



**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
FUNDAÇÃO PARQUE TECNOLÓGICO ITAIPU**

**CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS
RENOVÁVEIS COM ÊNFASE EM BIOGÁS**

**ESTUDO DA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS PROVENIENTE DE
RESÍDUOS DA AGROINDÚSTRIA PARA PRODUÇÃO E
ARMAZENAMENTO DE HIDROGÊNIO EM HORÁRIO FORA DE
PONTA E RECONVERSÃO DO HIDROGÊNIO EM ENERGIA
ELÉTRICA NO HORÁRIO DE PONTA**

ANA CAROLINA SALA MORENO

Foz do Iguaçu, PR – Brasil
2013

533.73 Moreno, Ana Carolina Sala
M843e .

Estudo da utilização do biogás proveniente de resíduos da agroindústria para produção e armazenamento de hidrogênio em horário fora da ponta e reconversão do hidrogênio em energia elétrica no horário de ponta

. / Ana Carolina Sala Moreno. -- Foz do Iguaçu, 2013.
49 f.: il.

Monografia (Especialização em energias renováveis com ênfase em biogás) --Universidade Federal da Integração Latino Americana, Foz do Iguaçu, PR, 2013.

Bibliografia.

Orientador: Prof. Dr. Gilson Paulillo

1. Biogás. 2. Energias renováveis. 3. Hidrogênio I.
Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha família que me apoiou fortemente durante o curso todo com muita paciência, compreensão e amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado as condições para superar este desafio e aos professores do curso pelos conhecimentos relevantes.

RESUMO

O consumo de energia elétrica no horário de ponta sempre foi preocupação constante no segmento industrial, uma vez que neste horário a tarifa de energia é mais elevada. Na busca por soluções tecnológicas de redução de gastos com energia elétrica, as indústrias, nos horários de ponta buscam alternativas mais econômicas para suprir a energia necessária. Neste sentido, muitas indústrias, como as agroindústrias por exemplo, utilizam grupos geradores a diesel para suprir a demanda de energia no horário de pico. Porém, a utilização de combustíveis fósseis como o diesel são emissores dos gases de efeito estufa. Por esta razão, a busca por energias que liberem menores quantidades de gases nocivos à atmosfera têm sido cada vez mais consideradas nas discussões ambientais e energéticas do país. Este estudo se propôs a analisar por meio de levantamento bibliográfico, a utilização do biogás proveniente dos dejetos agroindustriais, sua transformação em hidrogênio e a conversão do hidrogênio em energia elétrica como uma alternativa para a geração de energia nos horários de ponta em agroindústrias. A conversão do biogás em hidrogênio se dá por meio de processos de reforma de hidrocarbonetos. A conversão do hidrogênio em energia elétrica é possível por meio de células a combustível. A utilização de células a combustível aliada aos processos de reforma do biogás mostra-se mais vantajosa do que a utilização de grupos geradores a diesel nos aspectos emissão de gás carbônico e eficiência, porém, ainda apresentam custos mais elevados tanto de implantação quanto de manutenção. Uma alternativa para a utilização do biogás para geração de energia elétrica que se mostra viável é a utilização de células a combustível a biogás para suprimento de energia elétrica na ponta em agroindústrias.

Palavras-chave: Biogás – Energias Renováveis – Hidrogênio

ABSTRACT

The electricity consumption during high-peak period has always been a constant concern in the industrial segment, since this period the energy tariff rate is higher. In the search for technological solutions to reduce energy costs, industries, at peak periods seek more economical alternatives to supply the necessary energy. Regarding this, many industries, such as agro-industries, use diesel generators to supply power demand at peak times. Nevertheless, the use of fossil fuels such as diesel increases the emission of greenhouse gases. For this reason, the search for energies that release smaller amounts of noxious gases in the atmosphere has been increasingly considered in environmental and energy discussions of the country. This study aimed to analyze through literature, the use of biogas from agro-industrial waste, its transformation into hydrogen and the conversion of hydrogen into electricity as an alternative for power generation at peak periods in agro-industries. The conversion of biogas into hydrogen occurs through reform processes of hydrocarbons. The conversion of hydrogen into electricity is possible by fuel cells. The use of fuel cells coupled with the reform processes of biogas proves to be more advantageous than the use of diesel generator sets in aspects like carbon emissions and efficiency, however, this use still has much higher costs of implementation and maintenance. A viable alternative for the use of biogas in electricity generation is the use of biogas fuel cells to supplement the electricity in agro-industries at peak periods.

Key-words: Biogas – Renewable Energy – Hydrogen

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | | |
|-------------------------------------|-------|--|
| ANEEL | ..... | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| CENPES | ..... | Centro de Pesquisas e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello |
| COMGAS | .... | Companhia de Gás de São Paulo |
| COPEL | ..... | Companhia Paranaense de Energia Elétrica |
| PETROBRAS | .... | Petróleo Brasileiro S/A |
| P&D | ..... | Pesquisa & Desenvolvimento |
| CaC | ..... | Célula a Combustível |
| CO | ..... | Monóxido de Carbono |
| CO ₂ | ..... | Dióxido de Carbono |
| H ₂ | ..... | Hidrogênio |
| CH ₄ | ..... | Metano |
| O ₂ | ..... | Oxigênio |
| OH ⁻ | | Hidroxila |
| e ⁻ | | Elétron |
| KOH | ..... | Hidróxido de Potássio |
| AFC | ..... | Alcaline Fuel Cell |
| PEMFC | ..... | Proton Exchange Fuel Cell |
| PAFC | ..... | Phosphoric Acid Fuel Cell |
| MCFC | ..... | Molten Carbonate Fuel Cell |
| SOFC | ..... | Solid Oxide Fuel Cell |
| H ₃ O ⁺ | | Hidrônio |
| H ₃ PO ₄ | ..... | Ácido Fosfórico |
| CO ₃ ²⁻ | | Carbonato |
| ZrO ₂ (O ²⁻) | | Dióxido de Zircônio |
| S | ..... | Enxofre |
| H ₂ S | ..... | Ácido Sulfídrico |
| COS | ..... | Sulfeto de Carbonila |
| kWh | ..... | Quilowatt-hora |
| kW | ..... | Quilowatt |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Processos de produção de hidrogênio..... | 17 |
| Figura 2: Representação das etapas de reforma a vapor e oxidação parcial | 18 |
| Figura 3: Conversão de energia química em energia elétrica..... | 21 |
| Figura 4: Diagrama esquemático dos sistemas de geração a diesel e reforma do biogás..... | 31 |
| Figura 5: Comparativo das emissões de CO ₂ em diversas tecnologias..... | 32 |
| Figura 6: Comparativo das eficiências de conversão de várias tecnologias..... | 33 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1: Principais tipos de células a combustível | 24 |
| Tabela 2: Influência dos gases no desempenho da célula a combustível..... | 25 |
| Tabela 3: Características de vários combustíveis derivados da biomassa para conversão e uso em células a combustível..... | 26 |
| Tabela 4: Vantagens e Desvantagens das Células a Combustível..... | 28 |
| Tabela 5: Metodologia do Projeto..... | 29 |
| Tabela 6: Comparativo entre cinco tipos de tecnologias de célula a combustível..... | 33 |
| Tabela 7: Características das tecnologias de células a combustível e de combustão interna..... | 34 |
| Tabela 8: Custos de equipamentos e manutenção das tecnologias..... | 35 |
| Tabela 9: Tarifa Horossazonal Verde..... | 36 |
| Tabela 10: Fluxo de caixa do sistema de geração de energia elétrica..... | 39 |
| Tabela 11: Cálculo do valor presente líquido..... | 40 |
| Tabela 12: Cálculo do payback simples..... | 41 |
| Tabela 13: Cálculo do payback descontado..... | 41 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO..... | 11 |
| 1.1 Tema e problema..... | 13 |
| 1.2 Objetivos da pesquisa..... | 13 |
| 1.3 Delimitação do estudo..... | 14 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 15 |
| 2.1 O contexto da geração distribuída e os horários de pico em indústrias..... | 15 |
| 2.2 A produção de biogás nas agroindústrias..... | 16 |
| 2.3 A produção de hidrogênio a partir do biogás | 17 |
| 2.4 O armazenamento do hidrogênio produzido..... | 20 |
| 2.5 A geração de energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado | 21 |
| 2.6 A utilização direta do biogás em células a combustível | 25 |
| 2.7 Biogás x hidrogênio: vantagens e desvantagens..... | 25 |
| 3 METODOLOGIA | 29 |
| 4 TRANSFORMAÇÃO DO BIOGÁS EM HIDROGÊNIO E USO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA..... | 30 |
| 5 GERAÇÃO DE ENERGIA VIA CÉLULA A COMBUSTÍVEL ALIMENTADA POR BIOGÁS | 31 |
| 6 ALTERNATIVA PARA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS VIA CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA SUPRIMENTO DE ENERGIA NA PONTA. . | 36 |
| 7 CONCLUSÕES..... | 42 |
| REFERÊNCIAS..... | 45 |

1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no horário de ponta sempre foi preocupação constante no segmento industrial, uma vez que neste horário a tarifa de energia é mais elevada. Na busca por soluções tecnológicas de redução de gastos com energia elétrica, as indústrias procuram deslocar suas cargas para horários fora de ponta. Ainda assim, nos horários de ponta buscam alternativas mais econômicas para cobrir a demanda energética necessária.

Neste sentido, muitas indústrias utilizam grupo geradores a diesel para suprir a demanda de energia no horário de pico, como as agroindústrias por exemplo. Porém, a utilização de combustíveis fósseis como o diesel são emissores dos gases de efeito estufa. Por esta razão, a busca por energias que liberem menos gases nocivos à atmosfera tem sido cada vez mais considerada nas discussões ambientais e energéticas do País.

Segundo a ANEEL (2012), o horário de ponta é o período definido pela concessionária e composto por três horas consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, "*Corpus Christi*", dia de finados e demais feriados definidos por lei federal, considerando as características de seu sistema elétrico. Ao contrário, o horário fora de ponta é o período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.

Segundo a COPEL (2012), o horário de ponta é compreendido entre as 18 e 21 horas fora do horário de verão e, das 19 às 22 horas durante o horário de verão. Este horário é também conhecido como "horário de pico" em que há um alto consumo de energia. Este alto consumo não chega normalmente a sobrecarregar o sistema de fornecimento, mas pode, em momentos extremos, causar problemas. Foi criado, então, um incentivo para que os consumidores industriais deslocassem sua carga para o horário fora de ponta. Para isso, a tarifa no horário de ponta sofreu um pequeno acréscimo e a tarifa no horário fora de ponta foi reduzida. Dessa forma são evitados altos investimentos que serviriam apenas para suprir a demanda do horário de ponta, e que não representariam uma melhoria real no sistema de abastecimento de energia elétrica.

