Desenvolvimento de integração energética em planta de gaseificação via análise *pinch*

Palavras-Chave: Gaseificação, Integração Energética, Análise *Pinch*

Autores:

João Pedro Gaspar da Silva, FEM – Unicamp

Profª. Drª. Ingrid Lopes Motta (orientadora), FEM – Unicamp

INTRODUÇÃO:

A necessidade de reduzir a emissão de gases do efeito do estufa cresce junto à demanda energética no mundo, sendo um cenário favorável para a transição para fontes renováveis. Tem-se como um exemplo a matriz energética brasileira, que conta com aproximadamente 49,1% do total com energias renováveis (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2024). Para aproveitar o grande potencial das fontes renováveis no país, uma possível maneira seria a partir do aproveitamento energético de biomassas (Liu et al., 2022; Alves et al., 2023).

Uma das maneiras de se utilizar a biomassa para produção de energia é através da gaseificação. A gaseificação é um processo termoquímico que transforma grandes cadeias de carbono em moléculas menores dentro de reatores a altas temperaturas sob a presença de catalisadores, resultando em um gás de alto poder calorífico (Motta et al., 2018). Esse gás, chamado de gás de síntese, conhecido em inglês como *syngas*, pode ser utilizado em diversas aplicações como geração de energia elétrica na queima direta em turbinas e produção de biocombustíveis (Mahinpey et al., 2022; Rostrup-Nielsen, 2000).

Dentro das considerações do processo de gaseificação, é preciso ter em mente a composição final do gás obtido após o processo. O *syngas*, logo após a saída do reator, apresenta contaminantes como materiais particulados, amônia (NH_3), ácido clorídrico (HCl) e sulfeto de hidrogênio (H_2S), que podem causar entupimentos e corrosão em tubulações, além de dióxido de carbono (CO_2), que reduz o poder calorífico da corrente (Asadullah, 2014).

Considerando-se as propriedades físico-químicas dos contaminantes presentes no *syngas*, utilizam-se diversas etapas e equipamentos para a limpeza. Podem ser utilizados equipamentos como filtros, ciclones, torres de *spray*, *scrubbers* e reatores a altas temperaturas para craqueamento térmico e catalítico (Asadullah, 2014). A Figura 1 demonstra o processo de limpeza do *syngas* obtido em uma pequena planta de gaseificação de biomassas como palha, feno, cascas de árvores e resíduos de papel, a qual inclui filtros para remoção de particulados, leitos fixos para remoção de H_2S e HCl, reformador de alcatrão e leito de segurança.

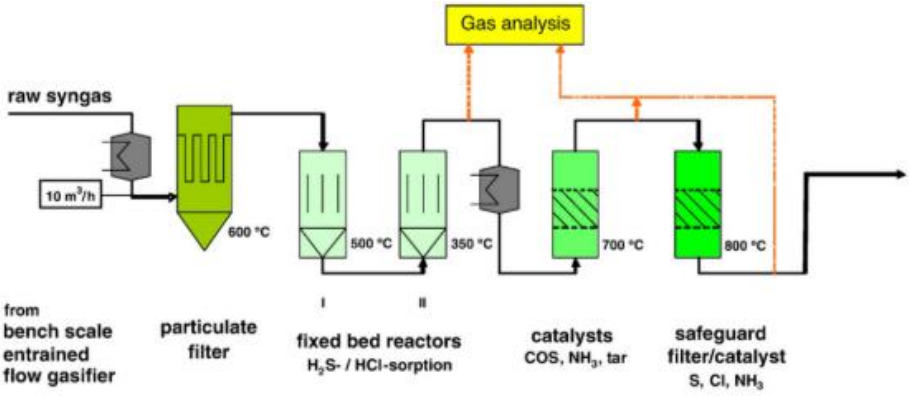

Figura 1: Exemplo de processos para limpeza de *syngas*. Fonte: (Leibold; Hornung; Seifert, 2008).

Os processos de limpeza apresentam custos elevados pelas variações de temperaturas necessárias para realização de cada etapa (Asadullah, 2014). Diante dessa necessidade, pode-se investigar formas de melhorar a eficiência energética do processo. Uma das formas de se melhorar essa eficiência é através de uma rede de trocadores de calor otimizada, obtida através da integração energética via análise *pinch* (Zhao et al., 2022).

A integração energética via análise *pinch* visa tornar o uso dos trocadores o mais eficiente possível em uma planta industrial, reduzindo o consumo de utilidades externas e promovendo a maior recuperação de calor possível nos processos (March, 1998; Smith, 2005).

Portanto, o objetivo geral desse projeto consistiu em entender como a integração energética via análise *pinch* pode fornecer dados para o desenvolvimento de uma rede de trocadores de calor otimizado para garantir o menor custo no processo de limpeza de *syngas*.

