toneladas | | | | | Média | CV (%) |
|------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|--------|
| | 2003 | 2004 | 2005 | 2006 | 2007 | | |
| São Francisco | 1.129.902 | 1.172.889 | 1.259.083 | 1.012.871 | 763.155 | 1.067.580 | 18% |
| Pioneiros | 822.519 | 1.092.504 | 1.178.782 | 1.300.244 | 1.373.567 | 1.153.523 | 19% |
| Lucélia | 1.116.000 | 1.129.000 | 1.229.000 | 1.135.000 | 1.610.200 | 1.243.840 | 17% |
| Cresciumal | 1.123.247 | 1.284.037 | 1.304.295 | 1.428.805 | 1.454.177 | 1.318.912 | 10% |
| Santa Terezinha | 1.162.252 | 1.508.358 | 1.631.130 | 1.260.259 | 2.166.348 | 1.545.669 | 26% |
| Campo Florido | 673.070 | 1.361.624 | 1.695.150 | 1.881.025 | 2.373.017 | 1.596.777 | 40% |
| Mandu | 1.638.834 | 1.577.282 | 1.697.468 | 1.801.001 | 1.818.475 | 1.706.612 | 6% |
| Santo Antonio | 1.692.877 | 1.769.027 | 1.892.297 | 2.037.551 | 2.192.586 | 1.916.868 | 11% |
| São J. da Estiva | 1.677.748 | 1.814.181 | 2.072.968 | 2.126.859 | 2.172.588 | 1.972.869 | 11% |
| Santa Adélia | 2.033.956 | 2.079.771 | 2.165.869 | 2.141.592 | 2.016.743 | 2.087.586 | 3% |
| Coruripe | 2.271.160 | 2.610.500 | 2.379.671 | 2.497.562 | 3.155.581 | 2.582.895 | 13% |
| Guarani | 2.197.779 | 1.963.297 | 2.626.587 | 3.307.580 | 4.052.989 | 2.829.646 | 30% |
| Cerradinho | 2.133.954 | 2.364.086 | 2.736.436 | 3.404.030 | 3.526.695 | 2.833.040 | 22% |
| Barra Grande | 3.578.666 | 3.437.881 | 3.901.453 | 3.165.678 | 3.349.883 | 3.486.712 | 8% |
| Macatuba | 3.560.465 | 4.016.057 | 3.853.613 | 3.555.351 | 3.466.913 | 3.690.480 | 6% |
| Colombo | 3.051.135 | 3.250.246 | 4.131.993 | 4.127.661 | 4.412.312 | 3.794.669 | 16% |
| Colorado | 3.243.452 | 3.287.349 | 3.755.972 | 4.540.982 | 4.482.502 | 3.862.051 | 16% |
| Santa Elisa | 5.668.672 | 5.196.714 | 4.687.741 | 5.337.279 | 5.960.328 | 5.370.147 | 9% |

CV (%) Coeficiente de variação

Verificou-se na tabela 07, que os valores de cana-de-açúcar processada e a média para cada usina apresentaram coeficiente de variação médio de 16%.

Na usina Campo Florido, o coeficiente de variação foi de 40% para o período estudado, devido à baixa quantidade de cana-de-açúcar processada na safra de 2003.

Na Tabela 08, são apresentados os valores da safra de 2006/2007 para as usinas de cogeração com o total de cana-de-açúcar processada em toneladas por dia, o total de bagaço produzido em (kg h^{-1}), a energia gerada em (MWh ano^{-1}) e a energia excedente em (kWh h^{-1}).

Tabela 08 Total de cana-de-açúcar processada por dia, total de bagaço produzido em kg h^{-1} , o total energia gerada em MWh ano^{-1} e a energia excedente em kWh h^{-1} para safra 2006/2007

| Usinas | Cana-de-açúcar processada toneladas dia ⁻¹ | Bagaço gerado kg h^{-1} | Energia gerada MWh ano^{-1} | Energia excedente kWh h^{-1} |
|--------------------|---|----------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|
| São Francisco | 3500 | 36458 | 93678 | 1353 |
| Pioneiros | 5000 | 52083 | 133825 | 1932 |
| Cresciumal | 6500 | 67708 | 173973 | 2512 |
| Lucélia | 8000 | 83333 | 214120 | 3092 |
| Mandu | 9500 | 98958 | 254268 | 3671 |
| Santa Adélia | 11000 | 114583 | 294415 | 4251 |
| Santa Terezinha | 12500 | 130208 | 334563 | 4831 |
| São José da Estiva | 14000 | 145833 | 374710 | 5410 |
| Santo Antonio | 15500 | 161458 | 414858 | 5990 |
| Campo Florido | 17000 | 177083 | 455005 | 6570 |
| Coruripe Iturama | 18500 | 192708 | 495153 | 7149 |
| Barra Grande | 20000 | 208333 | 535300 | 7729 |
| Macatuba | 21500 | 223958 | 575448 | 8309 |
| Cerradinho | 23000 | 239583 | 615595 | 8889 |
| Guarani | 24500 | 255208 | 655743 | 9468 |
| Colombo | 26000 | 270833 | 695890 | 10048 |
| Colorado | 27500 | 286458 | 736038 | 10628 |
| Santa Elisa | 29000 | 302083 | 776185 | 11207 |

O período de safra pode variar em cada usina. Por isso, baseando-se nas informações das usinas, definiu-se um período médio de 202 dias (4848 horas) para o cálculo da cana-de-açúcar processada diariamente.

MACEDO & CORTEZ (2002) apontam que para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, 250 quilos correspondem ao total de bagaço gerado.

KOBLITZ (2007) analisou a geração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro, sendo que o total de energia gerada em cada usina depende da tecnologia empregada. Segundo o autor, cada tonelada de cana-de-açúcar, por hora, produz 132 kW, utilizando-se apenas do bagaço para gerar energia.

De acordo com LAMONICA (2007), 7% do total de bagaço gerado é considerado como sobra, possibilitando gerar energia elétrica excedente.

Na Figura 07, utilizando o total de energia gerada, calculou-se a energia excedente de cada usina e o total de produção de hidrogênio em kg h^{-1} necessário para abastecer ônibus com autonomia de 200 a 300 Km por dia.

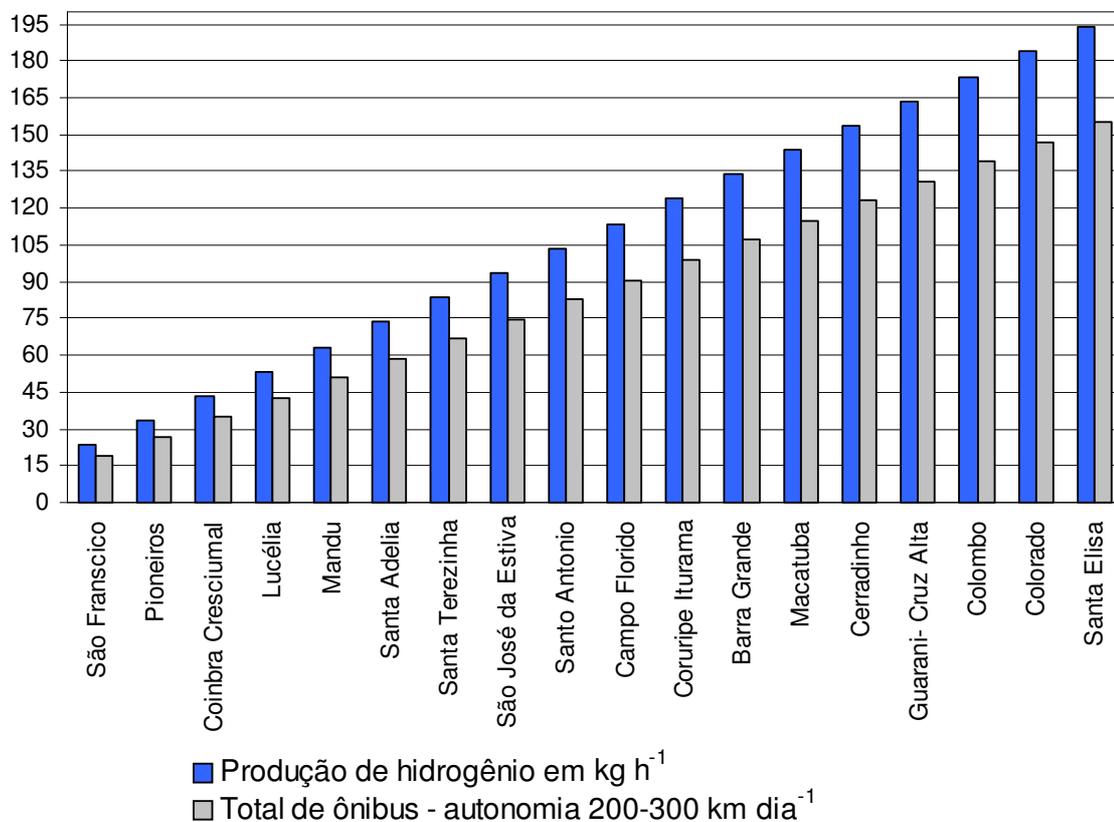


Figura 07 Potencial de produção de hidrogênio e a quantidade de ônibus que poderiam ser abastecidos pelas usinas que utilizam bagaço de cana-de-açúcar.

Com o cálculo do total de energia excedente foi possível verificar a quantidade de hidrogênio que pode ser produzida em função da capacidade de processamento de cana-de-açúcar nas usinas.

Conforme NORSK HYDRO, TELEDYNE & PROTON ENERGY (2007), em média, necessita-se de 5,2 kWh para produzir 1Nm^3 de hidrogênio, utilizando-se o processo de eletrólise.

Para análise de valores, transformou-se o total de hidrogênio em Nm^3h^{-1} para kg h^{-1} , ou seja, 1Nm^3 equivale a 0,08988 kg. No processo de eletrólise, há geração de oxigênio e hidrogênio, assim considerou-se apenas a quantidade de hidrogênio, sendo devolvido o oxigênio ao meio ambiente. Conforme o total de energia gerada, mostrado na Tabela 08, calculou-se o total

de energia excedente e, conseqüentemente, a quantidade de hidrogênio que pode ser produzida com este excedente.

SOUZA (2002) estudou o potencial de produção de hidrogênio para usinas com diferentes capacidades de processamento da cana-de-açúcar. Calculou a quantidade de hidrogênio produzido por dia e calculou quantos ônibus cada usina poderia abastecer, considerando que o veículo possui autonomia de 200 a 300 km. Uma usina com capacidade de processamento de 25 mil toneladas por dia poderia abastecer 282 ônibus.

Conforme MME (2005) somente São Paulo possui mais de 9 mil ônibus abastecidos, na sua maioria, por diesel. Se convertidos para usarem hidrogênio como combustível, forma-se um mercado consumidor e há um considerável benefício ambiental.