Além do problema de gestão de energia no horário de pico, as agroindústrias geram muitos resíduos, os quais se não são devidamente tratados podem provocar danos ao meio ambiente. Neste sentido, a possibilidade de utilização dos resíduos da agroindústria para a produção de biogás pode colaborar com a minimização dos impactos ambientais.

Neste contexto, o aproveitamento do biogás gerado a partir de resíduos da agroindústria mostra-se uma alternativa energética muito atraente, pois permite diminuir significativamente os custos operacionais agroindustriais conforme Godoy Junior (2001).

A partir do biogás, estudar-se-á a sua transformação em hidrogênio em horários fora de ponta, considerando a possibilidade de armazenamento e sua posterior utilização para geração de energia elétrica em horário de ponta por meio de equipamentos denominados células a combustível.

Nesse mesmo contexto, Bley (2010) salienta que começam a surgir novas aplicações para o biogás, como a reforma do biogás para a obtenção de hidrogênio e uso deste para carregar células a combustível.

Desta forma, este estudo possibilita verificar como a utilização do biogás, oriundo de resíduos da agroindústria, pode ser utilizado para produção de hidrogênio e conseqüentemente a reconversão do hidrogênio em energia elétrica.

Observa-se que o estudo destes processos se torna relevante para o meio agroindustrial uma vez que são opções interessantes para a redução da emissão dos gases causadores do efeito estufa, além de possibilitar o uso do hidrogênio como vetor energético.

Neste sentido, Reis (2003) complementa da seguinte forma:

Questões relacionadas com a preservação do meio ambiente têm despertado crescente interesse pela utilização em larga escala do metanol e do hidrogênio obtidos a partir da biomassa como fonte de energia, pois sua exploração e utilização de forma renovável, não causarão nenhum impacto negativo ao meio ambiente.

O estudo visa identificar, entre outros, possíveis benefícios econômicos da geração de energia elétrica a partir do hidrogênio, o que, a princípio poderá ser armazenado para ser utilizado e transformado em energia elétrica em horário de ponta, onde o preço da energia é elevado.

Além disso, o estudo permitirá identificar outras alternativas de utilização do biogás para a geração de energia elétrica visando o suprimento de energia na ponta em agroindústrias.

1.1 Tema e problema

A necessidade cada vez mais crescente da redução de gases do efeito estufa, que, na maioria das vezes, são oriundos da queima de combustíveis fósseis e, a busca por fontes de energias limpas, são soluções para minimizar as questões ambientais e energéticas. Neste contexto, o estudo da produção de hidrogênio a partir da reforma do biogás

proveniente de resíduos da agroindústria pode ser uma opção interessante, pois ao mesmo tempo em que contribui para minimizar as questões ambientais de uma agroindústria, pode proporcionar uma melhor gestão da energia elétrica, armazenando-a nos horários fora de ponta através de um vetor energético como o hidrogênio, uma fonte alternativa de energia, e utilizando-a no horário de ponta.

Diante do exposto o problema a ser resolvido com a pesquisa é:

- Quais os aspectos envolvidos na utilização do biogás proveniente de resíduos da agroindústria para a produção e armazenamento de hidrogênio em horários fora de ponta e reconversão do hidrogênio em energia elétrica em horário de ponta?

Além disso, uma outra questão a ser estudada é:

- Existem alternativas para a utilização do biogás para geração de energia elétrica e suprimento de energia no horário de ponta?

1.2 Objetivos da pesquisa

O objetivo geral deste trabalho é pesquisar a utilização do biogás proveniente de resíduos da agroindústria para produção de hidrogênio em horários fora da ponta e o processo de reconversão do hidrogênio em energia elétrica em horário de ponta. Para isso, definiram-se os seguintes objetivos específicos:

- Identificar e descrever o processo de produção de hidrogênio a partir do biogás oriundo de resíduos de processos agroindustriais;
- Descrever o processo de geração de energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado;
- Identificar as vantagens e desvantagens da transformação do biogás em hidrogênio e o processo de geração de energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado;
- Estudar e analisar os aspectos relacionados à geração de hidrogênio a partir do biogás em horários fora de ponta e geração de energia elétrica a partir do hidrogênio em horários de ponta com aplicação voltada a unidades agroindustriais;
- Estudar os aspectos relacionados à utilização do biogás para geração de energia elétrica em detrimento aos grupos geradores diesel;

- Estudar alternativa para a utilização de biogás para geração de energia elétrica visando o suprimento de energia em horário de ponta em agroindústrias.

1.3 Delimitação do estudo

Não foi considerado neste estudo o detalhamento dos processos que envolvem a produção do biogás a partir de resíduos da agroindústria, apenas o combustível biogás como matéria-prima. Parte-se da premissa de que as agroindústrias já possuem previamente um sistema de produção de biogás já implantado.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 O contexto da geração distribuída e os horários de pico em indústrias

Segundo (Jannuzzi, 2000), a geração distribuída se refere às unidades de produção de eletricidade de tamanho reduzido localizadas ao longo do sistema de distribuição, que tem como objetivo atender demandas localizadas durante períodos de pico ou então postergando a necessidade de novas instalações ou expansão existentes.

Rifkin (2003) complementa que a geração distributiva refere-se geralmente a pequenas usinas de geração de eletricidade, localizadas próximas ou juntas ao usuário final, como no caso de fábricas, escritórios comerciais, repartições públicas, bairros, domicílios privados.

Segundo Serra (2005), dentro deste contexto, a geração distribuída possui diversas aplicações: reserva de potência, co-geração de eletricidade e calor, geração de ponta, reforço de carga e geração isolada.

Neste sentido, a geração distribuída tem contribuído para que as indústrias adotem alternativas de produção de energia elétrica para suprimento de sua demanda no horário de ponta, evitando altos gastos com energia elétrica.

Nesta abordagem, Rifkin (2003) informa que um número cada vez maior de consumidores vem usando a geração distributiva para participar do que a indústria chama de "corte dos picos". Nos períodos de pico, quando a demanda é alta, as concessionárias de energia têm que acionar suas usinas menos eficientes e este custo adicional é repassado aos consumidores na forma de picos nos preços da eletricidade. Nos períodos de pico, os proprietários das usinas de geração distribuída podem optar por se desconectar da rede principal e conectar-se a sua própria provisão de energia para poupar dinheiro. Desta maneira, esta forma de geração de energia é um modo menos dispendioso e eficiente de proporcionar energia adicional do que a dependência da indústria numa fonte de energia centralizada.

Afirma Bley Junior et al (2009) que a produção de energia elétrica sob a forma de geração distribuída pode ser usada para autoabastecimento e também acumulada sob a forma de biogás para ser usada principalmente nos horários de ponta quando a energia comprada tem preços muito acima da tarifa em horários normais.

Muitas indústrias utilizam grupos geradores movidos a diesel para o suprimento da energia durante o horário de ponta. Sabe-se que os grupos geradores a diesel emitem gás carbônico, sendo, portanto nocivos ao meio ambiente.

Segundo Rifkin (2003), a mais popular das microtecnologias energéticas são os motores que funcionam a óleo diesel. Segundo ele, há um consenso progressivo entre especialistas da área de que as células a combustíveis alimentadas por hidrogênio, a longo prazo, acabarão assumindo a frente e se tornando líderes no mercado da geração distribuída.

Além disso, a geração distribuída também vem ganhando apoio devido à preocupação crescente com o aquecimento global e ao desejo de usar a energia com mais eficiência, reduzindo as emissões de gás carbônico.

2.2 A produção de biogás nas agroindústrias

Tomalsquim (2003) afirma que o uso da biomassa para fins energéticos tem se expandido com o aproveitamento dos resíduos de processos agrícolas e industriais de forma a gerar excedentes e mitigar custos ambientais.

No caso das agroindústrias, a questão ambiental é muito relevante, uma vez que geram muitos resíduos, que, uma vez não tratados, geram passivos ambientais. Em busca de soluções ambientalmente corretas e energeticamente sustentáveis, as agroindústrias têm adotado outras soluções, como é o caso da produção de biogás a partir destes dejetos industriais.

O biogás é definido por Neto (2012, p.89.) como:

Um produto resultante da fermentação, na ausência do ar, de dejetos animais, resíduos vegetais e orgânicos de origem industrial ou residencial, em condições adequadas de umidade. A reação é denominada digestão anaeróbica e o biogás é composto basicamente de 55-65% de metano; 35-45% de gás carbônico; 0-1% de nitrogênio; 0-1% de oxigênio; 0-1% de ácido sulfídrico.

A produção do biogás pode ser realizada mediante a utilização de biodigestores num processo de digestão anaeróbica da biomassa residual.

O Cenbio (2001) defende que o uso do biogás promove a descentralização da geração já que todo o adensamento populacional poderá funcionar como produtor de energia. Tanto nas residências e indústrias quanto nas propriedades rurais existe a produção de resíduos que se tratados pela via anaeróbica podem ser convertidos em biogás.

Segundo O'Hayre (2009), o processo de digestão anaeróbica consiste em uma série de reações químicas. Primeiramente, através de um processo denominado hidrólise,

carboidratos, gorduras e proteínas reagem quimicamente com a água e se decompõem em pequenas moléculas como açúcares, ácidos graxos e aminoácidos. Então, diferentes tipos de bactérias progressivamente decompõem estas moléculas em ácidos de cadeia curta, alcoóis e gases. Estas reações podem ser representadas pela reação global da quebra da glicose em gás carbônico e metano, conforme indicada a seguir.



O gás resultante não contém somente metano, mas também nitrogênio, ácido sulfídrico e oxigênio.

2.3 A produção de hidrogênio a partir do biogás

Segundo Capaz (2012), existem vários processos de produção do hidrogênio, conforme apresentado na figura 1.

