



GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO TÉRMICA - GGT

UTILIZAÇÃO DE MACRÓFITAS PROVENIENTES DE RESERVATÓRIOS HIDRELÉTRICOS COMO MATÉRIA-PRIMA PARA OBTENÇÃO DE UREIA

JULIO SANCHO LINHARES TEIXEIRA MILITAO(1);ANA PAULA MACHADO PEREIRA(2);PIERRE TEIXEIRA RODRIGUES(3);PAULO BASTOS GONÇALVES(2);JÉFERSON MARCOS PEREIRA DA SILVA MORAIS(2);DANIELA DE ARAUJO SAMPAIO(1) UNIR(1);NECTAR(2);JORDÃO ENERGIA(3)

RESUMO

Neste trabalho foram abordados balanços materiais e energéticos do processo de produção de ureia empregando biogás. É proposto o emprego de macrófitas de reservatórios hidrelétricos como matéria prima para a obtenção do biogás. Neste sentido, verifica-se a viabilidade de uma planta operacional em escala reduzida, já que quantidade disponível de matéria prima excede as demandas necessárias tanto para produção de energia térmica quanto insumo reacional. Computou-se um volume de retirada das macrófitas dos reservatórios de aproximadamente 117,5 m³/mês para produção de aproximadamente 45,4 kg/dia de hidrogênio; 66,4 kg/dia de amônia e 48 kg/dia de ureia.

PALAVRAS-CHAVE

Biogás, Macrófitas, Ureia, Hidrogênio

1.0 INTRODUÇÃO

Dentre os produtos de importância para a agricultura, a ureia se destaca devido ao seu conteúdo de nitrogênio, que por sua vez, é necessário para o desenvolvimento das plantas. Aproximadamente 90% da ureia produzida é utilizada como fertilizante nitrogenado (1) sendo que o preço da tonelada métrica ultrapassou US\$ 390 em junho de 2021 (2).

A obtenção da ureia pode ser conseguida por uma rota química baseada em três estágios. No primeiro estágio objetiva-se a formação do gás síntese ($H_2 + CO$) a partir da decomposição do gás metano (CH_4), no segundo estágio ocorre a reação entre o gás hidrogênio (H_2) obtido anteriormente e nitrogênio (N_2) para formar amônia (NH_3) e por fim, no último estágio, a amônia deverá reagir com dióxido de carbono (CO_2) para formar para formar carbamato de amônia (NH_2COONH_4), que será decomposto em ureia ($(NH_2)_2CO$) e água (H_2O) (3).

O metano necessário para a obtenção do gás síntese, ponto de partida da rota química para produção de ureia, é comumente proveniente de combustíveis fósseis como gás natural, carvão e nafta. Tais combustíveis apresentam baixo preço e ampla disponibilidade, no entanto como consequência de seu alto teor de carbono, liberam grande quantidade de gases relacionados ao efeito estufa, o que tem os tornado pouco atraentes (4, 5). Neste sentido, existe uma busca por alternativas de matérias-primas que possam substituir os combustíveis fósseis de forma que, a biomassa se apresenta como uma forte candidata em virtude de sua neutralidade de carbono (5). A digestão anaeróbia da biomassa, com consequente decomposição da matéria orgânica, possibilita a obtenção de biogás, que é uma mistura gasosa composta em grande parte por CH_4 e CO_2 , resultante da decomposição biológica espontânea da biomassa, pela ação de bactérias.

No Brasil, um exemplo de biomassa que se apresenta em quantidade considerável são algas e vegetação aquática (chamadas de macrófitas), que aparecem nos reservatórios de usinas hidrelétricas em razão de desequilíbrios no sistema hídrico. A proliferação exagerada dessas macrófitas nos reservatórios ocasiona vários problemas que vão desde a estética, o comprometimento da possível utilização da água até o acúmulo dessas plantas nas grades das turbinas (6), fazendo com que seja necessário o controle da vegetação. Dentre possíveis alternativas de aproveitamento/controle deste material, está a sua utilização como substrato para a produção de biogás.

A comunidade científica tem apontado a utilização do biogás proveniente de biomassa de origem diversas como palha de cereais (7), madeira (8) e eucalipto (5) para a produção de amônia. Visto que amônia é um composto químico elementar para a síntese de ureia, entende-se que adicionando uma próxima etapa ao processo, é possível obter ureia a partir de biogás de macrófitas.

As plantas tradicionais para a produção de ureia operam em capacidades diárias na casa de toneladas. Na presente proposta, as plantas de produção de biogás e ureia operariam com produção em escala reduzida de maneira que poderiam estar próximas aos reservatórios hidroelétricos, reduzindo os custos com o transporte de

macrófitas e destinando essa biomassa para a produção de ureia. Levando em consideração o acima exposto, este trabalho apresenta o desenvolvimento e estudo dos balanços materiais e energéticos do processo de obtenção de ureia a partir de biogás de macrófitas.

