

## **Análise da combustão de biometano a partir de resíduos sólidos urbanos para inserção na rede de gás natural**

**Analysis of the combustion of biomethane from urban solid waste for insertion into the natural gas network**

**Análisis de la combustión de biometano a partir de residuos sólidos urbanos para su inserción en la red de gas natural**

Recebido: 18/02/2022 | Revisado: 25/02/2022 | Aceito: 01/03/2022 | Publicado: 11/03/2022

### **Harison Franca dos Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0682-7351>  
Universidade Estadual Paulista, Brasil  
E-mail: [harison.franca@unesp.br](mailto:harison.franca@unesp.br)

### **João Pedro Jenson de Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1355-2886>  
Universidade Estadual de Campinas, Brasil  
E-mail: [joaojenson1@gmail.com](mailto:joaojenson1@gmail.com)

### **Miguel Sales Porto de Sousa**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6942-3093>  
Universidade Estadual Paulista, Brasil  
E-mail: [miguelsp.sousa@gmail.com](mailto:miguelsp.sousa@gmail.com)

### **Felipe Augusto Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7377-2528>  
Universidade Estadual Paulista, Brasil  
E-mail: [felipe.santos@unesp.br](mailto:felipe.santos@unesp.br)

### **Luis Gonçalves da Silva Junior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-2324>  
Universidade Estadual Paulista, Brasil  
E-mail: [luis.goncalves@unesp.br](mailto:luis.goncalves@unesp.br)

### **Marielle Verger Nardeli**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1327-0272>  
Universidade Estadual Paulista, Brasil  
E-mail: [marielle.nardeli@unesp.br](mailto:marielle.nardeli@unesp.br)

### **Joice Aparecida Leal de Moura**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5445-5858>  
Universidade Estadual Paulista, Brasil  
E-mail: [joice.leal@unesp.br](mailto:joice.leal@unesp.br)

### **Clarissa Guimaraes e Miranda**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9916-6497>  
Universidade Federal de São João del Rei, Brasil  
E-mail: [issasjdr@hotmail.com](mailto:issasjdr@hotmail.com)

### **Renivaldo José dos Santos**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0079-6876>  
Universidade Estadual Paulista, Brasil  
E-mail: [renivaldo.santos@unesp.br](mailto:renivaldo.santos@unesp.br)

### **Leonardo Lataro Paim**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5113-6376>  
Universidade Estadual Paulista, Brasil  
E-mail: [leonardo.paim@unesp.br](mailto:leonardo.paim@unesp.br)

### **Resumo**

Com o crescimento da população e o aumento da demanda por energia surge a necessidade de desenvolvimento de fontes alternativas energia. O biometano, obtido a partir da purificação do biogás, que pode ser retirado da decomposição resíduos sólidos urbanos, presente em quantidades abundantes em muitas cidades brasileiras, tem se despontado como uma interessante alternativa a fim de complementar a utilização combustíveis gasosos, visto que o principal combustível utilizado atualmente é o gás natural, de origem fóssil e com impactos ambientais negativos em sua extração. Este trabalho promove a análise da viabilidade energética e ambiental da utilização do biometano para a injeção na rede de gás de natural, a partir de ferramentas de simulações computacionais. Os resultados obtidos, indicam que as emissões dos gases da combustão do gás natural e do biometano são praticamente equivalentes e, a diferença nos valores de temperatura de chama entre os combustíveis é de cerca de 7,1%. Assim, a inserção do

biometano na rede de gás natural, além de não implicar no aumento de impactos ambientais também não promove perdas significativas nas características energéticas da mistura.

**Palavras-chave:** Biometano; Gás natural; Biomassa; Bioenergia; Potencial energético.

### **Abstract**

With the growth of the population and the increase in demand for energy, the need arises for the development of alternative sources of generation. Biomethane obtained from biogas purification, which can be extracted from the decomposition of municipal solid waste, present in abundant quantities in many Brazilian cities, has emerged as an interesting alternative to complement the use of gases for combustion. Since the main fuel used today is natural gas, of fossil origin and with negative environmental impacts in its extraction, this article promotes an analysis of the energy and environmental viability of the use of biomethane for injection in the natural gas network, the computational tools. The results obtained indicate that the gas emissions from the combustion of natural gas and biomethane are practically equivalent and the difference in the flame temperature values between the fuels is around 7.1%. Thus, the insertion of biomethane in the natural gas network, besides not implying the increase of environmental impacts also does not promote significant losses in the energetic characteristics of the mixture.

**Keywords:** Biomethane; Natural gas; Biomass; Bioenergy; Energy potential.

### **Resumen**

Con el crecimiento de la población y el aumento de la demanda de energía surge la necesidad del desarrollo de fuentes alternativas de generación. El biometano obtenido de la purificación de biogás, que puede ser extraído de la descomposición de los residuos sólidos urbanos, presentes en cantidades abundantes en muchas ciudades brasileñas, se ha convertido en una alternativa interesante para complementar el uso de gases para combustión. Dado que el principal combustible utilizado en la actualidad es el gas natural, de origen fósil y con impactos ambientales negativos en su extracción, este artículo promueve un análisis de la viabilidad energética y ambiental del uso de biometano inyectable en la red de gas natural, las herramientas computacionales. Los resultados obtenidos indican que las emisiones de gases de la combustión de gas natural y biometano son prácticamente equivalentes y la diferencia en los valores de temperatura de llama entre los combustibles se sitúa en torno al 7,1%. Así, la inserción de biometano en la red de gas natural, además de no implicar el aumento de los impactos ambientales, tampoco promueve pérdidas significativas en las características energéticas de la mezcla.

