

**XI-025 - POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO A PARTIR DO BIOGÁS GERADO EM UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO – VANTAGENS E ANÁLISE DE DESEMPENHO AMBIENTAL**

**Alexandre Pereira de Souza** <sup>(1)</sup>

Mestre em Planejamento Energético (PPE/COPPE/UFRJ), Químico Industrial (EQ/UFRJ) e Analista de Qualidade (Químico) da Gerência de Tratamentos de Esgotos da CEDAE – RJ.

**Tiago Chagas de Oliveira Tourinho** <sup>(1)</sup>

Biólogo pelo Instituto de Biologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Especialista em Gestão Ambiental pela Escola Politécnica da UFRJ / Instituto Brasil PNUMA. Mestre em Engenharia Ambiental pela UFRJ. Analista da Qualidade da Gerência de Tratamentos de Esgotos da CEDAE – RJ.

**Átila Santana da Silva** <sup>(1)</sup>

Engenheiro Químico pela Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ. Técnico em Química. Técnico de Laboratório da Gerência de Tratamento de Esgotos da CEDAE – RJ.

**Endereço** <sup>(1)</sup>: Rua Bulhões Marcial, 975 - Vigário Geral – Rio de Janeiro – RJ – CEP: 21241-366 – Brasil – Tel: +55 (21) 3451-7953 – e-mail: [alexandres@cedae.com.br](mailto:alexandres@cedae.com.br)

## RESUMO

A demanda por gás hidrogênio ( $H_2$ ) tem aumentado continuamente, atingindo cerca de 478 bilhões de  $m^3$  em 2013. O  $H_2$  possui a maior quantidade de energia por unidade de massa conhecida (121000 kJ/kg). Esta, além de outras qualidades, faz dele, uma das principais alternativas para a substituição dos combustíveis fósseis consumidos mundialmente. A reforma a vapor tem sido empregada como a principal alternativa tecnológica para a produção de  $H_2$  e é responsável por 50% da sua produção mundial. A desvantagem deste processo é a coprodução de monóxido de carbono (CO), sendo que, para a obtenção de  $H_2$  com alta pureza, é necessário que haja a remoção do CO, o que encarece o processo. Perspectivas futuras projetam que, a partir de 2020, o hidrogênio produzido no Brasil deverá ser majoritariamente proveniente de fontes renováveis, sendo uma delas, o biogás. As Estações de Tratamento de Esgotos (ETEs) são fontes de geração de biogás, quando possuíntes de digestores anaeróbicos. O presente trabalho busca: estimar o potencial de produção de gás hidrogênio a partir do biogás gerado em uma ETE utilizando o processo de Decomposição Termocatalítica do Metano (DTCM); determinar a aplicação mais vantajosa para a utilização de hidrogênio – geração de calor ou eletricidade – comparada com o metano; e, realizar uma análise de desempenho ambiental através de um *software* de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), comparando o impacto em 4 diferentes cenários: I) conversão do metano a dióxido de carbono por meio da queima e liberação na atmosfera; II) conversão do metano em eletricidade; III) utilização do processo de DTCM para produção de hidrogênio; e, IV) emissão direta do metano na atmosfera. Estima-se que o potencial de produção de  $H_2$  a partir do biogás gerado na ETE estudada seja de 3644,08  $Nm^3$  por dia. A combustão do metano visando a geração de energia térmica apresenta potencial 59,3% maior que a utilização do  $H_2$ . Contudo, tendo como objetivo produzir energia elétrica, a conversão do metano a  $H_2$  e a sua utilização para este fim, apresenta uma potência 25,5% maior do que a gerada pelo metano. Em relação ao desempenho ambiental, o cenário III se apresenta como opção menos impactante, apresentando -9,13 mPt de impacto/ $m^3$  de metano gerado. O cenário II se apresenta como o segundo processo menos impactante, com 44,45 mPt de impacto/ $m^3$  de metano gerado. Já o cenário IV se apresenta como opção mais impactante ao meio ambiente, com impacto de 263,40 mPt/ $m^3$  de metano gerado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Hidrogênio, Metano, Decomposição, Termocatalítica, Biodigestor

## INTRODUÇÃO

O hidrogênio é o átomo mais abundante do universo, e na Terra corresponde a aproximadamente 70% da superfície do planeta. Todavia, por não existir na forma de molécula isolada, e estar sempre associado a outro elemento, como o oxigênio (na forma de água) ou o carbono (como hidrocarboneto), o hidrogênio como gás ( $H_2$ ) precisa ser produzido. A produção do hidrogênio gasoso pode ocorrer por diferentes rotas tecnológicas

através de três matrizes principais: combustíveis fósseis, fontes renováveis e eletrólise da água. (AZEVEDO *et alii*, 2006 *apud* EGUTE, 2010).

