

Processo de Geração de Potência Termelétrica Baseado em Trocadores de Calor de Alta Temperatura

Palavras-chave: Waste-to-energy, Gasification, Simulations.

Tílio Júnior Machado Marigo FEM – UNICAMP

Prof. Dr. Marcio L. de Souza-Santos FEM – UNICAMP

OBJETIVOS DA PESQUISA

Diante de múltiplas novas formas de produção de energia elétrica, as consumindo combustíveis residuais ou parcialmente renováveis devem ser perseguidas. Entre as várias alternativas está o uso de resíduo municipal urbano, que no presente trabalho será designado pela sigla internacional MSW (Municipal Solid Waste). Assim, esta investigação pretende contribuir com uma linha de pesquisa que estuda várias alternativas empregando o MSW.

Em particular, o trabalho inicia o estudo da aplicação de trocadores de calor para altas temperaturas, conhecidos na literatura como HTHE (High Temperature Heat Exchanger) [1-3]. A Figura 1 mostra uma representação do processo estudado.

O objetivo deste trabalho foi otimizar o processo de geração termelétrica tendo como função objetivo a eficiência exergética (EE) do gaseificador que produziria um gás capaz, por meio de combustão, levar a temperaturas dentro dos limites de operação de HTHE especiais. Em outras palavras, tentou-se maximizar a temperatura da fonte quente do ciclo de geração de potência mostrado na Figura 1.

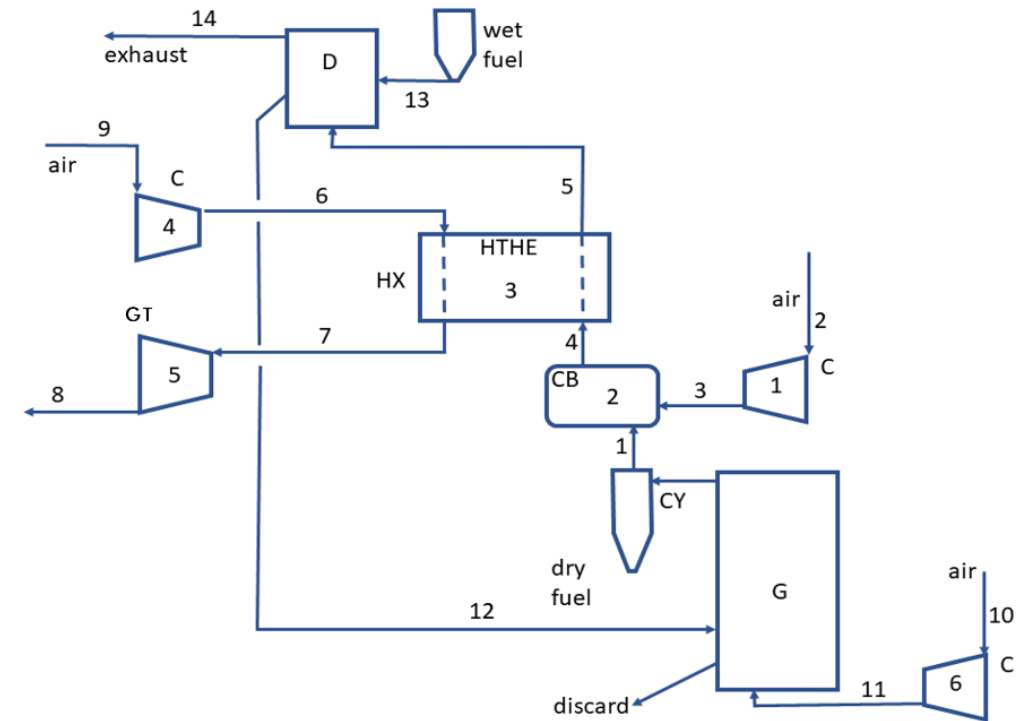


Figura 1 - Processo de geração baseado em HTHE. C = Compressor, CB = Câmara de combustão, CD = Condensador, CY = Ciclone, D = Secador, G = Gaseificador, GT = Turbina à gás, HTHE = trocador de calor de alta temperatura.

METODOLOGIA DA PESQUISA

As simulações computacionais do gaseificador foram realizadas por meio do software CeSFaMB©, um simulador para leitos borbulhantes, circulantes, moventes e de arraste. Detalhes da base matemática do simulador e estratégia de simulações podem ser encontradas na literatura [4-7].

