

APLICAÇÃO DE BIOGÁS PROVENIENTE DE ATERRO SANITÁRIO EM FORNOS CERÂMICOS E COLORÍFICOS

José Vinicius Sorato de Medeiros¹

Thiago Fernandes de Aquino²

Resumo: A dependência do uso constante de combustíveis não-renováveis para geração de energia térmica e elétrica é um dos maiores quebra-cabeças existentes na atualidade. A iminente escassez que os combustíveis fósseis carregam consigo e o grande potencial poluente dos derivados de petróleo são dois dos maiores motivos que movem os estudos para obtenção de alternativas viáveis para os combustíveis fósseis. Tendo isso em mente, ao longo das últimas décadas a utilização de biogás gerado em aterros sanitários, ganhou destaque em diversos setores da indústria por conta da possibilidade de substituição dos combustíveis existentes e pela sua obtenção natural a partir dos resíduos orgânicos. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo expandir o uso de biometano em fornos de alta temperatura (1200 a 1400 °C) a partir de ensaios em forno cadinho, determinando sua estequiometria, poder calorífico e avaliação das vantagens e desvantagens dele. O uso do biogás demonstrou-se suficientemente capaz de substituir o GLP para obtenção de altas temperaturas, respeitando sua estequiometria e características de queima, obtendo-se uma economia de 340% em oxigênio e emissão de CO₂ 370% menor que o gás liquefeito de petróleo.

Palavras-Chave: Biogás. Energia Renovável. Sustentabilidade. Eficiência Energética. Resíduos Sólidos Urbanos.

1 INTRODUÇÃO

O crescente aumento na produção de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um problema que se estende desde a década de 50, onde os índices de urbanização, intensificados com o êxodo rural, elevavam-se constantemente a cada ano. Esse crescimento descontrolado saturou quaisquer planejamentos urbanos da época, fazendo com que diversas dificuldades perdurem até hoje.

Uma dessas complicações é o manejo dos RSU gerados em grandes cidades, que por falta de espaço ou de preocupação por parte de órgãos públicos na época, acabaram por depositar esses resíduos em lixões a céu aberto e até mesmo

¹Graduando em Engenharia Química. Ano 2021-2. E-mail: vinicius1_vino@hotmail.com

²Professor do Centro Universitário UniSATC E-mail: thiago.aquino@satc.edu.br

em rios e aquedutos, causando prejuízos ambientais que estão sendo arcados até hoje.

Após o reconhecimento dos danos que esses tipos de descartes podem causar para o meio ambiente, formas menos agressivas de depósito de lixo foram elaboradas, sendo a mais comum o aterro sanitário. A grande importância da evolução no processo de despejo do lixo urbano é que desde a chegada do resíduo até sua decomposição e recuperação, todos os produtos e subprodutos gerados ao longo do tempo são controlados e tratados de forma que se tornem seguros no aspecto ambiental.

Um desses produtos é conhecido como biogás, mistura de alguns gases com a predominância do metano. Na escala de contribuição do efeito estufa, o metano (CH_4) ocupa o segundo lugar, contribuindo com 20% e ficando atrás apenas do dióxido de carbono (CO_2), que contribui com 60% do total de gases relacionados a esse efeito.

Contudo, apesar de sua contribuição ser significativamente menor, o metano possui um potencial de intensificação 23 vezes maior que o gás carbônico. A forma encontrada para amenizar esse dano nos aterros, é a sua canalização para fora do subsolo seguido de combustão em queimadores espalhados pelo terreno, gerando dióxido de carbono e água no processo.

Mesmo que esse procedimento reduza o dano, ainda assim acaba-se tornando um desperdício energético, já que essa queima preventiva não é aplicada em processo algum, e em casos específicos, parte desse gás é destinado a geração de energia para a própria empresa que coordena o aterro sanitário. Apesar da comercialização de biogás em botijões já ser uma realidade, suas aplicações ainda são suscintas e seguem sendo estudadas, para ampliação das capacidades de uso dele.

Dessa forma, o objetivo do trabalho é analisar e verificar se o custo-benefício do uso de biometano é aplicável em processos industriais com fornos de alta temperatura e avaliar o rendimento do mesmo em testes práticos de pequena escala. Para isso, serão simuladas as condições de um forno de larga escala em um forno cadinho (utilizado para testes de frita) utilizando as condições estequiométricas calculadas a partir da análise química do biogás fornecido.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A seguir, serão introduzidos os tópicos mais relevantes para compreensão deste trabalho.

2.1 COMBUSTÍVEIS

Um combustível é definido como uma substância química, que juntamente de um oxidante, produz uma reação exotérmica, ou seja, com liberação de energia na forma de calor (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007).

Sabe-se também, que os compostos formados por carbono e hidrogênio são comumente bons combustíveis, como pode ser observado nos combustíveis fósseis, que pertencem à família dos hidrocarbonetos.

Contudo, o carbono e hidrogênio nesses materiais costumam ser acompanhados de outros elementos, tais como enxofre, nitrogênio e oxigênio (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007).

A presença do enxofre se torna mais clara quando o combustível tem origem da decomposição da matéria orgânica, e se manifesta tanto dentro da composição dele quanto como um contaminante, como no caso do H₂S.

Para o homem, o H₂S tem grande potencial irritante, agindo primeiramente nos olhos e nariz. A exposição severa a esse gás pode causar coma imediato com ou sem convulsão e até a morte (FRARE; GIMENES; PEREIRA, 2009, p.1 apud PRICE; CHEREMISINOFF, 1995).

2.1.1 Gás natural

O gás natural é um combustível que ocorre naturalmente em jazidas de petróleo acarretada por intempéries do meio ambiente. Ele é encontrado tanto na forma não associada quanto na forma associada, ou seja, de forma não associada ao petróleo, ficando acima deste e sendo a primeira camada da jazida, e de forma associada ao petróleo, sendo separada no meio do processo de destilação fracionada nas petrolíferas (FIOREZE et al. 2013).