Algumas características tornam o gás hidrogênio bastante notável, em especial sua elevada capacidade energética (121.000 kJ/kg) – a maior quantidade de energia por unidade de massa conhecida (ALVES *et alii*, 2013). Devido a essa particularidade, a demanda por hidrogênio tem aumentado continuamente. Segundo Mondal e Chandran (2014), sua demanda mundial estimada foi de 402 bilhões de m<sup>3</sup> em 2008, atingindo cerca de 478 bilhões de m<sup>3</sup> em 2013. Seus principais usos são: i) a utilização de processo de hidrotratamento na indústria petroquímica; e ii) o emprego de combustível não-poluente (livre de CO) em células a combustível. Estas alcançaram um progresso considerável na última década, tendo sido desenvolvidas para transporte e para geração de energia em instalações estacionárias ou portáteis.

As células a combustível transformam a energia química das moléculas de hidrogênio em energia elétrica com até 60% de eficiência. Além disso, quando o hidrogênio é usado em células veiculares a combustível, apresenta um rendimento maior que os dispositivos atuais utilizados em veículos de combustão interna. Estas qualidades fazem do hidrogênio uma das principais alternativas para a substituição dos combustíveis fósseis consumidos mundialmente (ALVES *et alii*, 2013).

Apesar de ser sempre mencionado como uma fonte renovável e limpa de energia, o hidrogênio, de acordo com o modo de produção, pode ser classificado como *green hydrogen* – quando proveniente de fonte renovável – ou *black hydrogen* – quando advindo de combustíveis fósseis (LINARDI, 2008). Os combustíveis fósseis representam a principal matéria-prima para a produção de hidrogênio no cenário atual, sendo que o gás natural responde por 48% da produção mundial, o petróleo por 30% e o carvão por 18% (ARMOR, 2009 *apud* EGUTE, 2010).

A reforma a vapor tem sido empregada como a principal alternativa tecnológica para a produção de hidrogênio e é responsável por 50% da sua produção mundial. A popularidade desse processo pode ser atribuída à sua alta eficiência de conversão e relação custo-benefício em comparação com os outros processos concorrentes (CHENA *et alii*, 2008 *apud* BRAGA, 2014). A desvantagem deste processo é a coprodução de monóxido de carbono (CO), caracterizando o chamado “gás de síntese”, largamente utilizado nas indústrias. Para a obtenção de hidrogênio com alta pureza, é necessário que haja a remoção do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), encarecendo o processo (AWADALLAH *et alii*, 2014).

Outra alternativa de produção de hidrogênio é a eletrólise. Apesar de apresentar como um ponto positivo a ausência de emissões de dióxido de carbono, sua produção para fins energéticos é praticamente inexistente no Brasil devido ao alto custo – instalação de equipamentos e insumos, eletricidade e água – quando comparado ao processo de reforma a vapor de gás natural (BRASIL, 2005).

Perspectivas futuras projetam que, a partir de 2020, o hidrogênio produzido no Brasil deverá ser majoritariamente proveniente de fontes renováveis. Além da cana de açúcar, outras biomassas devem ser utilizadas para este fim, incluindo o biogás (BRASIL, 2005). O biogás pode ser gerado por diferentes processos ou operações, tais como: aterros sanitários ou biodigestores de resíduos orgânicos, fezes de animais ou de lodo de Estação de Tratamento de Esgoto (ETEs).

Uma dessas rotas pesquisada e bastante promissora é a Decomposição Termocatalítica do Metano (DTCM). De acordo com Mondal e Chandran (2014), o processo de DTCM ocorre basicamente em duas etapas: a decomposição do metano (equação 1); e a geração de mais hidrogênio, através da recuperação do catalisador, pela gaseificação do carbono (equação 2). A equação global é representada pela equação 3.



Todo o processo ocorre a 610°C, aproximadamente (MONDAL e CHANDRAN, 2014), sendo necessário o pré-aquecimento das correntes afluentes que alimentam o sistema, a saber: i) a corrente de metano utilizada no processo; e, ii) a corrente de água utilizada na recuperação do catalisador.

Uma potencial oportunidade para aplicação desta rota a partir de fontes renováveis se encontra nas Estação de Tratamento de Esgoto (ETEs). As ETEs são unidades operacionais do sistema de esgotamento sanitário que através de processos físicos, químicos e biológicos removem as cargas poluentes do esgoto, devolvendo ao ambiente, efluente tratado, porém gerando lodo como resíduo do processo. Atualmente, algumas ETEs, visando a redução do lodo para o seu posterior descarte, recorrem ao processo de biodigestão. Este processo anaeróbico resulta na geração do biogás, rico em metano. Apesar do biogás, até o momento, na maioria dos casos, ser direcionado para produzir energia elétrica ou energia térmica, novos estudos apontam sua utilização para a produção de gás hidrogênio ( $H_2$ ) através de rotas mais eficientes.

## OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivos:

- estimar o potencial de produção de gás hidrogênio a partir do biogás gerado em uma ETE do município do Rio de Janeiro utilizando o processo de DTCM;
- determinar a aplicação mais vantajosa para a utilização de hidrogênio – geração de calor ou eletricidade – comparada com o metano; e,
- realizar uma análise de desempenho ambiental através de um *software* de Avaliação de Ciclo de Vida, comparando o impacto em 4 diferentes cenários:
  - I. conversão do metano a dióxido de carbono por meio da queima e liberação na atmosfera;
  - II. conversão do metano em eletricidade;
  - III. utilização do processo de DTCM para produção de hidrogênio; e
  - IV. emissão direta do metano na atmosfera.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Uma Estação de Tratamento de Esgotos (ETE), localizada no município do Rio de Janeiro, com tratamento secundário, recebe uma vazão afluente de aproximadamente, 605 L/s. Por meio dos dados de projeto da ETE e de alguns dados disponíveis na literatura (Tabela 1) foi possível estimar o potencial de produção de hidrogênio a partir do biogás gerado na etapa da biodigestão do lodo. Tais dados também embasaram os cálculos para a verificação da aplicação mais vantajosa, dentro das condições apresentadas neste estudo, do hidrogênio gerado comparado ao metano: utilização em eletricidade ou energia térmica.

**Tabela 1: Resumo dos principais valores adotados para a realização dos cálculos.**

Parâmetro	Valor adotado	Unidade	Referência
Nº de digestores	2	unidades	Dados de Projeto da ETE (2014)
Volume útil de cada digestor	5300	m <sup>3</sup>	Dados de Projeto da ETE (2014)
Tempo de Detenção do Lodo	18	dias	Dados de Projeto da ETE (2014)
Produção teórica de biogás (vazão)/ digestor	1251,4	Nm <sup>3</sup> /d	Dados obtidos <i>in situ</i> (2014)
% CH <sub>4</sub> no biogás	70	%	ALVES <i>et alii</i> (2013)
Calor específico da água (líquida)	4186	J/kg.K	GREEN e PERRY (2007)
Calor latente de vaporização (água)	2,26 x 10 <sup>6</sup>	J/kg	GREEN e PERRY (2007)
Calor específico da água (vapor)	2009	J/kg.K	GREEN e PERRY (2007)
Calor específico do metano	2191	J/kg.K	GREEN e PERRY (2007)
Eficiência do processo de Decomposição Termocatalítica do Metano (DTCM)	65	%	MONDAL e CHANDRAN (2014)
Eficiência de conversão de H <sub>2</sub> em eletricidade	60	%	ALVES <i>et alii</i> (2013)
Eficiência de conversão de CH <sub>4</sub> em eletricidade	30	%	JORDÃO e PESSÔA (2011)
Poder calorífico do CH <sub>4</sub>	35800	kJ/m <sup>3</sup>	JORDÃO e PESSÔA (2011)
Poder calorífico do CH <sub>4</sub>	50140	kJ/kg	Adaptado de JORDÃO e PESSÔA (2011)
Poder calorífico do H <sub>2</sub>	121000	kJ/kg	ALVES <i>et alii</i> (2013)

Durante o processo da DTCM, que ocorre a 610°C, torna-se necessário aquecer a corrente de metano e o vapor d'água, cuja finalidade, além reagir com o carbono depositado no catalisador, buscando a regeneração do mesmo, é produzir mais hidrogênio. Para esta etapa, deve-se, portanto, calcular: i) a quantidade de água para permitir esse processo (quantidade mínima e suficiente para evitar consumo exagerado de energia, pois o maior custo do processo está ligado à vaporização e aquecimento da água); ii) a quantidade de calor necessária para aquecer a corrente de metano (de 0 a 610 °C); e iii) a quantidade de calor necessária para aquecer e vaporizar a água (de 0 a 610 °C). As quantidades caloríficas necessárias para o aquecimento nesta etapa do processo estão apresentadas nas equações (4) e (5).

$$Q_{\text{metano}} = m_{\text{metano}} \cdot c_{\text{metano}} \cdot \Delta\theta \text{ (0 a 610}^\circ\text{C)} \quad \text{equação (4)}$$

Onde:

$Q_{\text{metano}}$  é o calor necessário para o aquecimento da corrente de metano, em J;

$m_{\text{metano}}$  é a massa de metano que se deseja aquecer, em kg;

$c_{\text{metano}}$  é o calor específico do metano, em J/kg.K; e

$\Delta\theta$  é a variação de temperatura, em K.

$$Q_{\text{água}} = m_{\text{água}} \cdot c_{\text{líquido}} \cdot \Delta\theta \text{ (0 a 100}^\circ\text{C)} + m_{\text{água}} \cdot L_{\text{vaporização}} + m_{\text{água}} \cdot c_{\text{vapor}} \cdot \Delta\theta \text{ (100 a 610}^\circ\text{C)} \quad \text{equação (5)}$$

Onde:

$Q_{\text{água}}$  é o calor necessário para o aquecimento da massa de água, em J;

$m_{\text{água}}$  é a massa de água que se deseja aquecer, em kg;

$c_{\text{líquido}}$  é o calor específico da água líquida, em J/kg.K;

$\Delta\theta$  é a variação de temperatura, em K;

$L_{\text{vaporização}}$  é o calor latente de vaporização da água, em J/kg; e

$c_{\text{vapor}}$  é o calor específico da água no estado de vapor, em J/kg.K.