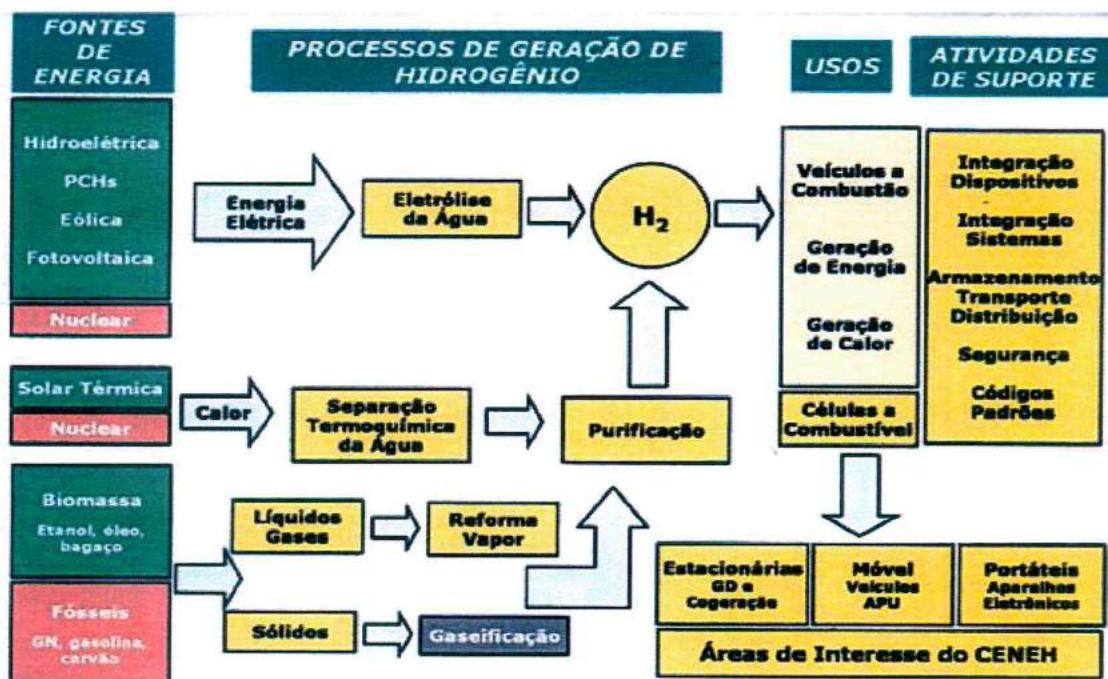


Figura 1: Processos de produção de hidrogênio (CAPAZ, 2012)

Segundo Serra (2005) o gás natural é o combustível mais utilizado para produção de hidrogênio, devido à disponibilidade, custo e pela experiência já adquirida no setor de petróleo. Qualquer outro combustível pode ser reformado para produção de um gás rico em hidrogênio, sendo um candidato potencial para emprego em células a combustível.

Diante disto, um cenário promissor se abre para os gases resultantes da digestão de rejeitos agrícolas, como é o caso da utilização do biogás.

Conforme já apresentado, o biogás é composto em sua maioria pelo gás metano, um hidrocarboneto. Um hidrocarboneto pode ser convertido em hidrogênio através de processos específicos ao invés de ser utilizado como combustível para motores a combustão.

Especificamente para o gás natural, que também é um gás composto em sua maioria por metano, segundo Serra (2005), existem três principais processos de conversão do gás natural em hidrogênio, processos estes denominados reforma a vapor, reforma por oxidação parcial e reforma autotérmica.

A figura 2 representa esquematicamente as etapas da reforma a vapor ou da reforma por oxidação parcial.

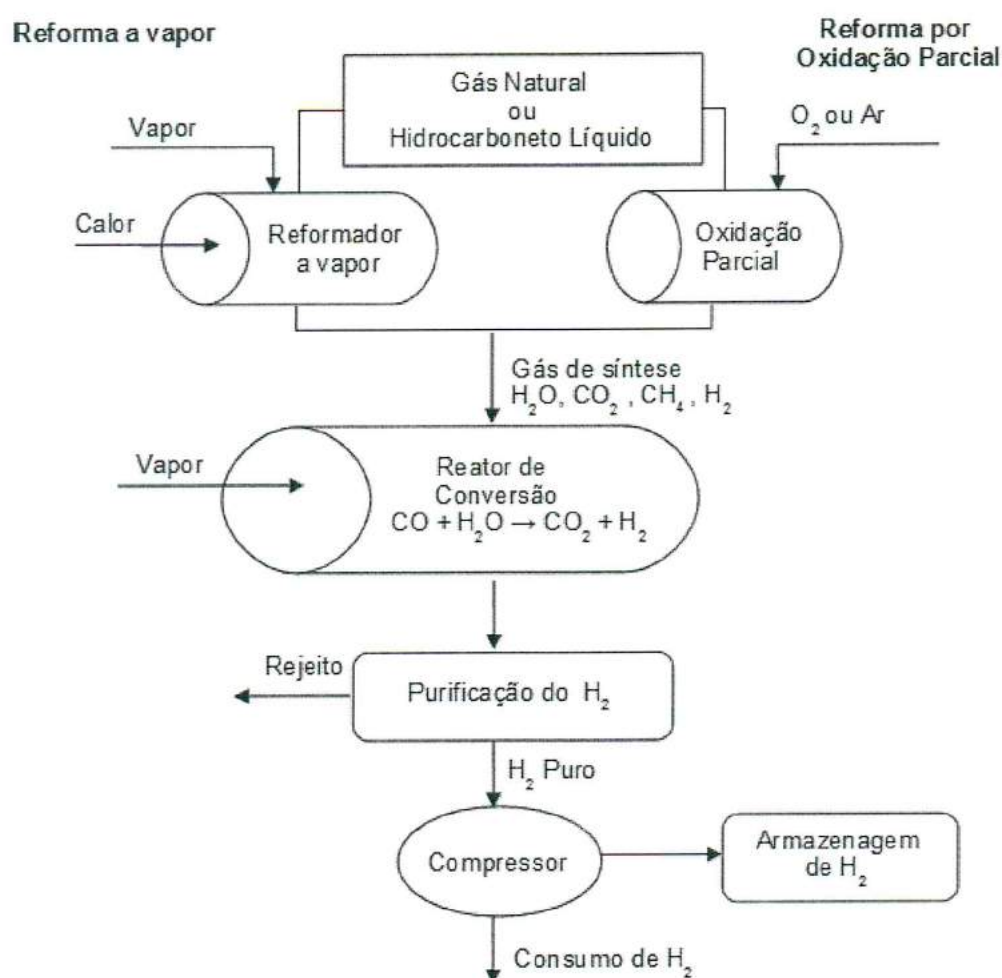


Figura 2: Representação das etapas de reforma a vapor e oxidação parcial (SERRA, 2005).

Serra (2005) ainda complementa que a reforma catalítica do metano é um processo bem conhecido e disponível comercialmente para produção de hidrogênio em larga

escala. A reforma catalítica compreende a reforma a vapor, o enriquecimento do gás de síntese pela reação com a água em outro reator e a purificação do hidrogênio.

A reação de reforma a vapor encontra-se simplificada a seguir (2). Trata-se de uma reação endotérmica a qual requer uma fonte externa de calor.



Após a reforma, o gás de síntese resultante é direcionado para reatores de conversão onde o teor de hidrogênio é aumentado pela reação exotérmica com a água.



Esta reação ocorre preferencialmente abaixo de 600°C, a qual, na presença de catalisadores ativos pode ser conduzida até a 200°C.

Na reforma por oxidação parcial, o gás metano é parcialmente oxidado através de uma reação exotérmica, a qual devido a alta temperatura não depende de catalisadores. Da mesma forma que a reforma a vapor, o gás de síntese resultante passa por reatores de conversão e posteriormente por um processo de purificação do hidrogênio.

A reação simplificada para a reforma por oxidação parcial encontra-se a seguir.



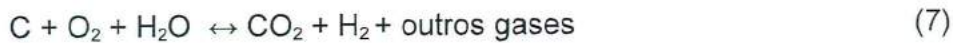
A reforma autotérmica combina as vantagens da reforma a vapor e da reforma por oxidação parcial. O gás metano reage tanto com o vapor quanto com o oxigênio. A reação de oxidação parcial fornece o calor necessário para a reação de reforma a vapor se utilizadas proporções adequadas de metano, vapor e oxigênio.

As reações da reforma autotérmica estão representadas da seguinte forma:



Além dos três processos de reforma descritos, O'Hayre (2009) indica a existência de outros dois processos de reforma de um hidrocarboneto em hidrogênio, sendo eles a gaseificação e a reforma do gás proveniente da digestão anaeróbica.

O processo de gaseificação envolve a reação de um combustível sólido contendo carbono em alta temperatura sob pressão com oxigênio e água para produzir hidrogênio, gás carbônico, monóxido de carbono e outros gases. A reação simplificada deste processo está descrita na equação (7):



.O processo de reforma do gás proveniente de digestão anaeróbica, como é o caso do biogás, pode seguir os processos de reforma a vapor, reforma por oxidação parcial ou reforma autotérmica conforme descritos anteriormente.

Por fim, Tomalsquim (2003) informa que no que diz respeito às dificuldades tecnológicas, os processos de geração estacionária de hidrogênio baseados na reforma de hidrocarbonetos pode ser considerada dominada devido às experiências acumuladas por empresas, centros de pesquisas e universidades do país, podendo-se destacar o CENPES, COMGAS e a PETROBRAS.

2.4 O armazenamento do hidrogênio produzido

Após a sua produção, o hidrogênio produzido a partir do biogás pode ser armazenado localmente para sua posterior utilização quando da necessidade de conversão em energia elétrica.

Segundo Gambetta (2012) existem diversas tecnologias possíveis de armazenamento do hidrogênio as quais se diferem pelo tipo de aplicação.

Em linhas gerais, é possível o armazenamento subterrâneo como hidrogênio gasoso, o armazenamento do hidrogênio sob a forma líquida, o armazenamento como do hidrogênio como gás comprimido e o armazenamento na forma de hidretos metálicos.

Segundo Santos (2013), as principais vantagens do armazenamento do hidrogênio como gás comprimido são a simplicidade e a inexistência de perdas energéticas com o passar do tempo, mesmo após a compressão do H_2 .

Complementa ainda Santos (2013), que o método de armazenamento do hidrogênio em cilindros é amplamente usado em aplicações onde a solicitação de hidrogênio é variável e não é muito alta, nomeadamente em unidades de células a combustível, nos autocarros, automóveis, em habitações, em estabelecimentos comerciais e industriais.

2.5 A geração de energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado

Reis (2003) define que as células a combustível são dispositivos que convertem energia química do combustível diretamente em energia elétrica, sem que se processe a combustão, diferentemente do processo convencional de conversão.

A figura 3 mostra esquematicamente a diferença entre o processo convencional de conversão de energia química em energia elétrica e o processo de conversão utilizando células a combustível.

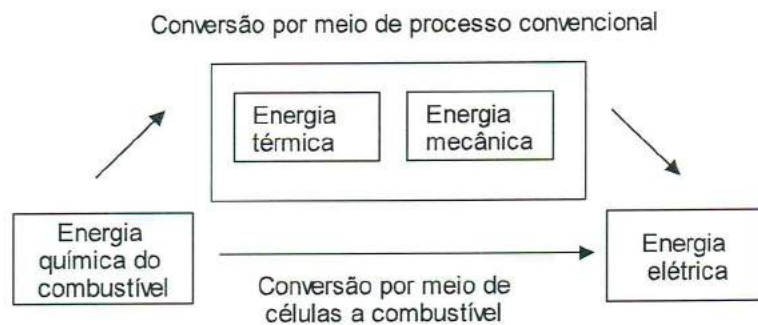


Figura 3: Conversão de energia química em energia elétrica (REIS, 2003).

Segundo Vilullas (2001), as células a combustível são aptas para aplicações estacionárias devido à elevada eficiência e à possibilidade de geração de energia em locais remotos, onde podem ser utilizados combustíveis renováveis gerados localmente.