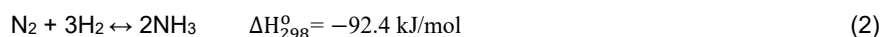
2.0 DESENVOLVIMENTO

A síntese industrial de ureia ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) envolve a combinação de amônia (NH_3) e dióxido de carbono (CO_2), em alta pressão, para formar carbamato de amônio ($\text{NH}_2\text{COONH}_4$) que, por sua vez, é desidratado pela aplicação de calor, para formar ureia e água (H_2O), de acordo com a seguinte reação química (1):

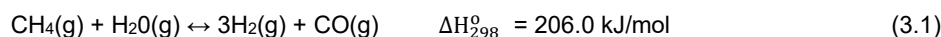


A primeira reação (entre amônia e gás carbônico) é rápida e exotérmica enquanto a segunda (desidratação do carbamato de amônio), é lenta e endotérmica. A conversão final observada, em termos de CO_2 , apresenta valores entre 50 e 80% sendo os maiores rendimentos alcançados com o aumento da temperatura e da razão NH_3/CO_2 . A uma pressão de aproximadamente 140 bar, temperaturas em torno de 183 °C e relação molar NH_3/CO_2 aplicada no reator de 2,95 a conversão de CO_2 observada é de cerca de 60% enquanto a conversão de amônia de 41% (9).

A amônia, matéria prima necessária para síntese da ureia, é obtida através da reação entre hidrogênio (H_2) e nitrogênio (N_2), em altas pressão e temperatura e na presença de catalizador ferro, conforme a seguinte reação química (2). Em temperaturas em torno de 400 °C e pressão em torno de 330 bar, observa-se uma conversão de cerca de 26% do hidrogênio (9).



Usualmente, o nitrogênio utilizado para a produção de amônia é proveniente do ar atmosférico enquanto o processo de interesse para obtenção de hidrogênio é baseado na reação química entre o de gás metano (CH_4) e vapor de água, em elevadas pressão e temperatura, como apresentado nas reações químicas (3.1 e 3.2):



O conjunto das reações apresentado para obtenção do hidrogênio a partir do metano é conhecido como reforma a vapor do metano e o produto da reação de reforma (mistura de H_2 e CO), por sua vez, é conhecido como gás síntese (*syngas*) (10).

Uma vez conhecidas as reações químicas envolvidas, pode-se então resumir o processo de obtenção de ureia a partir do biogás em três estágios:

- ESTÁGIO 1: Reforma do metano para a produção de hidrogênio;
- ESTÁGIO 2: Reação entre hidrogênio e nitrogênio para formar amônia e
- ESTÁGIO 3: Reação entre amônia e dióxido de carbono para formar ureia.

Para tanto, visando possibilitar um entendimento rápido do processo e seus estágios, bem como auxiliar nos cálculos de balanços materiais e energéticos elaborou-se um diagrama de blocos simplificado do processo, apresentado na Figura 1.

