



# Contribuição ao Estudo Teórico de Alternativa de Geração Termelétrica Consumindo Misturas de Resíduo Sólido Urbano e Glicerol

**Palavras-Chave:** Gaseificação, Combustão, Geração de Potência

**Autores:**

**Felipe Cozac Ramos, FEM, UNICAMP**

**Prof. Dr. Marcio L. de Souza-Santos (orientador), FEM, UNICAMP**

## INTRODUÇÃO:

O manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de cidades continua sendo um problema crítico. O uso de aterros sanitários ainda é a solução mais comumente empregada, porém traz impactos socioambientais indesejados [1]. Também tem crescido a demanda por fontes alternativas e renováveis de energia. Nesse contexto, a possibilidade e viabilidade do uso de RSU como combustível para geração energética já foram sugeridas e estudadas [2], [3].

A produção de biodiesel no Brasil vem aumentando. O glicerol cru é um resíduo dessa produção cujo uso foi estudado em diversos campos [4]. Entre os usos possíveis está adicioná-lo a combustíveis ou participando de gaseificação com biomassas para gerar um gás combustível [5], [6].

A alimentação de combustíveis sólidos a vasos de pressão encontra dificuldades técnicas. Em processos convencionais são empregados silos com válvulas estanques (lock-hoppers) pressurizados em série [7]. Dependendo da pressão do equipamento, podem ser necessários muitos níveis de pressões e um complicado controle de válvulas. Isso é especialmente

crítico quando se emprega combustíveis como RSU, que possui muito material fibroso que facilmente bloquearia os canais ou válvulas. Esse processo pode ser significativamente simplificado pela alimentação do combustível como uma lama, permitindo que a alimentação ao vaso possa ser feita por bombas disponíveis comercialmente, tornando a operação mais confiável e diminuindo custos de operação.

## OBJETIVO:

A presente iniciação científica pretende contribuir ao estudo de um processo de geração termelétrica por um ciclo integrado de gaseificação-turbina a gás, ilustrado na Figura 1. O foco do trabalho é a otimização do gaseificador (equipamento G), que é o equipamento central no sistema. O gaseificador opera em leito arrastado com configuração de fluxo de ar descendente (downdraft). O combustível desse sistema é uma mistura de Resíduos Sólidos Urbanos com glicerol cru.

O RSU particulado úmido é alimentado em um secador (equipamento D), que opera próximo à pressão atmosférica. Essa alimentação pode ser realizada por um parafuso de Arquimedes. A corrente

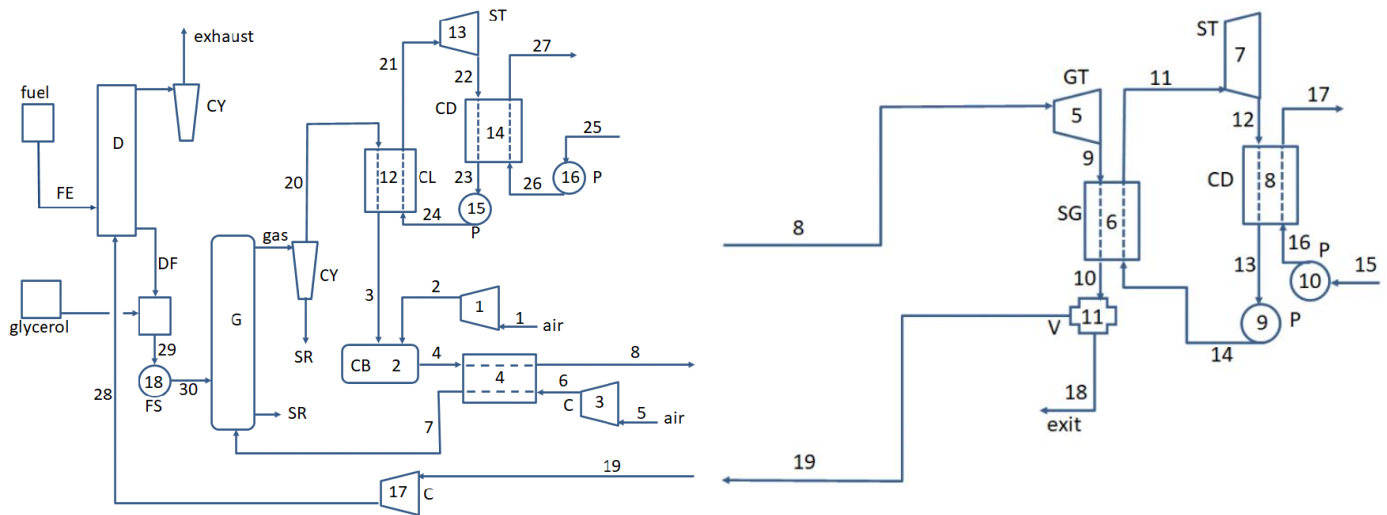


Figura 1 – Ciclo integrado. C = Compressor, CB = Combustor, CD = Condensador, CL = Sistema de limpeza, CY = Ciclone, D = Secador, DF = Combustível seco, FE = Alimentação de combustível, FS = Bombeamento da lama combustível, G = Gaseificador, GT = Turbina a gás, SG = gerador de vapor, ST = Turbina a vapor, SR = Resíduo sólido, P = Bomba de água, V = Válvula ou separador