METODOLOGIA:

Para o presente estudo, utilizaram-se dados de composição e vazão de uma corrente de *syngas* obtida a partir da simulação do processo de gaseificação de Motta et al. (2022) utilizando bagaço de cana-de-açúcar como biomassa, temperatura do reator de 950 ºC, pressão de 1 bar, teor de umidade de 10% na biomassa e relação vapor/biomassa de 1,15. A simulação do processo de limpeza foi realizado no software *Aspen Plus*®, partindo-se da corrente de *syngas* coletada, com vazão de 10 m³/h e seguindo o fluxo de limpeza informado por Leibold; Hornung; Seifert (2008), conforme apresentado na Figura 1.

Na simulação das etapas de limpeza, foi utilizado um bloco do tipo SEP (bloco FILTER), que permite a separação simples de fases ou componentes, para representar o filtro de particulados, removendo partículas como fuligem. Nessa etapa, foi considerado a remoção de 100 % do particulado. Em seguida, deve-se remover os componentes H_2S e HCl utilizando-se leitos fixos de adsorção. Os leitos fixos foram representados por um bloco do tipo RYIELD (blocos SEPH2S e SEPHCL), que converte a corrente de entrada em produtos com base em rendimentos mássicos (ou molares) especificados de cada componente. Na sequência, deve-se eliminar o alcatrão da corrente de *syngas* por meio do processo de reforma. O reator de reforma do alcatrão foi representado por um bloco do tipo RSTOIC (bloco REFORMIN), que permite decompor a corrente de entrada através de reações químicas estequiométricas. A reforma do alcatrão foi representada pela equação fornecida por Shen; Yoshikawa (2013) nas proporções indicadas Dutta; Phillips (2009) no Quadro 1. Por fim, um filtro de segurança, representado por um bloco SEP (bloco SAFEGUAR), realiza a remoção do restante dos contaminantes. Entre as etapas de

remoção, foram inseridos trocadores de calor com o bloco HEATER para adequar a temperatura da corrente e para que as etapas de limpeza ocorram nas condições térmicas adequadas. Na montagem do fluxograma de processos, foi considerada uma perda de pressão de 0,1 bar em cada um dos processos, sendo um valor intermediário entre os valores indicados por Smith (2005). Outro ponto que foi levado em consideração na realização das simulações, foi a presença de H_2O, tendo em vista que a biomassa utilizada na simulação inicial terá 10% de umidade. Para que a simulação ficasse a mais próxima da realidade e para realizar um comparativo entre condições iniciais e finais do *syngas*, foi inserida uma etapa de remoção desse componente (bloco H2OREMOV). O fluxograma da simulação da limpeza de *syngas* pode ser visto na Figura 2.

$$C_nH_m + nH_2O \rightarrow nCO + (N + 0{,}5m)H_2 \qquad Equação\ 01$$

Contaminante	Porcentagem de conversão
Metano (CH_4)	46,2%
Etano (C_2H_6)	99%
Etileno (C_2H_4)	90%
Alcatrão (C_{10+})	99,9%
Benzeno (C_6H_6)	99%
Amônia (NH_3)	78%

Quadro 1: Porcentagem de conversão das cadeias no reator de reforma. Fonte: Dutta; Phillips, 2009.

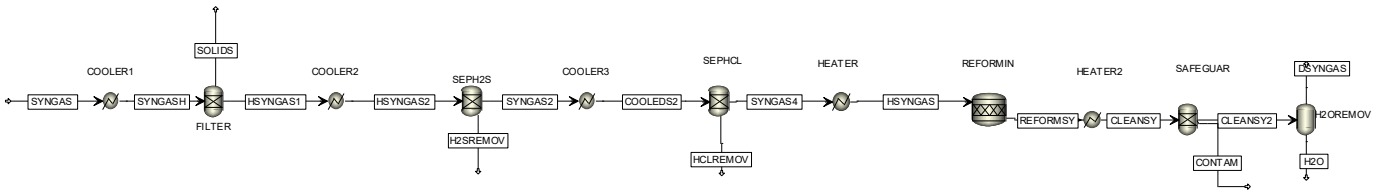

Figura 2: Processos de limpeza do *syngas*. Fonte: Autoria própria.

Para a realização da etapa de integração energética, coletaram-se os calores específicos (c_p) e vazões das correntes. A integração das correntes foi realizada de seguindo as heurísticas apresentadas por Smith (2005) e utilizando o *software HINT*, permite a inserção dos dados das correntes e elaboração de uma rede de trocadores otimizada de forma computacional.

Inicialmente, foi construída a cascata térmica para determinar a energia residual no sistema de utilidades, considerando uma variação mínima de temperatura ΔT_{min} de 10 ºC. Na sequência, foram elaboradas as curvas compostas para identificar o ponto *pinch* e conduzida a integração seguindo a heurística de integrar as correntes mais próximas do ponto *pinch*.