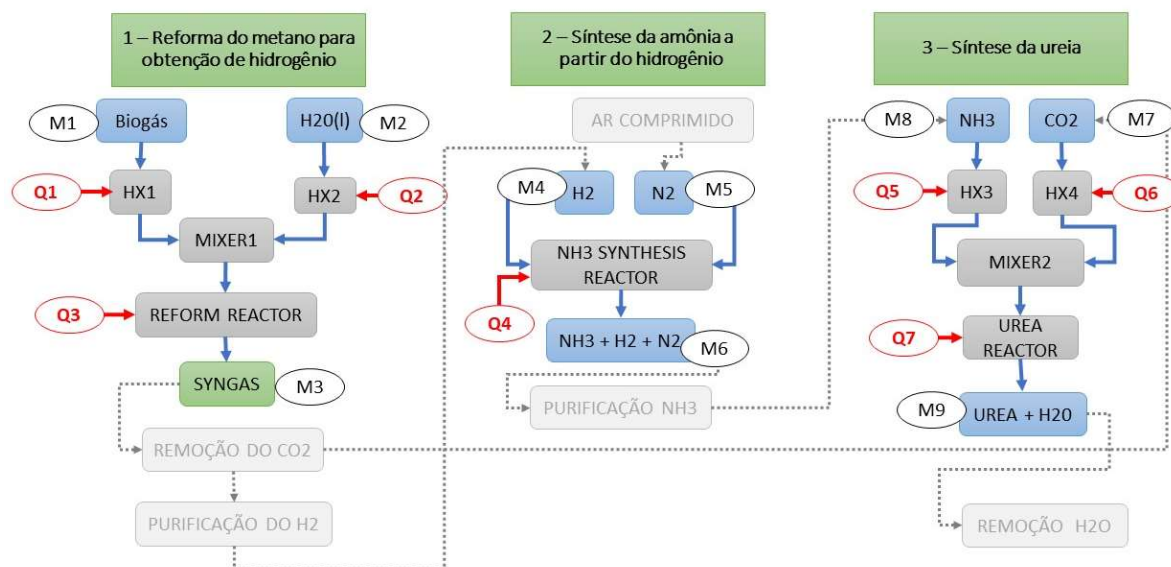


FIGURA 1 – Fluxograma (diagrama de blocos) simplificado para o processo de obtenção de ureia a partir de biogás. As letras “M” se referem à vazão mássica das correntes e as letras “Q” se referem ao fluxo de calor.

Neste estudo considerou-se que a matéria prima biogás, que alimenta o processo, está previamente dessulfurizada e com composição molar apresentada na Tabela 1.

TABELA 1 – Composição do biogás considerada no presente estudo

| ESPÉCIE | FRAÇÃO MOLAR, y_i (%) | MM* Espécie (kg/kmol) | MM* Biogás (kg/kmol) |
|-----------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| CH ₄ | 56,00 | 16,04 | 8,98 |
| CO | 3,00 | 28,00 | 0,84 |
| CO ₂ | 37,00 | 44,01 | 16,28 |
| N ₂ | 1,00 | 28,01 | 0,28 |
| H ₂ | 1,00 | 2,02 | 0,02 |
| O ₂ | 2,00 | 32,00 | 0,64 |
| TOTAL | 100,00 | - | 27,05 |

*MM = massa molar

Outras considerações, a respeito das reações químicas de interesse também são descritas: (a) razão H₂O/CH₄ na reação de reforma igual a 4 (11); (b) conversão de metano na reação de reforma igual a 90% (11); (c) conversão de H₂ na reação síntese de amônia igual a 26% (9); (d) conversão de CO₂ na síntese de ureia igual a 60% e razão NH₃/CO₂ de 2,95 (9).

2.1 Balanços materiais para produção de ureia a partir de biogás

O balanço material da reação de reforma a vapor de Metano para produção de Hidrogênio está representado na Tabela 2, considerando 90% de conversão de CH₄. Pode-se observar que no reator está sendo alimentada uma vazão mássica de água quatro vezes superior à vazão mássica de carbono (conforme as considerações iniciais) e, ao final do processo, a vazão de saída de água é inferior, uma vez que parte foi consumida na reação de reforma. Observa-se também que a vazão mássica de monóxido de carbono (CO) na saída é maior do que na entrada, uma vez que este composto é um dos produtos (gerado) da reação de reforma. Em relação ao dióxido de carbono, pode-se verificar que as vazões mássicas de entrada e de saída são iguais, uma vez que este balanço material foi realizado levando em consideração a reação química dominante (3.1) e nesta, não há geração do referido composto. Para finalizar, da Tabela 2, verifica-se que é necessária uma vazão mássica de 399,8 kg/dia de biogás com 56% de CH₄ e 1021,7 kg/dia de vapor de água para a produção de 45,4 kg/dia de hidrogênio.

TABELA 2 – Balanço material da reação de reforma a vapor de metano para produção de hidrogênio (ESTÁGIO 1)

| | Componente | ENTRADA (kg/dia) | CONSUMIDO (kg/dia) | GERADO (kg/dia) | SAÍDA (kg/dia) |
|---------|-----------------|------------------|--------------------|-----------------|----------------|
| BIO GAS | CH ₄ | 132,8 | 119,5 | 0,0 | 13,3 |
| | CO | 12,4 | 0,0 | 208,6 | 221,0 |
| | CO ₂ | 240,7 | 0,0 | 0,0 | 240,7 |

| | | | | | |
|--|------------------|------------|-------|------|-----------|
| | N ₂ | 4,1 | 0,0 | 0,0 | 4,1 |
| | H ₂ | 0,3 | 0,0 | 45,1 | 45,4 (M4) |
| | O ₂ | 9,5 | 0,0 | 0,0 | 9,5 |
| | H ₂ O | 1021,7(M2) | 134,1 | 0,0 | 887,6 |

O balanço material da reação de síntese de amônia (NH₃) a partir da combinação de Hidrogênio (H₂) e nitrogênio (N₂) está representado na Tabela 3, levando em consideração a conversão de 26% de H₂. Pode ser observado que há H₂ na saída do processo, uma vez que não há a conversão de 100% e que a vazão mássica de hidrogênio proveniente da etapa anterior (45,4 kg/dia) foi considerada como entrada para a presente etapa, gerando 66,4 kg/dia do produto de interesse (amônia, NH₃).