**Palabras clave:** Biometano; Gas natural; Biomasa; Bioenergía; Potencial energético.

## **1. Introdução**

A utilização de recursos de origem fóssil para a produção de combustíveis tem sido complementada por fontes renováveis, pois o crescimento da população e conseqüentemente o aumento da demanda por energia tem colaborado para o esgotamento destes recursos. A queima de alguns destes combustíveis implica no acúmulo de gases de efeito estufa tornando o uso a longo prazo insustentável para produção de energia (Elgharabawy et al., 2021).

No desenvolvimento de alternativas energéticas eficientes e ambientalmente sustentáveis o Brasil é reconhecido como um dos principais precursores mundiais. Com sua vasta área territorial rica em recursos, sua matriz é formada por diversas fontes interligadas por um extenso sistema de transmissão e distribuição de energia (Lazaro et al., 2022). No caso dos combustíveis gasosos o fornecimento de gás presente em grande parte dos gasodutos é o gás natural, o qual permanece em estado gasoso sob condições atmosféricas normais sendo encontrado em bacias sedimentares, marinhas ou terrestres (Casey et al., 2016). O Brasil, apesar de possuir algumas dessas reservas, não possui ampla produção de gás natural, o que o obriga a realizar importações. Nesse contexto, como proposta de fonte energética limpa e sustentável, surge a reutilização dos resíduos sólidos urbanos (RSU) como alternativa ecologicamente viável para produção de combustíveis (Mendonça et al., 2021; Vieira et al., 2016).

Composto por matéria biodegradável e não-biodegradável, os RSU, ou lixo urbano, a decorrer do nível de urbanização, renda per capita e padrão de consumo de cada país, pode variar sua composição gravimétrica (Gutierrez-Gomez et al., 2021). No Brasil estima-se que são produzidos diariamente cerca de 240 mil toneladas de RSU, onde 51,4% são compostos de matéria orgânica (Batista et al., 2021).

O tratamento dos RSU é dividido em três métodos, o mecânico que a separa ou altera o tamanho do resíduo, o térmico que produz mudanças nas características devido a processos físico-químicos e o biológico, que tem como produto o biogás,

que ocorre a partir da ação de grupos de seres vivos no processo de digestão anaeróbica da matéria orgânica (Angelidaki et al., 2018; Luz et al., 2018).

De forma geral, o biogás possui de grandes quantidades de metano e dióxido de carbono e, em menor proporção, água, amoníaco, azoto, oxigênio, nitrogênio, siloxanos e sulfureto de hidrogênio (Raimundo et al., 2017; Scarlat et al., 2018). A decorrer do processo de purificação do biogás tem-se a obtenção do biometano (Khan et al., 2021). O processo baseia-se em duas etapas, sendo a primeira correspondente a retirada de produtos nocivos que o compõem, e a segunda no ajuste do poder calorífico e densidade relativa através da remoção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) (Singhal et al., 2017). Após o tratamento, a composição do biometano é dada pelo teor mínimo de 90% de metano (CH<sub>4</sub>) com baixos índices de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>).

Considerando que a produção de biometano é descentralizada e assumindo as expectativas de inserção de 36 milhões de m<sup>3</sup> por dia na rede de gás natural para o ano de 2050, a promoção deste combustível, além de contribuir com os termos da política nacional de resíduos sólidos, favorece também a expansão das redes de distribuição de gás canalizado (EPE, 2021). Neste contexto, pode-se dizer também que além dos benefícios supracitados o combustível ainda contribui com a universalização e o fortalecimento dos mercados regionais através da geração distribuída de energia, geração de empregos locais e diminuição dos espaços ocupados pelos resíduos sólidos. Outro grande benefício deste combustível é que sua produção impacta significativamente na diminuição dos resíduos a serem destinados a aterros sanitários, aterros controlados e lixões, aumentando a vida útil destes locais. Além disso, a queima deste combustível produz balanço neutro do carbono, devido a absorção de CO<sub>2</sub> pelas plantas (Piñas et al., 2016).

Visto as características positivas do emprego do biometano, este trabalho contempla o estudo de utilização do mesmo como combustível alternativo ao gás natural, por meio de ferramentas de simulação computacional, a fim de se analisar a viabilidade energética e ambiental da injeção do biometano na rede de gás.

## 2. Metodologia

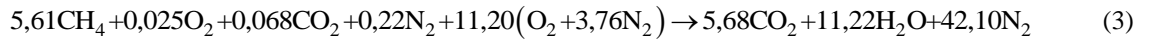
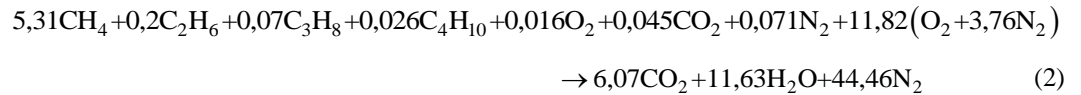
A metodologia utilizada para o desenvolvimento deste trabalho foi a pesquisa teórica/computacional e utilizou um software livre para realizar as simulações computacionais dos processos de combustão e como base foi utilizado o trabalho de Andreadou (Andreadou, 2016). Visando identificar a viabilidade energética do biometano, utilizou-se o ambiente de simulação COCO (CAPE-OPEN to CAPE-OPEN), o qual é constituído pelos componentes COFE (CAPE-OPEN Flowsheet Environment), TEA (Thermodynamics for Engineering Applications), COUSCOUS (CAPE-OPEN Unit-operations Simple Package) e CORN (CAPE OPEN Reactions Numerics Package).