Para simular todo o processo, efetuando os balanços de massa e energia no volume de controle em cada equipamento foi utilizado o software IPES©. Ambos os programas foram desenvolvidos por De Souza-Santos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Revisão bibliográfica sobre trocadores de calor de alta temperatura

Desenvolveu-se uma breve procura na literatura sobre HTHE. O estudo resultou em um compilado sobre os materiais mais promissores, assim como informações de ligas comercialmente disponíveis [1-3] [13].

Os materiais que podem ser utilizados nesses equipamentos são: polímeros, metais, cerâmicos e carboníferos. Para o caso estudado, que implica em temperaturas acima de 900 K, não serão considerados materiais poliméricos. Os materiais mais promissores são os cerâmicos: Carbetto de silício (SiC) e Óxido de alumínio (Al₂O₃). Em caso de necessidade para empregar maior dureza ou resistência ao choque térmico, as matrizes de compósito cerâmicos (CMCs) podem ser uma alternativa. Caso uma opção metálica seja preferível, INCONEL® nickel-chromium alloy 625 ou até mesmo ligas ODS-FeCrAl podem ser consideradas.

Material Base	Máxima Temperatura de Operação [K]	Resistência ao Cisalhamento [MPa]	Resistência à corrosão
Carbetto de Silício (SiC)	1973	210-380	Quimicamente inerte.
Nitrato de Silício (Si ₃ N ₄)	2173	190-240	Vulnerável à oxidação a temperaturas acima de 1273 K.
Alumina (Al ₂ O ₃)	1973	330	Altamente resistente a ataques químicos sob atmosfera redutora e oxidante.
347 SS (Fe/Cr/Ni)	1089	825	Vulnerável à corrosão a temperaturas acima de 973 K.
INCONEL® Alloy 625	1250	712	Resistência à corrosão excepcional.
Nitrato de Alumínio (AlN)	1573	450	Boa resistência a corrosão até 1573 K

Tabela 1 - Materiais base para HTHX.

Otimização do gaseificador

Para uma otimização preliminar do gaseificador, foram adotadas as seguintes premissas:

- Taxa de consumo de MSW em 3,6 kg/s. Tal valor foi adotado em trabalhos anteriores [9,10,11] e levaria a uma unidade de porte condizente com o lixo gerado por uma população média de 250 a 300 mil habitantes. Escalonamentos acima ou abaixo não devem comprometer as conclusões do presente trabalho.
- Granulometria, análises imediatas e elementares do MSW foram assumidas como em trabalhos anteriores [8,12].
- Simulações preliminares mostraram que operações estáveis (ou dentro da faixa de operação de leito fluidizado) poderiam ser encontradas para um gaseificador com diâmetro interno em torno de 5 m com altura de leito em 4 m e altura total de 12 m.

Diversas simulações foram realizadas para entender o comportamento do gaseificador. Em um primeiro ataque, o diâmetro do leito e vazão mássica de ar injetado foram usados como variáveis. A combinação dessas duas variáveis independentes resultou em diferentes valores de temperatura de gás de saída, eficiência exergética do equipamento e conversão de carbono no interior desse, que, por sua vez, são as variáveis dependentes do estudo em questão.

A partir dessas configurações, apenas duas tentativas foram necessárias para se encontrar um máximo de EE (eficiência exergética). Essa eficiência é definida como:

$$EE = \eta_{exer,icv} = \frac{(Fb)_{leaving-stream}}{(\sum_{iSR} b_{iSR})_{entering-stream}} \quad [4]$$

Com base nos resultados foi possível identificar tendências que são consistentes com a teoria de gaseificação e operações de leitos fluidizados borbulhantes. Por exemplo, a Figura 3 mostra que aumentos na vazão mássica de ar injetado provocam aumentos na temperatura do gás que deixa o gaseificador. Isso ocorre até que a vazão mássica de oxigênio atinja a quantidade estequiométrica para a combustão completa.

Como consequência do aumento da temperatura, a razão exérgica diminui, pois, a concentração de componentes combustíveis nesse gás diminui após certo valor de razão de ar injetado -- relativo ao requerido para combustão completa do combustível sólido alimentado ao gaseificador.

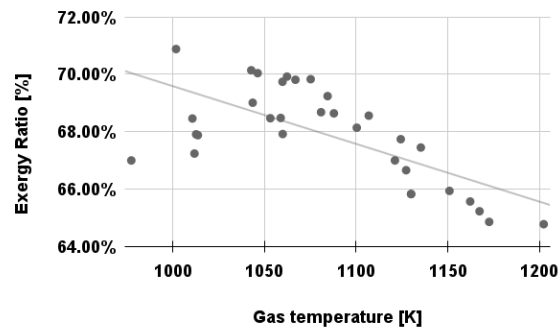


Figura 2 - Razão de exergia pela temperatura.