28, advinda da corrente 19 que é uma fração dos gases de escape da turbina a gás (equipamento 5), é utilizada para a secagem do combustível. Esses gases de escape da turbina também são usados para acionar um ciclo Rankine (equipamentos 6 a 10), para recuperação de energia.

O combustível seco é misturado com glicerol cru e a lama formada (corrente 29) é bombeada, por meio de bombas de lama comerciais, ao gaseificador pressurizado (equipamento G). O gás produzido (corrente 20) passa por ciclones e filtros para diminuir a quantidade de partículas sólidas, bem como seu tamanho médio. Esse gás também é resfriado até temperaturas inferiores ao ponto de orvalho das espécies alcalinas diluídas no gás, permitindo a retirada desses elementos da corrente gasosa. O processo de resfriamento da corrente 20 move um ciclo Rankine composto pelos equipamentos 12 a 16.

## MÉTODOLOGIA E FERRAMENTAS:

Como ilustrado na Figura 1, o ar alimentado ao gaseificador (corrente 7) é aquecido pelos gases de exaustão do combustor (corrente 4). Assim, inicialmente foi realizada uma otimização do gaseificador, tomando como variáveis a vazão e a

temperatura do ar injetado nesse (corrente 7). Adotou-se variações de 1 kg/s para a vazão e de 100 K para a temperatura dessa corrente. Os demais parâmetros, como geometria do gaseificador e alimentação de combustível, foram mantidos constantes nesta etapa.

Após a otimização inicial, o campo de valores de glicerol cru injetado no gaseificador foi aumentado, visando visualizar melhor os pontos ótimos de operação. Adotou-se variações de 1 kg/s tanto para a injeção de glicerol quanto para a de ar. A temperatura do ar foi mantida constante no valor referente à melhor condição encontrada anteriormente.

A taxa de alimentação de RSU seco foi fixada em 5 kg/s, o que está dentro do taxa produzida por grandes cidades. A alimentação de glicerol cru é variada entre 5 kg/s e 7 kg/s, valores que permitem operações adequadas de bombas encontradas no mercado.

A eficiência do processo pode ser avaliada de diferentes formas. A eficiência exergética foi escolhida como função objetivo por compreender tanto a entalpia de combustão do gás produzido quanto sua entalpia sensível. Ambas são importantes no processo proposto pois o gás irá não só alimentar

o combustor da turbina a gás como também mover um ciclo Rankine para recuperação de energia. A eficiência exergética é definida como a razão entre a exergia do gás de saída e a exergia total dos gases e sólidos alimentados no gaseificador. A exergia de cada corrente é calculada como sua vazão (em kg/s) multiplicada por sua exergia específica (em kJ/kg).

As simulações do gaseificador foram realizadas utilizando o software CeSFaMB<sup>®</sup>, capaz de simular diversas configurações de caldeiras, gaseificadores, fornalhas, secadores e outros equipamentos operando em condição de leitos móveis, borbulhantes, circulantes e arrastados. Esse simulador foi validado e aplicado em diversos tipos de equipamentos [3,5,8-10]. A metodologia empregada pelo programa é descrita em detalhes por De Souza-Santos [10].

Escolheu-se manter a pressão média de operação do gaseificador em 4 MPa, pois essa fica próxima ao limite de operação de compressores axiais comerciais que podem operar com descarga em torno de 900 K. Tal operação evitaria a necessidade de esfriamentos intermediários.

É adotado um valor de 1500 K como a temperatura de amolecimento de cinzas no gaseificador. Casos nos quais esse limite é ultrapassado dentro do equipamento são descartados, pois poderiam levar a problemas operacionais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A Figura 2 mostra a eficiência exergética do gaseificador em função da temperatura e vazão do gás alimentado. Alguns pontos operacionais não estão presentes no gráfico por estarem fora da faixa de operações viável desse gaseificador. Em vazões muito baixas de ar, a ignição da lama combustível não ocorre e o processo de pirólise não se estabelece antes do fim do gaseificador. Vazões maiores de ar levam a

temperaturas que ultrapassam o valor limite de amolecimento de cinzas.