4.2 Cálculo do custo da eletricidade

Verifica-se na Tabela 09, a potência em kW, custo específico da planta de cogeração (C_{pog}) em US\$ kW⁻¹, custo de investimento em U\$S ano⁻¹.

Tabela 09 Potência, custo específico da planta de cogeração e o custo total do investimento para as usinas de açúcar e álcool na safra de 2006/2007.

| Usinas | Potência kW | Custo específico da planta de cogeração (US\$ kW ⁻¹) | Custo total do investimento (U\$S ano ⁻¹) |
|--------------------|-------------|--|---|
| São Franscico | 19323 | 1714,3 | 5.760.504 |
| Pioneiros | 27604 | 1583,4 | 7.600.914 |
| Coinbra Cresciumal | 35885 | 1493,5 | 9.320.388 |
| Lucélia | 44167 | 1426,0 | 10.952.878 |
| Mandu | 52448 | 1372,5 | 12.518.174 |
| Santa Adélia | 60729 | 1328,4 | 14.029.137 |
| Santa Terezinha | 69010 | 1291,1 | 15.494.750 |
| São José da Estiva | 77292 | 1259,0 | 16.921.612 |
| Santo Antonio | 85573 | 1230,7 | 18.314.761 |
| Campo Florido | 93854 | 1205,7 | 19.678.154 |
| Coruripe Iturama | 102135 | 1183,2 | 21.014.981 |
| Barra Grande | 110417 | 1162,8 | 22.327.857 |
| Macatuba | 118698 | 1144,2 | 23.618.963 |
| Cerradinho | 126979 | 1127,2 | 24.890.147 |
| Guarani | 135260 | 1111,4 | 26.142.988 |
| Colombo | 143542 | 1096,8 | 27.378.850 |
| Colorado | 151823 | 1083,2 | 28.598.926 |
| Santa Elisa | 160104 | 1070,5 | 29.804.263 |

Pode-se observar que o custo específico da planta de cogeração foi de US\$ 1070,5 kW⁻¹ a US\$ 1714,3 kW⁻¹. Nota-se que aumentando a capacidade de processamento da cana-de-açúcar, o custo total do investimento também irá aumentar.

Com relação à potência, as usinas possuem 1635 MW de potência instalada, que por sua vez, relaciona-se com a quantidade de bagaço gerado e total de energia gerada por quilograma de bagaço (kWh kg⁻¹).

ROCKMAN (2007) relatou que a maioria das novas usinas deve atuar na produção de bioeletricidade, já que há um grande volume de bagaço e que o setor sucroalcooleiro pode chegar a 8 mil MW de potência instalada.

Na Figura 08, são mostrados os custos das plantas de cogeração em relação à capacidade de processamento de cana-de-açúcar em toneladas por dia.

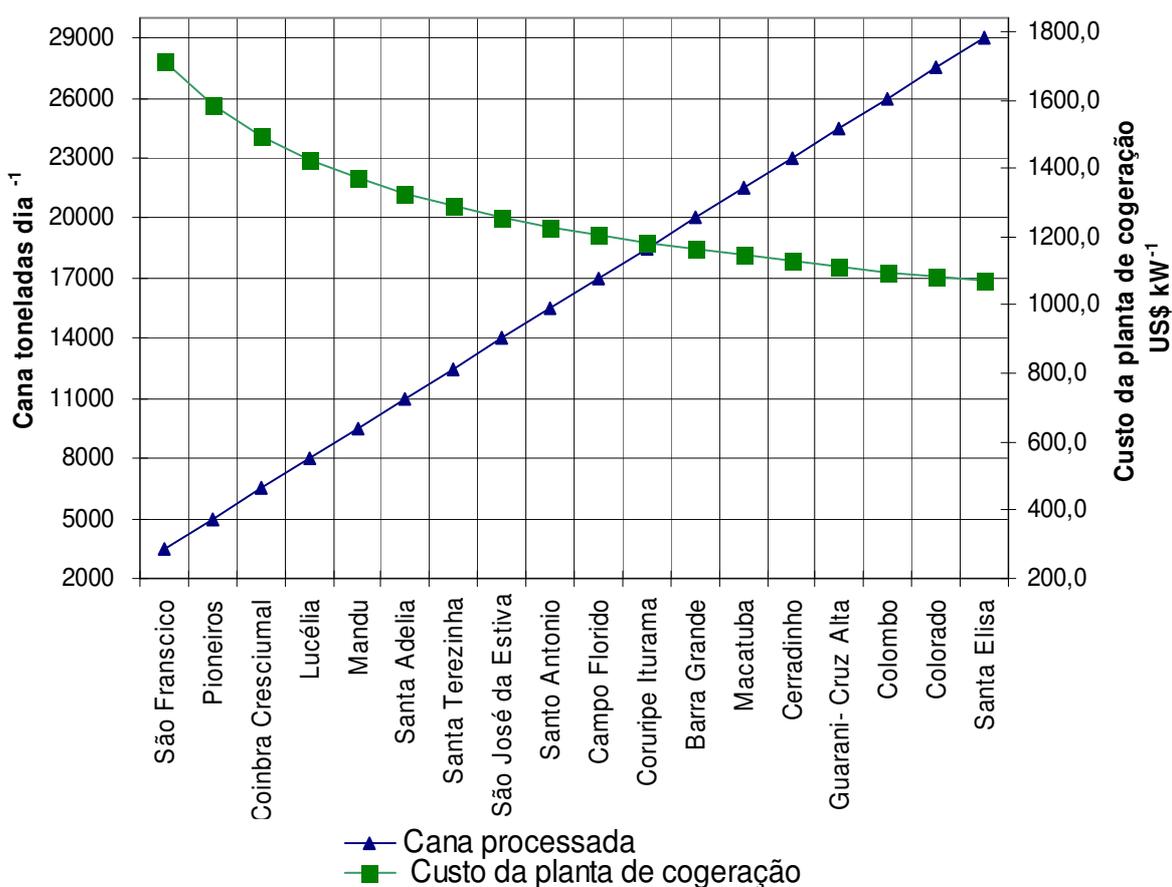


Figura 08 Custo específico da planta de cogeração em relação à capacidade de processamento de cana-de-açúcar em toneladas por dia.

MELO & SILVA (2006) realizaram um estudo para verificar o custo da planta de cogeração utilizando a biomassa e consideraram que usando turbinas industriais de baixa e alta tecnologia, o custo específico da planta varia entre US\$ 1.230 kW⁻¹ e US\$ 1.488 kW⁻¹.

TORQUATO & FRONZAGLIA (2005) avaliaram projetos de investimento em cogeração nas usinas de açúcar e álcool no estado de São Paulo e obtiveram custos de US\$ 420 kW⁻¹ a US\$ 480 kW⁻¹ para o período da safra de 2005.

Conforme informações obtidas nas usinas (comunicação pessoal), os valores correspondentes aos custos da planta de cogeração podem variar, pois cada usina tem diferentes tecnologias empregadas.

Na Figura 09, são apresentados os valores do custo da eletricidade em US\$ kWh⁻¹. Baseou-se no valor do dólar comercial de outubro de 2007, onde US\$1,00 é igual a R\$ 1,80 e conforme informações das usinas analisadas, admitiu-se que preço do bagaço é de US\$ 9,00.

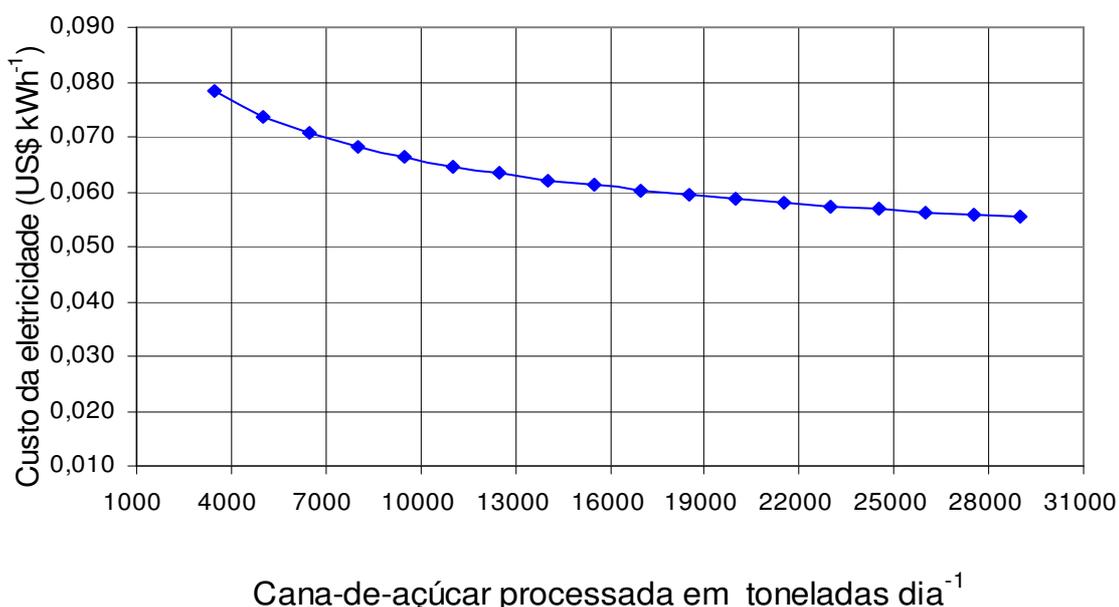


Figura 09 Custo da eletricidade gerada em função da capacidade de processamento da cana-de-açúcar nas usinas de açúcar e álcool.

Observa-se que conforme aumenta a capacidade de cana-de-açúcar processada diminui o custo da eletricidade. Isso significa que em usinas com maiores quantidades de cana-de-açúcar processadas o custo da eletricidade,

torna-se estável a partir de 28 mil toneladas de cana-de-açúcar processada por dia.

SILVA (2000) verificou os custos da eletricidade gerada pelo sistema com turbina de condensação/extração no período de safra e de entressafra e concluiu que o custo de geração da eletricidade é de US\$ 0,030 kWh⁻¹.

Maiores quantidades de bagaço resultam em menores preços para tonelada de bagaço. Segundo dados de uma usina de cogeração (comunicação pessoal), o preço da eletricidade foi calculado entre US\$ 0,030 kWh⁻¹ a US\$ 0,025 kWh⁻¹. Nesses valores não são considerados os custos de transporte da cana-de-açúcar até a usina.

Na Figura 10, são mostrados os custos da eletricidade em US\$ kW⁻¹ variando o valor do bagaço da cana-de-açúcar.