A fim de se desenvolver uma interface intuitiva para fluxo de produtos químicos, utilizou-se o COFE, onde foi modelado o fluxograma apresentado na Figura 1, em que a cada stream foi atribuída condições específicas como temperatura, pressão, fração molar e fluxo. Além disso, houve também a inserção de operadores unitários como o mixer (havendo a mistura ar/combustível) e fixed conversion reactor (reator para o qual a conversão de uma reação específica).

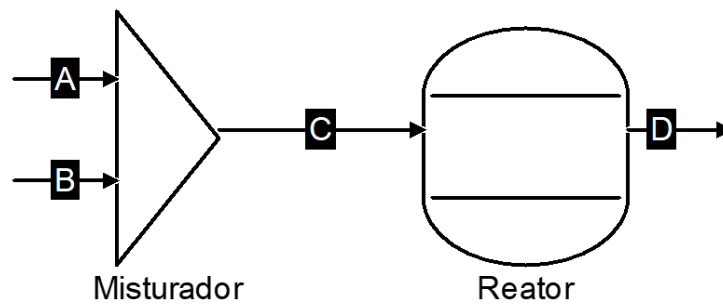
Baseado na condição de referência para fornecimento de gás exposto nas resoluções ANP N° 685 e N° 852, é estabelecido a pressão de 1 bar e temperatura de 293,15 K (20 °C) para os *stream* A e B, respectivamente para o ar e o combustível (biometano ou gás natural) com fração molar correspondente a sua composição e, também o ar com 79% de nitrogênio e 21% de oxigênio, considerando ideal (ANP, 2017, 2021). A referenciar o mixer, conforme assegura (Li et al., 2021), a presente razão estequiométrica ar-combustível, onde determinará o fluxo que irá ao misturador, visto que representa a quantidade estequiométrica de oxidante em relação a certa quantidade de combustível, é apresentada. Como consequência o *stream* C representa o fluxo originário do mixer que está sendo destinado ao reator de conversão fixa. No reator foi implementada a Equação (1) que representa as reações em série e as reações estequiométricas do gás natural (2) e do

biometano (3) do ambiente de simulação COCO.

$$\zeta_{i,j} = (x_{i,in} L_{in} - x_{i,l} L_l) / x_{i,in} L_{in} \quad (1)$$



**Figura 1.** Fluxograma utilizado durante simulação.



Fonte: Autores.

Identificando  $\zeta_{i,j}$  como a conversão do componente  $i$  para a reação  $j$ , também  $L_{in}$  como fluxos de entrada,  $L_{out}$  fluxos de saída e  $L_l$  taxas de fluxo total intermediário. Neste é selecionado a opção isotérmica, o qual é estabelecido a temperatura de 1500 K que direciona o correto funcionamento do reator. Dado que em um sistema de controle, segundo (Nise, 2000), são manipuladas entradas específicas para a obtenção de uma saída desejada. Assim, no *stream* D está presente o resultado de todas as etapas anteriores, o qual é indicado pela fração molar dos produtos possibilitando a análise da viabilidade energética do biometano.

Com objetivo de simular o processo de combustão do biometano e do gás natural sob o propósito de analisar as emissões dos gases, temperatura adiabática da chama, entalpia das misturas, taxa de calor específico, peso molecular das misturas, além de se obter a razão entre os mols de combustível pelos mols dos produtos, foi utilizado o software HPFLAME (Copyright 1996 McGraw-Hill). Realizou-se simulações da combustão do gás natural para as pressões de 1, 5 e 30 bar, onde se variou a razão de equivalência ( $\phi$ ) de acordo com a Tabela 1.

**Tabela 1.** Parâmetros analisados na combustão de biometano e gás natural.

VALORES DE RAZÃO ( $\phi$ )						
0,1	0,25	0,50	0,75	1,0	1,25	1,50

Fonte: Autores.

Na Tabela 2 são apresentados os parâmetros considerados para quantidades de átomos de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, valor de entalpia dos reagentes e temperatura.

**Tabela 2.** Parâmetros fixos da simulação no HPFLAME.

Combustível	Nº Carbono	Nº Hidrogênio	Nº Oxigênio	Nº Nitrogênio	Entalpia (kJ/kmol)	Temperatura (K)
Gás Natural	6,069	23,26	0,122	0,144	-82.292,0	1500
Biometano	0,93	3,60	0,072	0,12	-79.126,4	1500

Fonte: Autores.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Análise energética – COCO Simulator

De acordo com o objetivo proposto, realizou-se a caracterização do gás natural e do biometano a fim de se avaliar a inserção do biometano na rede de gás natural, considerando as regras de aprovação do controle de qualidade prevista pela ANP referente às resoluções Nº 852 e Nº 685, que estabelecem as especificações do gás natural e biometano no Brasil. A Tabela 3 apresenta as especificações do gás natural e do biometano, de acordo com as resoluções ANP Nº 852 e Nº 685.