2.1.2 Biogás

Quando uma quantidade qualquer de biomassa passa pelo processo de decomposição com ausência de oxigênio livre, ocorre a produção de um gás com teor de 40 a 70% de metano, e o restante sendo composto de dióxido de carbono e alguns outros gases em menores quantidades, como o H_2S e N_2 (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2011).

Contudo, o termo “biogás” é ambíguo, “pois o gás que é produzido pela decomposição aeróbia (gás carbônico) também é um “biogás” (ABBASI; TAUSEEF; ABBASI, 2011, p. 1). Mesmo assim, usualmente é compreendido como biogás a mistura de metano e CO_2 produzida por meio da decomposição anaeróbia.

Um dos grandes desafios do implemento desse combustível nos processos industriais, encontra-se na contaminação indesejada do gás com H_2S , já que “A alta concentração de H_2S (~3500 ppm) causa corrosão nas partes metálicas do interior do motor.” (HUERTAS; GIRALDO; IZQUIERDO, 2011, p. 133).

Além disso, a queima dessa substância gera como produto o dióxido de enxofre, que é um dos grandes agentes poluidores e principal responsável pelo fenômeno da chuva ácida (HORIKAWA et al., 2004).

Mesmo com algumas dificuldades, cada vez mais se faz necessário o uso dessas formas de energia sustentáveis. O avanço da tecnologia já permite com que esse poluente seja extraído antes da queima, podendo ser destinado em outros processos, e evitando os problemas de corrosão e poluição.

2.2 OXIDANTES

Segundo técnicos da CETESB (200-), um material é classificado como oxidante quando este possui capacidade de liberar oxigênio rapidamente, de forma que consiga manter uma reação de combustão ou quando o mesmo composto, submetido a um pequeno aumento na temperatura, libere oxigênio gasoso.

Os oxidantes mais conhecidos e comumente usados são o ar atmosférico e o oxigênio na sua forma pura (líquida ou gasosa). Porém, são conhecidos vários outros, tais qual o peróxido de oxigênio e o nitrato de amônio.

2.2.1 Ar atmosférico

O ar atmosférico é um dos oxidantes mais utilizados para os processos de combustão. Isso porque, o fato de ser extremamente abundante e com menor custo, o torna extremamente atrativo para operações que não envolvem temperaturas muito altas.

A composição volumétrica do ar corresponde a aproximadamente 78,08% de nitrogênio, 20,95% de oxigênio, 0,93% de argônio, 0,03% de dióxido de carbono e 0,01% de outros gases como metano, hélio, neônio etc. (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007).

2.2.2 Oxigênio líquido

Logo atrás do ar atmosférico, o oxigênio líquido é o oxidante mais comum no uso industrial por conta da sua pureza. A ausência de inertes garante que a combustão alcance temperaturas mais elevadas e que todos os reagentes sejam consumidos integralmente, desde que sejam aplicados os cálculos considerando os volumes estequiométricos.

2.3 COMBUSTÃO

O processo de combustão caracteriza-se por uma reação exotérmica muito rápida entre o combustível e oxidante, acompanhada por liberação de energia em forma de calor (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007, p.11).

De forma simples, a reação de combustão ocorre sempre que um reagente inflamável (combustível) entra em contato com um composto oxidante, formando uma chama estável e podendo ser manipulada para uso nos mais diversos processos que necessitam dessa energia gerada.

2.3.1 Combustão completa

A combustão ideal corresponde ao perfeito balanço químico dos reagentes, de forma que não exista excesso ou falta deles, formando gás carbônico, água e

dióxido de enxofre (em alguns casos) como produtos. Para essa situação, denomina-se como uma combustão completa (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007).

Por conta das incertezas e imprecisões nos equipamentos industriais, é comum manter-se um pequeno excesso de oxigênio, garantindo assim que todo o carbono existente seja convertido para sua forma mais oxidada.

2.3.2 Combustão incompleta

Diferentemente da combustão completa, a combustão incompleta ocorre quando se fornece a vazão insuficiente de oxidante para a queima, gerando subprodutos menos oxidados, como o monóxido de carbono (CO).

Isso se torna um problema a longo prazo, já que a geração de CO implica em uma menor entalpia, e por consequência, gerando menos calor por mol de combustível.

Além disso, o monóxido de carbono é extremamente poluente e tóxico, sendo conhecido pela sua facilidade em causar asfixia e problemas respiratórios ao longo prazo por conta da sua ligação com a hemoglobina (PINA; FURLAN, 2007).

2.3.3 Razão de equivalência

Chama-se razão de equivalência a expressão matemática que define o tipo de queima obtida, a partir da relação entre a quantidade de combustível fornecida pela quantidade de oxidante presente na reação. Para calcular-se essa razão, utiliza-se a Eq. 1:

$$\Phi = \frac{m_{are} * m_c}{m_{ce} * m_{ar}} \quad (1)$$

Onde:

Φ = Razão de equivalência (---)

m_{are} = Massa de oxidante estequiométrico (Kg)

m_{ce} = Massa de combustível estequiométrico (Kg)

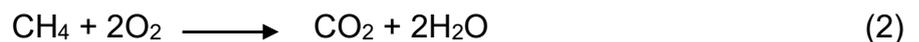
m_{ar} = Massa de oxidante fornecido (Kg)

m_c = Massa de combustível fornecido (Kg)

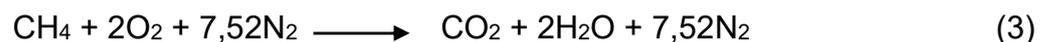
Para valores de $\Phi > 1$, tem-se uma combustão rica (com excesso de combustível), e para valores de $\Phi < 1$, tem-se uma combustão pobre (com excesso de oxigênio) (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007).