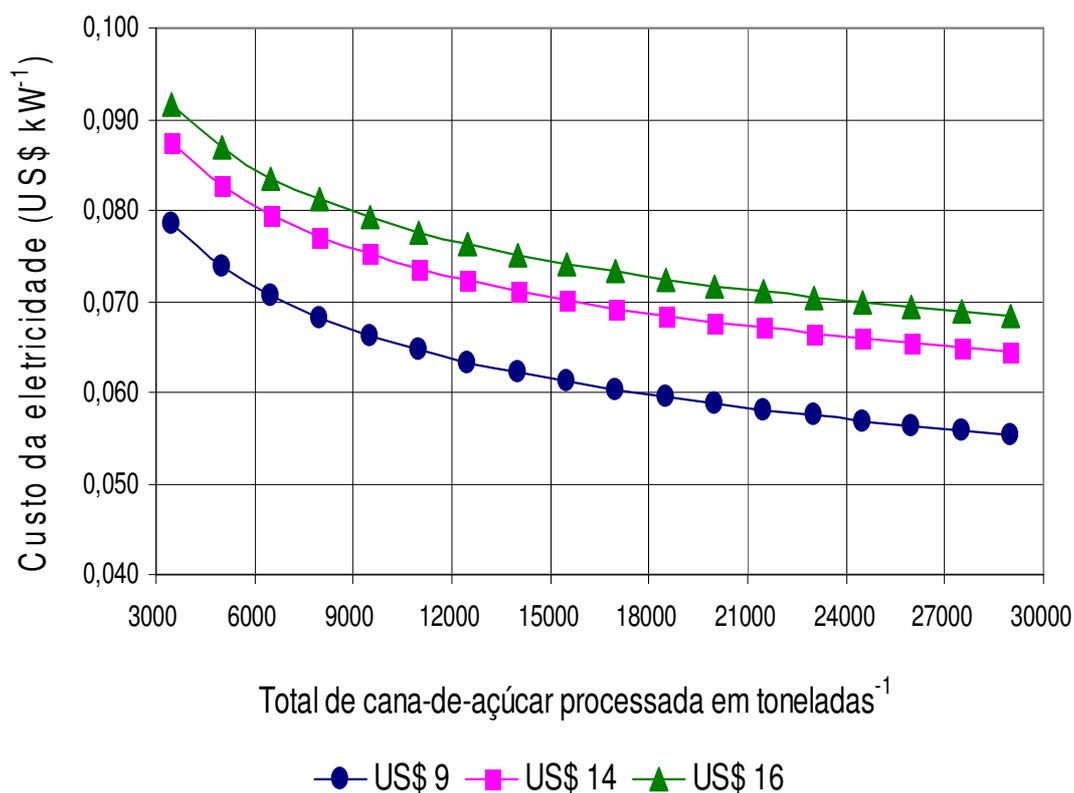


Figura 10 Custo da eletricidade em função do preço do bagaço da cana-de-açúcar.

É importante ressaltar que o custo da eletricidade relaciona-se com o custo da planta de cogeração. Isso mostra que para projetos atuais em que o

custo da planta de cogeração é de US\$ 480,00 kW⁻¹ o custo da eletricidade seria de US\$ 0,034 kWh⁻¹, conforme TORQUATO & FRONZAGLIA (2005).

Aumentando o preço de venda do bagaço, verificou-se que o custo da eletricidade varia na mesma proporção.

4.3 Cálculo do custo da planta de eletrólise

De acordo com os preços dos eletrolisadores apresentados nos anexos e com a média de consumo de energia para produzir hidrogênio, calculou-se a capacidade de produção para cada usina.

Utilizando-se a equação 06, calculou-se o custo específico da planta (C_{EL}), mostrado na Figura 11.

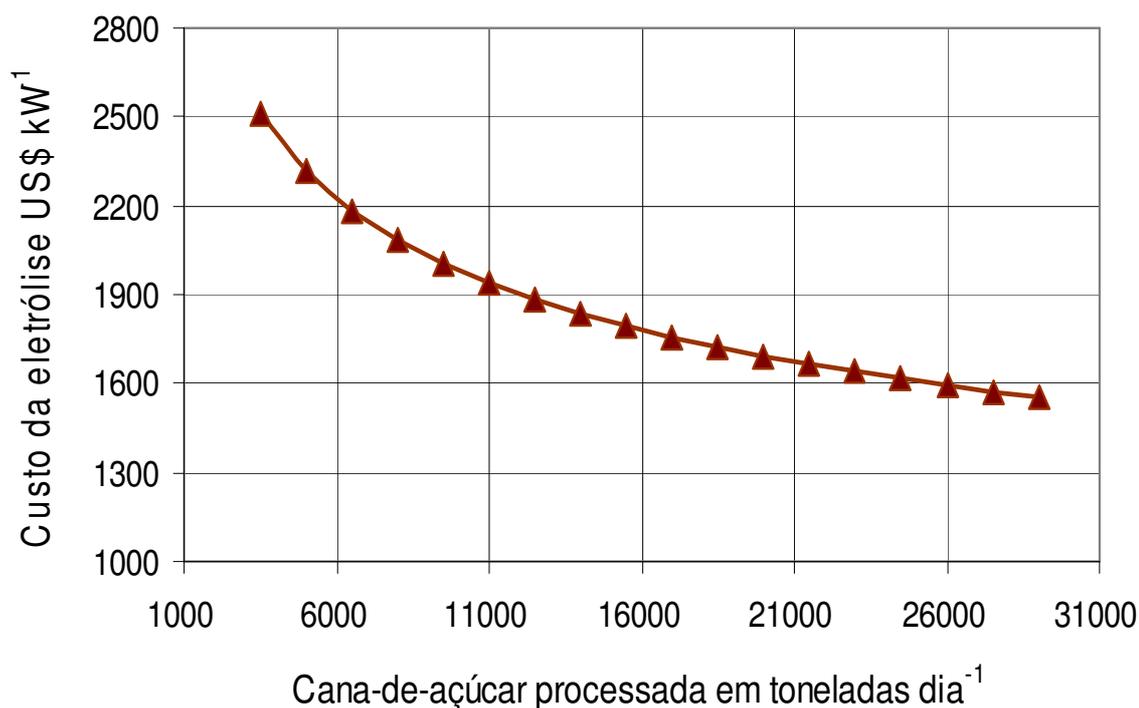


Figura 11 Custo específico da planta de eletrólise em função da capacidade cana-de-açúcar processada

Com o valor da capacidade de produção do hidrogênio (em Nm³ h⁻¹), estimou-se o custo de capital da planta de eletrólise (C_{EL}), que é uma das variáveis necessárias para calcular o custo do hidrogênio.

Observa-se que o custo específico da planta eletrólise diminuiu de US\$ 2510 kW⁻¹ até US\$ 1555 kW⁻¹. Ao aumentar a produção, acontece uma melhor utilização da capacidade e com isso os custos fixos e variáveis são distribuídos por maiores quantidades de produto, resultando um custo mais baixo da planta de eletrólise por kW⁻¹.

SOUZA (1998) analisou o custo da planta de eletrólise, utilizando energia hidroelétrica secundária para produzir hidrogênio. Constatou que o custo da planta de eletrólise depende do tamanho da planta, ou seja, decresce com aumento da capacidade de produção da planta.

Na Figura 12, são mostrados os custos da planta de cogeração em relação ao custo da planta de eletrólise.

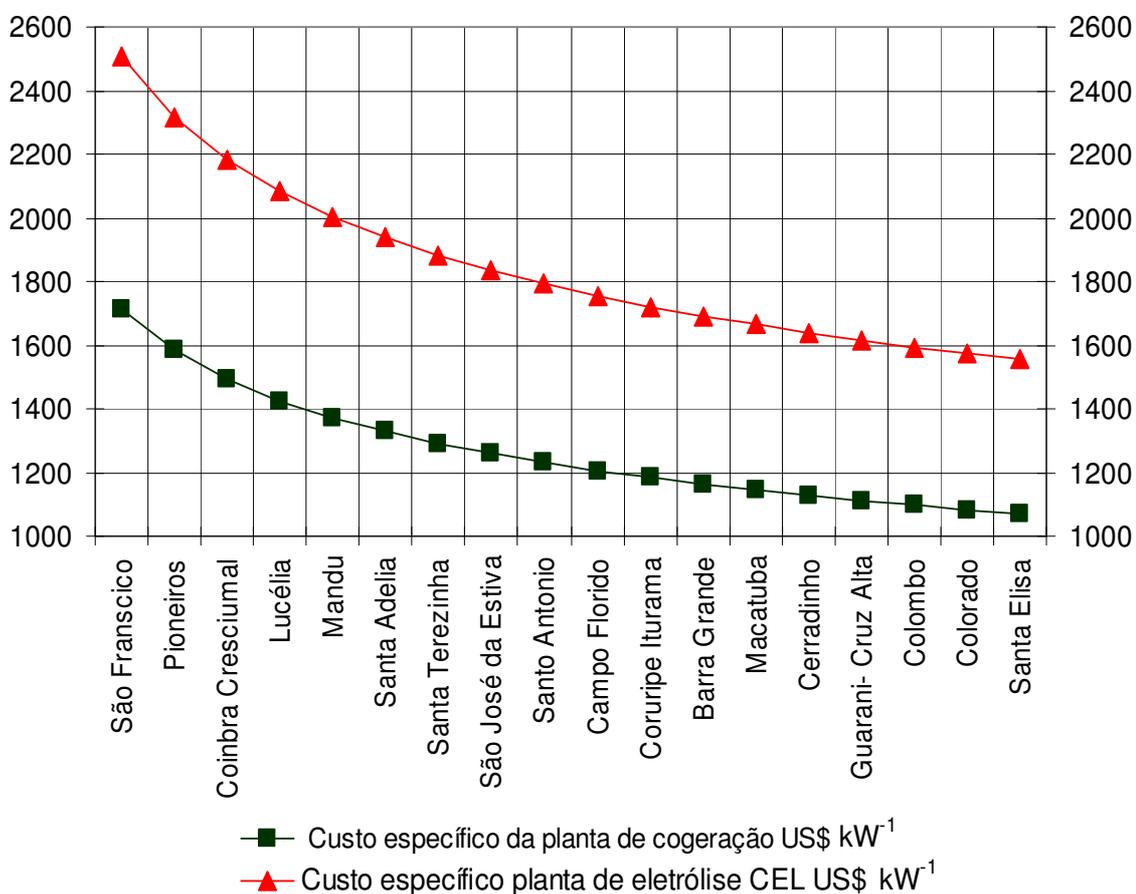


Figura 12 Comparação do custo específico da planta de cogeração em relação ao custo específico da planta de eletrólise.

Observa-se que os custos das plantas de cogeração e de eletrólise resultam em curvas de tendência parecidas, ou seja, quando aumentam as capacidades de processamento das usinas os custos de cogeração e eletrólise

tornam-se menores. Entretanto, com maior produção de bagaço de cana-de-açúcar tende a diminuir ainda mais o custo específico da planta de cogeração em relação ao custo específico da planta de eletrólise.