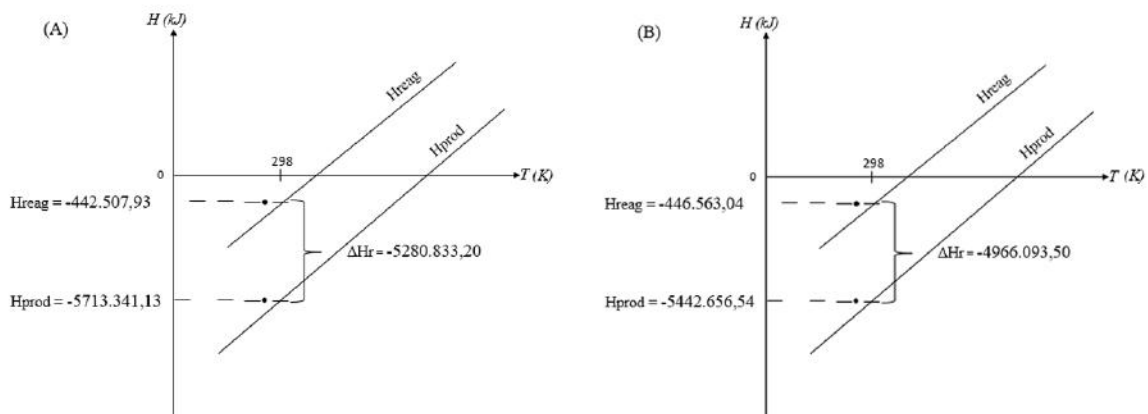
**Tabela 3.** Composição molar do gás natural (ANP Nº 852) e biometano (ANP Nº 685).

CARACTERÍSTICA	GÁS NATURAL	BIOMETANO
Metano (CH <sub>4</sub> ), min.	85 %	90 %
Etano (C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ), máx.	12 %	-
Propano (C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> ), máx.	6,0 %	-
Butano (C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> ), e metais pesados, máx.	3,0 %	-
Oxigênio (O <sub>2</sub> ), máx.	0,5 %	0,8 %
Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ), máx.	-	3,0 %
Dióxido de Carbono e Nitrogênio (CO <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> )	8,0 %	-
Dióxido de Carbono, Nitrogênio e Oxigênio (CO <sub>2</sub> + N <sub>2</sub> + O <sub>2</sub> ), máx.	-	10,0 %

Fonte: Autores.

Considera-se as especificações para o estudo da entalpia de reação  $\Delta H_r$ , que é numericamente inversa a entalpia de combustão  $\Delta H_c$ . Deste modo, é possível verificar na Figura 2 a proximidade de ambas as entalpias de reação dos combustíveis, supondo que a água nos produtos esteja em estado líquido, caracterizando um processo exotérmico.

**Figura 2.** Entalpias de reação para misturas estequiométricas em um processo exotérmico, com água no estado líquido para (a) gás natural e ar e (b) biometano e ar.



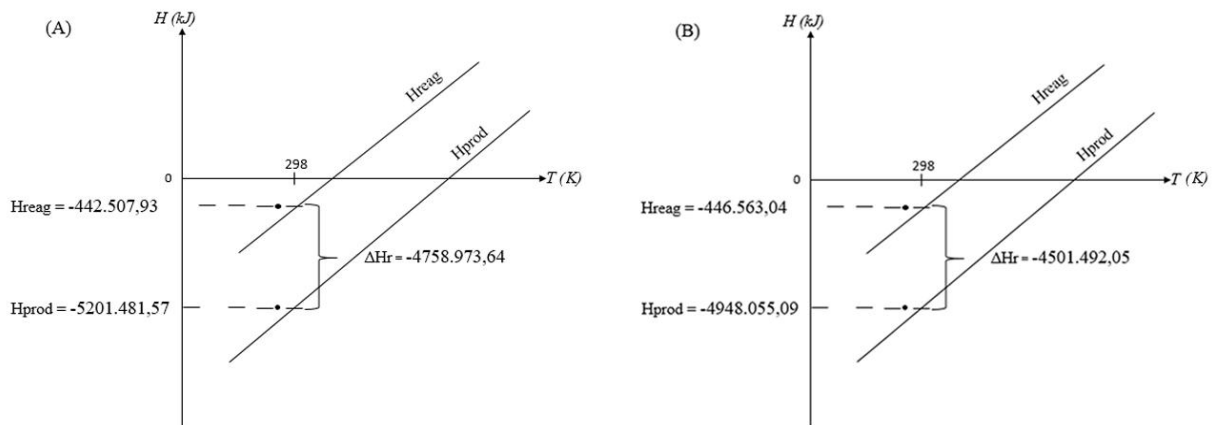
Fonte: Autores.

Com a entalpia de combustão obteve-se o Poder Calorífico Superior (PCS), definido pela combustão que se efetua a volume constante, onde a água formada durante a combustão é condensada e, o calor proveniente da condensação é recuperado (Duca et al., 2022; Murillo et al., 2022).