Segundo Rifkin (2003), uma célula a combustível é composta de um ânodo carregado negativamente em um lado, um cátodo carregado positivamente em outro e um eletrodo no meio, sendo este último composto de uma solução alcalina ou de ácido líquido, ou ainda de membrana plástica, permitindo que os íons de hidrogênio carregados positivamente viajem do ânodo para o cátodo.

O hidrogênio é inserido no lado do ânodo, onde uma reação química oxida a molécula de hidrogênio produzindo um próton e um elétron. Os elétrons livres escapam pelo circuito elétrico externo na forma de eletricidade em corrente contínua. Os prótons viajam pela camada eletrolítica para o cátodo carregado positivamente. O fluxo de elétrons retorna para o cátodo, onde reage com íons de hidrogênio e com o oxigênio do ar para formar água.

Segundo Reis (2003), numa célula a combustível, a reação global é considerada como o resultado de duas semi-reações, sendo uma de oxidação em que há perda de elétrons e outra de redução em que há ganho de elétrons.

Assim, por exemplo, a reação global que descreve uma célula a combustível do tipo alcalina é:



A reação acima é o resultado da combinação da meia-reação de oxidação que ocorre no ânodo com a meia-reação de redução que ocorre no catodo descritas a seguir.



Segundo Reis (2003), as tecnologias de células a combustível em desenvolvimento nas últimas décadas são identificadas a partir do tipo de eletrólito utilizado e se diferem pelas reações químicas envolvidas e pelas temperaturas de operação. As cinco principais tecnologias de célula a combustível em desenvolvimento são:

- Células alcalinas (AFC, de *Alkaline Fuel Cell*);
- Células a ácido fosfórico (PAFC, de *Phosphoric Acid Fuel Cell*);
- Células a polímero sólido (PEMFC, de *Proton Exchange Membran Fuel Cell*);
- Células a carbonato fundido (MCFC, de *Molten Carbonate Fuel Cell*);
- Células a óxido sólido (SOFC, de *Solid Oxide Fuel Cell*).

A maior desvantagem das células alcalinas se deve ao fato dos eletrólitos alcalinos reagirem com o dióxido de carbono, ocorrendo carbonatação, restringindo seu uso em aplicações em que o oxigênio e o hidrogênio puros são utilizados como reagentes.

As células alcalinas, mesmo diante de seu alto custo, têm se mostrado viáveis para aplicações como missões espaciais, submarinas e militares.

Devido à sua compatibilidade com muitos materiais, este tipo de célula tem vida longa, chegando a atingir 15.000 horas de operação.

Com relação às células de ácido fosfórico, segundo Reis (2003), utilizam ácido fosfórico como eletrólito. Elas podem ser abastecidas com combustíveis derivados do processo de reforma como o gás natural, gás liquefeito de petróleo e outros destilados leves, ou ainda do processo de limpeza do gás de carvão produzido por um gaseificador.

O ácido fosfórico oferece algumas vantagens como a estabilidade térmica, química e eletroquímica e a baixa volatilidade para temperaturas superiores a 150°C.

Para proporcionar maior atividade nas reações eletroquímicas, este tipo de célula requer o emprego de catalisadores à base de metais nobres como a platina, o que pode ser considerado como uma desvantagem devido ao seu alto custo.

As células a ácido fosfórico são utilizadas principalmente nas centrais de cogeração de estabelecimentos comerciais, conjuntos residenciais e pequenas indústrias. Normalmente, neste tipo de aplicação, o mais comum é utilizar o gás natural reformado, embora existam também aplicações com nafta e metanol.

Reis (2003) indica que as células a polímero sólido utilizam como eletrólito uma membrana de polímero sólido com cerca de 100 micro de espessura, a qual atua como excelente condutora de íons de hidrogênio. Da mesma forma que nas células a ácido fosfórico e alcalinas requerem a utilização de um agente catalisador das reações eletroquímicas, a platina. Este tipo de célula é aplicada na indústria automotiva e em estações estacionárias.

Um outro tipo de célula a combustível existente é a célula a carbonato fundido, a qual se diferencia das demais pelo envolvimento do dióxido de carbono nas reações eletroquímicas. Outra particularidade se dá com o monóxido de carbono, normalmente existente no gás de entrada do anodo, funcionar como um gás combustível da mesma maneira que o hidrogênio.

Este tipo de célula é aplicada em centrais de cogeração de médio e grande porte devido à sua eficiência que pode atingir 55%. Além disso, devido à sua operação em altas temperaturas (entre 600°C a 650°C) é atrativa para sistemas de cogeração que operam em ciclo combinado.

Por último, as células a óxido sólido são dotadas de eletrólito à base de uma mistura de óxido de zircônio e yttria, ânodo composto de níquel-óxido de zircônio e catodo à base de estrôncio. Também operam em altas temperaturas, assim como as células de carbonato fundido. Dispensam o uso de catalisadores à base de materiais nobres e de alto custo, permitem o processamento direto do combustível no próprio interior da célula e são adequadas para uso em sistemas de cogeração com ciclo combinado devido a possibilidade de produção de calor residual.

A tabela 1 apresenta um resumo das características dos principais tipos de células a combustível descritas anteriormente.

Tabela 1 – Principais tipos de células a combustível

| Tipo | Eletrólito (espécie transportadora) | Faixa de temperatura (°C) | Vantagens | Desvantagens | Aplicações |
|-------|---|---------------------------|---|---|---|
| AFC | KOH (OH ⁻) | 60-90 | Alta eficiência | Sensível a CO ₂ Gases ultra puros, sem reforma do combustível | Espaçonaves Aplicações militares |
| PEMFC | Polímero (H ₃ O ⁺) | 80-90 | Altas densidade de potência e eficiências Operação flexível | Custo da membrana e catalisador Contaminação do catalisador com CO | Veículos automotores Espaçonaves Unidades estacionárias |
| PAFC | H ₃ PO ₄ (H ₃ O ⁺) | 160-200 | Maior desenvolvimento tecnológico | Controle da porosidade do eletrodo Sensibilidade a CO Eficiência limitada pela corrosão | Unidades estacionárias (100kW a alguns MW) Cogeração eletricidade/calor |
| MCFC | Carbonatos fundidos (CO ₃ ²⁻) | 650-700 | Tolerância ao CO/CO ₂ Eletrodos a base de Ni | Problemas de materiais Necessidade de reciclagem de CO ₂ Interface trifásica de difícil controle | Unidades estacionárias de algumas centenas de kW Cogeração eletricidade/calor |
| SOFC | ZrO ₂ (O ²⁻) | 800-1000 | Alta eficiência (cinética favorável) A reforma do combustível pode ser feita na célula | Problemas de materiais Expansão térmica Necessidade de pré-reforma | Unidades estacionárias de 10 a algumas centenas de kW Cogeração eletricidade/calor |

Fonte: WENDT et al. apud PARIS, 2007.

Segundo Tomalsquim (2003), é possível que o hidrogênio produzido por reforma de hidrocarbonetos possa ser utilizado para alimentar células a combustível. No entanto, é necessário proceder a limpeza e remoção de alguns componentes gasosos, de acordo com a especificação de cada célula a combustível.

Este autor apresenta três etapas que normalmente ocorrem nos processos de reforma sendo elas: a limpeza do combustível primário onde há a remoção de enxofre, haletos e amônia para prevenir o envenenamento dos catalisadores do reformador; a conversão do combustível primário onde ocorre a conversão de um hidrocarboneto

combustível para um gás reformado rico em hidrogênio; e alteração do gás reformado, processo o qual ocorre a conversão do monóxido de carbono e água no gás reformado para hidrogênio e dióxido de carbono, oxidação seletiva para reduzir o monóxido de carbono para uns poucos ppm ou remoção da água por condensação para aumentar a concentração de hidrogênio.

A tabela 2 apresenta a influência dos gases oriundos do processo de reforma no desempenho das células a combustível.

Tabela 2 - Influência dos gases no desempenho da célula a combustível

| Tipo de gás | Tipo de Célula a Combustível | | | | |
|------------------------------------|------------------------------|-------------|-------------------|--------------------|--------------|
| | Eletrólito polimérico | Alcalina | Ácido fosfórico | Carbonato fundido | Óxido Sólido |
| H ₂ | Combustível | Combustível | Combustível | Combustível | Combustível |
| CO | Veneno (50 ppm por pilha) | Veneno | Veneno (< 0,5%) | Combustível | Combustível |
| CH ₄ | Diluyente | Veneno | Diluyente | Diluyente | Combustível |
| CO ₂ e H ₂ O | Diluyente | Veneno | Diluyente | Diluyente | Diluyente |
| S como H ₂ S e COS | Nenhum estudo relatado | Veneno | Veneno (< 50 ppm) | Veneno (< 0,5 ppm) | Veneno |

Fonte: TOMALSQUIM, 2003.

2.6 A utilização direta do biogás em células a combustível

Assim como o hidrogênio precisa ser purificado para ser utilizado diretamente numa célula a combustível, o biogás, se utilizado diretamente em uma célula a combustível também requer uma limpeza.

Segundo Sprenger (2009), mesmo diante da necessidade de limpeza do biogás, a conversão do mesmo por meio de células a combustível oferece diversas vantagens: emite reduzida quantidade de poluentes se comparado a outros equipamentos e produz eletricidade com eficiência de até 40% e, com recuperação do calor, pode atingir eficiências acima de 85%.

2.7 Biogás x hidrogênio: vantagens e desvantagens

2.7.1 Vantagens e desvantagens da transformação do biogás em hidrogênio

Em se tratando de biogás proveniente da biodigestão de dejetos da agroindústria, é possível observar na tabela 3 que o gás de digestor se apresenta vantajoso para

conversão e uso em células a combustível em relação a outros combustíveis derivados da biomassa.

Tabela 3 – Características de vários combustíveis derivados da biomassa para conversão e uso em células a combustível

| Fonte energética | Condição | Observações | Infraestrutura | Custo (US\$/MMBtu) |
|------------------|---|--|---|---------------------------------------|
| Gás de síntese | P&D ainda sem demonstração em CaC | Difícil remoção de contaminantes | Necessita de infraestrutura para coleta de biomassa | 9 a 50 |
| Gás de aterro | Demonstrações bem estabelecidas com CaC | Conteúdo energético decresce com o tempo | CaC deve ser implantada no local de produção do gás | 2 a 3 |
| Gás de digestor | Demonstrações bem estabelecidas com CaC | Grande variação na composição do gás | CaC deve ser implantada no local de produção do gás | 1,5 |
| Etanol | Demonstrações iniciais com CaC | Demonstrações insuficientes | Só em regiões específicas (observação válida para os EUA) | 12,50 (milho); 15 a 19 (celulósio) |
| Óleo de pirólise | Pesquisas iniciais, sem demonstração em CaC | Requer alta temperatura de reforma | Não há | 2 a 6 |
| Biodiesel | Pouca ou nenhuma pesquisa com CaC | Desconhecidos | Utiliza a infraestrutura do diesel | 15 a 25 |
| Ácido levulínico | Pouca ou nenhuma pesquisa com CaC | Desconhecidos | Não há | 9 a 51 |
| Gás natural | Alguns projetos comerciais | Requer mínimo pré-tratamento | Gasodutos | 3 a 4 |

Fonte: SERRA, 2005.