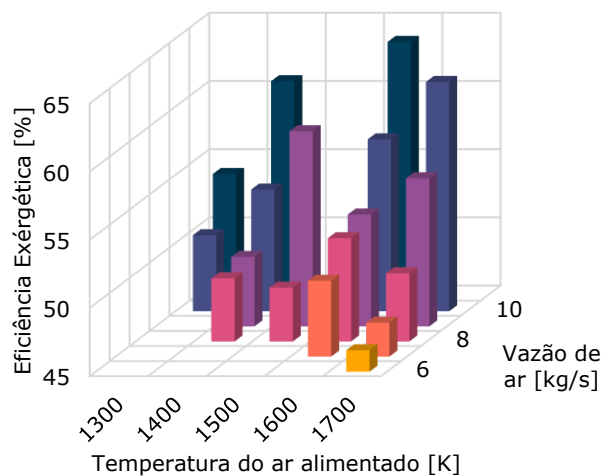


Figura 2 – Eficiência exergética do gaseificador em função da temperatura e vazão de ar alimentado.

Observa-se que a eficiência exergética é maior para os casos com maior vazão de ar. Isso ocorre, pois, havendo mais ar disponível, uma fração maior das partículas carboníferas reage com oxigênio, aumentando a temperatura do gás produzido. Por outro lado, havendo maior nível de oxidação, menores frações dos combustíveis ficam disponível para as demais reações de gaseificação. Isso provoca uma queda na fração molar de gases combustíveis, como H<sub>2</sub>, CO e CH<sub>4</sub>, e conseqüentemente na entalpia de combustão e, portanto, na exergia química do gás produzido.

A Figura 3 mostra como a vazão de glicerol, e conseqüentemente a fração de sólido seco na lama combustível, influenciam na eficiência exergética do gaseificador. A temperatura de alimentação do ar foi fixada em 1600 K. A eficiência exergética diminui com o aumento da alimentação de glicerol. Isso pode ser explicado pelo fato de o glicerol cobrir as partículas de RSU, reagindo com os gases antes desses alcançarem a partícula carbonífera, o que impõe resistências de transporte de massa do oxigênio até a superfície das partículas sólidas e, portanto, diminuições nas taxas de reações heterogêneas.

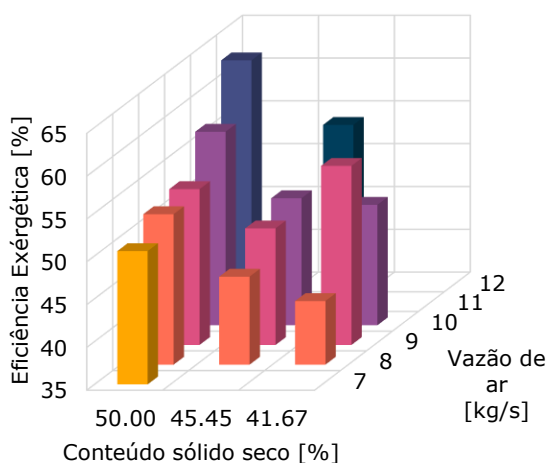


Figura 3 – Eficiência exérgica do gaseificador em função das vazões de glicerol e ar alimentados

Para as condições aqui estabelecidas, a maior eficiência exérgica foi obtida para o equipamento alimentado com 11 kg/s de ar a 1600 K. e 5kg/s de glicerol cru. A Tabela 1 apresenta os principais parâmetros e condições de saída para o gaseificador que obteve melhor eficiência.

Trabalhos anteriores [3,5] mostraram que a versão de leito fluidizado borbulhante seria mais adequada e levaria a melhores resultados. Isso se deve ao maior tempo de residência de gases e partículas nesse tipo de equipamento quando comparado ao de leito arrastado. O maior tempo de residência permite que as reações de gaseificação se aproximem mais do equilíbrio e que haja maior conversão de carbono.

Parâmetro de entrada	Valor
Diâmetro interno do reator (m)	2
Comprimento do reator (m)	50
Temperatura do ar alimentado (K)	1600
Vazão mássica de ar alimentado (kg/s)	11
Parâmetro de saída	Valor
Razão de oxigênio	0,2052
Vazão mássica de gases que deixam o gaseificador (kg/s)	18,62
Vazão mássica de sólidos que deixam o gaseificador (kg/s)	2,376
Velocidade superficial (Meio do reator) (m/s)	0,6129
Temperatura média (Meio do leito) (K)	1453,4
Temperatura média do gás produzido (K)	1496,6
Conversão de carbono (%)	79,96
Taxa de aporte de energia para o equipamento pelo combustível (MW)	157,59
Taxa total de aporte de energia para o equipamento (MW)	173,29
Entalpia de combustão do gás quente (MJ/kg)	8,02
Entalpia de combustão do gás frio (MJ/kg)	6,79
Taxa de saída de energia pelo gás quente (MW)	149,35
Taxa de saída de energia pelo gás frio (MW)	115,29
Eficiência de gás quente (%)	86,19
Eficiência de gás frio (%)	66,53
Taxa de aporte de exergia pelo combustível (MW)	210,5
Taxa de aporte de exergia pelo gás alimentado (MW)	13,15
Taxa total de aporte de exergia (MW)	223,6
Taxa de exergia levada pelo gás (MW)	142,3
Taxa total de saída de exergia (MW)	189,2
Razão entre taxas de saída e entrada de exergia (%)	84,63
Razão entre exergia levada pelos gases e exergia total de entrada (%)	63,64