2.4 ESTEQUIOMETRIA DA COMBUSTÃO

Para reações de combustão em geral, compreende-se que a queima de compostos na presença de oxigênio tende sempre à formação de água e gás carbônico. A Eq. 2 representa a queima do gás metano em condições ideais:



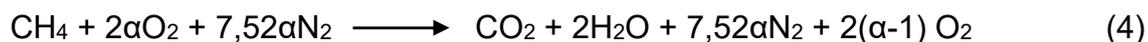
Contudo, esse resultado irá variar dependendo das circunstâncias do ambiente em questão, do combustível e do oxidante utilizado. Caso a mesma reação ocorresse utilizando-se ar atmosférico, ela seria descrita conforme apresentada na Eq. 3:



2.4.1 Excesso de oxidantes

“O excesso de ar é definido como o percentual acima da quantidade estequiométrica de ar, sendo este quase sempre necessário para completar as reações do processo real de combustão.” (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007, p.19).

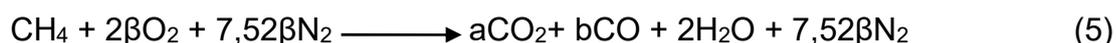
Como forma de garantir o máximo aproveitamento do poder calorífico do combustível, usualmente utiliza-se um excesso de ar ou oxigênio no processo. Esse excesso pode ser representado pela letra grega α , sendo calculado a partir da relação entre a vazão de ar real pela vazão estequiométrica. Dessa forma, a reação é representada de acordo com a Eq. 4:



2.4.2 Deficiência de oxidantes

Na deficiência de oxigênio, as reações de combustão tendem a ter dificuldades em transformar os carbonos e sulfetos na sua forma mais oxidada (CO_2 e SO_2 , respectivamente) gerando novos subprodutos que precisam ser analisados na estequiometria final.

Para fins de cálculo, indica-se a falta de oxidantes pela letra grega β , onde $\beta \leq 1$, representando o percentual real de oxidante fornecido na reação. Sendo assim, a reação apresentada na Eq. 5 fica representada como:



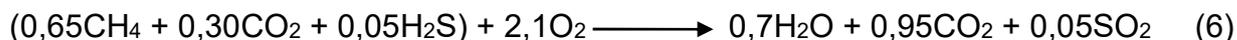
Os coeficientes a e b podem ser calculados de acordo com o balanço estequiométrico e com o valor de β . Nessa situação, para valores de $\beta < 0,75$, o valor de a se torna negativo, ou seja, utilizando-se 75% da vazão mínima de oxigênio necessária para a combustão, a produção de dióxido de carbono cessa e apenas produz-se monóxido de carbono (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007).

2.4.3 Estequiometria envolvendo biogás

Para se avaliar a estequiometria de um combustível gerado biologicamente, é importante conhecer quais gases estão presentes na mistura e em qual quantidade. Segundo Rasi (2009), a variação nos índices de metano, gás carbônico e outros contaminantes, está diretamente relacionada com os materiais fornecidos no biodigestor para decomposição.

Isso implica que para cada planta de biogás, um estudo detalhado precisa ser feito e avaliado, garantindo a qualidade do mesmo e possibilitando a adição de sistemas de enriquecimento se necessários.

Estima-se que a composição geral do metano gerado em aterros, é de 45-65% de CH_4 , 30-40% de CO_2 e 15-500 ppm de H_2S . Sendo assim, pode-se montar a reação demonstrada na Eq. 6 para um combustível com essa composição química:



É importante ressaltar que apesar de participar da reação e ser um gás com poder calorífico bom, o H_2S é o principal problema na implantação de um sistema de queima utilizando biogás. Isso porque, o poder corrosivo deste ao entrar em contato com a água, gera a corrosão de tubulações, motores e maçaricos, causando prejuízos financeiros que precisam ser levados em consideração.

2.5 TEMPERATURA

“Usualmente, chamamos de temperatura a quantidade que informa quão quente ou frio é um objeto em relação a algum padrão” (MOURA; AGUIAR, 2016, p.1).

Com isso, pode-se dizer que a temperatura é um indicador da quantidade de calor que um determinado elemento ou objeto possui em um determinado instante. Porém, esse valor não é absoluto, já que dependendo do referencial adotado, chega-se em diversos valores diferentes para uma mesma situação.

Essa dependência de referencial, resulta nas diferentes escalas termométricas que existem no meio científico. Entre elas, as que mais se destacam são as escalas Celsius ($^{\circ}\text{C}$), Fahrenheit ($^{\circ}\text{F}$) e Kelvin (K).

2.5.1 Temperatura de chama adiabática

Define-se como temperatura de chama adiabática, a maior temperatura que pode ser obtida para os produtos da combustão, desconsiderando-se as perdas de energia para o sistema em estudo (CARVALHO JR; MCQUAY, 2007).

Esta, pode ser expressa em uma relação matemática que envolve o calor específico e as diferenças de temperatura em t_1 e t_2 :

$$\Delta H_c = \int_{T_i}^{T_f} \sum_i n_i * c_{pi} * dT$$

Onde:

ΔH_c = Entalpia de combustão ($J \cdot mol/kg$)

T_i = Temperatura inicial (K)

T_F = Temperatura de chama adiabática (K)

n_i = número de mols estequiométricos (mol)

c_{pi} = calor específico ($J/Kg.K$)

É necessário o uso do somatório para situações em que o produto da combustão é uma mistura de 2 ou mais gases (que é o caso do metano), integrando-se toda a equação por conta da variação de temperatura que ocorre naturalmente em um sistema.

2.5.2 Fatores de interferência da temperatura

Muitos elementos em um processo de combustão podem interferir na temperatura final da reação. Um dos fatores de interferência mais comum, é a resistência térmica.

Define-se a resistência térmica como uma relação inversa da condutividade térmica, ou seja, é a capacidade que um determinado material possui de dificultar a transferência de calor. Uma barra de ferro, por exemplo, consegue receber energia calorífica e transferi-la com facilidade, resultando em um aquecimento e um resfriamento mais rápido se comparado à um material cerâmico (considerado como um “isolante térmico”).