4.4 Custos de produção de hidrogênio a partir da energia excedente

Na Figura 13, são mostrados os custos do hidrogênio em US\$ Nm⁻³ em relação à capacidade de produção de hidrogênio em Nm³ h⁻¹ utilizando energia excedente do bagaço da cana-de-açúcar.

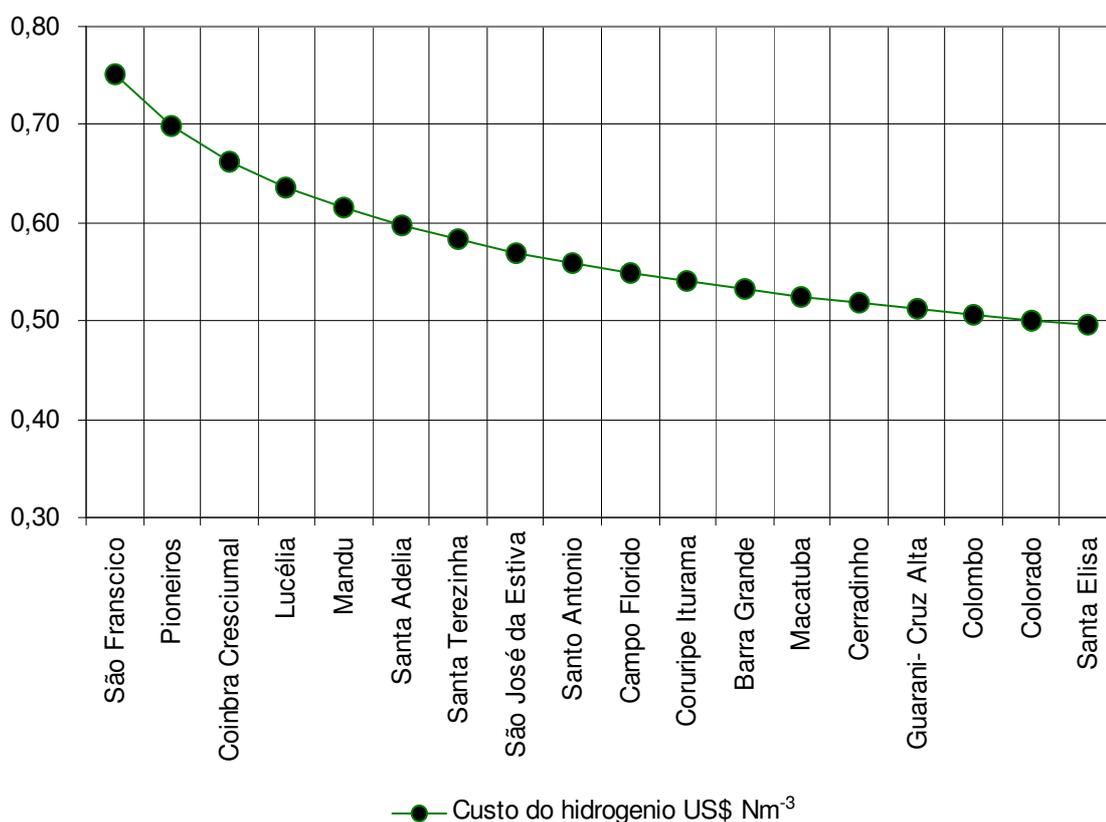


Figura 13 Custos do hidrogênio em relação à capacidade de produção nas usinas de açúcar e álcool

Com o custo da planta de eletrólise (C_{EL}), estimou-se o custo do hidrogênio. Para o cálculo do custo do hidrogênio em relação à capacidade de produção, manteve-se a mesma taxa de retorno (12%) utilizada para o cálculo da eletricidade.

AGARUSSI & ESPINOLA (2006) analisaram algumas maneiras de calcular o custo de produção do hidrogênio. Ressaltaram a importância do custo da energia que é o principal insumo para produzir hidrogênio. Os autores concluíram que utilizando a energia hidroelétrica secundária o custo mínimo do hidrogênio foi de US\$ 0,090 Nm⁻³.

CONTRERAS *et al.* (2007) realizaram um estudo para verificar os custos de produção do hidrogênio via eletrólise, utilizando a energia de hidroelétricas. Os resultados mostraram que os custos variam entre US\$ 0,4 Nm⁻³ e US\$ 0,3 Nm⁻³ de hidrogênio.

SOUZA (1998) estudou o aproveitamento de energia hidroelétrica secundária para produzir hidrogênio e os custos apurados foram de US\$ 0,179 Nm³ para plantas com capacidade de produção de 1000 Nm³ h⁻¹.

Na Figura 14, são mostrados os custos de produção do hidrogênio em relação à capacidade de produção de hidrogênio em Nm³ h⁻¹ utilizando energia excedente do bagaço da cana-de-açúcar, variando a taxa anual de desconto

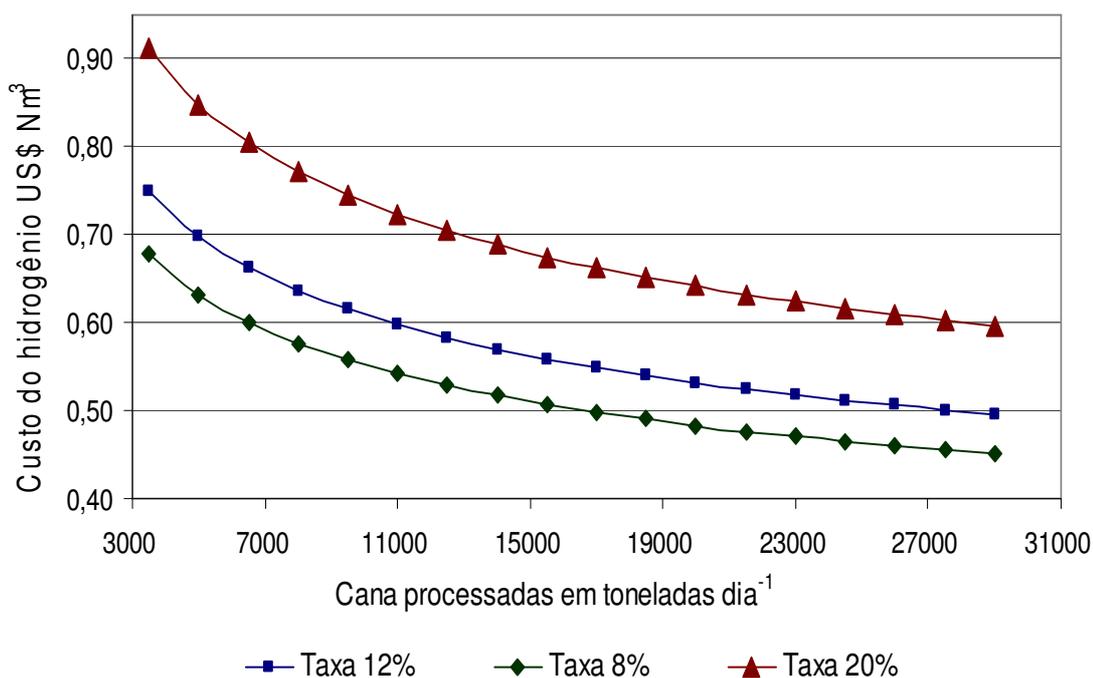


Figura 14 Variação do custo do hidrogênio em relação à taxa anual de desconto.

Alterando-se os outros parâmetros constantes, porém variando a taxa anual de desconto, nota-se que o custo do hidrogênio varia e tende a tornar-se

constante à medida que a capacidade de processamento da cana-de-açúcar aumenta.

Na Figura 15, verifica-se o total de hidrogênio que poderia ser produzido em $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ em cada usina e o custo do hidrogênio em $\text{US\$ Nm}^{-3}$.

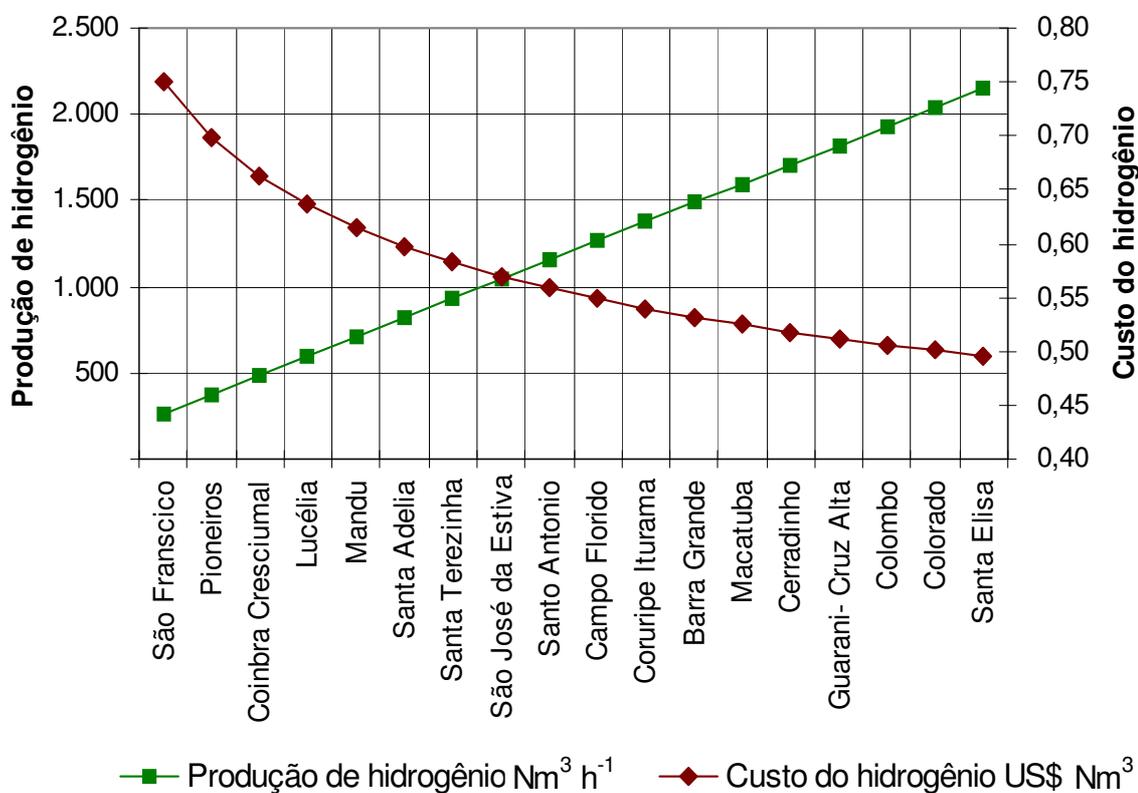


Figura 15 Total de hidrogênio que poderia ser produzido e o custo do hidrogênio conforme potencial em cada usina

Observa-se que as usinas de açúcar e álcool possuem potencial para produzir de 260 a 2155 $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ de hidrogênio. Para uma usina com processamento de cana-de-açúcar acima de 14 mil toneladas por dia e possível produção de 1040 $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ o custo do hidrogênio é de $\text{US\$ } 0,57 \text{ Nm}^{-3}$.