Tabela 1: Principais parâmetros do gaseificador de maior eficiência

## CONCLUSÕES:

Dentro dos limites estabelecidos, a maior eficiência exergética – aqui definida como a razão entre a exergia da corrente gasosa produzida e a exergia total das correntes injetadas no reator – alcançada foi de 63,64% para uma operação com 11 kg/s de ar a 1600 K. Nessas condições seria possível alcançar uma eficiência de gás quente de 86,19% e uma eficiência de gás frio de 66,53%.

A maior eficiência exergética foi encontrada para um gaseificador operando com uma razão de oxigênio de 20,5%.

O gaseificador produziria um gás isento de alcatrão e, após passar por um processo de limpeza, poderia ser alimentado no combustor de uma turbina a gás. Tais processos de limpeza reduziriam a quantidade de sólido arrastado e a granulometria de partículas na corrente gasosa, além de incluir a condensação e retirada de componentes alcalinos que poderiam erodir e corroer as pás da turbina. Nota-se que a temperatura máxima das partículas no interior desse gaseificador seria menor que a temperatura de amolecimento de cinzas, preservando assim a segurança da operação.

A melhor eficiência exergética encontrada nesse trabalho é menor do que as reportadas em trabalhos anteriores [3,5] onde o gaseificador opera com uma mistura de biomassa e glicerol cru. Essa diferença pode ser atribuída ao fato desses trabalhos considerarem gaseificadores operando em leito fluidizado borbulhante ao invés de leito arrastado.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] P. R. Jacobi and G. R. Besen, “Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade,” *Estudos Avançados*, vol. 25, no. 71, pp. 135–158, 2011.
- [2] E. Akkaya and A. Demir B, “**ENERGY CONTENT ESTIMATION OF MUNICIPAL SOLID WASTE BY MULTIPLE REGRESSION ANALYSIS**,” in *Presented at 5th International Advanced Technologies Symposium (IATS’09)*, Karabuk, Turkey, 2003.
- [3] M. L. De Souza-Santos and K. Ceribeli, “Technical evaluation of a power generation process consuming municipal solid waste,” *Fuel*, vol. 108, pp. 578–585, 2013, doi: 10.1016/j.fuel.2012.12.037.
- [4] D. T. Johnson and K. A. Taconi, “The glycerin glut: Options for the value-added conversion of crude glycerol resulting from biodiesel production,” *Environmental Progress*, vol. 26, no. 4, pp. 338–348, Dec. 2007, doi: 10.1002/ep.10225.
- [5] C. C. Cadavez and M. L. de Souza-Santos, “Efficiency of a power generation alternative regarding the composition of feeding biomass-glycerol slurry; theoretical assessment,” *Energy*, vol. 214, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.energy.2020.118967.
- [6] L. Wei, L. O. Pordesimo, A. Haryanto, and J. Wooten, “Co-gasification of hardwood chips and crude glycerol in a pilot scale downdraft gasifier,” *Bioresour Technol*, vol. 102, no. 10, pp. 6266–6272, May 2011, doi: 10.1016/j.biortech.2011.02.109.
- [7] P. Vimalchand, W. W. Peng, and G. Liu, “**High Pressure Feeder and Method of Operating to Feed Granular or Fine Materials**, US Patent Number 20110146153 A1,” 2011
- [8] M. L. de Souza-Santos, “**MODELLING AND SIMULATION OF FLUIDIZED-BED BOILERS AND GASIFIERS FOR CARBONACEOUS SOLIDS**,” 1987.
- [9] M. L. de Souza-Santos, “Proposals for power generation based on processes consuming biomass-glycerol slurries,” *Energy*, vol. 120, pp. 959–974, 2017, doi: 10.1016/j.energy.2016.12.005.
- [10] M. L. de Souza-Santos, *Solid Fuels Combustion and Gasification Modeling, Simulation, and Equipment Operations*, 2nd ed. New York, NY, USA: CRC Press, 2010.