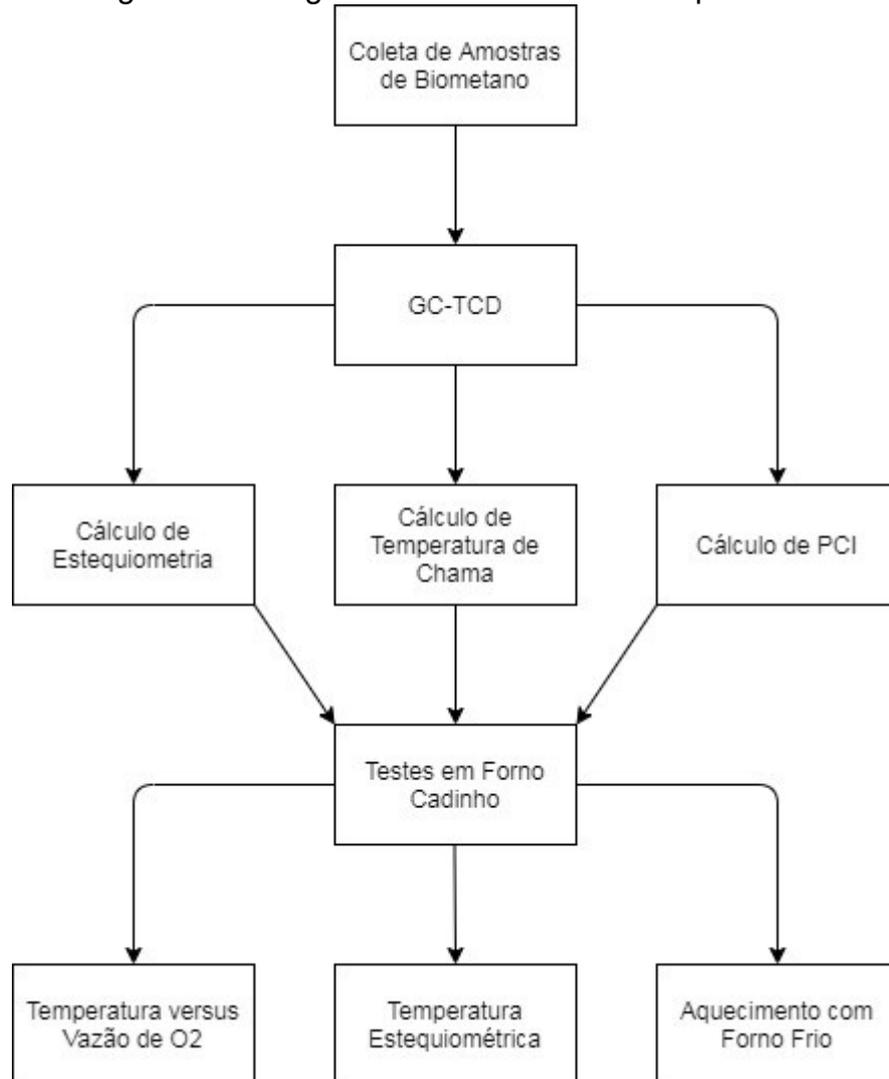
Tendo isso em mente, fornos que possuem materiais com melhor condução de calor tendem a trocar energia com o meio externo, reduzindo a temperatura máxima que a chama pode fornecer.

Além disso, a pureza dos gases envolvidos é outro fator determinante para a temperatura final de combustão. Isso porque, a presença de gases inertes, tanto no combustível quanto no oxidante, não gera calor (já que não participam da reação) e absorvem parte da energia calorífica gerada por conta da Lei Zero da termodinâmica (BARRETO et al, 2008)

3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são apresentados os materiais, equipamentos e instrumentação utilizada para elaboração do experimento. A Fig. 1 demonstra as etapas realizadas para obtenção dos resultados:

Figura 1: Fluxograma do Procedimento Experimental



Fonte: Do autor (2021)

3.1 COLETA DA AMOSTRA

A coleta do biometano foi realizada com ajuda de uma maleta e dois *bags* (tedlar) *Sulfinert* para armazenamento do biogás. A maleta atua como amostrador do tipo “pulmão”, e foi acoplada em local com fluxo de biogás. A coleta foi realizada na

empresa Novacolor Beneficiamento e Moagem LTDA., sendo o fornecimento do biogás realizado pela RACLI Limpeza Urbana, com amostragem feita em duplicata para maior confiabilidade dos resultados.

3.2 DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Tendo as amostras coletadas, foi realizada a análise química da mistura de gases por cromatografia gasosa com detector por condutividade térmica (GC-TCD), com o objetivo de quantificar a presença dos gases CO_2 , CH_4 , H_2S e inertes presentes. Com isso é possível calcular o teor de pureza da amostra coletada, dando continuidade aos testes.

3.3 ANÁLISE DE DADOS

A partir dos resultados da cromatografia, foram calculadas características importantes do biogás, tais como: estequiometria ideal, e poder calorífico inferior.

3.3.1 Estequiometria ideal

A definição da estequiometria balanceada para a mistura gasosa é parte fundamental na execução de uma análise de queima de um combustível. A partir da estequiometria geral da combustão, é possível elaborar uma relação que define a situação reacional ideal do processo.

Utilizando as composições de metano, gás carbônico e outros inertes, foi calculada e escrita a relação balanceada dos componentes, juntamente com a quantidade de oxigênio necessária para combustão completa do biogás. Essa relação foi utilizada no controle de vazão do combustível e oxidante no teste em forno cadinho.

3.3.2 Temperatura máxima de chama

A partir de equações presentes na literatura, calculou-se a temperatura máxima que se espera atingir na chama da queima do biometano, conforme apresentado na Eq.2.

Por conta de se tratar de uma mistura de gases, o calor específico de cada elemento deve ser estipulado, e a partir da análise química será gerado um valor proporcional a todos os componentes gasosos presentes na amostra.