TABELA 3 – Balanço material da reação de síntese de amônia NH₃ (ESTÁGIO 2)

| Componente | ENTRADA (kg/dia) | CONSUMIDO (kg/dia) | GERADO (kg/dia) | SAÍDA (kg/dia) |
|-----------------|---------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| H ₂ | 45,4 (M4) | 11,8 | 0 | 33,4 |
| N ₂ | 210,1(M5) | 54,6 | 0 | 155,5 |
| NH ₃ | 0 | 0 | 66,4 | 66,4 (M7) |

Na Tabela 4, está apresentado o balanço material da reação química de síntese de ureia (reação química 1). Pode ser observado que a vazão mássica de NH₃ produzida na etapa anterior foi considerada como vazão de entrada para a presente etapa e que apenas 41% desta quantidade foi consumida, conforme as considerações citadas anteriormente. Assim, faz-se também é necessária uma vazão mássica de 31,8 kg/dia de CO₂ para a obtenção da vazão mássica desejada de 48 kg/dia de ureia.

TABELA 4 – Balanço material da reação de síntese de ureia (ESTÁGIO 3)

| Componente | ENTRADA (kg/dia) | CONSUMIDO (kg/dia) | GERADO (kg/dia) | SAÍDA (kg/dia) |
|------------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------------|-------------------|
| CO ₂ | 31,8 (M8) | 13,0 | 0,0 | 18,8 |
| NH ₃ | 66,4 (M7) | 27,2 | 0,0 | 39,2 |
| NH ₂ COONH ₄ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,00 |
| NH ₂ CONH ₂ | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 48,05 |
| H ₂ O | 0 | 0 | 0,00 | 14,40 |

2.2 Balanços energéticos para a produção de ureia a partir de biogás

O cálculo das vazões mássicas também se fez necessário para a realização dos balanços energéticos. As vazões mássicas, foram convertidas em vazões molares para, por sua vez, serem aplicadas nos cálculos das entalpias de entrada e saída dos componentes, cuja variação entre esses valores se refere ao calor, Q (energia) necessário para o fenômeno.

Da primeira lei da termodinâmica, o balanço de energia (BE) para um sistema aberto em regime permanente é dado por:

$$Q = \Delta H = H_{saída} - H_{entrada}$$

onde Q é taxa de calor e H é a entalpia.

Sabe-se também que a entalpia pode ser calculada pelo produto entre a capacidade calorífica e a variação de temperatura:

$$H = \int C_p dT$$

onde C_p é a capacidade calorífica do composto químico em questão.

A capacidade calorífica para um composto químico é função da temperatura, e pode ser descrita pela equação:

$$C_p \left(\frac{J}{mol \cdot K} \right) = a + b(T) + c(T^2) + d(T^3)$$

onde a , b , c e d são coeficientes tabelados, cujos valores estão apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 – Valores dos coeficientes para o cálculo da capacidade calorífica e entalpia de formação (ΔH_f^0) dos compostos químicos

| Composto | a | b | c | d | T | ΔH_f^0 (kJ/mol) |
|-----------------|-------|---------|-------------|-----------|----|----------------------------|
| CH ₄ | 34,31 | 0,05469 | 0,000003661 | -1,1E-08 | °C | -74,84 |
| CO | 28,95 | 0,00411 | 0,000003548 | -2,22E-09 | °C | -110,52 |
| CO ₂ | 36,11 | 0,04233 | -0,00002887 | 7,464E-09 | °C | -393,51 |

| | | | | | | |
|-----------------------------------|---------|-----------|-------------|------------|----|----------|
| N ₂ | 29 | 0,002199 | 0,000005723 | -2,871E-09 | °C | 0 |
| H ₂ | 28,84 | 0,0000765 | 0,000003288 | -8,678E-10 | °C | 0 |
| O ₂ | 29,1 | 0,01158 | -0,00000607 | 1,311E-09 | °C | 0 |
| H ₂ Oliq | 18,2964 | 0,47212 | -1,34E-03 | 1,31E-06 | K | -285,84 |
| H ₂ Ogas | 34,46 | 0,00688 | 7,60E-06 | -3,59E-09 | °C | -241,826 |
| NH ₃ | 35,15 | 0,02954 | 0,000004421 | -6,686E-09 | °C | -67200 |
| NH ₂ CONH ₂ | 90,93 | - | - | - | °C | -235500 |

Na Figura 1, é possível observar que antes de entrarem no reator forno de reforma, o biogás e a água passam por um equipamento: o trocador de calor (HX1 e HX2, respectivamente). Para o HX1 deve ser fornecida energia suficiente para aquecer o biogás da temperatura ambiente (25 °C) até a temperatura desejada de entrada no reator de reforma (370 °C). Já para o HX2, deve ser fornecida energia para aquecer a água de 25 °C até 240 °C). Nas Tabelas 6 e 7 estão apresentados os valores de entalpias calculados, necessários para o balanço energético.