A análise do desempenho ambiental é realizada através de um ambiente computacional de avaliação do ciclo de vida (ACV), o SimaPro 7.2. Este *software* utiliza a base de dados suíça Ecoinvent, que apresenta em torno de 4000 conjuntos de dados para serviços, produtos e processos comumente utilizados nos estudos de caso de ACV. De acordo com a literatura, este é o *software* mais utilizado para aplicações de ACV (LAPINSKIENE e MARTINAITIS, 2013) e é uma poderosa ferramenta de avaliação do impacto potencial gerado.

O método de avaliação de impacto de ciclo de vida (AICV) utilizado foi o ReCiPe 2008, o qual representa o estado da arte relacionado a AICV na Holanda e é descrito por Goedkoop *et alii* (2013). Os métodos de AICV auxiliam na modelagem dos efeitos dos aspectos ambientais no objeto de estudo, sugerindo categorias de impacto que serão afetadas (exemplo: mudanças climáticas, eutrofização, depleção de recursos, danos à saúde humana, etc.) e quantificando estes efeitos. Para classificar e caracterizar as categorias intermediárias de impacto é utilizado o método "ReCiPe Midpoint (E) versão 1.04/World ReCiPe E/E".

Em seguida, opta-se pela análise normalizada e ponderada. A normalização busca mostrar em que medida uma categoria de impacto tem uma contribuição significativa para a problemática ambiental global, pois ela transforma valores com diferentes unidades, em valores adimensionais. Isto possibilita desconsiderar as categorias de impacto que contribuem pouco em comparação com outras, reduzindo o número de pontos que necessitem avaliação.

A ponderação se refere à conversão e possível agregação dos resultados normalizados dos indicadores entre as diferentes categorias de impacto, utilizando fatores numéricos (pesos) baseados em escolha de valores (ABNT, 2009). No cálculo da ponderação, os resultados das categorias intermediárias são multiplicados pelos pesos e se obtém um perfil ambiental ponderado que, caso todas as categorias sejam somadas, conduzirão a um único índice ambiental global, ou pontuação total, auxiliando na tomada de decisões quanto ao cenário menos impactante. Para as análises de normalização e ponderação, utiliza-se o método de AICV "ReCiPe Endpoint (E) / World ReCiPe E/E" disponível no programa. O conjunto de normalização/ponderação "World ReCiPe E/E" se refere aos valores de normalização mundiais com o grupo de ponderações pertencendo ao cenário igualitário (PRÉ CONSULTANTS, 2010).

Neste estudo é realizada a comparação de desempenho ambiental de quatro cenários:

- I) A queima do metano gerado, liberando o dióxido de carbono para a atmosfera – aqui denominado como “CO<sub>2</sub> emitido pela queima do CH<sub>4</sub>”;
- II) A conversão do metano gerado em eletricidade para ser utilizada na própria ETE – aqui denominado como “Conversão em eletricidade”;
- III) A geração de hidrogênio por meio do processo de DTCM – aqui denominado como “H<sub>2</sub> pelo processo sugerido”; e,
- IV) A liberação do metano gerado à atmosfera sem queima – aqui denominado como “Liberação de metano gerado”.

No primeiro cenário, a análise se limita à quantidade de dióxido de carbono emitida para a atmosfera com a queima do metano, somado ao impacto de produção de aço inoxidável para a construção de queimadores de biogás de 3 toneladas. Neste estudo, considera-se que a vida útil de um queimador seja de 5 anos e que o processo de queima funcione por 20 anos, sendo necessárias 4 unidades. Os dados do inventário de ciclo de vida (ICV) para o aço inoxidável são extraídos da *European reference Life Cycle Database* (ELCD), pelo próprio *software*.

No segundo cenário, a análise se limita à quantidade de dióxido de carbono emitido para a atmosfera com a queima do metano, somado ao impacto evitado ao se deixar de gerar eletricidade da matriz energética brasileira. Os dados de ICV para a eletricidade são extraídos de Frischknecht *et alii* (2007).

No processo sugerido, terceiro cenário, a análise dos impactos foi limitada a: o dióxido de carbono emitido para a atmosfera com a queima do metano para aquecimento e com a recuperação do catalisador; e o impacto evitado ao se deixar de gerar gás hidrogênio pelo processo de reforma a vapor do metano. Os dados de geração de hidrogênio por reforma a vapor foram fornecidos pela base de dados Ecoinvent, que se baseou no levantamento de inventário de I Boustead (2005).

No quarto processo, a liberação de todo o metano gerado foi o único aspecto considerado dentro das fronteiras do sistema analisado.

Em todos os casos, a unidade funcional de comparação foi a seguinte: impactos causados (ou evitados) a cada 1 m<sup>3</sup> de metano produzido por digestão anaeróbica

## RESULTADOS OBTIDOS

Conforme apresentado nas equações 2 e 3, a reação para DTCM, que ocorre a 610°C, necessita do aquecimento da corrente de metano e de vapor d'água, visando a regeneração do catalisador, e maior produção de hidrogênio. Apesar de, a princípio, intencional a destinação do metano integralmente à produção de hidrogênio, sugere-se separar uma fração do metano gerado para produzir energia e favorecer a ocorrência da reação, uma vez que há a necessidade de aquecimento do processo. Sendo assim, um primeiro passo envolve calcular o percentual do metano destinado a cada aplicação (produção de hidrogênio e aquecimento do processo).