A Figura 4 indica que aumentos no diâmetro do leito do gaseificador levam a pequenos, mas perceptíveis, aumentos na eficiência exérgica. Isso pode estar relacionado com decréscimo na velocidade superficial do gás no leito e consequente aproximação das condições de mínima fluidização levando a menores bolhas e, portanto, maiores áreas de trocas de calor e massa entre bolhas e emulsões -- onde se encontram as partículas de combustível.

Com base na otimização do equipamento, foi possível selecionar a configuração do gaseificador a operação que resultasse na máxima eficiência exérgica como também a baseada em gás frio. Assim, encontrou-se o diâmetro de 5,5 m e ar insuflado de 4,5 kg/s.

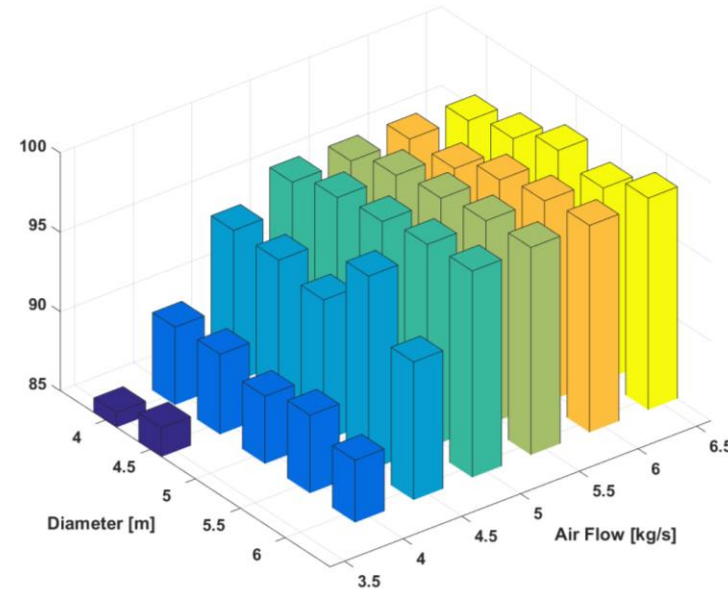


Figura 3 - Conversão de Carbono [%]

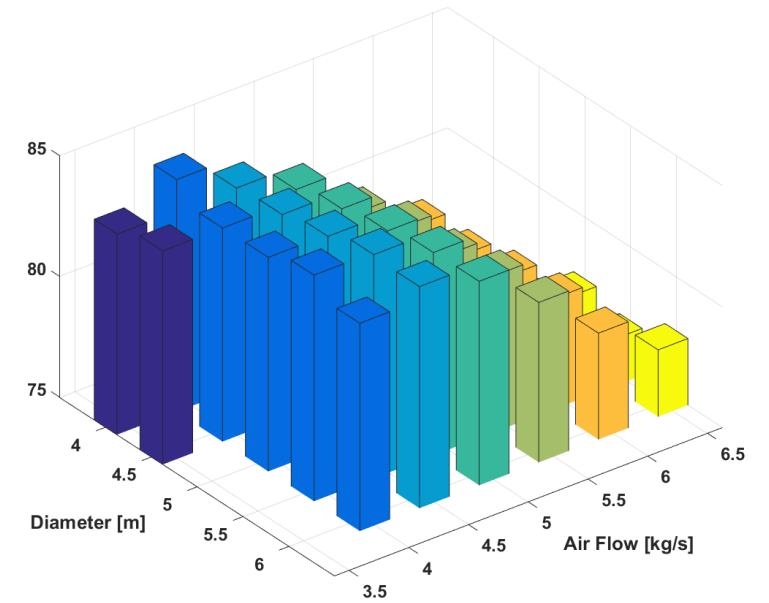


Figura 5 - Eficiência fria [%]