Sendo:

1- Gás de síntese: neste caso, obtido de gaseificação de resíduos de madeira e resíduos agrícolas. Composição ilustrativa: 30-40% H_2 ; 20-30% CO ; 10-15% CH_4 ; 6% H_2O ;

2- Gás de aterro: 57% CH_4 ; 42% CO_2 ;

3- Gás de digestor: 57-66% CH_4 ; 33-39% CO_2 ; 1-10% N_2 ;

4- Gás natural (para comparação): 80-90% CH_4 ; o restante é basicamente constituído de etano, propano e butano;

5- Óleo de pirólise: obtido por rápido aquecimento, vaporização e condensação de resíduos de madeira e resíduos agrícolas;

6- Biodiesel: éster líquido obtido de óleos vegetais e gordura animal;

7- Ácido levulínico: obtido por hidrólise de biomassa celulósica, incluindo lixo sólido, resíduos de fabricação de papel, resíduos de madeira e resíduos agrícolas.

Nesta mesma abordagem, o Cenbio (2001) considera o biogás como uma fonte de energia renovável e, portanto, sua recuperação e seu uso energético apresentam vantagens ambientais, sociais, estratégicas e tecnológicas significativas.

O Cenbio (2001) complementa que a conversão energética do biogás pode ser apresentada como uma solução para o volume de resíduos produzidos nas agroindústrias, visto que reduz o potencial tóxico das emissões de metano, ao mesmo tempo em que produz energia elétrica agregando, desta forma, ganho ambiental e redução de custos, devido à diminuição de compra da energia consumida da concessionária local.

Além disso, deve ser considerado o fato do biogás apresentar baixo custo, uma vez que é um subproduto da digestão anaeróbica que normalmente é desprezado nas agroindústrias.

O aproveitamento energético do biogás, além de contribuir para a preservação do meio ambiente, também traz benefícios para a sociedade, pois promove a utilização ou reaproveitamento de recursos de baixo custo; colabora com a não dependência da fonte de energia fóssil, oferecendo maior variedade de combustíveis; possibilita a geração descentralizada de energia; aumenta a oferta de energia; reduz os odores e as toxinas do ar, diminui a emissão de poluentes pela substituição de combustíveis fósseis (CENBIO, 2008).

Por outro lado, uma desvantagem do processo de conversão do biogás em hidrogênio está no fato da necessidade de armazenamento do hidrogênio, o que requer cuidados de segurança e gastos do sistema de armazenamento. Conforme já exposto, existem células a combustível que permitem a conversão direta do biogás em energia elétrica.

2.7.2 Vantagens e desvantagens da geração de energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado

Conforme já apresentado neste capítulo, a utilização do hidrogênio para a geração de energia elétrica está diretamente relacionada à utilização das tecnologias de células a combustível.

Desta forma, as vantagens e desvantagens da geração de energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado estão intimamente relacionadas com as vantagens e desvantagens das células a combustível.

Em se tratando de células a combustível, na tabela 4 são apresentadas as principais vantagens e desvantagens das células a combustível apontadas por Serra (2005).

Tabela 4 – Vantagens e Desvantagens das Células a Combustível

| Vantagens | Desvantagens |
|--|---|
| Perspectiva de alta eficiência e confiabilidade | Vida útil limitada (ainda se desconhece a vida útil real) |
| Excelente desempenho em cargas parciais | Eficiência elétrica decrescente ao longo da vida útil |
| Ausência ou baixas emissões de poluentes | Investimento inicial ainda muito elevado |
| Expectativa de intervalos elevados entre falhas | Baixa disponibilidade de unidades de demonstração |
| Ausência de partes móveis e, conseqüentemente, silenciosas | Poucos provedores da tecnologia |
| Modularidade e possibilidade de operação remota | Tecnologia ainda pouco divulgada no setor elétrico para geração estacionária |
| Flexibilidade de utilização de combustível (com emprego de reformadores) | Necessidade de investimentos de vulto em infraestrutura de suprimento de combustíveis |

Fonte: SERRA, 2005.

Nota-se que as células a combustível apresentam diversas vantagens e que é uma tecnologia de alta eficiência e ecologicamente atrativa. Porém, existem alguns pontos que precisam ser trabalhados para torná-la competitiva com outras tecnologias já estabelecidas.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho tem como tipologia a pesquisa bibliográfica e a técnica de análise de dados será a análise de conteúdo.

A tabela 5 demonstra a metodologia do projeto, descrevendo as técnicas de coleta e análise de dados que serão utilizadas por objetivo específico.

Tabela 5 – Metodologia do Projeto

| Objetivo Específico | Técnica de Coleta de Dados | Técnica de Análise de Dados |
|--|---|------------------------------------|
| Identificar e descrever o processo de produção de hidrogênio a partir do biogás oriundo de resíduos de processos agroindustriais. | Pesquisa Documental Pesquisa Bibliográfica | Análise de Conteúdo |
| Descrever o processo de geração de energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado. | Pesquisa Documental Pesquisa Bibliográfica | Análise de Conteúdo |
| Identificar as vantagens e desvantagens da transformação do biogás em hidrogênio e o processo de geração de energia elétrica a partir do hidrogênio armazenado. | Pesquisa Documental Pesquisa Bibliográfica | Análise de Conteúdo |
| Estudar e analisar os aspectos relacionados à geração de hidrogênio a partir do biogás em horários fora de ponta e geração de energia elétrica a partir do hidrogênio em horários de ponta com aplicação voltada a unidades agroindustriais. | Pesquisa Documental Pesquisa Bibliográfica | Análise de Conteúdo |
| Estudar os aspectos relacionados à utilização do biogás para geração de energia elétrica em detrimento aos grupos geradores diesel. | Pesquisa Documental Pesquisa Bibliográfica | Análise de Conteúdo |
| Estudar alternativa para a utilização de biogás para geração de energia elétrica visando o suprimento de energia em horário de ponta em agroindústrias. | Pesquisa Documental Pesquisa Bibliográfica | Análise de Conteúdo |

Fonte: elaboração do próprio autor

4 TRANSFORMAÇÃO DO BIOGÁS EM HIDROGÊNIO E USO NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Um dos aspectos importantes para a geração de energia elétrica para o suprimento de energia no horário de ponta é a possibilidade de armazenamento do hidrogênio produzido a partir do biogás.

Conforme visto, o hidrogênio, na forma de gás, pode ser armazenado em cilindros de alta pressão durante o período fora de ponta, para ser utilizado como vetor energético no período de ponta, período do dia o qual as agroindústrias pagam preços muito elevados de tarifa de energia elétrica.

Neste sentido, a produção e o armazenamento do hidrogênio no próprio local de consumo pode ser considerado um outro aspecto relevante, uma vez que se evita a necessidade de distribuição e transporte deste hidrogênio.

Além disso, Gambetta (2012) indica que a produção de hidrogênio nos horários fora de ponta e sua reconversão em eletricidade nos horários de alta demanda, fazendo uso de células a combustível, deve ser feita de forma descentralizada, de forma a contornar o problema de armazenamento de grandes quantidades de hidrogênio, o que exigiriam um sistema complexo de armazenamento.

Por outro lado, segundo Alessandro (2011), o armazenamento do hidrogênio deve ser realizado de maneira cuidadosa devido à sua alta inflamabilidade e explosividade. Sendo quatorze vezes mais leve que o ar, necessita de armazenamento pressurizado para evitar que o gás escape e se disperse na atmosfera.

Um outro aspecto que deve ser considerado para a geração de energia elétrica na ponta é se a agroindústria possui quantidade suficiente de biogás para ser convertido em hidrogênio e se o hidrogênio armazenado possui quantidade suficiente para ser convertido em energia elétrica para atendimento do horário de ponta.

Neste sentido, para que uma agroindústria utilize este tipo de sistema como alternativa para geração de energia elétrica nos períodos de ponta, torna-se necessária uma análise criteriosa baseada na quantidade de matéria-prima (biogás) disponível, quantidade de hidrogênio gerado por um reformador, além de outras variáveis como as eficiências e rendimentos envolvidos nos processos, os custos de purificação e armazenamento do hidrogênio, os custos de investimentos de infraestrutura necessária, os custos de operação e manutenção do sistema, por exemplo.

Além disso, devem ser considerados os aspectos ambientais associados, os quais podem ser decisivos para a tomada de decisões da alta direção deste tipo de segmento.

5 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA VIA CÉLULA A COMBUSTÍVEL ALIMENTADA POR BIOGÁS

A utilização de grupos geradores movidos a diesel é muito comum em indústrias, principalmente quando se trata de utilização nos horários de ponta em que a tarifa de energia elétrica é elevada.

Sabe-se que os grupos geradores movidos a diesel estão associados a alguns impactos ambientais devido à utilização de combustível fóssil, além de ser um grande emissor de gás carbônico.

Este estudo se propõe a analisar uma alternativa a para geração de energia elétrica em agroindústrias nos horários de ponta comparando-a com a tecnologia convencionalmente adotada pelas indústrias que são os grupos moto-geradores movidos a diesel.

O intuito deste estudo é buscar elementos na bibliografia levantada que permitam a comparação entre os dois sistemas representados esquematicamente na figura 4.

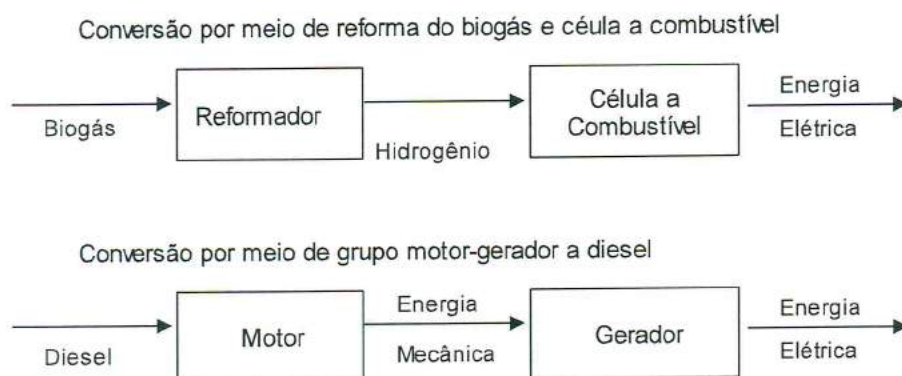


Figura 4: Diagrama esquemático dos sistemas de geração a diesel e reforma do biogás.

Em se tratando de agroindústrias, considera-se como combustível para este sistema o biogás. As agroindústrias estão buscando cada vez mais mecanismos de controle de emissões, uma vez que têm a obrigação de mitigar as emissões de gases produzidas pelas suas atividades.