TABELA 6 – Entalpias (H) de entrada (T = 25 °C) e saída (T = 370 °C) do biogás no trocador de calor (HX1)

| Componente | Hentrada (J/dia) | Hsaída (J/dia) |
|-----------------|---------------------|-------------------|
| CH ₄ | -6,19E+08 | -4,91E+08 |
| CO | -4,90E+07 | -4,44E+07 |
| CO ₂ | -2,15E+09 | -2,07E+09 |
| N ₂ | 0,00E+00 | 1,51E+06 |
| H ₂ | 0,00E+00 | 1,48E+06 |
| O ₂ | 0,00E+00 | 3,17E+06 |
| TOTAL | -2,82E+09 | -2,60E+09 |

$$Q1 = H_{saída} - H_{entrada} = -2,60 \times 10^9 - (-2,82 \times 10^9) = 221087,62 \frac{kJ}{dia}$$

TABELA 7 – Entalpias (H) de entrada (T = 25 °C) e saída (T = 240 °C) da água no trocador de calor (HX2)

| Componente | Hentrada (J/dia) | Hsaída (J/dia) |
|------------------|---------------------|-------------------|
| H ₂ O | -1,62E+10 | -1,33E+10 |

$$Q2 = H_{saída} - H_{entrada} = -1,33 \times 10^{10} - (-1,62 \times 10^{10}) = 2,93 \times 10^6 \frac{kJ}{dia}$$

Na Tabela 8 estão apresentados os valores de entalpias de entrada e saída dos compostos no reator de reforma, considerando as respectivas temperaturas de saída dos trocadores de calor como temperaturas de entrada no reator de reforma e considerando também que os produtos deixam o reator de reforma a 850 °C, temperatura de operação do reator.

TABELA 8 – Entalpias (H) de entrada e saída (T = 850 °C) da água no trocador de calor

| Componente | Hentrada (J/dia) | Hsaída (J/dia) |
|-------------------|---------------------|-------------------|
| CH ₄ | -4,91E+08 | -2,27E+07 |
| CO | -4,44E+07 | -6,69E+08 |
| CO ₂ | -2,07E+09 | -1,93E+09 |
| N ₂ | 1,51E+06 | 3,77E+06 |
| H ₂ | 1,48E+06 | 5,48E+08 |
| O ₂ | 3,17E+06 | 8,02E+06 |
| H ₂ Og | -1,33E+10 | -1,03E+10 |
| TOTAL | -1,59E+10 | -1,24E+10 |

$$Q3 = H_{saída} - H_{entrada} = -1,24 \times 10^{10} - (-1,59 \times 10^{10}) = 3,48 \times 10^6 \frac{kJ}{dia}$$

Os valores de entalpias de entrada e saída dos compostos envolvidos na reação síntese de amônia, então apresentados na Tabela 9. Neste caso foi considerada a temperatura ambiente (25 °C) para os cálculos das entalpias de entrada visto que 25 °C é aplicada como temperatura de referência e então poderíamos considerar a entalpia dos compostos puros (caso dos reagentes) como zero, simplificando os cálculos.

TABELA 9 – Entalpias (H) de entrada (T = 25 °C) e saída (T = 400 °C) no reator de síntese de amônia (NH₃)

| Componente | Hentrada (J/dia) | Hsaída (J/dia) |
|----------------|---------------------|-------------------|
| H ₂ | 0 | 1,81E+08 |

| | | |
|-----------------|---|-----------|
| N ₂ | 0 | 6,19E+07 |
| NH ₃ | - | -2,01E+08 |
| TOTAL | 0 | 4,19E+07 |

$$Q4 = 4,19 \times 10^7 \frac{kJ}{dia}$$

Nas Tabelas 10 e 11 estão apresentados os valores de entalpia calculados para aquecer a amônia (NH₃) e o dióxido de carbono (CO₂) da temperatura ambiente (25° C) até a temperatura desejável de entrada no reator síntese (63 °C), conforme ilustrado na Figura 3 (HX3 e HX4 respectivamente).