Utilizando-se a equação 1 – e assumindo que todo o metano que passa pelo catalisador, nas CNTP, é reduzido a carbono (nanotubos) – cada 1 m<sup>3</sup> de metano produz 0,536 kg de nanotubos. Utilizando-se a mesma proporção estequiométrica, conforme a equação 2, para regenerar o catalisador e remover o carbono depositado, é necessário 1,606 kg de vapor d'água aquecido.

Para o cálculo do balanço energético do processo, que ocorre a 610°C, deve-se considerar a quantidade de calor necessário para o aquecimento da corrente de metano, bem como a vaporização e o aquecimento da água:



- Para o pré-aquecimento da corrente de 1 m<sup>3</sup> de metano necessita-se de 966,03 kJ - conforme aplicação da equação (4)
- Para vaporização e aquecimento de 1,606 kg água necessita-se de 6011,35 kJ - conforme aplicação da equação (5).

Verifica-se, portanto, que a quantidade total de calor necessário para a realização das duas etapas a 610°C é de 6977,38 kJ. Utilizando-se o metano como fonte de obtenção da energia necessária para o processo, e considerando seu poder calorífico como sendo 35800 kJ/m<sup>3</sup>, verifica-se a necessidade da queima de 0,195 m<sup>3</sup> de metano (≈17%).

Dessa forma, visando reduzir o custo da obtenção de energia, será considerada a utilização do próprio metano proveniente do biogás para tal fim. Para atender a essa necessidade, com uma margem de segurança, a corrente de metano é dividida em duas:

- 20% da vazão de metano utilizada para aquecimento; e
- 80% da vazão de metano aplicada para produção de hidrogênio.

De acordo com a equação 3, e adotando uma eficiência de 65% no processo de DTCM, para cada 1 mol de metano que entra no processo são gerados 2,6 mols de gás hidrogênio. Assim, a ETE em estudo com capacidade de geração de metano de 1751,96 m<sup>3</sup>/d, apresenta potencial de produzir 3644,08 m<sup>3</sup>/d de hidrogênio a partir do biogás advindo dos dois biodigestores anaeróbios.

No intuito de determinar a aplicação mais vantajosa energeticamente para a utilização de hidrogênio e do metano, foram realizadas as seguintes comparações:

i) potenciais de geração de energia térmica do metano e do hidrogênio (Tabela 2);

ii) potenciais de geração de energia elétrica do metano e do hidrogênio (Tabela 3).

**Tabela 2: Potenciais de geração de energia térmica do metano e do hidrogênio.**

Fonte	Produção	Poder Calorífico	Energia Térmica Gerada	Resultado
Metano	1251,4 kg/dia	50140 kJ/kg	6,27 x 10 <sup>7</sup> kJ/dia	Potencial do metano: 59,3% maior que o hidrogênio
Hidrogênio	325,4 kg/dia	121000 kJ/kg	3,94 x 10 <sup>7</sup> kJ/dia	

**Tabela 3: Potenciais de geração de energia elétrica do metano e do hidrogênio.**

Fonte	Produção	Eficiência de Conversão Elétrica	Energia Elétrica Gerada	Resultado
Metano	1251,4 kg/dia	30% eficiência	5,22 MWh/dia	Potencial do hidrogênio: 25,5% maior que o metano
Hidrogênio	325,4 kg/dia	60% eficiência	6,56 MWh/dia	

De acordo com a tabela 2, é possível analisar que o potencial de geração de calor do metano se apresenta 59,3% maior que o do hidrogênio. Por outro lado, a tabela 3 indica que, visando a geração de energia elétrica, o potencial do hidrogênio é 25,5% maior que o do metano.

Em momento posterior, analisou-se, através do *software*, o desempenho ambiental de quatro diferentes cenários: I) liberação do dióxido de carbono gerado pela combustão do metano produzido; II) conversão do metano em eletricidade; III) produção de hidrogênio pelo processo de DTCM; e IV) liberação do metano gerado à atmosfera sem queima. A tabela 4 apresenta os resultados das emissões realizadas; das emissões evitadas ao meio ambiente; e dos recursos naturais consumidos, no caso das depleções, em cada categoria intermediária de impacto, através do método de AICV ReCiPe 2008.