Uma alternativa possível de ser adotada pelas agroindústrias é a produção de biogás proveniente do sistema de tratamento de efluentes das agroindústrias, a conversão do biogás em energia elétrica via células a combustível para suprimento de energia em horários de ponta, por exemplo. Diante da literatura estudada, verificou-se que

atualmente existem tecnologias que permitem a transformação do biogás em energia elétrica por meio de células a combustível com reformador acoplado.

Neste sentido, buscou-se informações acerca deste tipo de processo e uma análise de conteúdo foi feita acerca dos aspectos que estão relacionados à utilização do biogás para geração de energia elétrica em detrimento aos grupos moto-geradores a diesel, comumente utilizados nas agroindústrias.

O estudo se restringiu à verificação de três aspectos fundamentais: emissões de gás carbônico, eficiência e custos.

Em termos de emissões de gás carbônico, um estudo realizado por Bauen & Hart apud Araujo (2000) comparou as emissões das tecnologias de célula a combustível do tipo PAFC e SOFC, em que ambas utilizaram processo de reforma do gás natural, com um sistema de motor a diesel e outro de motor a gás natural. Os sistemas comparados tinham capacidade de geração em torno de 200 kW de energia.

A figura 5 demonstra os resultados observados quanto à emissão de gás carbônico para cada tecnologia.

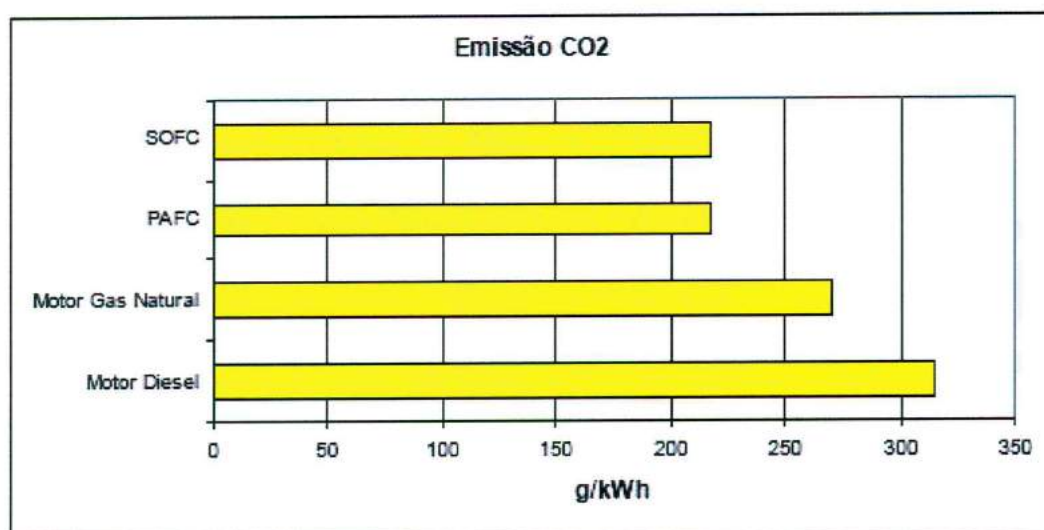


Figura 5: Comparativo das emissões de CO₂ em diversas tecnologias (BAUEN & HART apud ARAUJO, 2000)

Observa-se pelos resultados deste estudo que o maior índice de emissão de gás carbônico se dá pelo motor a Diesel quando comparado com as demais tecnologias, especialmente quando comparado com o sistema de reforma de gás natural via células a combustível.

Com relação à eficiência, segundo Araujo (2000) o desempenho das células a combustível é superior às tecnologias tradicionais. A eficiência das células a combustível

varia na faixa de 50 a 60%, enquanto que os motores de combustão interna atingem eficiência máxima de 45%.

A figura 6 demonstra o comparativo entre a eficiência de conversão de várias tecnologias.

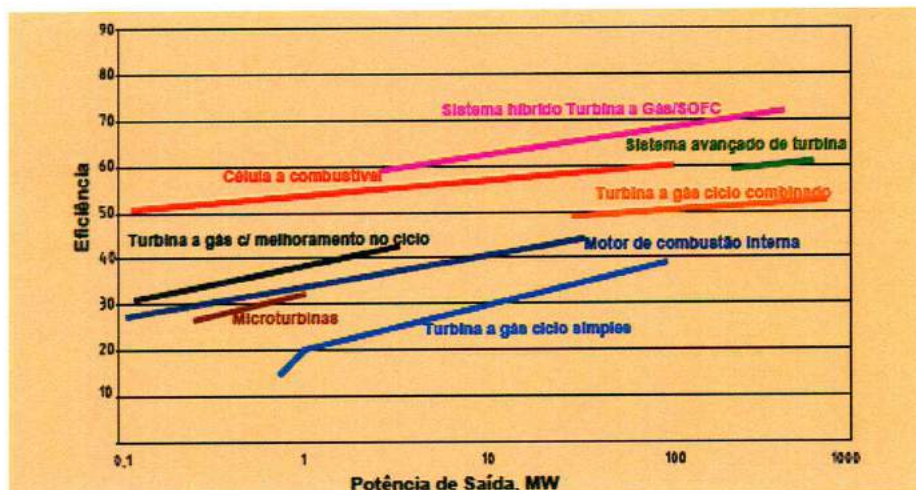


Figura 6: Comparativo das eficiências de conversão de várias tecnologias (DOE apud Araujo, 2000)

Franchi (2009) compara a eficiência de cinco tipos de células a combustível já descritas neste trabalho. Os dados estão representados na tabela 6.

Tabela 6 – Comparativo entre cinco tipos de tecnologias de célula a combustível

| Célula a combustível | Eficiência Elétrica | Reforma de combustível | Combustível |
|----------------------|---------------------|------------------------|----------------------------------|
| PEMFC | 35-55% | Externo | Hidrogênio |
| AFC | 45-65% | Externo | Hidrogênio ouro |
| PAFC | 40-50% | Externo | Gás natural, biogás |
| SOFC | 50-65% | Externo ou interno | Gás natural, biogás, etanol, etc |
| MOFC | 50-65% | Externo ou interno | Gás natural, biogás, etanol, etc |

Fonte: Ellis apud Araujo, 2000

Neste mesmo aspecto, segundo Rifkin (2003), as células a combustível são silenciosas e são até duas vezes e meia mais eficientes que os motores de combustão interna e os únicos efluentes são a eletricidade, o calor e a água pura destilada.

Tomalsquim (2003) afirma que a eficiência elétrica de uma célula a combustível pode atingir próximo de 85% quando o calor produzido por ela é reaproveitado.

Com relação ao aspecto custo, segundo Araujo (2000), as células a combustível ainda apresentam custo de capital elevado. A tabela 7 mostra os valores de custo de capital para a tecnologia de células a combustível e de combustão.

Tabela 7 – Características das tecnologias de células a combustível e de combustão interna

| Característica | Célula a combustível PEMFC | Célula a combustível PAFC | Gerador Motor de Combustão Interna |
|---|----------------------------|---------------------------|------------------------------------|
| Capacidade em kW | 1 – 250 | 100 – 1000 | 25 – 5000 |
| Entrada prevista no mercado | Disponível | Disponível | Disponível |
| Custo projetado (2005), unidade monetária/kW | 1000 – 2000 | 3000 | 300 – 1300 |
| Área ocupada pela planta (m ² /kW) | 0,05 – 0,37 | | 0,02 – 0,03 |
| Eficiência elétrica a plena carga (%) | 40 | 45 | 25 – 45 |
| Eficiência elétrica a meia carga (%) | 40 | 45 | 23 – 40 |
| Saída de calor, % da entrada | 40 | 35 | 35 – 45 |
| Temperatura utilizável (°C) | 50 – 90 | 140 – 200 | 80 – 480 |

Fonte: Ellis apud Araujo, 2000.

Do exposto na tabela 7, observa-se que as células a combustível ainda requerem muitos desenvolvimentos e ganhos de escala para atingir custos de capital competitivos com as tecnologias já estabelecidas, como os motores de combustão interna.

Neste mesmo sentido, Rifkin (2003) afirma que as células a combustível são caras. Como qualquer outra tecnologia, sua produção ainda não atingiu o ponto em que economias de escala passam a se desenvolver e reduzem significativamente o custo por unidade manufaturada.

Segundo Martelli apud Franchi (2009) a tendência com a evolução da tecnologia de células a combustível e a difusão da sua utilização será a redução do custo para 400,00 US\$/kW em 2015, o que passaria a ser sua utilização mais atraente em relação às outras tecnologias.

Ainda, Whole Buildin Design Guide apud Franchi (2009) indica, conforme apresentado na tabela 8, além dos custos dos equipamentos células a combustível e geradores a diesel, o tempo e preço médio da manutenção destas tecnologias.

Tabela 8 – Custos de equipamentos e manutenção das tecnologias

| Geradores | Custos (US\$/kW) | Tempo para realizar a manutenção | Custo médio da manutenção (US\$/kWh) |
|-----------------------|---------------------|---|--------------------------------------|
| Células a combustível | 3.000 a 5.000 | Anualmente: verificar o sistema de abastecimento de combustível e o reformador do sistema 40.000: substituir células pilha | 0,5-1,0 (estimado) |
| Geradores a diesel | 300 a 800 | 750-1000: mudança de petróleo e filtro de óleo 8.000: reconstruir cabeça motor 16.000: reconstruir motor bloco | 0,5-1,0 (estimado) |

Fonte: WHOLE BUILDING DESIGN GUIDE apud FRANCHI, 2009.

Conforme indicado na Tabela 8, além dos custos dos equipamentos relativos às células a combustível serem mais altos, os custos relativos à manutenção das mesmas pode se tornar mais caro pelo fato de após 40.000 horas de operação ser necessária a substituição das pilhas de células a combustível.

Por fim, segundo Castilho (2009) as principais oportunidades de mercado para a introdução da tecnologia de células a combustível no cenário energético brasileiro, situam-se nas centrais de pequeno e médio porte para a produção e/ou auto-produção independente de energia, levando em consideração o elevado custo de energia nos períodos de ponta e o baixo índice de poluição ambiental e sonora. A eficiência das células a combustível aliada a sua capacidade de co-geração através do calor liberado também é um fator significativo desta tecnologia.

6 ALTERNATIVA PARA UTILIZAÇÃO DO BIOGÁS VIA CÉLULAS A COMBUSTÍVEL NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PARA SUPRIMENTO DE ENERGIA NA PONTA.

A idéia inicial deste estudo era analisar os aspectos econômicos do armazenamento do hidrogênio para sua posterior utilização em células a combustível no horários de ponta de agroindústrias.

Tendo em vista a literatura estudada, não foram encontrados dados técnicos e de custos que pudessem subsidiar a análise de produção de hidrogênio a partir de biogás de resíduos da agroindústria para suprimento de energia na ponta.