TABELA 10 – Entalpias (H) de entrada (T = 25 °C) e saída (T = 60 °C) da amônia no trocador de calor (HX3)

| Componente | Hentrada (J/dia) | Hsaída (J/dia) |
|-----------------|------------------|----------------|
| NH ₃ | -2,62E+08 | -2,57E+08 |

$$Q5 = Hsaída - Hentrada = -2,57 \times 10^8 - (-2,62 \times 10^8) = 5,41 \times 10^3 \frac{kJ}{dia}$$

TABELA 11 – Entalpias (H) de entrada (T = 25 °C) e saída (T = 63 °C) do dióxido de carbono no trocador de calor (HX4)

| Componente | Hentrada (J/dia) | Hsaída (J/dia) |
|-----------------|------------------|----------------|
| CO ₂ | -7,68E+08 | -7,65E+08 |

$$Q6 = Hsaída - Hentrada = -7,65 \times 10^8 - (-7,68 \times 10^8) = 2,81 \times 10^3 \frac{kJ}{dia}$$

Os valores de entalpia calculados para as espécies envolvidas na reação síntese de ureia, estão apresentados na Tabela 12. Considerou-se que o reator opera à temperatura de 185 °C, sendo esta a temperatura de saída. Como entalpia de entrada foram considerados os valores de saída dos trocadores de calor HX3 e HX4.

TABELA 12 – Entalpias (H) de entrada (T = 63 °C) e saída (T = 185 °C) dos compostos envolvidos na síntese de ureia

| Componente | Hentrada (J/dia) | Hsaída (J/dia) |
|------------------------------------|------------------|----------------|
| CO ₂ | -7,7E+08 | -4,46E+08 |
| NH ₃ | -2,6E+08 | -1,41E+08 |
| NH ₂ COONH ₄ | - | -1,77E+08 |
| H ₂ O | - | -1,89E+05 |
| TOTAL | -1E+09 | -7,63E+08 |

$$Q7 = Hsaída - Hentrada = -7,63 \times 10^8 - (-1 \times 10^9) = 2,59 \times 10^5 \frac{kJ}{dia}$$

2.3 Estimação da quantidade (kg/dia) necessária de macrófitas para produção de ureia

Pode-se afirmar que, na presente proposta, o biogás poderá ser utilizado em duas vias: 1) insumo para a reação de reforma do metano para a produção de hidrogênio e 2) insumo para a produção de energia térmica necessário nos processos químicos. Na primeira via, é necessária uma vazão mássica de 399,8 kg/dia de biogás (Tabela 2). Assim, considerando a massa específica do biogás com composição apresentada na Tabela 1, igual a 1,11 kg/m³, tem-se que o volume diário de biogás necessário para a primeira via do processo é de 361,7 m³.

Para a segunda via, o somatório de todas as taxas de calor e sua conversão para kWh, retorna uma taxa de calor total de 1928,77 kWh/dia. Foi estimado que cada m³ apresenta um potencial médio de 1,47 kWh de geração de energia térmica (13), assim, tem-se que o volume diário de biogás necessário para a segunda via é de 1305,21 m³.

TABELA 13 – Vazão volumétrica (m³/dia) de biogás para atender a demanda de insumo para reações químicas e geração de energia térmica em uma planta de produção de ureia

| Via | Volume de biogás necessário (m ³ /dia) |
|--|---|
| 1) insumo para a reação de reforma do metano para a produção de hidrogênio | 361,7 |
| 2) insumo para a produção de energia térmica necessário nos processos químicos | 1305,21 |
| TOTAL | 1666,9 |

Dalpaz (13) estudou várias espécies de macrófitas como substrato para produção de biogás e em seu estudo observou que o melhor desempenho foi de produção de 353,6 mL de biogás por grama de sólidos voláteis (matéria orgânica seca). Visto que o conteúdo de umidade de macrófitas é muito baixo (inferior a 5%), pode-se assumir uma razão de produção de 0,3536 mL de biogás por grama de macrófita ou ainda. 2,82 kg de macrófita/m³ de biogás.

Assim:

$$2,82 \frac{\text{kg macrófita}}{\text{m}^3 \text{ biogás}} \times 1666,9 \frac{\text{m}^3 \text{ biogás}}{\text{dia}} = 4714,1 \frac{\text{kg macrófita}}{\text{dia}}$$

Assumindo a massa específica de macrófitas em torno de 1600 kg/m³ (14):

$$\left(4714 \frac{\text{kg macrófita}}{\text{dia}} \right) \div \left(1600 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) = 2,94 \frac{\text{m}^3 \text{ macrófita}}{\text{dia}}$$

Considerando um tempo de retenção hidráulica (TRH) de 40 dias da biomassa no biodigestor, tem-se o volume mensal de retirada das macrófitas dos reservatórios de aproximadamente 117,5 m³ de macrófitas/mês ou 188032 kg de macrófitas/mês. Vale salientar que esta demanda de biogás caracteriza uma planta operacional em escala reduzida e, neste sentido subutiliza o volume mensal de biomassa (macrófitas) comumente disponível em reservatórios de usinas hidrelétricas.