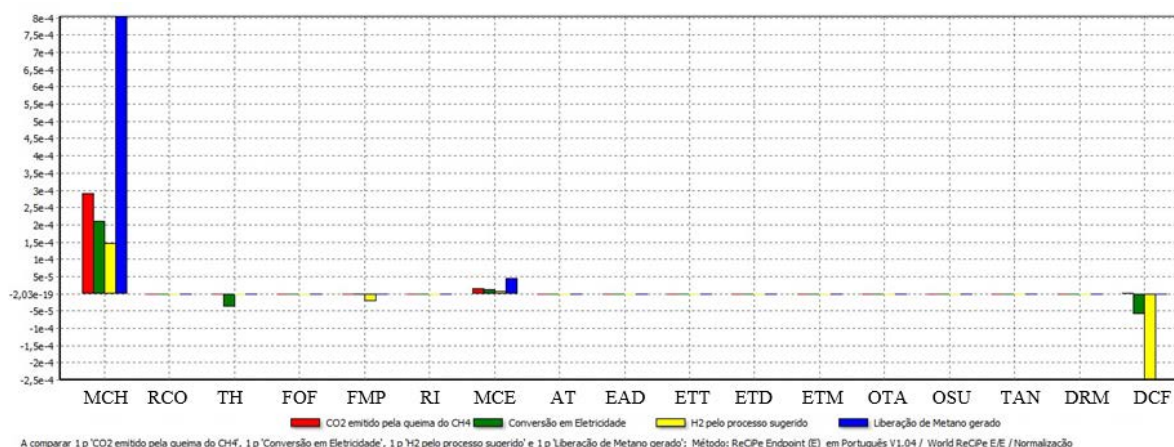
**Tabela 4: Emissões e/ou consumos das substâncias de referência para cada categoria de impacto.**

Categoria de impacto	Unidade das substâncias de referência	Cenários			
		I	II	III	IV
Mudanças Climáticas (MCH+MCE)	kg CO <sub>2</sub> eq	1,97	1,43	9,78x10 <sup>-1</sup>	5,43
Redução da Camada de Ozônio (RCO)	kg CFC-11 eq	0	-2,58x10 <sup>-8</sup>	-6,61x10 <sup>-13</sup>	0
Toxicidade Humana (TH)	kg 1,4-DB eq	1,60x10 <sup>-3</sup>	-1,28	-7,49x10 <sup>-4</sup>	0
Formação de Oxidantes Fotoquímicos (FOF)	kg NMVOC <sup>€</sup>	8,42x10 <sup>-6</sup>	-7,99x10 <sup>-4</sup>	-5,08x10 <sup>-3</sup>	0
Formação de Material Particulado (FMP)	kg PM <sub>10</sub> eq	8,05x10 <sup>-6</sup>	-2,64x10 <sup>-4</sup>	-1,96x10 <sup>-3</sup>	0
Radiação Ionizante (RI)	kg U <sup>235</sup> eq	0	-9,55x10 <sup>-2</sup>	0	0
Acidificação Terrestre (AT)	kg SO <sub>2</sub> eq	1,66x10 <sup>-5</sup>	-8,09x10 <sup>-4</sup>	-4,81x10 <sup>-3</sup>	0
Eutrofização na Água Doce (EAD)	kg P eq	9,16x10 <sup>-10</sup>	-3,80x10 <sup>-5</sup>	-2,18x10 <sup>-8</sup>	0
Eutrofização Marinha (EM)	kg N eq	2,93x10 <sup>-6</sup>	-1,80x10 <sup>-4</sup>	-1,94x10 <sup>-3</sup>	0
Ecotoxicidade Terrestre (ETT)	kg 1,4-DB eq*	3,20x10 <sup>-6</sup>	-1,63x10 <sup>-4</sup>	-9,20x10 <sup>-7</sup>	0
Ecotoxicidade da Água Doce (ETD)	kg 1,4-DB eq	9,73x10 <sup>-7</sup>	-7,96x10 <sup>-4</sup>	-2,52x10 <sup>-7</sup>	0
Ecotoxicidade Marinha (ETM)	kg 1,4-DB eq	3,75x10 <sup>-3</sup>	-1,10	-2,82x10 <sup>-4</sup>	0
Ocupação de Terra Agrícola (OTA)	m <sup>2</sup> a	0	-1,69x10 <sup>-2</sup>	0	0
Ocupação de Solo Urbano (OSU)	m <sup>2</sup> a	0	-7,95x10 <sup>-4</sup>	0	0
Transformação de Área Natural (TAN)	m <sup>2</sup>	0	-6,21x10 <sup>-4</sup>	0	0
Depleção Hídrica (DH)	m <sup>3</sup>	1,78x10 <sup>-5</sup>	-1,48x10 <sup>-3</sup>	0	0
Depleção de Recursos Minerais (DRM)	kg Fe eq	7,24x10 <sup>-4</sup>	-6,73x10 <sup>-3</sup>	-3,58x10 <sup>-3</sup>	0
Depleção de Combustíveis Fósseis (DCF)	kg oil eq	6,02x10 <sup>-4</sup>	-8,07x10 <sup>-2</sup>	-3,42x10 <sup>-1</sup>	0

<sup>€</sup> Non-Methane Volatile Organic Compounds. \* 1,4-Diclorobenzeno.

Os valores positivos, na tabela 4, indicam as emissões em cada unidade de referência, enquanto que os valores negativos indicam as emissões evitadas, ou seja, o que deixou de ser emitido com processos externos, ao se optar pelo respectivo cenário. Através destes resultados é possível observar que o cenário II – Conversão do metano em eletricidade – é menos impactante em 12 das 18 categorias analisadas, enquanto que o cenário III – Produção de hidrogênio pelo processo DTCM – é menos impactante em 6 das 18 categorias.