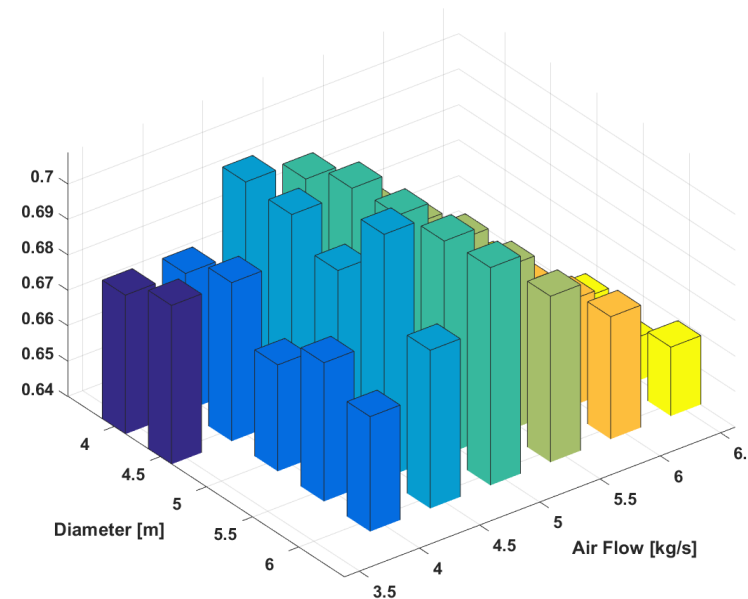


Figura 4 - Razão de Exergia [-]

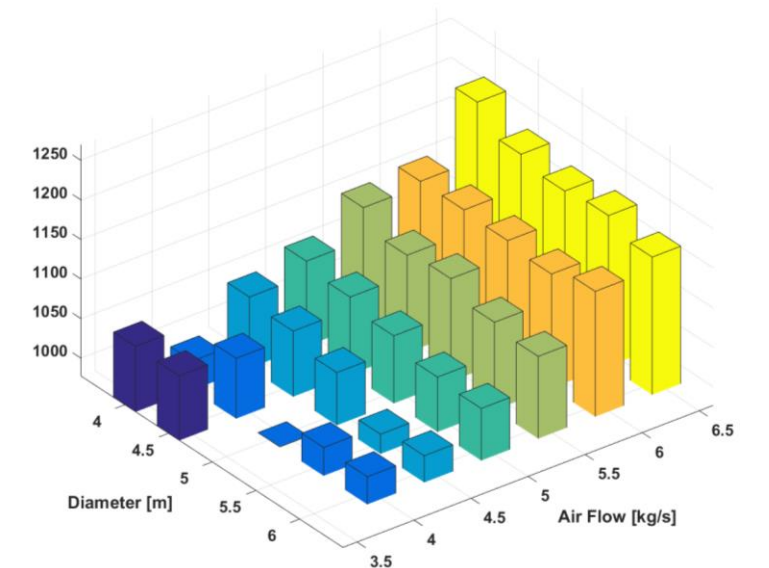


Figura 6 - Temperatura do gás produzido [K]

Simulação do processo termodinâmico

A partir dos dados do gás produzido no gaseificador, utilizou-se o programa IPES® para simular parte do processo que envolve o HTHE. Estão incluídos os equipamentos e correntes apresentados na Figura 7. Vale ressaltar que o presente trabalho se propõe apenas a explorar os limites operacionais do trocador, sendo assim, uma avaliação completa de todo o sistema fica como escopo para trabalhos futuros.

Compressor (1): esse equipamento tem a função de insuflar ar comprimido na câmara de combustão, onde por sua vez desempenha o papel de comburente. O compressor foi modelado como não isentrópico, ou seja, categorizando-se como um processo não reversível.

Câmara de combustão (2): sua função é conter a combustão do gás rico produzido pelo gaseificador. O modelo utilizado nesse trabalho é isentálpico, em outras palavras, as perdas de calor para o ambiente são desconsideradas.

Trocador de calor de alta temperatura (3): esse último é utilizado para permitir a troca de calor entre duas correntes, mas sem que haja a troca de massa entre elas. Assim como o combustor, esse equipamento foi considerado como isentálpico. Além disso, as perdas de carga no trocador de calor foram fixadas a 5 kPa e a temperatura mínima entre as duas correntes em 10 K, como recomenda o manual do programa utilizado.

O gás combustível produzido pelo gaseificador (corrente 1) chega à câmara de combustão à 1001,8 K, que por sua vez se mistura com ar comprimido à 397,4 K (corrente 3). Como foi constatado na revisão bibliográfica sobre HTHX que trocadores a base de carbeto de Silício (SiC) podem resistir a temperaturas superiores a 1900 K, a vazão de ar comprimido foi ajustada para que o gás da queima saia a aproximadamente 1710 K.

Após passar pelo trocador de calor de alta temperatura, a corrente 5 segue até um equipamento que secará o lixo urbano úmido que será consumido no gaseificador. A corrente 7 poderá ser utilizada para geração de potência por meio de uma turbina a gás.