SOUZA (1998) verificou o custo de produção de hidrogênio via eletrólise da água, reforma do gás natural e gaseificação do carvão para plantas de 1 a 100 mil $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$. Em plantas de 1 a 5 mil $\text{Nm}^3 \text{h}^{-1}$ o custo da produção do hidrogênio via eletrólise variou entre $\text{US\$ } 0,179 \text{ Nm}^{-3}$ e $\text{US\$ } 0,141 \text{ Nm}^{-3}$.

Neste trabalho, não foram estudadas possíveis aplicações do hidrogênio. No entanto, seria interessante estudar os benefícios ambientais

resultantes da substituição de veículos que utilizam combustíveis fósseis por veículos movidos a hidrogênio, uma vez que o hidrogênio não é poluente.

Levantou-se o custo da eletricidade, baseando-se no custo do bagaço. Notou-se, com isso, que seria importante estudar o custo da eletricidade, considerando um maior número de variáveis. Por exemplo: aquisição de maiores quantidades de bagaço, queima de pontas e folhas da cana-de-açúcar, custos com transporte desses insumos entre outros. Essas variáveis são importantes para verificar a viabilidade econômica de se produzir mais energia excedente.

Levantou-se o potencial de produção de hidrogênio em usinas de cogeração de açúcar e álcool qualificadas pela ANEEL. Pode-se recomendar um estudo de caso em uma das usinas com potencial de produção de hidrogênio, analisar o tipo de tecnologia empregada, a quantidade de energia que a usina necessita no processo e o total de energia elétrica excedente disponível.

É importante ressaltar que nesse estudo verificou-se o custo da produção de hidrogênio nas usinas, mas pode ser feito um estudo onde sejam incluídos os principais setores de consumo de hidrogênio, analisando os custos de transporte e armazenamento do hidrogênio e oxigênio resultantes da eletrólise.

5 CONCLUSÕES

Baseando-se nos resultados, pode-se concluir que:

- Nas usinas de açúcar e álcool há um considerável volume de bagaço de cana-de-açúcar e a sobra deste, transformada em energia elétrica excedente, pode ser utilizada para gerar hidrogênio. O potencial de geração de energia elétrica excedente é de 113 MWh de energia, o que produziria $21.738 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ de hidrogênio. Essa quantidade é suficiente para abastecer 1563 ônibus com autonomia de 200 a 300 km diariamente.
- O custo da eletricidade produzida em função do total de bagaço varia de US\$ $0,055 \text{ kWh}^{-1}$ a US\$ $0,078 \text{ kWh}^{-1}$. Esses custos são baixos devido a grande disponibilidade e baixo custo do bagaço.
- Os custos das plantas de eletrólise dependem diretamente dos preços dos eletrolisadores e variam conforme a capacidade de produção de hidrogênio. Obteve-se um valor médio de consumo de energia de 5,2 kWh para produzir 1 Nm^3 de hidrogênio. Os custos específicos das plantas de eletrólise são inversamente proporcionais à capacidade de produção das usinas. Isso significa que a capacidade de produção de hidrogênio nas usinas é de 260 a $2155 \text{ Nm}^3 \text{ h}^{-1}$ para custos específicos da planta de eletrólise que variam de US\$ 1555 kW^{-1} a US\$ 2510 kW^{-1} .
- Os custos de produção de hidrogênio, a partir de energia excedente, variam de US\$ $0,55 \text{ Nm}^{-3}$ a US\$ $0,75 \text{ Nm}^{-3}$. Considerando as perspectivas de crescimento na produção de álcool e açúcar, produzir hidrogênio torna-se uma opção atrativa para usinas de cogeração com energia excedente.

7 REFERÊNCIAS

AGARUSSI, M.A.S.N., ESPÍNOLA, M.O.G. Análise emergética da produção de hidrogênio eletrolítico aproveitando a energia vertida não turbinada da usina hidroelétrica de Itaipu. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL, 3, 2006, Campinas, SP, Brasil. **Anais eletrônicos...** Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/WICaC2006/> Acesso em: 03 out. 2007.

ARAUJO, P.D.; BERGAMINI, C.P.; ESTEVEA, G.R.T.; CAMARGO, J.C.; SILVA, E.P.; LOPES, D.G. Análise comparativa entre dois sistemas de geração de energia elétrica para a comunidade isolada no interior do estado do Amazonas: célula a combustível com reformador para gás natural x gerador diesel. **Revista PCH Noticias & SHP News**, V.7, n.24, 2005.

ARENA (Agência Regional da Energia da Região Autónoma dos Açores). Hidrogênio: o combustível do futuro, 2007. Disponível em: <<http://www.arena.com.pt/ntec.html#H>> Acesso em: 03. dez. 2007.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**, 2005. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Atlas/download.htm>> Acesso em: 03 fev. 2007.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Banco de informações de geração**, 2007. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/15.htm>> Acesso em: 01 dez. 2007

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Leis e Decretos do setor elétrico**, 2007. Leis e decretos do setor elétrico. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/biblioteca.cfm?target=indexbas>> Acesso em: 01 fev. 2007

BEN. Balanço Energético Nacional, Brasília, 2006 Disponível em: <http://www.mme.gov.br/site/menu/select_main_menu_item.do?channelId=1432&pageId=10780> Acesso em 02 fev. 2007

BRANDÃO, S.S. da. Cogeração: **Trabalho no âmbito da cadeira de Produção e Planejamento de Energia Elétrica**, 2004. Disponível em: <<http://ssbrandao.no.sapo.pt/Cogeracao.pdf>>. Acesso em 02 fev. 2007.

BONA, F.S.; RUPPERT, E.F. As microturbinas e a geração distribuída. **PCH Notícias & SHP News**, Itajubá, n.24, p.8-11, nov-dez-jan 2004/05.

CLARK, W.; ISHERWOOD, W. Distributed generation: remote power systems with advanced storage technologies. **Energy Policy**, v. 32, n.14, p. 1573-1589, 2004

COELHO, S.T. **Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir da biomassa**: um modelo para estado de São Paulo. São Paulo, 1999, 278 f. Tese (Doutorado em Energia) Universidade de São Paulo, SP.

CONTRERAS, A.; POSSO, F.; VEZIROGLU, T.N. *Modeling and simulation of the production of hydrogen using hydroelectricity in Venezuela. **International Journal of Hydrogen Energy**. New York v.32, n.9, p. 1219-1224, 2007.*

CORRIA, M.E.; COBAS, V.M.; LORA, E.S. *Perspectives of Stirling engines use for distributed generation in Brazil. **Energy Policy**, France, 34, n. 18, p. 3402-3408, 2006.*

DUARTE, A.F. Programa brasileiro de ciência tecnologia e inovação para a economia do hidrogênio-ProH₂. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRECÉLULAS A COMBUSTÍVEL, 3, 2006, Campinas, SP, Brasil; **Anais eletrônicos**...Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/WICaC2006/WICaC2006_PDF.html> Acesso em: 22 fev.2007.

EL-KHATTAM, W.; SALAMA, M.M.A. *Distributed generation technologies, definitions and benefits. **Electric Power Systems Research**, Oxford, v. 71, n. 2, p. 119-128, 2004.*

ESCOBAR, M.R. Geração distribuída 2004. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON BIOENERGY POLICIES, TECHNOLOGIES AND FINANCING, 1, 2004, Ribeirão Preto, SP, Brasil; **Anais eletrônicos**... Disponível em: <http://www.bioenergy-lamnet.org/publications/source/bra2/Escobar.pdf> Acesso em: 25 nov.2007

FORSBERG, C.W. Future hydrogen markets for large-scale hydrogen production systems. ***International Journal of Hydrogen Energy**, New York, v. 32, n.4, p. 431-439, 2007.*

GARMAN, D.K. Energia renovável e novas tecnologias. **Revista Perspectivas Econômicas**, Washington v. 9, n. 2, 2004.

HALL, O.D.; HOUSE, J.O.I.; SCRASE, I. Visão geral de energia e biomassa. In: CALLE, R., BAJAY, S.V., ROTHMAN, H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Editora Unicamp, 2002. Cap.1.

HOLLANDA, J.B. Geração distribuída e a cana de açúcar: Sinergia com a produção próxima a carga permite parecerias lucrativas para as concessionárias elétricas e para as usinas e contribuem para reduzir custos para todos os consumidores interligados ao sistema, 2005. PORTALGD. Disponível em: <<http://www.portalgd.com.br/zpublisher/materias/default.asp?id=16265>> Acesso em: 14 set.2005.

JORNALCANA. **Safra de cana é recorde em 2006/2007**, 2006. Disponível em: <http://www.jornalcana.com.br/pdf/156/%5Cproddadosnot.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2008

KIKUCHI, S. Energia potencial a ser explorado. **Revista Ecologia e Desenvolvimento**, Rio de Janeiro, ano 10, n.94, p.1- 4, 2001.

KOBLITZ, L.O. Geração de energia elétrica no setor sucro-alcooleiro, 2007. In: SIMPOSIO E MOSTRA INTERNACIONAL DA TECNOLOGIA DA

AGROINDÚSTRIA SUCROALCOLEIRA, 1, 2007, Piracicaba, Sp, Brasil; **Anais eletrônicos**...Disponível em:< <http://www.simtec.com.br/palestras/simcoger2007.htm>> Acesso em:25 nov.2007

LAMONICA,M,E. Produção de vapor e eletricidade: a evolução do setor sucroalcooleiro. In: WORKSHOP DE GESTÃO DE ENERGIA E RESÍDUOS NA AGROINDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA, 2, 2007, Pirassununga, Sp, Brasil. **Anais eletrônicos**....Disponível em:< <http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/Novidades/GERA/Dia%2012/4-Helcio-Lamonica.pdf>> Acesso em: 20 out.2007.

LUZZI, A.; BONADIO, L.; MCCANN, M. In Pursuit of the Future: 25 years of IEA Research towards the realisation of Hydrogen Energy Systems, 2006. Disponível em:<<http://www.rgesd-sustcomm.org/hi-po/documentos.html>> Acesso em: 25.nov.2007.

MACEDO,I.C.; CORTEZ, L.A.B. O processamento industrial da cana-de-açúcar no Brasil. In: CALLE, R., BAJAY, S.V., ROTHMAN. H. **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Editora Unicamp, 2002. Cap.6, 448 p.