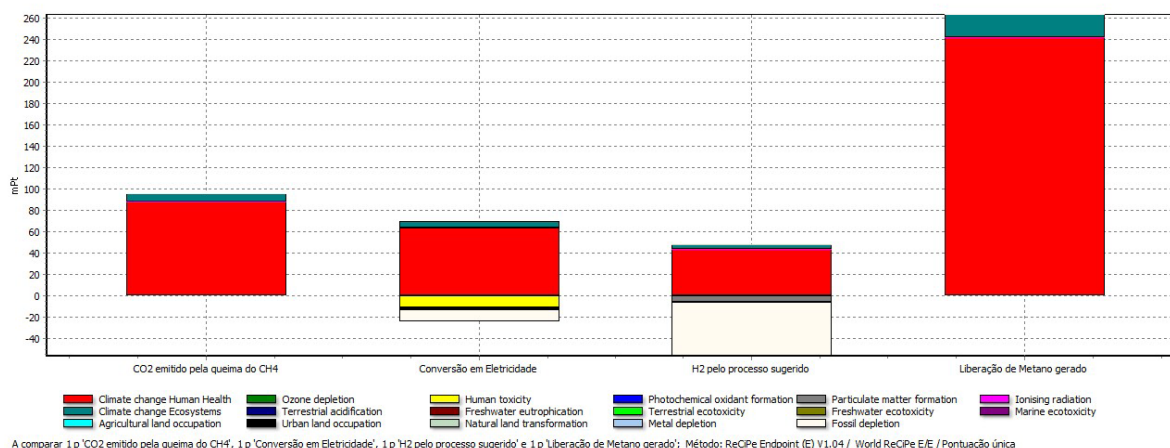
Para verificar quais são as categorias mais afetadas, os dados da tabela 4 são agregados e normalizados (figura 1). A unidade funcional de comparação é: impacto/m<sup>3</sup> de metano gerado. Valores positivos indicam danos ao meio ambiente, enquanto que valores negativos indicam benefícios ao meio ambiente.



**Figura 1: Normalização comparativa dos 4 cenários.**

Através da figura é possível observar que, as categorias mais impactadas são: Mudanças Climáticas para Humanos (MCH); Toxicidade Humana (TH); Formação de Material Particulado (FMP); Mudanças Climáticas para Ecossistemas (MCE); e, Depleção de Combustíveis Fósseis (DCF).

Em seguida, com o intuito de se comparar, de forma holística, os impactos dos processos, os dados normalizados são ponderados e somados, sendo transformados em pontuações únicas, as quais podem ser vistas na figura 2. A unidade de medição de impacto é apresentada em mPt (miliPontos) adimensionais. A unidade funcional de comparação é: impacto/m<sup>3</sup> de metano gerado. Valores positivos indicam danos ao meio ambiente, enquanto que valores negativos indicam benefícios ao meio ambiente.



**Figura 2: Comparação das pontuações únicas dos 4 cenários estudados.**

O cenário I – CO<sub>2</sub> emitido pela queima do metano – apresenta 95,52 mPt de impacto. O cenário II – Conversão do metano em eletricidade – apresenta 44,45 mPt de impacto. O cenário III – produção de H<sub>2</sub> pela DTCM – apresenta -9,13 mPt (impacto benéfico ao meio ambiente), enquanto que o cenário IV – Liberação de metano gerado – apresenta 263,40 mPt de impacto.

Conforme observado na tabela 4, o cenário II impacta um menor número de categorias intermediárias que o cenário III. Todavia, após a normalização e ponderação dos resultados, observa-se que o processo de produção de hidrogênio por DTCM é menos impactante que a utilização do metano para a geração de eletricidade para a própria ETE quando visto de forma holística. Além disso, ambos os cenários se mostraram vantajosos quando comparados à combustão do metano e sua liberação na forma de dióxido de carbono, ou sua simples liberação à atmosfera, que se apresenta como pior cenário.

## CONCLUSÕES

A ETE na qual foi baseado este estudo, empregando o processo de biodigestão do lodo, com capacidade de geração de 2502,8 m<sup>3</sup> por dia de biogás, com 70% de metano, apresenta um potencial estimado de produção de gás hidrogênio de 3644,08 Nm<sup>3</sup> por dia.

Conclui-se também que, a combustão do metano, visando a geração de energia térmica, apresenta potencial 59,3% maior que a utilização do gás hidrogênio, sendo, portanto, mais vantajosa a utilização do metano para tal finalidade. Por outro lado, com o objetivo de se produzir energia elétrica, torna-se mais vantajosa a conversão do metano a hidrogênio e a sua utilização para este fim, uma vez que isto representa uma potência 25,5% maior do que a gerada pelo metano.

Em relação ao desempenho ambiental, a utilização do metano como fonte geradora de gás hidrogênio (cenário III) se apresenta como opção menos impactante ao meio ambiente, quando visto de forma ponderada, apresentando -9,13 mPt de impacto/m<sup>3</sup> de metano gerado. O cenário II – Conversão do metano em eletricidade – se apresenta como o segundo processo menos impactante, com 44,45 mPt de impacto/m<sup>3</sup> de metano gerado. A liberação do metano à atmosfera (cenário IV) se apresenta como opção mais impactante ao meio ambiente, com impacto de 263,40 mPt/m<sup>3</sup> de metano gerado.