3.3.3 Cálculo do poder calorífico

Utilizando os dados de poder calorífico existentes na literatura para os gases de combustão, calculou-se o PCI da amostra de biogás levando em consideração as frações que participam da reação de queima (metano e H_2S) em relação à totalidade da mistura.

Dessa forma, é possível comparar a capacidade de fornecimento de calor com os resultados obtidos de forma prática, definindo assim o grau de sucesso obtido no uso do biocombustível.

3.4 TESTES EM FORNO CADINHO

Tendo todos as informações necessárias, foi iniciada a etapa de testes práticos em um forno de pequena escala. O forno utilizado foi do tipo “cadinho”, sendo composto de uma estrutura metálica revestida com tijolos refratários para o insulamento térmico, com diâmetro interno de 550 mm, diâmetro externo de 650 mm e altura de 650 mm.

Além disso, acoplou-se à estrutura um maçarico que atua como fonte de calor para o aquecimento do forno. Este maçarico possui bocal duplo, com passagem interna de combustível e passagem externa para o oxigênio, e a abertura do bico utilizado para fornecimento de metano mede 10 mm de diâmetro.

Para controle da vazão do gás e do oxigênio, foi utilizado um painel elétrico, contendo dois pressurizadores e dois pressostatos (um para cada fluido) e dois rotômetros para pressões de 1,2 bar.

3.4.1 Temperatura versus vazão de O₂

O teste teve início após o completo aquecimento do forno até 1400°C. Começando de uma situação de deficiência de O₂, gradualmente foi elevada a vazão de oxidante e as leituras de temperatura foram realizadas.

A cada aumento de vazão, foi esperado pela estabilização da temperatura, e assim, anotou-se o valor medido. Em seguida, foi aumentada a vazão novamente, até que houvesse um excesso de oxigênio na queima.

As leituras de temperatura foram feitas com auxílio de um pirômetro portátil *Rayranger 3i* da marca *Raytech* previamente calibrado, que realiza a medição a partir da emissividade que sai do forno e é recebida pelo equipamento.

3.4.2 Temperatura estequiométrica geral

Após a obtenção dos resultados dos efeitos da queima com e sem excesso de oxigênio, foi preparado o forno na condição estequiométrica mínima, ou seja, a menor vazão de trabalho que mantenha o balanceamento dos gases. A partir disso, aumentou-se proporcionalmente a injeção dos gases dentro do forno enquanto foram anotadas as temperaturas.

Semelhante ao teste anterior, aguardou-se a estabilização da temperatura antes de cada registro, e só após isso é que se aumentou a taxa de entrada dos gases.

3.4.3 Aquecimento com forno frio

Com o forno de teste completamente frio, iniciou-se o aquecimento do forno de forma que atingisse a temperatura de 1400 °C em um determinado tempo. Utilizando os dados obtidos anteriormente, foi usada a condição mais favorável do biogás para fornecer calor, com a finalidade de medir a velocidade necessária para atingir a temperatura objetivo de 1400 °C.

O mesmo procedimento foi realizado com gás GLP fornecido em botijões P45, para que fosse possível comparar a eficiência do biometano em relação a outros gases combustíveis industriais. A partir da comparação, levantou-se os possíveis

benefícios e dificuldades da implementação desse combustível em uma situação de maior escala.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após a execução dos procedimentos de avaliação, foi realizada a análise e discussão dos resultados apresentados a seguir.

4.1 ANÁLISE DE DADOS

Os valores pela análise química fornecida pelos controladores da empresa RACLI estão dispostos conforme Tab. 1.

Tabela 1: Dados da cromatografia gasosa

Componente	Análise RACLI (%)	Amostra 1 (%)	Amostra 1.1 (%)	Amostra 2 (%)	Amostra 2.1 (%)
Metano (CH ₄)	86,00	89,98	90,08	93,02	92,61
Dióxido de Carbono (CO ₂)	10,00	3,47	3,40	3,40	3,44
Oxigênio (O ₂)	3,00	-	-	-	-
Sulfeto de Hidrogênio (H ₂ S)	-	0	0	0	0
Nitrogênio (N ₂)	1,00	5,06	4,96	2,36	2,28
Hidrogênio (H ₂)	-	0,15	0,15	0,05	0,04
Monóxido de Carbono (CO)	-	1,33	1,40	1,18	1,62

Fonte: Do Autor (2021)

Com esses dados, foi possível calcular o balanceamento da reação de oxidação do biometano e definir a quantidade de oxigênio necessária para cada m³ de combustível injetado no forno. Dessa forma, a relação detalhada dos componentes presentes no biogás, a quantidade de oxidante necessária para a reação e os produtos gerados da queima estão expostos conforme Eq. 7:



A parte inicial da equação demonstra as quantidades de cada composto por m³ de gás, seguido pela quantidade de oxigênio que satisfaz a condição de combustão completa. Em contraste à estequiometria do biogás, a Eq. 8 apresenta o

balanceamento referente ao gás liquefeito de petróleo (GLP):



É possível notar que em relação ao gás liquefeito de petróleo, a vazão de oxidantes para manter a estequiometria do metano é aproximadamente 3,41 vezes menor e a proporção de gás carbônico gerada é 3,66 vezes menor. Isso implica em uma redução de custo de 4 mols no consumo de oxigênio líquido para cada mol de combustível utilizado no processo e também na produção de poluentes na atmosfera, contudo, a existência de CO₂ contaminante na composição do biogás prejudica o seu poder calorífico real, tornando-o difícil de ser utilizado em situações que precisa-se de rápido aquecimento ou temperaturas elevadas.

Outro aspecto importante na caracterização de um gás, é o valor do seu poder calorífico. A Tab. 2 apresenta o PCI do biogás fornecido pela RACLI e também o PCI de algumas referências encontradas na literatura.