Segundo a ANP é estabelecido para o gás natural que o PCS deve estar entre 35.000 kJ/m<sup>3</sup> à 43.000 kJ/m<sup>3</sup>. Oriundo do cálculo estequiométrico, o PCS calculado foi de 42.692,60 kJ/m<sup>3</sup>. Para o biometano, específica que o PCS deve estar entre 35.000 kJ/m<sup>3</sup> a 43.000 kJ/m<sup>3</sup>. De forma análoga, o PCS obtido foi de 36.700,31 kJ/m<sup>3</sup>, atendendo as especificações para ambos os combustíveis analisados. No simulador COCO foi identificado a diferença de PCS entre o gás natural e o biometano de aproximadamente 14%, equivalente aos cálculos e correspondente às resoluções.

Na Figura 3 está representado a entalpia de reação para o processo exotérmico. Entretanto, supõe-se que a água é um dos produtos esteja no estado gasoso, encontrando, novamente, uma proximidade significativa de ambas as entalpias para mistura estequiométrica do biometano e ar. Para um processo exotérmico, com a água no estado gasoso.

**Figura 3.** Entalpias de reação para misturas estequiométricas em um processo exotérmico, com água no estado gasoso para (a) gás natural e ar e (b) biometano e ar.



Fonte: Autores.

Estando ausente nas resoluções previamente relatadas, o Poder Calorífico Inferior (PCI), é caracterizado pela energia efetiva disponível por unidade de massa de combustível após as perdas com a evaporação da água (Duca et al., 2022). Nessas condições, para a entalpia de combustão atribuída ao gás natural, o PCI encontrado é equivalente à 38.354,91 kJ/m<sup>3</sup> e, para o biometano 33.077,03 kJ/m<sup>3</sup>. Como comparação, assegura (Turns, 2012) que o PCI é menor que o PCS, deste modo os valores atribuídos a ambos os combustíveis se mostraram coerentes.

A proximidade dos valores de PCS e PCI de ambos os combustíveis é um fator que contribui para a consolidação da viabilidade da injeção do biometano na rede de gás natural. Para plena execução do mixer foi estabelecida a relação ar/combustível estequiométrica para ambos os combustíveis, sendo equivalente a 9,80:1 e 8,99:1, para o gás natural e o biometano, respectivamente.

Como resultado dos processos vislumbrados no fluxograma, stream D, da Figura 1, a Tabela 4 apresenta para ambos os combustíveis as frações molares dos produtos advindos da combustão completa. Sendo ressaltado o dióxido de carbono, este apresenta ao gás natural 0,64% a mais que o biometano, proximidade que ressalta a viabilidade de injeção do biometano na rede de gás.

**Tabela 4.** Fração molar dos produtos originários da reação do gás natural e do biometano, obtidas pelo simulador COCO.

<i>STREAM D</i>	GÁS NATURAL	BIOMETANO
Fração molar de gás carbônico	0,0812925	0,0818169
Fração molar do Nitrogênio	0,7172	0,71671
Fração molar de água	0,156585	0,154366

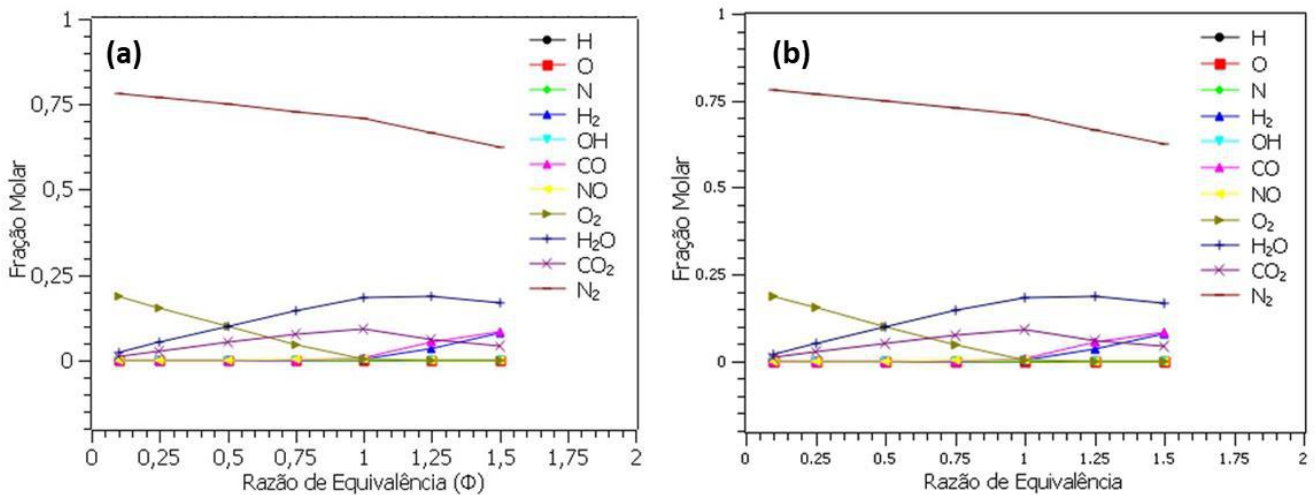
Fonte: Autores.

### 3.2 Análise dos gases de combustão

O estudo dos gases de combustão foi analisado pelo software HPFLAME que é baseado no algoritmo de Olikara e Borman (Olikara & Borman, 1975; Turns, 2012). As Figuras 4a e 4b apresentam o comportamento das frações molares dos gases emitidos na combustão do gás natural e do biometano, respectivamente, para as diferentes razões de equivalência e para a pressão intermediária analisada de 5 bar, uma vez que os resultados obtidos para as pressões de 1 e 30 bar são significativamente iguais.

