

ANÁLISE DE EMISSÃO DE MATERIAL PARTICULADO EM UMA PLANTA DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Tainá L. Silva¹; Euclides A. P. Lima²; Solidônio R. Carvalho¹; Valério L. Borges¹; Alam G. Trovó¹; Washington M. S. Junior¹.

¹Universidade Federal de Uberlândia - UFU

²Universidade de Uberaba – UNIUBE – Universidade Federal de Uberlândia - UFU
taina.silva@ufu.br

Palavras-Chave: Material Particulado, gaseificação, biomassa.

Introdução

A crescente demanda por fontes alternativas e sustentáveis de energia tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias capazes de reduzir a dependência de combustíveis fósseis e mitigar os impactos ambientais associados ao setor energético (MORAES, 2025; SOUSA; LUCAS; ARANHA, 2023). Nesse contexto, a biomassa destaca-se como um recurso renovável e versátil, cuja conversão energética pode ocorrer por diferentes rotas termoquímicas. Entre essas, a gaseificação tem atraído atenção significativa, pois permite a produção de um gás de síntese (syngas) rico em monóxido de carbono (CO) e hidrogênio (H₂), que pode ser utilizado para geração de calor, insumo para síntese química e eletricidade, permitindo ganhos de eficiência elétrica em torno de 40%, o dobro comparado ao processo realizado por combustão. (BREEZE, 2014; FAAIJ, 2006; XAVIER, 2025).

Apesar de suas vantagens, a gaseificação de biomassa está entre os processos que mais emitem material particulado, em nível comparável às emissões veiculares. Essas partículas resultam da formação de gases como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), compostos orgânicos voláteis (COVs), cinzas e fragmentos de carvão não totalmente convertidos (CETESB, [s.d.]).

A presença desse material no fluxo de gás pode comprometer a eficiência do processo, provocar desgaste acelerado em componentes do sistema (como tubulações, filtros e turbinas) e entupimento de tubulações, além de representar riscos ambientais e de saúde quando emitido para a atmosfera.

A qualidade do ar resulta da interação entre fontes de poluição e a atmosfera, influenciando os efeitos sobre os materiais. O monitoramento é feito apenas para alguns poluentes, escolhidos por sua relevância e pela viabilidade de acompanhamento (CETESB, [s.d.])

Material e Métodos

A planta de geração de energia analisada é composta por um gaseificador, quatro ciclones dispostos em configuração linear, um lavador de gases do tipo *scrubber*, um queimador de gases e, por fim, uma chaminé de emissão.

Inicialmente, foi realizada a análise imediata da biomassa por meio de um termogravímetro TGA 2000A, conforme as normas ASTM D5142-04 e ASTM D7582-12, em triplicata. Essa etapa teve como objetivo a determinação dos teores de umidade, compostos voláteis e cinzas presentes no material.

Em seguida, foi conduzida a análise do poder calorífico superior (PCS) utilizando uma bomba calorimétrica IKA C200, com o auxílio de um banho térmico com precisão de 0,1 °C, em conformidade com a norma ASTM D5865-04.

Para a coleta de material particulado na chaminé, utilizou-se um Coletor Isocinético de Particulados em Amostragens (CIPA) ISOTEC TE 751, acoplado a um filtro de fibra de vidro com 99,9% de precisão de eficiência da retenção de partículas de 0,3 micra. Antes da coleta, os filtros foram acondicionados em uma estufa TECNAL TE-396/1 a 105 °C por uma hora e meia, posteriormente armazenados em uma dessecadora até atingirem a temperatura ambiente, e então pesados em uma balança analítica SHIMADZU AUY220 com precisão de 0,0001 g, também em triplicata.

Após a coleta, os filtros foram submetidos ao mesmo procedimento descrito anteriormente.

Resultados e Discussão

A análise de poder calorífico indicou que o resíduo combustível possui um poder calorífico superior (PCS) elevado, estimado em 18,870 MJ/kg. Essa característica evidencia o potencial energético do material para aplicação em sistemas de conversão térmica, como a gaseificação.