Tabela 2: Poder calorífico dos gases

Combustível	Poder Calorífico (Kcal/m³)
Biogás (RACLI)	7.436
Gás Natural	9.065
Gás GLP	9.658
Biogás Não-Tratado	1.571

Fonte: Do autor (2021)

A partir disso, observa-se que a diferença existente no PC do biometano obtido diretamente do RSU sem tratamento sofre uma considerável perda em comparação com o gás tratado para remoção de umidade e CO₂. Essa discrepância impossibilita o uso do biogás não tratado para geração de calor objetivando temperaturas elevadas em um forno, sendo melhor utilizado para produção de energia ou em alguns casos, para uso em motores de combustão.

Em relação ao gás natural, percebe-se uma significativa diferença de poder calorífico por conta da presença de gás carbônico contaminante no metano testado. Dessa forma, para que ambos atinjam o mesmo nível de fornecimento de calor, é preciso compensar a diferença com um aumento na vazão de trabalho, gerando um gasto maior de combustível em um mesmo período de tempo.

4.2 TEMPERATURA MÁXIMA ESTEQUIOMÉTRICA

As temperaturas máximas registradas para cada vazão, foram compiladas de acordo com a Tab. 3 abaixo:

Tabela 3: Temperatura máxima por vazão de metano

Vazão CH ₄ (m ³)	Vazão O ₂ (m ³)	Temperatura Estabilizada (°C)
8,0	13,52	1405
7,0	11,83	1353
6,0	10,14	1240
5,0	8,45	1012
4,0	6,76	870
3,0	5,07	-
2,0	3,38	-
1,0	1,69	-

Fonte: Do autor (2021)

Os dados presentes na Tab. 3 indicam uma maior queda de temperatura conforme a vazão de CH₄ é reduzida. Essa variação ocorre porque a quantidade de energia necessária para se manter uma determinada temperatura não é linear, ou seja, entre 4 e 5 m³ de vazão, existe um ganho mais amplo de temperatura se comparado com 7 a 8 m³ de CH₄, e assim sucessivamente até que se atinja uma temperatura próxima da temperatura de chama adiabática desse combustível.

A ausência de linearidade na manutenção da temperatura pode estar ligada com a dificuldade existente em isolar termicamente o forno, o que acentua a troca térmica das paredes dele com o meio externo conforme a temperatura aumenta, provocando uma resistência natural ao seu acréscimo.

Além disso, nas vazões de 1 a 3 m³ não foi possível obter uma leitura estável do valor de temperatura no forno, por conta das oscilações de vazão do biogás. Também é importante salientar que o combustível alimentado no forno não seja homogêneo da mesma forma que está descrito na análise química, causando picos de gás carbônico que apagam momentaneamente a chama do maçarico e provocando instabilidade no fornecimento de calor da reação.

4.3 TEMPERATURA VERSUS VAZÃO DE O₂

Após as análises da influência do excesso e ausência de oxigênio, expõem-se as leituras obtidas de acordo com a Tab. 4 a seguir.

Tabela 4: Temperatura por vazão de O₂

Vazão CH ₄ (m ³)	Vazão O ₂ (m ³)	Excesso/Ausência O ₂ (m ³)	Temperatura Estabilizada (°C)
8,0	22,0	8,48	1352
8,0	20,0	6,48	1363
8,0	18,0	4,48	1390
8,0	16,0	2,48	1400
8,0	14,0	0,48	1417
8,0	12,0	-0,48	1415
8,0	10,0	-2,48	1430

Fonte: Do autor (2021)

É possível perceber que em altas vazões, a temperatura atingida diminui em comparação com a temperatura estequiométrica máxima obtida no experimento anterior. Isso prova que o excesso de oxidante passa a causar o mesmo efeito de um inerte dentro do combustível, não participando da reação pois não existe mais elementos que possam ser oxidados e retirando calor do forno para que haja o equilíbrio de temperatura.

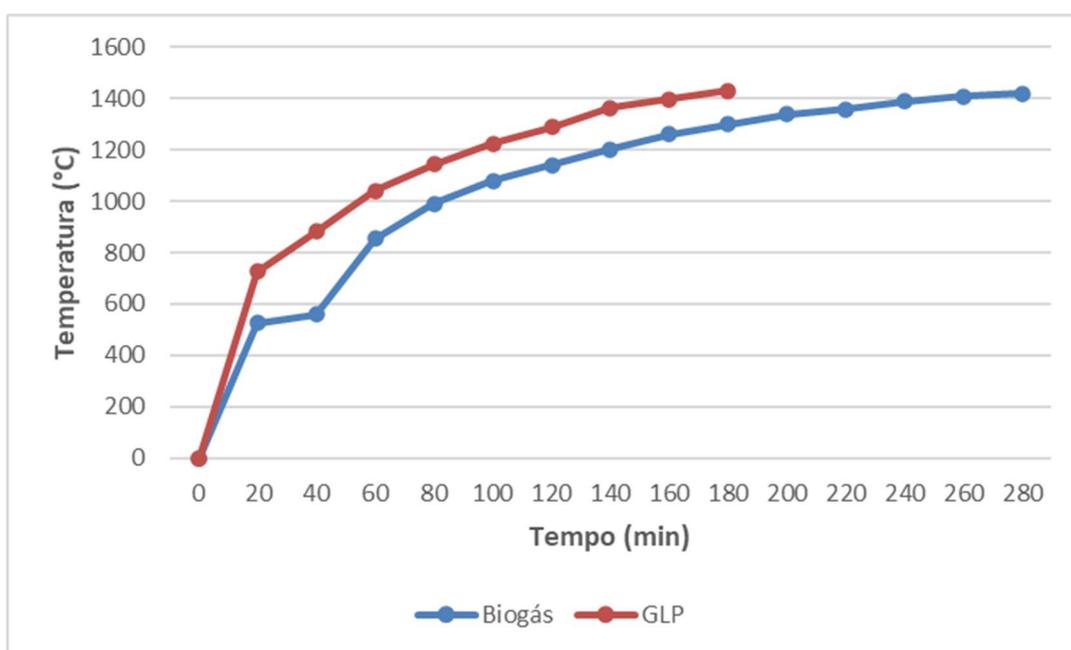
Em contrapartida, o efeito da combustão com falta de oxidantes não demonstra um comportamento tão intenso quanto o excesso. O aumento da temperatura nesse caso não é um resultado esperado, já que a presença de compostos menos oxidados implica em menor eficiência energética da queima, mas pode ser explicado pela forma que a estrutura do forno utilizado no teste é montada.