Nota-se que tanto para o gás natural quanto para o biometano, as quantidades de oxigênio são nulas em todas as razões de equivalência e é observado que a maior fração molar é para o nitrogênio, que se comporta de forma inerte na reação de combustão e, de acordo com o aumento da quantidade de combustível em relação a quantidade de ar, a fração molar de nitrogênio inerte diminui.

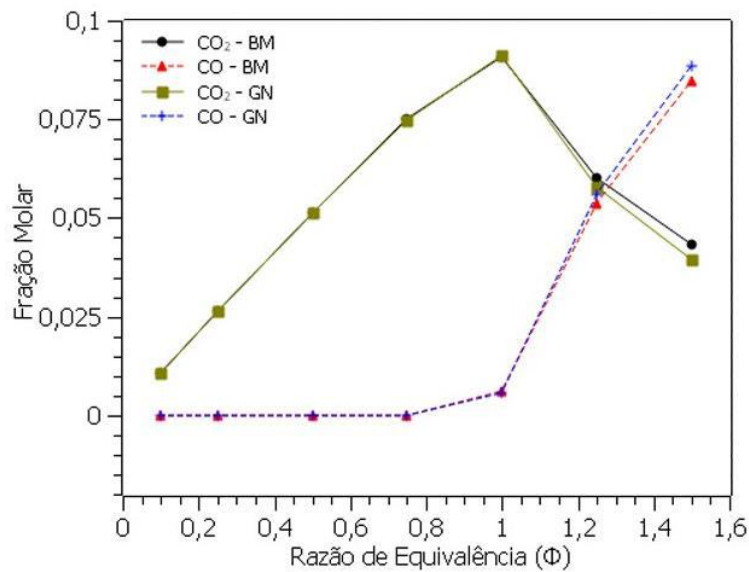
**Figura 4.** Fração molar de gases emitidos na reação de combustão para as diferentes razões de equivalência com pressão intermediária de 5 bar, para os combustíveis (a) gás natural; (b) biometano.



Fonte: Autores.

A Figura 5 apresenta o comportamento de gases que que contribuem para o efeito estufa na pressão de 5 bar para os dois combustíveis.

**Figura 5.** Fração molar de gases que contribuem para o efeito estufa na combustão de gás natural (GN) e biometano (BM) para as diferentes razões de equivalência para pressão intermediária de 5 bar.

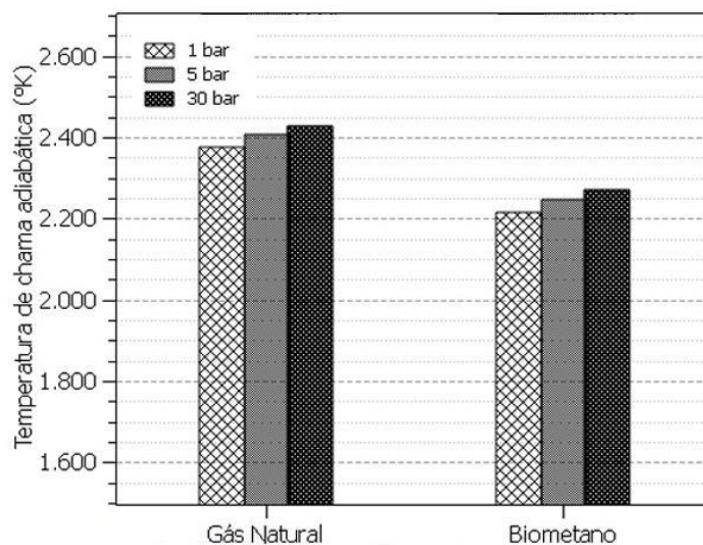


Fonte: Autores.

Não houve grandes diferenças entre as frações molares para os diferentes combustíveis. A quantidade de CO<sub>2</sub> e CO pode ser considerada crescente e consideravelmente nula, respectivamente, com o aumento das razões de equivalência até o ponto estequiométrico 1:1. Assim, a reação de combustão passa a ser incompleta, que é evidenciada pelo aumento da quantidade de CO.

Para o ponto estequiométrico 1:1, foi observado a maior temperatura de chama adiabática submetida à pressão constante. A Figura 6 compara estas temperaturas de chamas adiabáticas do gás natural e do biometano para as diferentes pressões analisadas.

**Figura 6.** Temperatura de chama adiabática de acordo com a pressão de 1, 5 e 30 bar para o gás natural e biometano.



Fonte: Autores.