Devido a este fato, no decorrer da pesquisa foi verificada a possibilidade da utilização do biogás diretamente em uma célula a combustível com reformador acoplado. Foram encontrados dados na literatura que serviram de base para as análises aqui apresentadas.

Desta forma, através de dados obtidos de uma agroindústria da região oeste do Paraná, a qual já possui um sistema de produção de biogás a partir de resíduos de processos agroindustriais, sendo sua produção diária de metano de aproximadamente 1.500 m³, partiu-se para o estudo dos aspectos econômicos desta alternativa.

Esta agroindústria possui um consumo médio mensal de energia de 2.615.522,43 kWh, sendo aproximadamente 326.940,30 kWh no período de ponta.

O perfil de consumo da agroindústria enquadra-se em consumidores A3a com a tarifa horossazonal verde, sendo os valores das tarifas para os horários de ponta e fora da ponta apresentados na tabela 9.

Tabela 9 - Tarifa Horossazonal Verde

| Horossazonal verde A3a (30 a 44kV) | Resolução ANEEL 1431 | |
|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------|
| | Resolução ANEEL | Com impostos (ICMS E PIS/COFINS) |
| Tarifas | | |
| Demanda (R\$/kW) | 5,12 | 7,81 |
| Demanda Ultrapassagem (R\$/kW) | 10,24 | 15,63 |
| Consumo na Ponta | 0,65 | 1 |
| Consumo Fora de Ponta | 0,13 | 0,2 |

Fonte: Copel, 2013

A partir da Tabela 9, desconsiderando-se os gastos com a demanda, estimam-se os gastos mensais com energia elétrica fora de ponta e na ponta hoje realizados por esta agroindústria conforme apresentados nas equações (11) e (12).

$$\begin{aligned} \text{Gasto com energia elétrica fora de ponta} &= 2.288.582,13 \text{ kWh} \times 0,20499\text{R\$/kWh} \\ \text{Gasto com energia elétrica fora de ponta} &= \text{R\$ } 469.136,45 \text{ por mês} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \text{Gasto com energia elétrica na ponta} &= 326.940,30 \text{ kWh} \times 1,00016\text{R\$/kWh} \\ \text{Gasto com energia elétrica na ponta} &= \text{R\$ } 326.992,61 \text{ por mês} \end{aligned} \quad (12)$$

O gasto total com energia elétrica nesta agroindústria é apresentado na equação (13).

$$\text{Gasto total com energia elétrica} = \text{R\$ } 796.129,06 \text{ por mês} \quad (13)$$

Pela quantidade diária de metano produzida por esta agroindústria, seria possível a utilização de uma célula a combustível do tipo PAFC com reformador, a qual, segundo Sprenger (2009) consome cerca de 1440 m³/dia na potência máxima de 200 kW.

Esta célula, operando a plena carga, teria condições de produzir energia elétrica mensal aproximada de 126.000 kWh no período fora da ponta e 18.000 kWh na ponta, conforme equações (14) e (15).

$$\text{Energia fora da ponta} = 200 \text{ kW} \times 21 \text{ horas/dia} \times 30 \text{ dias/mês} = 126.000 \text{ kWh/mês} \quad (14)$$

$$\text{Energia na ponta} = 200 \text{ kW} \times 3 \text{ horas/dia} \times 30 \text{ dias/mês} = 18.000 \text{ kWh/mês} \quad (15)$$

Ou seja, com a produção diária de metano disponível nesta agroindústria seria possível gerar aproximadamente 144.000 kWh/ mês de energia elétrica.

A energia elétrica fora da ponta poderia ser armazenada em banco de baterias de chumbo-ácido para ser utilizada na ponta.

Desta forma, utilizando-se desta energia no horário de ponta, a agroindústria teria um custo evitado estimado mensal e anual conforme demonstrados nas equações (16) e (17).

$$\text{Custo evitado de energia elétrica} = 144.000 \text{ kWh/mês} \times 1,0016 \text{ R\$/kWh} \quad (16)$$

$$\text{Custo evitado de energia elétrica} = \text{R\$ } 144.023,04/\text{mês} \quad (16)$$

$$\text{Custo evitado de energia elétrica} = \text{R\$ } 1.728.276,48/\text{ano} \quad (17)$$

A viabilidade da implantação foi analisada por meio de fluxo de caixa num horizonte de 5 anos. A tabela 10 mostra os valores de receitas advindas do custo evitado de energia elétrica e despesas envolvidas no sistema de geração.

As seguintes considerações foram utilizadas na elaboração do fluxo de caixa:

- Não contemplados o valor de investimento do sistema de produção de biogás, uma vez que a agroindústria já dispõe do sistema instalado;

- Taxa mínima de atratividade de 12% ao ano;
- Não contemplados custos evitados com geração de calor;
- Não contemplados possíveis receitas com venda de crédito de carbono;
- Custo da célula a combustível de US\$ 3.000/kWh;
- Custo de manutenção da célula a combustível de US\$ 0,01/kWh e 25% do valor da célula para troca de pilhas no Ano 5;
- Custo do sistema de armazenamento de hidrogênio como sendo US\$ 80/kWh;
- Custo de manutenção do banco de baterias de US\$ 0,005/kWh;
- Valores de referência para demais despesas foram extraídas do estudo de viabilidade do Sprenger (2009).

Tabela 10 – Fluxo de caixa do sistema de geração de energia elétrica

| ESTUDO DE VIABILIDADE DE SISTEMA DE GERAÇÃO DE ENERGIA | INVESTIMENTO | ANO 1 | ANO 2 | ANO 3 | ANO 4 | ANO 5 |
|---|--------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| MWh Energia Elétrica Gerada | | 1752 | 1752 | 1752 | 1752 | 1752 |
| MWh Calor Gerado | | 1752 | 1752 | 1752 | 1752 | 1752 |
| (-) Sistema de produção do biogás a partir de resíduos da agroindústria | R\$ 0,00 | | | | | |
| (-) Sistema de limpeza e purificação do biogás | R\$ 200.000,00 | | | | | |
| (-) Reformador e célula a combustível | R\$ 1.200.000,00 | | | | | |
| (-) Banco de baterias | R\$ 672.000,00 | | | | | |
| (-) Instalações civis | R\$ 500.000,00 | | | | | |
| (+) INVESTIMENTO DE CAPITAL PRÓPRIO | R\$ 2.572.000,00 | | | | | |
| (+) Custo evitado com Energia Elétrica – não computado | | R\$1.728.276,48 | R\$1.728.276,48 | R\$1.728.276,48 | R\$1.728.276,48 | R\$1.728.276,48 |
| (+) Custo evitado com calor gerado – não computado | | - | - | - | - | - |
| (+) receitas com créditos de carbono | | - | - | - | - | - |
| (+) RECEITAS LÍQUIDAS | | R\$1.728.276,48 | R\$1.728.276,48 | R\$1.728.276,48 | R\$1.728.276,48 | R\$1.728.276,48 |
| (-) Combustíveis (biogás) | | R\$0,00 | R\$0,00 | R\$0,00 | R\$0,00 | R\$0,00 |
| (-) Mão-de-obra para operação | | R\$ 4.000,00 | R\$ 4.000,00 | R\$ 4.000,00 | R\$ 4.000,00 | R\$ 4.000,00 |
| (-) Outros gastos diretos (materiais) | | R\$ 80.000,00 | R\$ 80.000,00 | R\$ 80.000,00 | R\$ 80.000,00 | R\$ 80.000,00 |
| (-) Manutenção | | R\$ 52.080,00 | R\$ 52.080,00 | R\$ 52.080,00 | R\$ 52.080,00 | R\$ 52.080,00 |
| (-) Seguros e taxas | | R\$ 15.000,00 | R\$ 15.000,00 | R\$ 15.000,00 | R\$ 15.000,00 | R\$ 15.000,00 |
| (-) Despesas administrativas | | R\$ 3.500,00 | R\$ 3.500,00 | R\$ 3.500,00 | R\$ 3.500,00 | R\$ 3.500,00 |
| (-) Depreciação das instalações e equipamentos (10% aa) | | R\$ 257.200,00 | R\$ 257.200,00 | R\$ 257.200,00 | R\$ 257.200,00 | R\$ 257.200,00 |
| (=) LUCRO ANTES DO IMPOSTO DE RENDA (LAIR) | | R\$1.316.496,48 | R\$1.316.496,48 | R\$1.316.496,48 | R\$1.316.496,48 | R\$1.051.056,48 |
| (-) Provisão para contribuição social (10% do LAIR) | | R\$ 131.649,65 | R\$ 131.649,65 | R\$ 131.648,65 | R\$ 131.648,65 | R\$ 105.105,65 |
| (-) Provisão para IR (35% do LAIR) | | R\$ 0,00 | R\$ 460.773,77 | R\$ 460.777,77 | R\$ 460.777,77 | R\$ 367.869,77 |
| (=) LUCRO LÍQUIDO | | R\$ 1.184.846,83 | R\$ 724.073,06 | R\$ 724.073,06 | R\$ 724.073,06 | R\$ 578.081,06 |
| (=) RESULTADO LÍQUIDO DO EXERCÍCIO | -R\$ 2.572.000,00 | R\$ 1.184.846,83 | R\$ 724.073,06 | R\$ 724.073,06 | R\$ 724.073,06 | R\$ 578.081,06 |

Fonte: Adaptado de Sprenger (2009)

A partir dos valores da Tabela 10, realizou-se o cálculo do valor presente líquido, que é igual aos resultados líquidos anuais (receitas-despesas) trazidos ao presente. Para tal, foi utilizada a tabela 11.

Tabela 11 – Cálculo do Valor Presente Líquido

| Ano=j | Resultado por ano | $(1+12\%)^j$ | Resultado por ano/ $(1+12\%)^j$ |
|-------------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------|
| 1 | R\$ 1.184.846,83 | 1,12 | R\$ 1.057.898,96 |
| 2 | R\$ 724.073,06 | 1,25 | R\$ 577.226,61 |
| 3 | R\$ 724.073,06 | 1,4 | R\$ 515.380,90 |
| 4 | R\$ 724.073,06 | 1,57 | R\$ 460.161,52 |
| 5 | R\$ 578.081,06 | 1,76 | R\$ 328.018,72 |
| Investimento inicial | | | -R\$ 2. 572.000,00 |
| Valor Presente Líquido | | | R\$ 366.686,71 |

Também foi calculada a taxa interna de retorno, que é o valor da taxa para Valor Presente Líquido Nulo. A taxa interna de retorno encontrada para o projeto foi de 18,33%.

Ambos os valores indicam a viabilidade do projeto, que ocorre quando Valor Presente Líquido é maior que zero e quando a taxa interna de retorno é igual ou maior do que a taxa mínima de atratividade.