Para a montagem do maçarico no forno, existe um furo na parede do mesmo que é mais amplo do que o tamanho do maçarico, e também um furo na tampa que permite a leitura da temperatura no interior do forno. Sendo assim, existem duas entradas possíveis de ar atmosférico que estão compensando a falta de oxigênio injetada pelo maçarico e completando não intencionalmente a reação de combustão, fazendo com que não seja tão notória a influência da ausência de O₂.

4.4 AQUECIMENTO COM FORNO FRIO

Com as leituras de temperatura obtidas no aquecimento, organizou-se os dados e com eles, foram construídas as curvas de aquecimento pelo tempo, conforme Fig. 1. As curvas que demonstram a velocidade de aquecimento dos dois combustíveis avaliados.

Figura 1: Curva de aquecimento



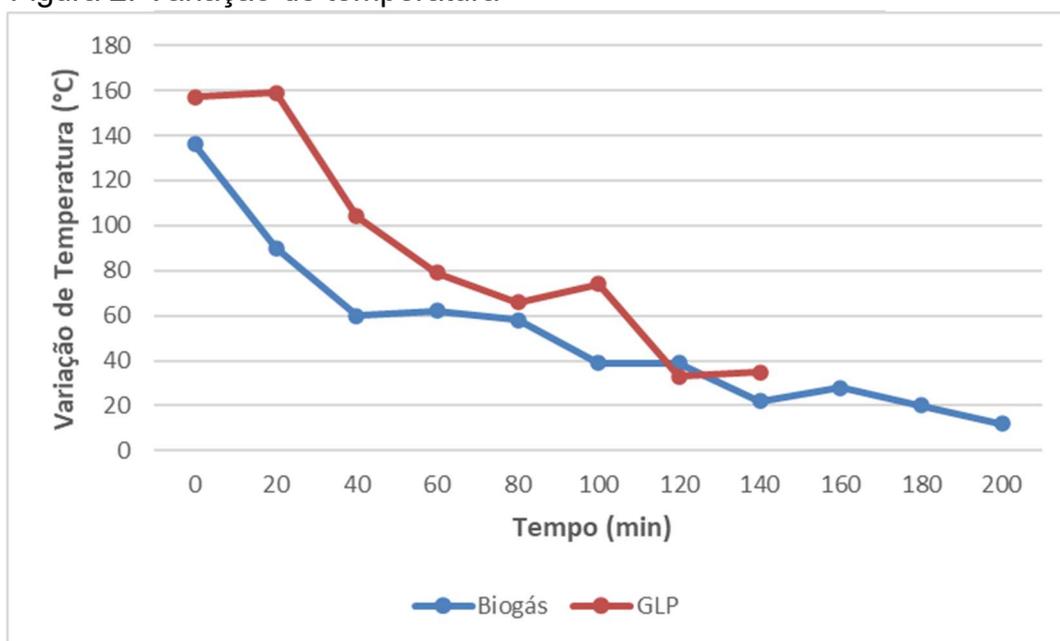
Fonte: Do autor (2021)

As curvas apresentadas demonstram a velocidade que os dois combustíveis obtiveram mediante aquecimento em condições estequiométricas. Pode-se observar que o gás liquefeito de petróleo (GLP) é significativamente mais rápido, atingindo 1400 °C em 3 horas de trabalho.

Em contrapartida, o biometano trabalhando em condição ideal levou 4 horas e 40 minutos para atingir a mesma meta do experimento, sendo significativamente mais lento que o GLP. Essa lentidão, apesar de não aparentar problema, pode dificultar seu uso em escala industrial, já que para fornos grandes, o aquecimento leva dias até que se obtenha a temperatura uniforme dentro do forno, ou seja, a diferença de 1 hora e 40 minutos poderia equivaler em um ou mais dias de produção parada além do que se espera.

A Fig. 2 demonstra a diferença que ocorre na variação da temperatura entre cada leitura, e exalta a diferença existente entre o poder calorífico dos dois combustíveis testados.

Figura 2: Variação de temperatura



Fonte: Do autor (2021)

Conforme os valores aumentam verifica-se uma gradual redução no acréscimo de temperatura que foi obtida entre as leituras com intervalos de 20 minutos. Essa queda é explicada pela resistência natural que existe no aumento de temperaturas, onde para cada unidade aumentada, a quantidade de energia calorífica necessária para elevar-se outra unidade é maior.

Além disso, a troca de calor existente entre a parede isolante do forno cadinho com o meio externo é acelerada pela diferença de temperatura do interior do forno com o meio externo (que está em temperatura ambiente), o que eleva a resistência ao aumento de temperatura em uma vazão constante de combustível.

Dessa forma, é possível assumir que o biogás na vazão constante em que foi testado estivesse atingindo seu equilíbrio de temperatura, ou seja, o ponto onde a troca térmica se iguala com o fornecimento de calor, resultando em uma faixa de temperatura estável e sem grandes variações, diferente do GLP, que demonstrou poder elevar ainda mais a temperatura caso o teste continuasse por mais uma hora.

Esse fenômeno está associado com a presença relativamente alta de gases inertes dentro da mistura de biogás, que além de não participarem efetivamente da reação, retiram energia do sistema para que a própria molécula seja aquecida e diminuem o seu poder calorífico, acentuando a disparidade existente entre os dois combustíveis.

5 CONCLUSÕES

Esse trabalho permitiu compreender as características do uso de biometano proveniente dos resíduos sólidos urbanos para fornos de alta temperatura, reforçando a versatilidade dos usos existentes para biogases em vários setores, incluindo o cerâmico.