MACEDO, I.C. **Doze estudos sobre a agroindústria da cana-de-açúcar no Brasil e a sua sustentabilidade**. São Paulo: Editora Berlendis & Vertecchia: UNICA – União da Agroindústria Canavieira do Estado de São Paulo, 2005.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Roteiro para a Estruturação da Economia do Hidrogênio no Brasil**, 2005. Disponível em:< http://www.mme.gov.br/site/menu/elect_main_menu_item.do?channelId=2590>Acesso em: 03 mar.2007

MME. Ministério de Minas e Energia, 2007. Disponível em:< <http://www.mme.gov.br>>Acesso em: 03 mar.2007

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Cadeia Produtiva da Agroenergia**, 2007. Disponível em: <http://webiica.iica.ac.cr/bibliotecas/repiica/B0584p/B0584p.pdf>. Acesso em: 03. jan.2008.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass: overview of biomass. **Bioresource Technology**, *United Kingdom*, v. 83, n.1, p. 37- 46, 2001.

MELO, A.L.F.; SILVA, S. Análise de viabilidade técnico-econômico para geração de energia elétrica através do ciclo combinado em Paragominas-Pa, utilizando biomassa. In: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 4, 2006, Recife, Pe, Brasil. **Anais eletrônicos**...Disponível em:<http://www.dmm.cefet-ma.br/graduacao/CONE M _2006_10-531.pdf>.Acesso em: 25. out.2007

MIRANDA, A. Novo gás para o brasileiro. **Jornal da Unicamp**, Campinas, v.1, n.161, p. 4-5, 2001.

MOTTA, R.; SARMENTO, V. Automóvel e hidrogênio juntos pelo meio-ambiente, 2006. Disponível em: http://www.dad.puc-rio.br/dad07/arquivos_downloads/42.pdf. Acesso em: 03.dez.2006

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. E. S. **Dendroenergia**: Fundamentos e aplicações. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.

NETO, V.C. Análise de viabilidade da cogeração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural. Rio de Janeiro, 2001, 174 f. Dissertação (Mestrado Ciências em Planejamento Energético) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

NEWBOROUGH, M. A report on electrolyzers, future markets and the prospects for itm power ltd's electrolyser technology, 2004. Disponível em:< www.h2fc.com/Newsletter/PDF/ElectrolyserTechnologyReportFINAL.doc> Acesso em 05. mai.2007.

NORSK HYDRO ELECTROLYSERS AS. *Technical Information*. Disponível em <http://www.electrolysers.com>. Acesso em:05 jun. 2003.

OLIVEIRA, C.E.L.; HALMEMAN, M.C.R.; MASSOCHIN, A. Implicações do novo modelo do setor elétrico brasileiro no processo de geração distribuída com a utilização do bagaço da cana-de-açúcar. In: CBE CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 11, 2006, Rio de Janeiro, **Anais...**, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL; 2006, p.275-288.

PADILHA. J.C.; SOUZA, R.F.; GONÇALVES, R.S.; BERTHELOT, J.R. Produção de hidrogênio por eletrólise da água usando líquidos iônicos como eletrólitos, 2006. In: WORKSHOP INTERNACIONAL SOBRECÉLULAS A COMBUSTÍVEL, 3, 2006, Campinas, Sp, Brasil; **Anais eletrônicos...**Disponível em:< http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/WICaC20_06/PDF/04-JaninePadilha.pdf > Acesso em : 03 set.2007.

PLASS, J.H.J. Hydrogen system application analysis.Task A, Internal Report, University of Miami, 1989.

PELEGRINI, M C. Inserção de centrais cogedoras a bagaço de cana no parque energético do estado de São Paulo: exemplo de aplicação de metodologia para análise dos aspectos locais e de integração energética. São Paulo, 2002, 187 p. Dissertação (Mestrado em Energia) Universidade de São Paulo, SP.

PELLISARI, H. Termoelétrica funciona só com bagaço de cana, 2007. Disponível em: <http://www.Jornalacidade.com.br/noticias/60467/termoeletrica-funciona-so-com-bagaco-de-cana.html>. Acesso em: 20 jan.2008

PROCKNOR, C. Cogeração de energia a bagaço de cana no estado de São Paulo,2007. Disponível em:<http://www.saneamento.sp.gov.br/bio_apresen/Procknor.pdf> Acesso em: 20 out.2007.

PROTON ENERGY SYSTEMS. *Energy Systems*. Disponível em: <http://www.protonenergy.com/>. Acesso em: 05 jun, 2007.

RAMOS, D. S.; PELEGRINI, M C ; VIEIRA, S . A Cogeração no setor sucroalcooleiro: Usinas de Médio Porte. In: ENCIT 2000 - CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS TÉRMICAS, 2000, Porto Alegre,

2000. Anais...VIII Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências Térmicas - ENCIT 2000.

RAMOS, R. A. V. ; GASCHE, J. L. ; TAKAKI, A. T. ; UCHOA, T. B. ; BRANCO, F. P. ; FIOMARI, M. C. ; MAIA, C. R. M. . Análise Energética e Exergética de uma Usina Sucro-Alcooleira com Sistema de Cogeração de Energia em Expansão. In: V CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2003, São Pedro, SP. **Anais...V Congresso Latino-Americano de Geração e Transmissão de Energia Elétrica, 2003.**

ROCKMANN, R. Uso do bagaço reforça receitas das usinas. **Jornal Valor Econômico**. Edição especial, p.2, 2007. Disponível em: <http://www.valoronline.com.br/seminarios/bioenergia/Suplemento_Bioenergia_02.pdf> Acesso em; 05 dez.2007.

ROMAGNOLI, H.C.; CAMARGO, C.C.B.de. Perspectivas para a geração distribuída no marco regulatório atual do setor elétrico brasileiro. In: VI SEMINÁRIO BRASILEIRO SOBRE A QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2005, Belém, 2005 . **Anais eletrônicos VI Seminário Brasileiro sobre a Qualidade da Energia Elétrica, 2005**,p. 337-342.

SACRAMENTO, E.M.; LUTERO, C. L.; CARVALHO, P.C.; Estado da arte da tecnologia em um sistema hidrogênio-solareólico. **Revista Tecnol. Fortaleza**, Fortaleza, v.27, n. 2, p. 150-162, 2006.

SERRA, E.T.; FURTADO, J.G.M.; SOARES, G.F.W.; NETO, A.C. **Células a combustível: uma alternativa para geração de energia e sua inserção no mercado brasileiro**. Rio de Janeiro: CEPEL-Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2005.

SILVA, E.P. **Introdução à tecnologia e economia do hidrogênio**. Campinas: Editora Unicamp, 1991.

SHORT, W.;PACKEY, D.J.; HOLT, T. A Manual for the Econômica Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies. National Renewable Energy Laboratory. DE-AC36-83CH10093, March, 1995.

SOUZA, Z. J. de; AZEVEDO, P. F.de. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. **Rev. Econ. Sociol. Rural.**, Brasília, v. 44, n. 2, p.179-199, 2006a.

SOUZA, Z.J.; AZEVEDO, P. F. Protocolo de Kyoto e co-geração no meio rural: configuração institucional e organizacional e perspectivas. In: AGRENER CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6, 2006, Campinas: UNICAMP, **Anais...Campinas, SP, BRASIL 2006b.**

SOUZA, S.N.M. Aproveitamento da energia hidroelétrica secundária para produção de hidrogênio eletrolítico. Campinas, 1998, 189 f. Tese (Doutorado em Planejamento de Sistemas Energéticos) Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, São Paulo.

SOUZA, S. N. M. *Potential of energy from waste of sugar cane for hydrogen production in Brazil*. In: 14th WORLD HYDROGEN ENERGY CONFERENCE, 2002, Montreal, Canada. **Anais...** Produced and Distributed by Gestion Micro-Intel, Montreal, Canada, 2002. 1 CD ROM.

TELEDYNE ENERGY SYSTEMS. *Products and Solutions*. Disponível em <<http://www.teledyneenergysystems.com>>. Acesso em: 02 mai.2007.

TERCIOTE, R. Impactos econômicos da implementação das novas usinas de cana-de-açúcar. In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 6, 2006, Campinas, **Anais...**Campinas:UNICAMP, 2006.

TORQUATO, S. A.; FRONZAGLIA, T. Tecnologia BIG-GT: energia a partir da gaseificação da biomassa da cana, 2005. Instituto de Economia Agrícola. Disponível em:< <http://www.iea.sp.gov.br/out/verTexto.php?codTexto=3814>> Acesso em:03.nov.2007

UNICA (União da Indústria de Cana-de-Açúcar). Produção do centro-sul de cana-de-açúcar das safras 1990/91 a 2005/06, 2007. Disponível em: <http://www.portalunica.com.br>>Acesso em:25 mar.2007.

WADE (World Alliance for Decentralized Energy). World survey off decentralized energy, 2005. Disponível em:<[http://www.localpower.org/documents_publications_worldsurvey05.pdf](http://www.localpower.org/documents_publications/worldsurvey05.pdf)> Acesso em: 16 fev.2007.

WILLIAMSON, S.H. *Five Ways to Compute the Relative Value of a U.S. Dollar Amount, 1790-2006*. MeasuringWorth.Com, 2007. Disponível em:< <http://www.measuringworth.com/calculators/uscompare/result.php>> Acesso em: 02 dez.2007.

ANEXOS

ANEXO A ORÇAMENTO ELECTROLYSERS

Dear Mr de Souza

Our largest electrolyser has a capacity fo 485 Nm³/hr. The price for a hydrogen plant with this capacity is from USD 1,8 million and upwards, dependning on the scope (i.e. high H₂ purity, high H₂ pressure, etc). If you comine 10 of these electrolysers, you should estimate with a cost saving in the range 10-20%.

Good luck with your study.

Best regards,

Henning G. Langås
Director, Sales & Marketing
Hydro Oil and Energy
Hydrogen Technologies
Visiting address: Heddalsvn. 11, N-3674 Notodden, Norway
Postal address: P.O. Box 44, N-3671 Notodden, Norway
Phone: + 47 35 92 78 17, Mobile: + 47 482 38 732, Fax.: + 47 35 01 44 04
<http://www.hydro.com/electrolysers>

ANEXO B ORÇAMENTO TELEDYNEES

Dear Sir,

Thank you for your inquiry. Here is a link to some information about our hydrogen generators:

<http://www.teledyneees.com/titan.asp>

You can download our brochures by clicking on the images of the hydrogen generators. The brochures have technical information to help you in your study.

Currently, our largest model (EC-1000) produces 56 Nm³/hr. They can be connected in parallel so, in theory, we could provide enough units to produce gas in the quantities you mentioned. As for the economics, you can use \$500,000 per unit as a budgetary figure. Additional costs that you might incur would be compression, storage, monitoring equipment, piping and valves as the system gets more complicated, and a building to protect the equipment from the environment.

These additional considerations could bring your cost up to \$750,000 or higher for each unit of EC-1000.

Roughly, I would consider you have described projects between \$10,000,000 at the low end and \$100,000,000 at the high end.