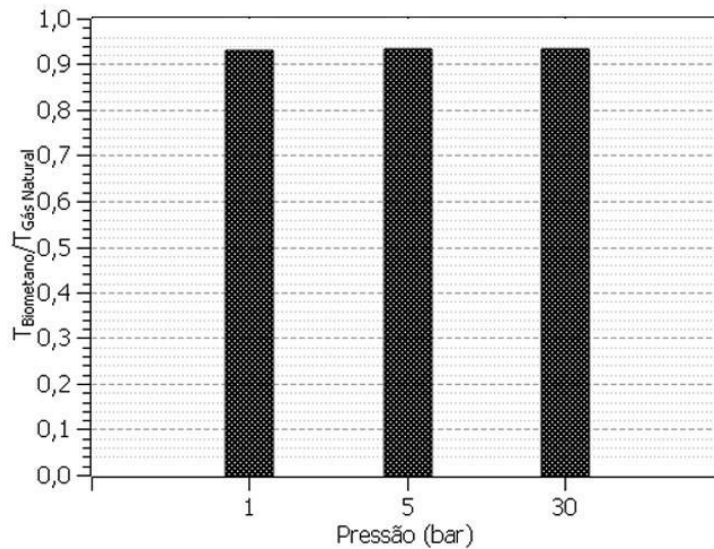
Observa-se que com o aumento da pressão há um pequeno crescimento no valor da temperatura de chama adiabática. Assim, para as diferentes faixas de pressão da rede de gás, que é classificada em: baixa (entre 0,5 e 4 bar) e média (entre 4 e 20



bar), não há variação significativa do potencial energético, tanto para o gás natural quanto o biometano.

Na Figura 7 as temperaturas de chama adiabática do biometano e do gás natural são comparadas através da razão (biometano/gás natural) para avaliar os impactos no potencial energético da inserção do biometano na rede de gás natural.

**Figura 7.** Temperatura de chama adiabática de acordo com a pressão de 1, 5 e 30 bar para a mistura de gás.



Fonte: Autores.

Nota-se que a temperatura de chama adiabática do biometano representa cerca de 93% da temperatura do gás natural, independentemente da pressão que ambos os combustíveis são submetidos. Reforçando que a inserção do biometano na rede de gás natural apresenta pouco impacto nas características energéticas da utilização de gases para combustão.

#### 4. Conclusão

Pode-se dizer que a inserção de biometano na rede de gás natural não implica no aumento de gases poluentes ( $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}$ ) que contribuem para o efeito estufa e impactam negativamente no meio ambiente. A diferença de cerca de 7,1% na temperatura de chama adiabática entre os combustíveis mostra que a inserção de biometano na rede de gás natural não impacta significativamente nas características energéticas do conteúdo. Além disso, o biometano obtido da purificação do biogás a partir de resíduos sólidos urbanos é uma importante alternativa para complementar a utilização de gases para a combustão, mesmo com a pequena diferença energética devido aos impactos locais positivos para a sua produção. Destaca-se novamente os comportamentos semelhantes para os dois combustíveis, viabilizando a inserção de biometano na rede de gás natural.

Além disso, o biometano é um combustível obtido a partir de resíduos sólidos urbanos, caracterizado como uma alternativa renovável para complementar a utilização de gases para combustão. Esta alternativa se torna ainda mais atraente quando se analisa fatores sociais, econômicos e ambientais positivos, como a geração de empregos locais, diminuição dos espaços ocupados por resíduos sólidos e, conseqüentemente a redução da contaminação do solo por esses resíduos. Além disso, a inserção de biometano na rede de gás pode diminuir consideravelmente a utilização de combustíveis de origem fóssil. Como consideração, o sucesso do biometano, visto o potencial, assim como o biogás, virá com a disponibilidade do mesmo a custos mais baixos e de diversas maneiras de aproveitamento, além disso, a disseminação das usinas ficará sujeita a melhoria na eficiência do processo, bem como para o surgimento de novas tecnologias de mistura e monitoramento (Ceconet et al., 2022).

Os trabalhos futuros visarão a aplicação da simulação em processos energéticos envolvendo biocombustíveis e combustíveis não renováveis visando a substituição ou utilização em blendas nos processos de combustão e aproveitamento

dos gases de exaustão. Uma outra área a ser estudada é a simulação dos processos de geração de compostos para aproveitamento energético por rotas ambientalmente amigáveis e economicamente viável.