Além disso, foi realizada uma análise complementar das cinzas resultantes do processo de gaseificação. Observou-se que, mesmo após a conversão térmica, as cinzas ainda apresentaram um poder calorífico superior considerável, em torno de 9,739 MJ/kg. Esse valor sugere a possibilidade de reaproveitamento energético do material residual, por exemplo, na realimentação da própria planta ou em processos auxiliares de geração térmica, a depender de sua composição e estabilidade.

Para uma avaliação energética mais completa, foi calculado o poder calorífico inferior (PCI) do resíduo utilizando a Equação 1, apresentada abaixo. Os resultados obtidos para PCS e PCI encontram-se sumarizados na Tabela 1, a seguir.

$$PCI = PCS - (h * m) \quad (1)$$

Onde,

h = Entalpia de vaporização da água [MJ/kg_{H2O}];

m = Massa de água gerada por kg de combustível queimado [kg_{H2O}/kg].

Tabela 1: Resultados de Poder calorífico do resíduo combustível e suas cinzas.

Material	PCI [MJ/kg]	PCS [MJ/kg]
Biomassa	17,766	18,870
Cinzas	8,635	9,739

A Tabela 2, apresentada a seguir, mostra os resultados da análise imediata do resíduo combustível. Os dados indicam que o material apresenta um baixo teor de cinzas, aproximadamente 1,5% (Figura 1c) em massa. Isso significa que, da quantidade total de resíduo inserida no sistema, seja em operação contínua ou parcial, apenas uma fração mínima é convertida em cinzas. O restante, majoritariamente constituído por matéria volátil e carbono fixo, é convertido em gás de síntese (*syngas*), o qual é utilizado como combustível para o sistema de geração de energia.

Tabela 2: Resultados de análise imediata do resíduo combustível e suas cinzas (base seca).

Material	Umidade [%]	Voláteis [%]	Cinzas [%]	Carbono fixo [%]
Biomassa	-	78,576 ± 0,484	1,513 ± 0,142	19,910 ± 0,346
Cinzas	-	21,813 ± 0,363	71,470 ± 11,155	6,717 ± 10,915

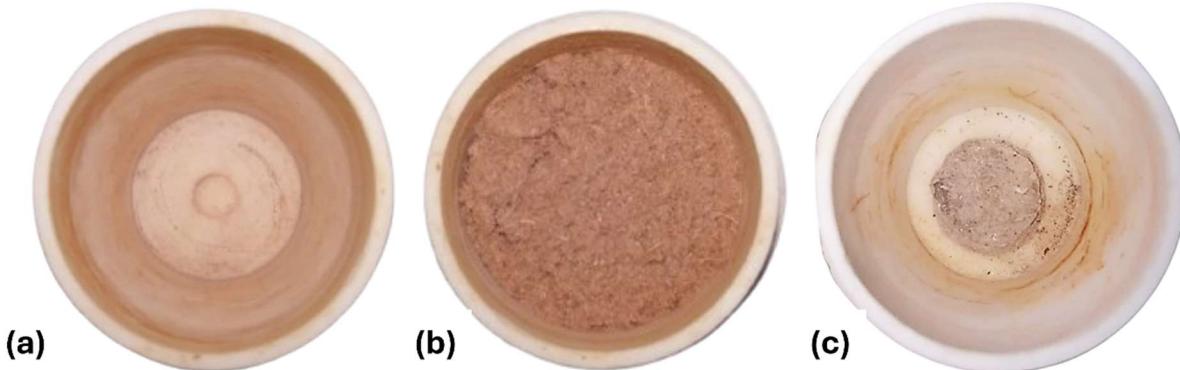


Figura 1: Resultado do teor de cinzas na gaseificação do resíduo combustível.

Essa informação é particularmente relevante, pois um baixo teor de cinzas no resíduo implica menor geração de material particulado no sistema. Como consequência, há uma redução na carga de sólidos transportada pelo gás de síntese ao longo do processo.

As cinzas geradas durante a gaseificação são conduzidas por meio do fluxo de gás e passam sucessivamente por quatro ciclones em série. Esses dispositivos têm como principal função a remoção do material particulado por meio de separação centrífuga, sendo mais eficazes na retenção de partículas com maior granulometria.