Além disso, verificou-se que o tempo de retorno do investimento é de aproximadamente 3 anos, utilizando o Prazo de Retorno do investimento (Payback) simples e 4 anos, utilizando o Prazo de Retorno de Investimento (Payback) descontado, conforme pode ser observado nas Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 – Cálculo do Payback simples

| Ano | Valor Presente | Valor Acumulado |
|------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | -R\$ 2.572.000,00 | -R\$ 2.572.000,00 |
| 1 | R\$ 1.184.846,83 | -R\$ 1.387.153,17 |
| 2 | R\$ 724.073,06 | -R\$ 663.080,11 |
| 3 | R\$ 724.073,06 | R\$ 60.992,95 |
| 4 | R\$ 724.073,06 | R\$ 785.066,01 |
| 5 | R\$ 578.081,06 | R\$ 1.363.147,07 |

Tabela 13 – Cálculo do Payback descontado

| Ano | Valor Presente | Valor Acumulado |
|------------|-----------------------|------------------------|
| 0 | -R\$ 2.572.000,00 | -R\$ 2.572.000,00 |
| 1 | R\$ 1.057.898,96 | -R\$ 1.514.101,04 |
| 2 | R\$ 577.226,61 | -R\$ 936.874,43 |
| 3 | R\$ 515.380,90 | -R\$ 421.493,53 |
| 4 | R\$ 460.161,52 | R\$ 38.667,99 |
| 5 | R\$ 328.018,72 | R\$ 366.686,71 |

7 CONCLUSÕES

Observou-se com este estudo que, as indústrias em geral vêm tendo iniciativas de geração de energia elétrica para suprir as demandas de energia nos horários de ponta, uma vez que nestes períodos a tarifa de energia elétrica aumenta consideravelmente.

Neste sentido, muitas indústrias já utilizam grupos moto-geradores movidos a diesel como forma de geração de energia elétrica nestes períodos.

Esta solução se mostra ineficaz em se tratando de questões ambientais, uma vez que o diesel é proveniente de fonte energia não-renovável e pelo teor elevado de emissões de gás carbônico que o uso deste combustível em grupos moto-geradores proporciona.

Para as agroindústrias que já contemplam em seus planos ambientais o tratamento de dejetos, através da utilização de biodigestores, o biogás pode ser visto como um combustível de baixo custo disponível neste segmento, podendo ser considerado uma fonte renovável de energia e de grande potencial para ser utilizado em fins energéticos.

Aliadas às questões ambientais está a possibilidade das agroindústrias em gerarem energia elétrica por meio do biogás.

Para isso, constatou-se que a conversão do biogás em energia elétrica é possível de ser realizada mediante várias formas. Neste estudo, especificamente estudou-se a conversão do biogás em hidrogênio e conversão do hidrogênio em eletricidade e a conversão direta do biogás em eletricidade por meio de células a combustível.

Primeiramente identificou-se e descreveu-se as etapas e processos do processo de conversão do biogás em hidrogênio e da conversão do hidrogênio em energia elétrica.

Compreendeu-se que conversão do biogás em hidrogênio é possível por meio dos processos de reforma a vapor, reforma por oxidação parcial ou reforma autotérmica. O hidrogênio produzido pode ser utilizado em células a combustível, mas para isso requer um alto grau de pureza.

Além disso, verificou-se que as células a combustível são soluções ecologicamente corretas, uma vez que os resíduos produzidos são água, calor e eletricidade.

Percebeu-se, através da análise comparativa entre o sistema de produção de energia via reformadores e células a combustível e o sistema a combustão interna a diesel, grandes diferenças em termos de eficiência, emissão de gás carbônico e custos.

Quanto ao aspecto emissão de gás carbônico, verificou-se que o sistema de combustão interna apresenta emissões de gás carbônico mais elevadas do que o sistema a célula a combustível.

Outra diferença que pôde ser constatada está na questão eficiência. A eficiência do sistema de combustão interna apresenta índices mais baixos do que o sistema a célula a combustível.

No entanto, ao contrário dos aspectos emissão de gás carbônico e eficiência, o sistema de combustão interna apresenta custos mais baixos do que o sistema a célula a combustível.

Neste sentido, apesar do sistema de célula a combustível apresentar benefícios que o colocam num patamar diferenciado em relação ao sistema de combustão interna, o aspecto custo ainda é o ponto crucial para a viabilidade da tecnologia de células a combustível.

Através deste estudo, torna-se notável que ainda são necessários novos desenvolvimentos para a tecnologia de células a combustível se tornar competitiva em relação aos tradicionais grupos geradores.

Uma outra alternativa estudada, que não o armazenamento de hidrogênio, foi a verificação da possibilidade das agroindústrias utilizarem-se diretamente do biogás para a geração de energia elétrica em células a combustível. Neste aspecto, para o suprimento da energia no horário de ponta, é necessário o armazenamento da energia elétrica produzida pela célula a combustível em banco de baterias. Esta alternativa mostrou-se viável para as agroindústrias que já apresentam o sistema de produção de biogás implantado, uma vez que o combustível biogás já está

disponível. Além disso, se somados os custos evitados com geração de calor para a indústria e a possibilidade de venda de créditos de carbono, o sistema se torna ainda mais atrativo.

Por fim, verificou-se que as alternativas para a geração de energia elétrica a partir do biogás são muitas, seja convertendo-o em hidrogênio, seja convertendo-o diretamente em energia elétrica. Cabe à alta direção dos estabelecimentos industriais, no caso, as agroindústrias avaliarem os benefícios ambientais gerados pela adoção de um ou outro tipo de sistema. O que é importante é que qualquer alternativa diferente dos sistemas convencionais de geração via combustíveis fósseis contribui para minimizar os impactos ambientais gerados por suas atividades industriais.

Diante do exposto, conclui-se que, no futuro será inevitável que ocorra a transição dos sistemas convencionais de geração de energia elétrica por sistemas mais eficientes e sustentáveis ambientalmente, uma vez que este tema encontra-se em fóruns de discussão mundiais.

A transição será necessária e o entendimento dos diversos aspectos associados às tecnologias são fundamentais para que os estabelecimentos industriais tenham a certeza de que aplicam seus recursos em iniciativas que agregam valor, permitindo o cumprimento das políticas ambientais estabelecidas e proporcionando a maximização do retorno aos seus investimentos.

REFERÊNCIAS

ALESSANDRO, M. **Metodologia de gerenciamento de risco do hidrogênio**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba. 2011.

ANEEL. **Glossário**. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/glossario.cfmatt=H>. Acesso em 07 de junho de 2012.

ARAUJO, P. D. et al. **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 Notícias & SHP NEWS, n.24, Ano 7, nov/dez/jan.

BLEY JUNIOR, C.; LIBÂNIO, J. C.; GALINKIN, M.; OLIVEIRA, M. M. **Agroenergia da Biomassa Residual: Perspectivas Energéticas, Socioeconômicas e Ambientais**. 2. ed. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional, Organização das Nações Unidas Para Agricultura e Alimentação, TechnoPolitik, 2009.

BLEY JUNIOR, C. **Reflexões sobre a economia do Biogás**. Disponível em: <http://www.observatoriobrasil.org/imagens/reflexoes.pdf>. Acesso em 18 de dez. 2011.

CAPAZ, R. S. **A arte da tecnologia do hidrogênio - Review**. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC000000000220060010007&script=sci_arttext#f1. Acesso em 15 de dez. 2012.

CASTILHO, A. L. et al *Estudo de caso da implantação da célula a combustível no hospital Erasto Gaertner*. – Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba. 2004.

CENBIO. Nota Técnica VII – **Geração de energia a partir do biogás gerado por resíduos urbanos e industriais**. Florianópolis, SC, 2001. Disponível em: <http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnicavii.pdf>
Acesso em 13 de jan. 2013.

CENBIO. Nota Técnica VIII - **Biogás e o mercado de crédito de carbono**. São Paulo, SP, 2008. Disponível em: http://cenbio.iee.usp.br/download/documentos/notatecnica_viii.pdf>. Acesso em 13 de jan. 2013.

COPEL. **Perguntas Frequentes**. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/el/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Findustria%2Fpagcopel2.nsf2Fverdocatual2F8089E3C766886E300325325742800650F21#1>. Acesso em 28 de junho de 2012.

COPEL. **Taxas e Tarifas**. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/ni>

vel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2F1126b3bcaa6cb04003257488005939cd. Acesso em 01 de abril de 2013.

FRANCHI, T. P. **Utilização de células a combustível tipo PEM como alternativa na geração auxiliar em instalações elétricas de grande porte.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo. 2009.

GAMBETTA, F. **Produção de hidrogênio eletrolítico nos horários fora de ponta e sua utilização como vetor energético nos horários de ponta através do uso de células a combustível.** Disponível em: <http://www.ifi.unicamp.br/ceneh/WICaC2008/PDF/24-FrancielleGambetta.pdf>. Acesso em 07 de junho de 2012.

GODOY Jr., E. **Sistema otimizado de reator anaeróbio de fluxo ascendente para tratamento de efluente da suinocultura.** Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade de Taubaté, Taubaté. 2001.

JANNUZZI, G. M. **Políticas Públicas Para Eficiência Energética e Energia Renovável no Novo Contexto de Mercado: Uma Análise da Experiência Recente dos EUA e do Brasil.** São Paulo: Autores Associados, 2000.

O'HAYRE, R.; CHA, S.; COLELLA, W.; PRINZ, F. **Fuel Cell Fundamentals.** 2. ed. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 2009.

PARIS, A. G. **Redução das emissões de gases de efeito estufa listados no protocolo de Quito pelo aproveitamento do gás gerado em aterros sanitários utilizando células a combustível de óxido sólido.** Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) – Instituto de Pesquisas Energéticas e nucleares, São Paulo. 2007.

REIS, L. B. **Geração de Energia Elétrica.** 1. ed. Barueri: Manole, 2003.

RIFKIN, J. **A Economia do Hidrogênio: A Criação de Uma Nova Fonte de Energia e a Redistribuição do Poder na Terra.** São Paulo: M. Books do Brasil Ltda, 2003.

SANTOS, F.M.S.M. **O Combustível hidrogênio.** Disponível em: <http://www.ipv.pt/millennium/millennium31/15.pdf>. Acesso em 01 de fevereiro de 2013.

SERRA, E. T.; FURTADO, J. G. M.; SOARES, G. F.; NETO, A. C. **Células a combustível: Uma Alternativa para Geração de Energia e a sua Inserção no Mercado Brasileiro.** Rio de Janeiro: CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, 2005.

SPRENGER, H. E. **Viabilidade do uso de biogás de ETE para alimentação de células a combustível de ácido fosfórico.** Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Tecnologia) – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento, Curitiba. 2009.

TOMALSQUIM, M. T. **Fontes Renováveis de Energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

VILULLAS, H. M. et al. **Células a Combustível: energia limpa a partir de fontes renováveis**. 2001. Disponível em: <http://gnesc.sbg.org.br/online;gnesc1515/v15a06.pdf>. Acesso em 13 de jan. 2013.