## Referências

- Andreadou, C. (2016). *Modelling of Energy Production from Alternative Fuels*. International Hellenic University.
- Angelidaki, I., Treu, L., Tsapekos, P., Luo, G., Campanaro, S., Wenzel, H., & Kougias, P. G. (2018). Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. *Biotechnology Advances*, 36(2), 452–466. [10.1016/j.biotechadv.2018.01.011](https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2018.01.011)
- ANP. (2017). *Resolução ANP Nº 685*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
- ANP. (2021). *Resolução ANP Nº 852*. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.
- Batista, M., Caiado, R. G. G., Quelhas, O. L. G., Lima, G. B. A., Leal Filho, W., & Yparraguirre, I. T. R. (2021). A framework for sustainable and integrated municipal solid waste management: Barriers and critical factors to developing countries. *Journal of Cleaner Production*, 312, 127516. [10.1016/j.jclepro.2021.127516](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127516)
- Casey, J. A., Savitz, D. A., Rasmussen, S. G., Ogburn, E. L., Pollak, J., Mercer, D. G., & Schwartz, B. S. (2016). Unconventional natural gas development and birth outcomes in Pennsylvania, USA. *Epidemiology*, 27(2), 163–172. [10.1097/EDE.0000000000000387](https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000387)
- Cecconet, D., Callegari, A., & Capodaglio, A. G. (2022). UASB Performance and Perspectives in Urban Wastewater Treatment at Sub-Mesophilic Operating Temperature. *Water (Switzerland)*, 14(1), 115. [10.3390/w14010115](https://doi.org/10.3390/w14010115)
- Codignole Luz, F., Volpe, M., Fiori, L., Manni, A., Cordiner, S., Mulone, V., & Rocco, V. (2018). Spent coffee enhanced biomethane potential via an integrated hydrothermal carbonization-anaerobic digestion process. *Bioresource Technology*, 256, 102–109. [10.1016/j.biortech.2018.02.021](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.02.021)
- Duca, D., Maceratesi, V., Fabrizi, S., & Toscano, G. (2022). Valorising Agricultural Residues through Pelletisation. *Processes*, 10(2), 232. [10.3390/pr10020232](https://doi.org/10.3390/pr10020232)
- Elgharabawy, A. S., Sadik, W. A., Sadek, O. M., & Kasaby, M. A. (2021). A review on biodiesel feedstocks and production technologies. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 66(1), 5098–5109. [10.4067/S0717-97072021000105098](https://doi.org/10.4067/S0717-97072021000105098)
- EPE. (2021). *Balanço Energético Nacional 2021: Ano base 2020*. Empresa de Pesquisa Energética.
- Gutierrez-Gomez, A. C., Gallego, A. G., Palacios-Bereche, R., Leite, J. T. de C., & Neto, A. M. P. (2021). Energy recovery potential from Brazilian municipal solid waste via combustion process based on its thermochemical characterization. *Journal of Cleaner Production*, 293, 126145. [10.1016/j.jclepro.2021.126145](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126145)
- Khan, M. U., Lee, J. T. E., Bashir, M. A., Dissanayake, P. D., Ok, Y. S., Tong, Y. W., Shariati, M. A., Wu, S., & Ahring, B. K. (2021). Current status of biogas upgrading for direct biomethane use: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 149, 111343. [10.1016/j.rser.2021.111343](https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111343)
- Lazaro, L. L. B., Soares, R. S., Bermann, C., Collaço, F. M. A., Giatti, L. L., & Abram, S. (2022). Energy transition in Brazil: Is there a role for multilevel governance in a centralized energy regime? *Energy Research and Social Science*, 85, 102404. [10.1016/j.erss.2021.102404](https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102404)
- Li, X., Yan, P., Ma, C., & Wang, J. (2021). Structural design and optimization of a solar spouted bed reactor of biomass gasification. *Applied Thermal Engineering*, 194, 117058. [10.1016/j.applthermaleng.2021.117058](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117058)
- Mendonça, C., Oliveira, J. P. J. de, Hiranobe, C. T., Santos, R. J. dos, & Paim, L. L. (2021). Resíduos sólidos urbanos de poda de gramíneas como fonte alternativa de energia: um estudo de caso na cidade de Rosana. *Research, Society and Development*, 10(13), e124101320803. [10.33448/rsd-v10i13.20803](https://doi.org/10.33448/rsd-v10i13.20803)
- Murillo, H. A., Pagés-Díaz, J., Díaz-Robles, L. A., Vallejo, F., & Huiliñir, C. (2022). Valorization of oat husk by hydrothermal carbonization: Optimization of process parameters and anaerobic digestion of spent liquors. *Bioresource Technology*, 343, 126112. [10.1016/j.biortech.2021.126112](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.126112)
- Nise, N. S. (2000). *Engenharia de Sistemas de Controle* (3rd ed.). LTC.
- Olikara, C., & Borman, G. L. (1975). *A Computer Program for Calculating Properties of Equilibrium Combustion Products with Some Applications to I.C. Engines*. SAE Technical Paper Series. [10.4271/750468](https://doi.org/10.4271/750468)
- Piñas, J. A. V., Venturini, O. J., Lora, E. E. S., de Oliveira, M. A., & Roalcaba, O. D. C. (2016). Aterros sanitários para geração de energia elétrica a partir da produção de biogás no Brasil: Comparação dos modelos LandGEM (EPA) e Biogás (Cetesb). *Revista Brasileira de Estudos de População*, 33(1), 175–188. [10.20947/S0102-309820160009](https://doi.org/10.20947/S0102-309820160009)
- Raimundo, D. R., Pedreira, J. R., Sousa, L. C., Cordova, M. E. H., & Miranda, R. T. (2017). Estudo da viabilidade econômica e da produção energética do biogás gerado no tratamento de efluentes, aplicados à cidade de Pouso Alegre- MG. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, 6(5), 995–1016. [10.5380/rber.v6i5.52804](https://doi.org/10.5380/rber.v6i5.52804)
- Scarlat, N., Dallemand, J. F., & Fahl, F. (2018). Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129, 457–472. [10.1016/j.renene.2018.03.006](https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.006)
- Singhal, S., Agarwal, S., Arora, S., Sharma, P., & Singhal, N. (2017). Upgrading techniques for transformation of biogas to bio-CNG: a review. *International Journal of Energy Research*, 41(12), 1657–1669. [10.1002/er.3719](https://doi.org/10.1002/er.3719)
- Turns, S. R. (2012). *An Introduction to Combustion: Concepts and Applications* (3rd ed.). McGraw-Hill.
- Vieira, F. D., Francisco, A. C. de, & Bittencourt, J. V. M. (2016). Biometano e biogás como fontes de energia sustentável e ecologicamente viável. *Revista Espacios*, 37(18), 9. <http://www.2.revistaespacios.com/a16v37n18/16371809.html>