As partículas que não são retidas nos ciclones, geralmente de menor diâmetro, seguem para o lavador de gases do tipo *scrubber*. Nesse estágio, ocorre a remoção adicional de contaminantes particulados e gasosos, principalmente por meio de processos de absorção e adsorção em meio aquoso.

Somente após essa etapa de limpeza o gás purificado segue para o queimador, onde é utilizado na geração de energia. Por fim, os resíduos remanescentes, em sua maioria já inertes e em baixas concentrações, são liberados na atmosfera por meio da chaminé.

Ainda que as concentrações de material particulado sejam significativamente reduzidas ao longo do sistema, é de extrema importância realizar o monitoramento contínuo das emissões na chaminé. Esse controle é essencial para assegurar que o sistema esteja operando de forma eficiente na remoção de particulados e que os teores finais de emissão estejam dentro dos limites estabelecidos pelo parecer técnico 099/25/IAA. A verificação periódica permite não apenas a conformidade ambiental, mas também a detecção precoce de eventuais falhas nos dispositivos de retenção, como ciclones e lavadores de gases, garantindo a segurança operacional e a sustentabilidade do processo.

O CIPA (Coletor Isocinético de Particulados em Amostragens) é um equipamento utilizado para a amostragem de material particulado em fontes estacionárias, como chaminés industriais, de forma isocinética, ou seja, mantendo a velocidade do fluxo de gases no ponto de amostragem.

Seu funcionamento baseia-se na aspiração controlada dos gases de exaustão por meio de uma sonda, acompanhada de um sistema de medição de pressão, temperatura e vazão. O ar é puxado por uma bomba de vácuo e o material particulado é coletado em filtros posicionados no

interior do equipamento. Esses filtros retêm as partículas presentes no fluxo gasoso, permitindo a posterior quantificação e análise laboratorial.

O tempo de coleta foi estabelecido em exatamente 1 hora, conforme recomendado pela norma L9.225(CETESB, 1985). A quantificação do material particulado coletado foi realizada por meio da diferença de massa dos filtros antes e após a amostragem, utilizando balança analítica de alta precisão.

Após a coleta, os dados obtidos passaram por um tratamento para correção da concentração em função da vazão do fluxo de amostragem e do tempo de coleta, garantindo que os resultados refletissem com precisão a concentração real de material particulado emitido, esses procedimentos foram realizados seguindo as normas da CETESB L9.222/ NBR 11966 (1992), L9.223/NBR 10702 (1992), L9.224/NBR 11967 (1993) e L9.225/NBR 12019 (1995). Já o método de operação, a calibração do equipamento CIPA e a determinação dos pontos de amostragem foram realizados com base nas diretrizes estabelecidas pelas normas da CETESB L9.221/ NBR 17163 (1990) e E6.030/NBR 12020 (2009).

Os valores finais, já normalizados e ajustados conforme os parâmetros operacionais, os critérios estabelecidos pela norma vigente e os limites de emissão regulamentares, são apresentados na Tabela 3 a seguir, para fins de análise comparativa

Tabela 3: Resultados de concentração de material particulados calculados e os estabelecidos por norma.

Coleta	Massa			Volume	Conc.	Parecer	Limite	Situação
	Massa	da água	Massa					
	do filtro	de lavagem	total [g]	de gás	MP	Técnico	099/25/IAA	[mg/Nm ³]
			[g]	[Nm ³]	[mg/Nm ³]		[mg/Nm ³]	
1	0,0557	0,0239	0,0796	1,175	67,7	30	Acima	
2	0,0069	0,0426	0,0495	0,996	49,7	30	Acima	

A partir dos resultados obtidos, observa-se que, em ambas as coletas realizadas, as concentrações de material particulado medidas na chaminé encontram-se acima dos limites estabelecidos pela norma vigente. Esse resultado indica que o sistema de controle de emissões está operando de forma ineficiente, apresentando desempenho abaixo do esperado para garantir a conformidade ambiental do processo.

Essa não conformidade aponta para a necessidade de uma investigação detalhada da eficiência dos equipamentos responsáveis pela retenção do material particulado, especialmente os ciclones e o lavador de gases. Deve-se avaliar a possibilidade de falhas de instalação, inadequações nos parâmetros operacionais (como vazão, pressão e temperatura), bem como possíveis erros de dimensionamento ou desgaste estrutural dos dispositivos.