Ressalta-se que, todos os resultados, e suas conclusões, foram obtidos através das premissas adotadas ao longo deste estudo.



## AGRADECIMENTOS

A pesquisa e o desenvolvimento deste trabalho contaram com o incentivo da Companhia Estadual de Águas e Esgotos (CEDAE), em especial, da Gerência de Tratamento de Esgotos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ALVES, H. J.; JUNIOR, C. B.; NIKLEVICH, R. R.; FRIGO, E. P.; FRIGO, M.S.; COIMBRA-ARAÚJO, C. H. Overview of hydrogen production technologies from biogas and the applications in fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy* 38 (2013) 5215 – 5225.
2. ARMOR, J. N. The multiple roles for catalysis in the production of H<sub>2</sub>. *Applied Catalysis A: General*, v. 176, p. 159-176, 1999 *apud* EGUTE, 2010.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 14044: gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Requisitos e orientações. Rio de Janeiro, 2009. 46p.
4. AWADALLAH, A. E.; MOSTAFA, M. S.; ABOUL-ENEIN, A. A.; HANAFI, S. A. Hydrogen production via methane decomposition over Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiO<sub>2</sub> binary oxides supported Ni catalysts: Effect of Ti content on the catalytic efficiency. *Fuel* 129 (2014) 68–77.
5. AZEVEDO, M. G.; FERRAZ, H. C.; SALIM, V.M.; BORGES, C. P. Preparo de membranas de carbono para separação de hidrogênio. *Revista matéria*, v. 11, n. 4, p. 372-378, 2006 *apud* EGUTE, 2010.
6. BRAGA, Lúcia Bollini. Aspectos técnicos, econômicos e ecológicos de processos de produção de hidrogênio. Guaratinguetá, 2014. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.
7. BRASIL. Ministério de Minas e Energia. O ROTEIRO BRASILEIRO PARA A ESTRUTURAÇÃO DA ECONOMIA DO HIDROGÊNIO. 2005. Disponível em: <www.mma.gov.br/clima/energia/energias-renovaveis/hidrogenio>. Acesso em: 25/09/2014.
8. CHENA, Y.; WANG, Y.; XUB, H.; XIONG, G. Efficient production of hydrogen from natural gas steam reforming in palladium membrane reactor. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 80 pp.283–294, 2008 *apud* BRAGA, 2014.
9. EGUTE, Nayara dos Santos. Estudo do processo para a aceleração da geração de amônia a partir de resíduos avícolas visando à produção de hidrogênio. São Paulo, 2010. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2010.
10. FATSIKOSTAS, A. N.; KONDARIDES, D. I.; E.VERYKIOS, X. Production of hydrogen for fuel cells by reformation of biomass derived ethanol. *Catalysis Today*, p. 145-155, 2002 *apud* BRAGA, 2014.
11. FRISCHKNECHT, R.; TUCHSCHMID, M.; FAIST EMMENEGGER, M.; BAUER, C.; DONES, R. Strommix und Stromnetz. Sachbilanzen von Energiesystemen. Final report No. 6 ecoinvent data v2.0. Editors: Dones R. Volume: 6. Swiss Centre for LCI, PSI. Dübendorf and Villigen, CH, 2007.
12. GOEDKOOP, M.; HEIJUNGS, R.; HUIJBREGTS, M.; DE SCHRYVER, A.; STRUIJS, J.; VAN ZELM, R. ReCiPe 2008, A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. First edition (version 1.08) Report I: Characterisation; May 2013. Disponível em: <http://www.lcia-recipe.net/> Acesso em: 26/12/2013.
13. I BOUSTEAD. REFORMER HYDROGEN. Eco-profiles of the European Plastics Industry. A report by I Boustead for PlasticsEurope. Bruxelas – Bélgica, 2005.
14. JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Tratamento de Esgotos Domésticos. 6ª ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011.
15. LAPINSKIENE, V.; MARTINAITIS, V. The Framework of an Optimization Model for Building Envelope. *Procedia Engineering*, v. 57, p. 670–677, 2013.
16. LINARDI, M. Hidrogênio e Células a Combustível. *Revista Economia e Energia*, n. 66. Ano XI. Ministério de Minas e Energia. Fevereiro – Março, 2008.
17. MONDAL, K. C.; CHANDRAN, S. R. Evaluation of the economic impact of hydrogen production by methane decomposition with steam reforming of methane process. *International Journal of Hydrogen Energy* 39 (2014) 9670 – 9674.
18. PERRY, R. H.; GREEN, D. W.. Perry's Chemical Engineers' Handbook, 8th. Edt., New York, McGraw-Hill Book Co., 2007.
19. PRÉ CONSULTANTS. Software SimaPro 7 - Classroom. 7.2.3 Multi user. Copyright© PRé Consultants, 2010.