I hope this is helpful. Let me know if you have additional questions.

Best regards,

Robert K. Matthis

Regional Sales Manager

Teledyne Energy Systems

Hunt Valley , MD

ANEXO C ORÇAMENTO DISTRIBUTED-ENERGY

Prof Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza
Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE - Brasil
CCET - Campus Cascavel
Rua Universitária, 2069
CEP 85814-110 Cascavel - PR
Fone: +55 (45) 32203155 or 32250414

Attention: Ms. Cristina Halmeman:

Per your request, I have attached the HOGEN Hydrogen generator quote for your review. Please let me know the next steps in your decision process.

Thank you very much,

Frank Vonesh, PE

Frank A. Vonesh, P.E.
Sales Manager – Midwest and Latin America
Distributed Energy Systems
10 Technology Drive
Wallingford, CT 06492
Phone: 314-566-6806 (mobile)
Phone: 636-519-8356 (office)
Fax: 636-519-7981
fvonesh@distributed-energy.com
www.distributed-energy.com



10 Technology Drive, Wallingford, Connecticut 06492 USA

Tel: 203.878.2000 • Fax: 203.949.8018 • www.distributed-energy.com

QUOTATION NUMBER: PQL08085

QUOTATION

PROF DR. SAMUEL NELSON MELEGARI DE SOUZA
UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANA
UNIOESTE - BRASIL
CCET - CAMPUS CASCAVEL
RUA UNIVERSITARIA, 2069
CEP 85814-110 CASCAVEL - PR
TEL +55 (45) 32203155 OR 32250414

DATE: OCTOBER 19, 2007
QUOTATION NUMBER: PQL08085
REFERENCE: FRANK VONESH
TERMS & CONDITIONS: SEE ATTACHED
WARRANTY: SEE ATTACHED
CURRENCY: US DOLLARS
QUOTE VALID FOR: 60 DAYS
EST. DELIVERY: 12 WEEKS AFTER ORDER ACCEPTANCE
EX-WORKS: WALLINGFORD, CONNECTICUT - USA

| PART NO | PRODUCT DESCRIPTION HOGEN® H-SERIES | QTY | PRICE | TOTAL |
|--------------|---|-----|--------------------|--------------------|
| HOGEN® 6M | HOGEN® 6M SERIES HYDROGEN GENERATOR <ul style="list-style-type: none"> • PRODUCTION RATE UP TO 6NM³ (218 SCFH). • COMPLETE UNIT INCLUDING PEM CELL STACK AND RECTIFIERS; CONTROLLER AND GAS DRYER. ALL IN ONE EASY TO INSTALL, CAUSTIC-FREE PACKAGE • 99.9995% PURITY AT 15 BARG (218 PSIG) MAXIMUM PRESSURE • INSTALLS EASILY IN UNCLASSIFIED SPACE • SYSTEM SENSES DEMAND AND INSTANTLY ADJUSTS PRODUCTION RATE WITH 100-0% TURNDOWN CAPABILITY. • 100% DUTY CYCLE RATED • ETHERNET CONNECTION STANDARD • CE, CSA, TUV-US, ATEX | 1 | \$189,500 | \$189,500 |
| KT-1000-0038 | AUTO CALIBRATION OPTION (FACTORY INSTALLED) <ul style="list-style-type: none"> • PROVIDES CAPABILITY OF UNIT TO AUTOMATICALLY CALIBRATE THE ON-BOARD COMBUSTIBLE GAS DETECTORS UPON OPERATOR INITIATION AT THE CONTROL PANEL. INCLUDES: WIRING; MOUNTING HARDWARE; SOLENOID VALVE; AND ONE CYLINDER OF CALIBRATION GAS(02-3400-0002). NO CHARGE FOR FACTORY INSTALLATION IF ORDERED WITH A NEW HOGEN • REQUEST PRODUCT DATA SHEET PD-0600-0015 | 1 | INCLUDED WITH UNIT | INCLUDED WITH UNIT |
| KT-1000-0012 | REMOTE ACCESS SOFTWARE <ul style="list-style-type: none"> • ALLOWS THE HYDROGEN GENERATOR TO CONNECT TO A LOCAL AREA NETWORK VIA ETHERNET FOR REMOTE MONITORING AND DIAGNOSTICS – SOFTWARE ONLY. • REQUEST PRODUCT DATA SHEET PD-0600-0026 | 1 | INCLUDED WITH UNIT | INCLUDED WITH UNIT |



10 Technology Drive, Wallingford, Connecticut 06492 USA

Tel: 203.678.2000 • Fax: 203.949.8016 • www.distributed-energy.com

QUOTATION NUMBER: PQL08085

| PART NO | PRODUCT DESCRIPTION | QTY | PRICE | TOTAL |
|--------------|--|-----|----------|-----------|
| | HOGEN® H SERIES – REQUIRED ANCILLARIES These accessories are required for a proper installation in the specific setting for this customer, or to satisfactorily meet the specific technical requirements of the application as outlined on the accompanying applications datasheet. | | | |
| TS-2000-0000 | ON LOCATION COMMISSIONING AND TRAINING <INTERNATIONAL ONLY> <ul style="list-style-type: none"> INCLUDES COMMISSIONING OF EQUIPMENT AND TRAINING SESSION ON OPERATION AND MAINTENANCE BY AUTHORIZED DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS PERSONNEL. PACKAGE INCLUDES INSTRUCTION TIME, TRAINING MATERIAL AND SET UP. PRICING INCLUDES ALL TRAVEL COST PRICING DOES NOT INCLUDE ANY INSTALLATION SITE WORK PLEASE NOTE: DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS RESERVES THE RIGHT TO NOT TRAVEL TO COUNTRIES THAT ARE LISTED ON THE US DEPT. OF STATE'S TRAVEL ADVISORY LIST. | 1 | \$12,800 | \$12,800 |
| KT-1000-0016 | US FILTER ELGA PRIMA DE-IONIZED WATER SUPPLY SYSTEM (MODIFIED BY DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS) – <ul style="list-style-type: none"> EXTERNALLY MOUNTED DI SUPPLY SYSTEM MAKES HIGH QUALITY DE-IONIZED WATER FOR THE HOGEN H SERIES OF HYDROGEN GENERATORS. USE OF HIGH QUALITY DE-IONIZED WATER WILL ENSURE THE LONGEST POSSIBLE ELECTROLYZER SYSTEM LIFE. THE US FILTER ELGA PRIMA DE-IONIZED WATER SUPPLY SYSTEM IS MODIFIED BY DISTRIBUTED ENERGY TO MEET THE DI WATER REQUIREMENTS OF THE HOGEN H SERIES OF HYDROGEN GENERATORS. MUST BE PURCHASED THROUGH DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS – NOT AVAILABLE DIRECT FROM MANUFACTURER. | 1 | \$5,565 | \$5,565 |
| KT-1000-0011 | BRASS PRESSURE REGULATOR KIT <ul style="list-style-type: none"> ALLOWS THE OUTLET PRESSURE OF THE HYDROGEN GENERATOR TO BE ADJUSTED BETWEEN 0-210PSIG. THIS OPTION MOUNTS TO THE EXTERIOR OF THE MECHANICAL INTERFACE PANEL AND INCLUDES ALL REQUIRED HARDWARE. NOTE: NOT NEEDED IF BACK UP MANIFOLD IS PURCHASED REQUEST PRODUCT DATA SHEET PD-0600-0023 | 1 | \$700 | \$700 |
| 02-2000-0002 | VENT LINE AUTOMATIC CONDENSATE DRAIN TRAP RECOMMENDED FOR ALL INSTALLATIONS TO PREVENT FLUID LOCK OF A VENT LINE. ¼" NTP PIPE FITTINGS | 1 | \$560 | \$560 |
| KT-1000-0017 | COOLANT WATER ISOLATION KIT-AUTOMATICALLY ISOLATES THE COOLANT FLOW TO THE HOGEN® HYDROGEN GENERATOR WHEN THE GENERATOR IS NOT IN OPERATION. INCLUDES: STRAINER, PRESSURE GAUGES, SOLENOID ISOLATION VALVE, AND CHECK VALVE | 1 | \$880 | \$880 |
| | | | | \$210,005 |
| PART NO | PRODUCT DESCRIPTION | QTY | PRICE | TOTAL |
| | HOGEN® H SERIES – RECOMMENDED EQUIPMENT The following accessories are not required for the specific application based on the information that Distributed Energy Systems has been provided, however they provide additional capabilities which may be desirable. | | | |
| 02-2504-0008 | VALVE, BALL, 3 WAY, ¼ CPI, SS FOR MANUAL BYPASS TO VENT-ALLOWS GAS PRODUCTION TO BE EASILY DIRECTED TO THE VENT LINE WHEN UNIT IS BEING SERVICED OR TESTED | 1 | \$280 | |