Conclusões

Apesar de a biomassa utilizada como combustível apresentar um elevado poder energético e baixo teor de cinzas residuais, o sistema não foi capaz de manter as emissões de material particulado atmosférico dentro dos limites estabelecidos pelo parecer técnico 099/25/IAA. Os valores obtidos nas coletas foram de 67,7 mg/Nm³ e 49,7 mg/Nm³, ambos superiores ao limite normativo de 30 mg/Nm³.

Esse resultado indica que o conjunto de equipamentos de retenção de material particulado, composto por quatro ciclones em série e um lavador de gases, não está operando com a eficiência necessária para garantir a conformidade ambiental. Assim, torna-se necessária uma revisão dos parâmetros operacionais, bem como uma reavaliação do dimensionamento, da manutenção e do desempenho desses dispositivos, visando a otimização do sistema de controle de emissões da planta de geração de energia.

Agradecimentos

Os autores agradecem aos órgãos Finep, FAPEMIG, SEDE, EMBRAPII, CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro.

Referências

- ABNT. NBR 10702 Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da massa molecular base seca. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2013.
- ABNT. NBR 11966 Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da velocidade e vazão. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1989.
- ABNT. NBR 11967 Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação da umidade. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1989.
- ABNT. NBR 12019 Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Determinação de material particulado. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1990.
- ABNT. NBR 12020 Efluentes gasosos em dutos e chaminés de fontes estacionárias - Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 1992.
- ABNT. NBR 17163 Determinação de Pontos de Amostragem em Dutos e Chaminés de Fontes Estacionárias. **Associação Brasileira de Normas Técnicas**, 2024.
- ASTM. D5142-04 Standard Test Methods for Proximate Analysis of the Analysis Sample of Coal and Coke by Instrumental Procedures. **American National Standards Institute**, 2004.
- ASTM. D5865-04 Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. **American National Standards Institute**, 2004.
- ASTM. D7582-12 Standard Test Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke by Macro Thermogravimetric Analysis. **American National Standards Institute**, 2012.
- BREEZE, P. The future of global biomass power generation. **The Power generation Technologies**, 2014.
- CETESB. E16.030 Dutos e chaminés de fontes estacionárias: Calibração dos equipamentos utilizados na amostragem de efluentes – Método de ensaio. **Companhia Ambiental do Estado e São Paulo**, 2009.
- CETESB. L9.221 Dutos e chaminés de fontes estacionárias: Determinação dos pontos de amostragem – Procedimento. **Companhia Ambiental do Estado e São Paulo**, 1990.
- CETESB. L9.222 Dutos e chaminés de fontes estacionárias: Determinação da velocidade e vazão dos gases – Método de ensaio. **Companhia Ambiental do Estado e São Paulo**, 1992.
- CETESB. L9.223 Dutos e chaminés de fontes estacionárias: Determinação da massa molecular seca e do excesso de ar do fluxo gasoso – Método de ensaio. **Companhia Ambiental do Estado e São Paulo**, 1992.
- CETESB. L9.224 Dutos e chaminés de fontes estacionárias: Determinação da umidade dos efluentes – Método de ensaio. **Companhia Ambiental do Estado e São Paulo**, 1993.
- CETESB. L9.225 Dutos e chaminés de fontes estacionárias: Determinação de material particulado – Método de ensaio. **Companhia Ambiental do Estado e São Paulo**, 1995.
- CETESB. Poluentes | Qualidade do Ar. **Companhia Ambiental do Estado e São Paulo**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>, s.d.
- FAAIJ, A. P. C. Bio-energy in Europe: changing technology choices. **Energy Policy**. 322-342, 2006.
- MORAES, C. H. Energia Sustentável no Brasil: desafios e oportunidades para ampliar a sustentabilidade ambiental. **Universidade Federal de Santa Maria**, 2025.
- SOUZA, O.; LUCAS, M. R.; ARANHA, J. Análise do potencial de Angola para a instalação de centrais termoelétricas a biomassa vegetal. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, 61(spe), e277511, 2023.
- XAVIER, J. Syngas - O que é, processos de produção e maiores produtores. **123Ecos**, 2025.