Para isso, foi necessário levar os estudos desse combustível tanto na teoria, calculando suas propriedades e balanceando sua reação de combustão, e na área prática, avaliando seu potencial térmico e pontuando possíveis vantagens e desvantagens para implemento em larga escala.

Os resultados dos experimentos revelaram que o tratamento adequado do biogás extraído diretamente do aterro para redução da concentração de inertes, viabiliza seu uso na obtenção de altas temperaturas, podendo chegar além dos 1400°C e possuindo uma estabilidade significativa desde que o fornecimento seja constante.

Além disso, em relação ao GLP, existe uma significativa queda na quantidade necessária de oxigênio para uma reação completa, diminuindo gastos com oxidantes e reduzindo também a emissão de CO₂, onde o biometano economiza aproximadamente 3,4 vezes mais oxigênio e emite 3,7 vezes menos gás carbônico para a atmosfera.

Observou-se que apesar dos resultados promissores, em determinadas situações o biogás pode ser uma opção menos prática de uso quando em comparação com outros combustíveis disponíveis para uso, e seu fornecimento é muito mais desvantajoso para locais distantes. Além disso, seu poder calorífico mais baixo em relação ao gás liquefeito de petróleo faz com que o aquecimento do forno seja mais lento, aumentando o tempo de inatividade produtiva dele.

Outro ponto a ser destacado é a presença de H₂S, apesar de não detectada nas amostras testadas, mesmo em pequenas quantidades após o tratamento, levam a corrosão dos equipamentos metálicos ao longo do tempo, incluindo tubulações, motores e maçaricos. Dessa forma, para inclusão do biometano de forma consistente, seria preciso adaptar equipamentos com intuito de mitigar os efeitos corrosivos desse gás, instalando tubulações plásticas por exemplo, ou realizando manutenções preventivas de forma mais constante.

Dessa maneira, é possível definir que existe um potencial de uso para o fim estudado, mas que não pode ser aplicado necessariamente em todos os processos, já que algumas características do biogás interferem em pontos produtivos de maneira significativa. Em pesquisas futuras, espera-se avaliar a fundo a economia que pode ser gerada em relação aos custos de implementação do gás de aterro, incluindo as adaptações e materiais necessários para esse fim.

REFERÊNCIAS

ABBASI, Tasneem; TAUSEEF, Syed Mohammad; ABBASI, Shahid Abbas. **Biogas Energy**. Kalapet: Springer Science & Business Media, 2011. 169 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=hWprsOiNyfEC&oi=fnd&pg=PR3&dq=biogas+&ots=fG4W7-asUQ&sig=mPH1knH3HNyYajqkQ46E0NZ4db4#v=onepage&q=biogas&f=false>. Acesso em: 24 abr. 2021.

BARRETO, Eduardo José Fagundes *et al.* **Combustão e Gasificação de Biomassa Sólida**: soluções energéticas para a Amazônia. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. Disponível em: <http://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/863/2/combustão%20e%20gasificação%20de%20biomassa%20sólida.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2021

CARDOZO, José Ignacio Huertas; GIRALDO, Nicolas; IZQUIERDO, S. **Removal of H₂S and CO₂ from biogas by amine absorption**. Monterrey: Bod – Books On Demand, 2011. 320 p. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=7uqPDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA133&dq=H2S+biogas+landfills&ots=uJwM23qZ9z&sig=qyHTrPeX17W4di-IOz5J1K3uvpc#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 20 abr. 2021.

CARVALHO JR., João Andrade de; MCQUAY, Mardson Queiroz. **Princípios de Combustão Aplicada**. Florianópolis: Editora da Ufsc, 2007. 171 p.

FERNANDES, Fabiano André Narciso; PIZZO, Sandro Megale; MORAES JUNIOR, Deovaldo. **Termodinâmica Química**. [Ceará]: Universidade Federal do Ceará, 2006. 186 p.

FIGLIANO, Mariele *et al.* **GÁS NATURAL: POTENCIALIDADES DE UTILIZAÇÃO NO BRASIL**. Santa Maria - Rs: Reget/Ufsm, 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/7896/pdf>. Acesso em: 14 abr. 2021.

FRARE, Laercio Mantovani; GIMENES, Marcelino Luiz; PEREIRA, Nehemias Curvelo. Processo para remoção de ácido sulfídrico de biogás. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S.L.], v. 14, n. 2, p. 167-172, jun. 2009. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522009000200004>. Disponível em: <http://www.scielo.br/j/esa/a/KLsC48SCw9wGbwYdBkq66Wx/?lang=pt>. Acesso em: 14 abr. 2021.

HORIKAWA, M.s. *et al.* **Chemical absorption of H₂S for biogas purification**. Maringá: Brazilian Journal of Chemical Engineering, 2004. 320 p. 21 v. (3). Disponível em: https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-66322004000300006. Acesso em: 20 abr. 2021.

MOURA, Marcos; AGUIAR, Carlos Eduardo. **Entropia e a Segunda Lei da Termodinâmica II. Entropia e Temperatura**. 2016. 14 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Física, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

PINA, Rosângela Zampieri; FURLAN, Maria Montserrat Diaz Pedrosa. **Monóxido de carbono: uma nova molécula de sinalização celular**. Maringá: Arquivo Mudi, 2007. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ArqMudi/article/view/20004/10830>. Acesso em: 25 abr. 2021.

RASI, Saija. **Biogas composition and upgrading to biomethane**. Jyväskylä: Jyväskylä University Printing House, 2009. 76 p. Disponível em: <https://jyx.jyu.fi/bitstream/handle/123456789/20353/9789513936181.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 28 abr. 2021.

SÃO PAULO. Cetesb. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (ed.). **Oxidantes e peróxidos orgânicos**. [200-]. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/emergencias-quimicas/aspectos-gerais/perigos-associados-as-substancias-quimicas/oxidantes-e-perioxido-organicos/>. Acesso em: 25 abr. 2021.