10 Technology Drive, Wallingford, Connecticut 06492 USA

Tel: 203.678.2000 • Fax: 203.949.8016 • www.distributed-energy.com

QUOTATION NUMBER: PQL08085

| PART NO | PRODUCT DESCRIPTION HOGEN® H SERIES - AVAILABLE EQUIPMENT The following accessories are not required for the specific application based on the information that Distributed Energy Systems has been provided, however they provide additional capabilities which may be desirable. | QTY | PRICE | TOTAL |
|----------------|--|-----|----------|-------|
| 04-0401-0006 | AUXILIARY CHILLER OPTION INDOOR 6 NM, 60 HZ (CLOSED LOOP COOLING WATER UNIT) <ul style="list-style-type: none"> REQUIRED IF COOLING WATER IS NOT AVAILABLE/INADEQUATE AT SITE. INDOOR UNIT ONLY. FOR USE WITH HOGEN 6M | 1 | \$14,980 | |
| 04-0401-0007 | AUXILIARY CHILLER OPTION OUTDOOR 6 NM, 60 HZ (CLOSED LOOP COOLING WATER UNIT) <ul style="list-style-type: none"> REQUIRED IF COOLING WATER IS NOT AVAILABLE/INADEQUATE AT SITE. OUTDOOR UNIT. FOR USE WITH HOGEN 6M | 1 | \$18,945 | |
| 02-3500-0000 | BRASS BACKUP MANIFOLD AUTO CROSSOVER KIT <ul style="list-style-type: none"> CROSSOVER IS DESIGNED SO THE GENERATOR SUPPLY WILL BE THE PRIMARY SOURCE AND WILL AUGMENT GENERATOR FLOW FROM A BACKUP SUPPLY DURING PEAK FLOW DEMANDS OR AUTOMATICALLY REPLACE THE FLOW FROM THE GENERATOR IF IT IS TAKEN OUT OF SERVICE. KIT INCLUDES WALL MOUNT PANEL, PRESSURE REGULATOR (BRASS BARSTOCK REGULATOR WITH STAINLESS STEEL DIAPHRAGMS), GENERATOR INLET WITH ISOLATION VALVE, FLEXIBLE CONNECTION FOR HIGH PRESSURE CYLINDER SUPPLY WITH ISOLATION VALVE. REQUEST PRODUCT DATA SHEET PD-0600-0017 | 1 | \$3,035 | |
| PART NO | PRODUCT DESCRIPTION HOGEN® H SERIES - AVAILABLE MAINTENANCE KITS The following maintenance supplies may not be required immediately, and users may buy them at the time of initial purchase, or afterward, depending on their normal maintenance supply procedures. | QTY | PRICE | TOTAL |
| KT-0100-0009 | KIT, 1 YEAR MAINTENANCE, H SERIES 2 - INCLUDES ONE EACH OF ALL RECOMMENDED PARTS NEEDED FOR THE FIRST YEAR OF MAINTENANCE SPARES <ul style="list-style-type: none"> AIR FILTER KIT, F122 / F133 DRYER DESSICANT KIT, REPL, H SERIES 2 ENCLOSURE DESSICANT BAG HUMIDITY DETECTOR / INDICATOR FILTER, F304 FILTER, F365 PUMP FILTER, F210 GB FILTER, F227 RESIN CARTRIDGE, GB208 POLYKLEAN AIR FILTER KIT, REPL, 12x12x1 AIR FILTER KIT, REPL, 148 5MM 8Q | 1 | \$1,980 | |
| KT-0100-0010-1 | ANNUAL MAINTENANCE KIT FOR YEAR TWO (6 Nm) - INCLUDES ONE EACH OF ALL RECOMMENDED PARTS NEEDED FOR THE SECOND YEAR OF MAINTENANCE SPARES <ul style="list-style-type: none"> 1 YEAR MAINTENANCE KIT ORIFICE, OR330-1 O-RING, FLANGE, 019, FKM DRYER CHECK VALVE KIT, H SERIES 2 CALIBRATION ORIFICE & FILTER KIT, REPL ORIFICE, OR325 ORIFICE, OR336 A300 CHECK VALVE KIT, REPL, SS, H SERIES 2 DI INLET ASSEMBLY, H SERIES | 1 | \$3,615 | |



10 Technology Drive, Wallingford, Connecticut 06492 USA

Tel: 203.678.2000 • Fax: 203.949.8016 • www.distributed-energy.com

QUOTATION NUMBER: PQL08085

LETTER OF CREDIT INSTRUCTIONS:

BANK: JPMORGAN
10420 HIGHLAND MANOR DRIVE
4TH FLOOR
TAMPA, FLORIDA 33610
UNITED STATES
PHONE: 813-432-5505

ACCOUNT: DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS

WIRE TRANSFER INSTRUCTIONS:

BANK: WEBSTER BANK
CONNECTICUT
UNITED STATES
ROUTING #: 211170101
ACCOUNT #: 10 0008852421

ACCOUNT: DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS

SPECIFICATIONS: SEE TECHNICAL DATA SHEET. SPECIFICATIONS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE.

PLEASE NOTE: THIS OFFER IS SUBJECT TO DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS STANDARD TERMS AND CONDITIONS. ORDER SUBJECT TO CREDIT APPROVAL, LICENSE AGREEMENT, AND EXPORT LICENSE APPROVAL.

ANY EXCEPTIONS TO THIS OFFER MUST BE SPECIFICALLY NOTED IN ANY RESULTING ORDER AND ACCEPTANCE ACKNOWLEDGED BY DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS.

FRANK J. SMARTZ
DIRECTOR, CUSTOMER SERVICE
DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS
TEL: 203-678-2321
FSMARTZ@DISTRIBUTED-ENERGY.COM



10 Technology Drive, Wallingford, Connecticut 06492 USA

Tel: 203.678.2000 • Fax: 203.949.8016 • www.distributed-energy.com

QUOTATION NUMBER: PQL08085

TERMS AND CONDITIONS OF SALE

DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS

1. **PRICES** – Prices are F.O.B. Distributed Energy Systems plant, Wallingford, Connecticut, USA, unless otherwise stated. Prices do not include any Municipal, State, or Federal, sales, excise, import, export duties or similar taxes. In addition to the prices specified, the amount of any present or future sales, use, excise, or other tax imposed shall be paid by the BUYER unless the BUYER provides DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS with a tax exemption certificate from the appropriate taxing authority. Where applicable, customs duties, consular fees and insurance charges shall be borne by BUYER. Until confirmed in writing or by acceptance of order or contract, all prices or leasing rates contained in quotations, catalogs, price lists and advertisements are subject to change without notice.
2. **TERMS OF PAYMENT** – An advance payment of 20% of total contract value is required at the time of order placement, unless otherwise agreed. Balance of payment is due before shipment.
3. **CANCELLATION AND RETURNS** - No goods may be returned for credit, repair, or replacement without prior DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS approval. In the event unauthorized return shipments are made to DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS, DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS reserves the right to refuse the shipment. It will be held as the BUYER's property without responsibility to DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS. All return shipments shall be at shipper's expense.
4. **SHIPMENTS AND DELIVERY** – Shipping dates are approximate and deliveries are subject to delays. DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS shall not be liable for any damage or penalty for delays or defaults in manufacture, delivery or shipment, or for failure to give notice of delay and such delay shall not constitute grounds for cancellation. Unless otherwise specified, products will be delivered FOB Wallingford, CT, USA, packaged and/ or boxed in accordance with DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS commercial practices for USA domestic delivery. When other delivery terms are agreed to, as applicable, DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS will pack and / or box in accordance with DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS commercial practices for shipment and select appropriate transportation, freight forwarding and insurance for the BUYER. Title to products shall pass to BUYER on acceptance. DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS products are packaged to protect against reasonable damage or deterioration; however, DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS will not be responsible for loss or damage in transit unless otherwise expressly agreed.
5. **PRODUCT CHANGES** – DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS reserves the right to: (a) make changes in design, specifications, processes of manufacture and construction of its products, without notice, provided such changes do not materially affect performance; and (b) effect changes described in (a) preceding, without incurring any obligation to make such changes to articles previously purchased.
6. **APPLICABLE LAW** –This Agreement, and all questions arising in connection herewith, shall be governed by and construed in accordance with the laws of the State of Connecticut and the United States of America.
7. **CELL STACK RESTRICTION** - The BUYER recognizes that the cell stack embodies confidential and proprietary information and trade secrets of DISTRIBUTED. The BUYER agrees not to disassemble or reverse engineer any cell stack, either supplied as part of a system or as a separate item. The BUYER hereby acknowledges that DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS remedy at law for breach of this restriction is inadequate, and that DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS shall have the right to injunctive relief in the event of any such breach in addition to any other remedy available to it. In addition, the BUYER hereby acknowledges that breach of this restriction immediately voids any cell stack warranty. BUYER hereby acknowledges that this restriction applies to any and all employees, agents, successors, or assigns and that the BUYER shall take all reasonable measures to ensure compliance with this restriction.
8. **LIABILITY** - DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS exclusive liability with respect to its products sold hereunder is set forth in its written WARRANTY accompanying these TERMS AND CONDITIONS. In no event shall DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS be liable for loss of profits or incidental, indirect, special, consequential or other similar damages arising out of any breach of this contract.
9. **RECYCLED CONTENT** – DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS reserves the right to utilize reclaimed, recycled, refurbished or other post-consumer materials in finished goods and packaging materials. Such materials are subject to the written WARRANTY, if any, accompanying these TERMS AND CONDITIONS.



10 Technology Drive, Wallingford, Connecticut 06492 USA

Tel: 203.678.2000 • Fax: 203.949.8016 • www.distributed-energy.com

QUOTATION NUMBER: PQL08081

LIMITED WARRANTY

HYDROGEN GAS GENERATOR SYSTEMS

LIMITED WARRANTY: DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS warrants that the ITEMS LISTED BELOW shall be free from defects in material and workmanship for the period of time stated below.

Hydrogen Gas Generator System: Twelve (12) months from shipment

Repair or replacement parts for Hydrogen Gas Generator System: Ninety (90) days from shipment

EXCLUDED FROM THIS LIMITED WARRANTY: The following shall be excluded from the Limited Warranty:

- Parts and items considered consumable in normal operations, including those parts and items supplied with the Hydrogen Gas Generator System ("System") for maintenance.
- Any Generator and its parts that are not installed, operated, and maintained in accordance with the unit's operation and maintenance manuals supplied with the System.
- Damages due to accident, abuse, acts of God, acts of terrorism, misuse or negligence, or which result, in whole or in part, from improper or unauthorized use or repair of the System, or use of the System in a manner for which it was not designed, or by causes external to the System such as, but not limited to, power or air conditioning failure or voltage irregularities.

REMEDY: BUYER'S sole and exclusive remedy in the event of defect, and the liability of DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS hereunder is limited to the adjustment, repair, or replacement of the defective item or part with a similar item or part free of defect.

Such adjustments, repairs, or replacements will be made at DISTRIBUTED ENERGY SYSTEMS, Wallingford, Connecticut, plant or, for Generators only, at the site of the Generator, if BUYER so elects. All costs for shipping equipment or parts shall be on the account of the BUYER whether to or from the point of manufacture. Labor costs associated with travel, expenses, and subsistence costs for field services shall be on the account of the BUYER.

VOIDING OF THE LIMITED WARRANTY: This Limited Warranty is immediately void upon:

- THE DISASSEMBLY OF THE ELECTROLYSIS CELL STACK, OR
- THE SALE, ASSIGNMENT OR ANY OTHER TRANSFER OF TITLE BY BUYER OF THE ITEMS OR PARTS OTHERWISE COVERED UNDER THIS LIMITED WARRANTY

WAIVER OF ALL OTHER WARRANTIES: THE LIMITED WARRANTY PROVIDED HEREUNDER AND THE RIGHTS AND REMEDIES OF THE BUYER HEREUNDER ARE IN LIEU OF, AND BUYER EXPRESSLY WAIVES, ALL OTHER WARRANTIES, GUARANTEES, OBLIGATIONS, LIABILITIES, OR REMEDIES, EXPRESSED OR IMPLIED, ARISING BY LAW OR OTHERWISE, INCLUDING WITHOUT LIMITATION implied warranties of merchantability AND NON-INFRINGEMENT, implied warranties arising from the course of dealing or usage of trade and implied warranties of suitability or fitness for a particular purpose.

LIMITATION OF LIABILITY: THE REMEDIES PROVIDED IN THIS LIMITED WARRANTY ARE EXCLUSIVE AND DISTRIBUTED SHALL IN NO WAY BE LIABLE FOR INCIDENTAL OR CONSEQUENTIAL DAMAGES OF ANY KIND WHATSOEVER INCLUDING WITHOUT LIMITATION LOSS OF USE, REVENUE OR PROFIT.