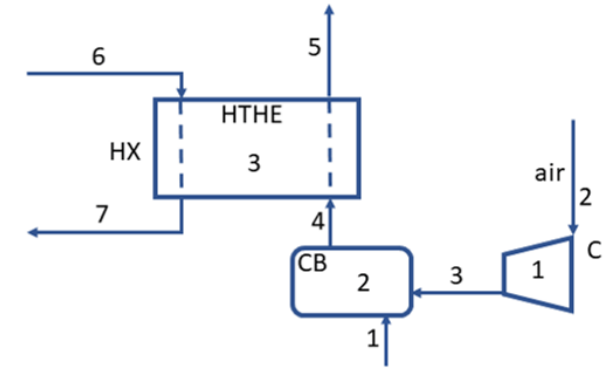


Figura 7 – Processo simulado.

Corrente	Temperatura [K]	Pressão [kPa]	Vazão mássica [kg/s]
1	1001,8	246	7,68
2	290	101	69,8
3	397,4	246	69,8
4	1710	246	77,47
5	500	241	77,47
6	400	1005	80,75
7	1700	1000	80,75

Tabela 2 – Correntes e suas propriedades

CONCLUSÕES

Diante do apresentado, verificou-se que a geração de potência com a utilização de trocadores de calor de alta temperatura não é somente plausível como promissora. Durante o desenvolvimento, melhores configurações para o sistema foram descobertas, como a substituição do combustor de leito circulante por um gaseificador de leito borbulhante, ou até mesmo a troca do fluido de trabalho, para geração de potência, de vapor para ar. Apesar das alterações, ressalta-se que a essência do tema do estudo foi mantida, tais modificações advêm da análise de resultados obtidos sendo inerente ao processo científico.

Por fim, mais estudos no tema são necessários para estimar a real eficiência do sistema de geração proposto, sendo esse trabalho apenas uma pequena contribuição para a importante questão da sustentabilidade e diversificação energética.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Aquaro D, Pieve M. High-temperature heat exchangers for power plants: performance of advanced metallic recuperators. Appl. Therm. Eng. 2007; 27:389-400.
- [2] Schulte-Fischedick J, Dreisigacker V, Tammé R. An innovative ceramic high-temperature plate-fin heat exchanger for EFCC processes. Applied Thermal Engineering 2007;27:1285-94.
- [3] Sommers A, Wang Q, Han X, T'Joën C, Park Y, Jacobi A. Ceramics and ceramic matrix composites for heat exchangers in advanced thermal systems—A review. Appl Therm Eng 2010; 30:1277-91.
- [4] de Souza-Santos M. L., Solid Fuels Combustion and Gasification: Modeling, Simulation, and Equipment Operation. 2nd ed. New York: CRC Press; 2010. (ISBN 9781420047493)
- [5] de Souza-Santos M. L., Comprehensive Modelling and Simulation of Fluidized-Bed Boilers and Gasifiers. Fuel 1989; 68: 1507-1521. doi.org/10.1016/0016-2361(89)90288-3
- [6] de Souza-Santos, M. L., A New Version of CSFB, Comprehensive Simulator for Fluidized Bed Equipment. Fuel, v. 86:12-13, 1684-1709, 2007. (doi: 10.1016/j.fuel.2006.12.001)
- [7] de Souza-Santos M. L., Application of Comprehensive Simulation of Fluidized-Bed Reactors to the Pressurized Gasification of Biomass. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences 1994; 16: 376-383.
- [8] Effect of Dry-Solid Content Level in Feeding Slurry of Municipal Solid Waste Consumed by FSIG/GT Power Generation Process; A theoretical Study
- [9] The Conference Board of Canada. Municipal Waste Generation. <http://www.conferenceboard.ca/hcp/Details/Environment/municipal-waste-generation.aspx>
- [10] Jacobi, P. R.; Bensen, G. R., Management of residues in São Paulo city: sustainability challenges (in Portuguese). Estud. av. vol.25 no.71 São Paulo Jan./Apr. 2011 http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142011000100010&lng=en&nrm=iso
- [11] Cheng, H.; Zhang, Y.; Meng, A.; Li, Q. Municipal solid waste fueled power generation in China: A case study of waste-to-energy in Changchun city. Environ. Sci. Technol. [Online] 2007, 41(21), 7509-7515. <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es071416g>
- [12] Domalski, E.S.; Jobe Jr. T.L.; Milne T.A. Thermodynamic Data for Biomass Conversion and Waste Incineration, 1986. National Bureau of Standards and Solar Energy Research Institute. <http://www.nrel.gov/biomass/pdfs/2839.pdf>
- [13] INCONEL ® alloy 625. Special Metals Corporation, 2013. Disponível em: <https://www.specialmetals.com/documents/technical-bulletins/inconel/inconel-alloy-625.pdf>