3.0 CONCLUSÕES

A produção da ureia pela rota que emprega gás metano como agente propulsor, apresenta desafios que merecem atenção. Tais desafios englobam a necessidade de novas alternativas para substituir o uso de combustíveis fósseis como matérias primas, assim a presente proposta apresenta a viabilidade do emprego de macrófitas como substrato para a produção de biogás, que por sua vez, pode ser usado como fonte de metano e energia térmica.

A partir da realização de balanços materiais e energéticos, foi possível estimar a quantidade mássica de macrófitas necessária para atender as demandas de biogás usado como matéria prima para a obtenção de energia térmica e gás metano para uma planta de produção de ureia em escala reduzida. Foi computado que a partir de uma vazão de 399,8 kg/dia de biogás (361,7 m³), contendo 56% de metano, estima-se uma síntese de 45,4 kg/dia de hidrogênio; 66,4 kg/dia de amônia e por fim, 48 kg/dia de ureia. Para gerar a energia térmica necessária para a operação desta planta operacional seria necessária uma vazão de 1442,62 kg/dia (1305,21 m³) de biogás de macrófitas.

Sobretudo, demonstrou-se a exequibilidade do emprego de macrófitas para a produção do biogás necessário para produção de energia térmica e matéria prima reacional da rota química (1) reforma a vapor do metano presente no biogás; (2) síntese de amônia a partir do hidrogênio obtido na reforma a vapor e (3) síntese de ureia a partir da amônia obtida, principalmente no que se diz respeito à disponibilidade desta biomassa.

O presente trabalho é fruto do projeto "Manejo de macrófitas no reservatório Barra do Braúna – controle de florações de cianobactérias com aproveitamento da biomassa excedente para a produção de biogás, energia e ureia" com recursos do programa de P&D/ANEEL das empresas BARRA DO BRAÚNA ENERGÉTICA S.A. (Proponente) e ITIQUIRA ENERGÉTICA S.A. (Cooperada), CÓDIGO ANEEL P&D-06305-0219/2020, os quais os autores gostariam de agradecer a confiança e parceria

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SERGEEV, Y. A.; ANDERZHANOV, R. V.; VOROB'EV, A. A. Energy- and Resource-Saving Technologies and Equipment in Urea Production. **Russian Journal of General Chemistry**, v. 90, n. 6, pp. 1168–1172, 2020.
- (2) INDEXMUND. Disponível em: <https://www.indexmundi.com/pt/pre%C3%A7os-de-mercado/?mercadoria=ureia&meses=12>
- (3) DAVEY, W.; WURZEI, T.; LURGI, A. G (2010). Method for the production of urea from natural gas. U.S. Patent n. 7674932B2, filed Aug, 18 2005 and issued March 9, 2010.
- (4) GUO, J. M. Conversion rate of urea synthesis process and enhance research. **Guangdong Chemical Industry**, v. 15, pp. 104–111, 2013.
- (5) ARORA, P.; HOADLEY, A. F. A.; MAHAJANI, S. M.; GANESH, A. Small-Scale Ammonia Production from Biomass: A Techno-Enviro- Economic Perspective. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 55, pp. 6422–6434, 2016.
- (6) AGOSTINHO, A. A.; GOMES, L. C.; JULIO, H. F. **Relações entre macrófitas aquáticas e fauna de peixes**. In: THOMAZ, S. M.; BINI, L. M. (Ed.). Ecologia e manejo de macrófitas aquáticas. Maringá: Eduem, 2003. p. 261-280.

- (7) AHLGREN, S.; BAKY, A.; BERNESSON, S.; NORDBERG, Å.; Noren, O.; Hansson, P. A. Ammonium Nitrate Fertiliser Production Based on Biomass - Environmental Effects from a Life Cycle Perspective. **Bioresour. Technol.** v. 99, n. 17, pp. 8034, 2008.
- (8) GILBERT, P.; THORNLEY, P. **Energy and carbon balance of ammonia production from biomass gasification.** Proceedings of Bio-Ten conference; Birmingham, UK, 2010.
- (9) MAXWELL, G. R. **Synthetic Nitrogen Products: A Practical Guide to the Products and Processes.** Kluwer Academic Publishers. 2004. 450 p.
- (10) KOROBITSYN, M. A.; VAN BERKEL, F. P. F. CHRISTIE, G. M. **SOFC AS A GAS SEPARATOR.** Final Report, 2000. Available online: <https://www.yumpu.com/en/document/read/4911894/sofc-as-a-gas-separator-ecn> (accessed on 28 September 2020).
- (11) SHAGDAR, E.; LOUGOU, B. G.; SHUAI, E. G.; CHINONSO, O. P.; TAN, H. Process analysis of solar steam reforming of methane for producing low-carbon hydrogen. **RSC Advances**, v. 10, pp. 12582–12597, 2020.
- (12) KOROBITSYN, M. A.; VAN BERKEL, F. P. F. CHRISTIE, G. M. **SOFC AS A GAS SEPARATOR.** Final Report, 2000. Available online: <https://www.yumpu.com/en/document/read/4911894/sofc-as-a-gas-separator-ecn> (accessed on 28 September 2020).
- (13) DALPAZ, R. **AValiação Energética do Biogás com Diferentes Percentuais de Metano na Produção de Energia Térmica e Elétrica.** Dissertação (Mestrado em Sistemas Ambientais Sustentáveis) – Programa de Pós- Graduação em Sistemas Ambientais Sustentáveis, da Universidade do Vale do Taquari (UNIVATES). Lajeado – RS, 91 p., 2019.
- (14) DUTRA, J. C. F. **AValiação de Pré-Tratamentos FísicoQuímicos em Macrófitas Aquáticas na Produção de Energia.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Campinas – SP, 140 p., 2018.

DADOS BIOGRÁFICOS



Bacharel Em Química pela Universidade de Fortaleza (1981), mestrado em Química pela Universidade Federal do Ceará (1988) e doutorado em Química pela Universidade Federal do Ceará (1995), com pós doutoramento na Université de Nice - França. Professor Titular da Universidade Federal de Rondônia. Docente e Orientador no Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade e Biotecnologia da Amazônia Legal - PPG-Bionorte. Coordenador do Grupo de Pesquisa em Tecnologia e Inovação, que atua no desenvolvimento de projetos de P&D em parceria com concessionárias de energia elétrica, nas áreas de biocombustíveis, inversores e turbinas hidráulicas, além da síntese de materiais com propriedades magnéticas.

(2) ANA PAULA MACHADO PEREIRA

Graduação em Química pela Universidade Federal de Rondônia (2015)
Mestranda em Desenvolvimento Regional pela Universidade Federal de Rondônia
Pesquisadora de Projetos de P&D

(3) PIERRE TEIXEIRA RODRIGUES

Graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal Fluminense e Mestrando em Administração pelo IBMEC-RJ, na área de Estratégia Empresarial e Desenvolvimento de Negócios. Vinte e cinco anos de experiência desenvolvendo projetos em eficiência energética, autor de publicações no tema eficiência energética, gerenciamento e desenvolvimento de mais de 250 projetos de pesquisa e desenvolvimento no Programa da ANEEL, gerenciamento e execução de projetos sobre fontes renováveis de energia elétrica e coordenação de ações relacionadas a inserção

no mercado de produtos desenvolvidos em projetos de pesquisa. Espírito empreendedor, dinamismo, histórico de sucesso no desenvolvimento e gestão de projetos ligados ao setor.

(4) DANIELA DE ARAUJO SAMPAIO

Doutora em Engenharia de Alimentos pela Universidade Federal do Paraná (2016)

Professora Adjunta da Universidade Federal de Rondônia Atuação na Pesquisa na área de Processos de separação e Projetos de Processos Industriais

(5) PAULO BASTOS GONÇALVES

Especialista em Geração de Energia Limpa a partir do Biogás. Desenvolvimento de Negócios, Criação e Projetos em Biogás para a Agroindústria. Pós Graduação COPPE - UFRJ, Otimização de Sistemas Hidrotérmicos de Potência 1973/1974. Experiência na área de Planejamento Energético de Curto e Médio Prazo, atuação em Empresas do Setor Elétrico a partir de 1974. Engenheiro em Planejamento Energético na CHESF (1974/1975), Engenheiro em Planejamento Energético em FURNAS Centrais Elétricas (1975/2001), Engenheiro de Projetos de P&D na UTE Norte Fluminense - EDF(2016/2017). Núcleo de Empreendimento em Ciência Tecnologia e Artes - NECTAR, Consultor em Criação e Desenvolvimento de projetos em Biogás.

(6) JÉFERSON MARCOS PEREIRA DA SILVA MORAIS

Graduação em Química pela Universidade Federal de Rondônia (2017)

Mestrando em Desenvolvimento Regional pela Universidade Federal de Rondônia

Pesquisadora de Projetos de P&D