A integração entre duas correntes foi realizada identificando a corrente limitante do ponto de vista energético, utilizando o c_p e a variação de temperatura ΔT que cada uma precisava atingir. Utilizou-se, então, a menor quantidade de calor disponível entre as duas e, na sequência, dividiu-se esse valor pelo c_p da outra corrente, identificando então as temperaturas iniciais e finais de cada uma após a troca térmica. O processo foi repetido até que não houvesse mais possibilidade de recuperação de calor entre as correntes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

Seguindo as heurísticas, elaborou-se a cascata e a curva composta, apresentadas na Figura 3. Na cascata, identificou-se a necessidade de 2,18 kW de calor em excesso no sistema. Esse excesso de calor foi retirado utilizando-se água de resfriamento.

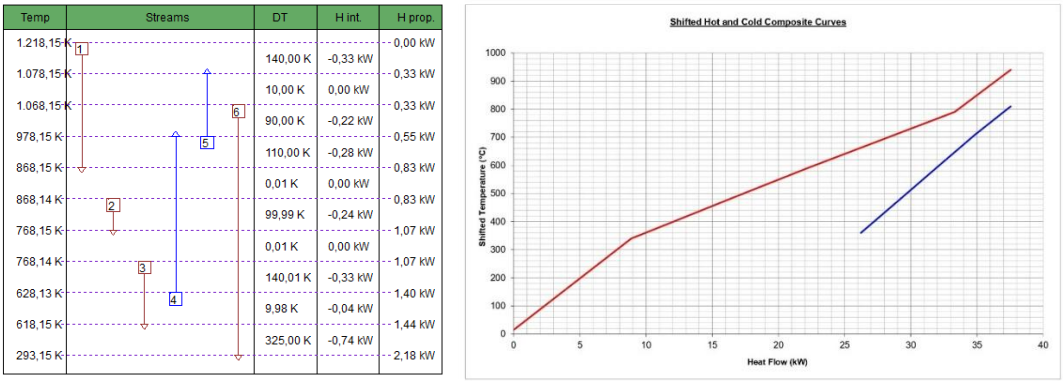

Figura 3: Cascata de temperaturas e curvas compostas. Fonte: Autoria própria.

Na curva composta, pôde-se observar que o ponto *pinch* acontece no ponto de temperatura mais elevada do sistema, de 950 ºC. Dessa forma, integraram-se as correntes de forma que a rede de trocadores otimizada ficasse conforme a Figura 4.

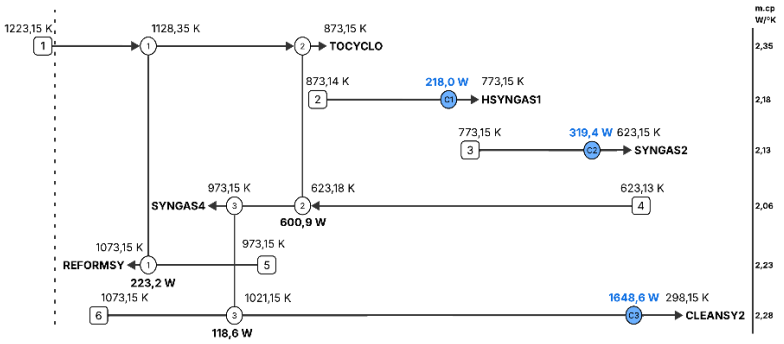

Figura 4: Rede de trocadores otimizada. C1, C2 e C3 representam o uso de água de resfriamento. Fonte: Autoria própria.

O primeiro trocador de calor foi adicionado para promover a troca térmica entre a corrente TOCYCLO e a corrente REFORMSY. Nessa integração, a corrente REFORMSY foi aquecida de 973,15 K até sua temperatura alvo de 1073,15 K, enquanto a corrente TOCYCLO foi resfriada de 1223,15 K para 1128,35 K, totalizando 223,2 W de calor trocado. Como REFORMSY foi a corrente limitante, a quantidade total de calor trocada foi de 223,2 W. A corrente TOCYCLO, por ainda não ter atingido sua temperatura final, precisou seguir para um segundo trocador.

O segundo trocador de calor foi adicionado para continuar o resfriamento da corrente TOCYCLO, que iniciou em 1128,35 K e atingiu seu objetivo de 873,15 K ao trocar 600,9 W de calor com a corrente SYNGAS4, que saiu de 623,13 K e atingiu 915,47 K. Após a troca, SYNGAS4 ainda necessitava atingir seu objetivo de 973,15 K, necessitando de um terceiro trocador de calor. Dessa forma, um terceiro trocador de calor foi adicionado para que SYNGAS4 atingisse seu objetivo, trocando calor com CLEANSY2, que, por sua vez, saiu de 1073,15 K e atingiu 1021,15 K, totalizando 118,6 W trocados.

Por fim, para que CLEANSY2, HSYNGAS1 e SYNGAS2 pudessem atingir as temperaturas necessárias, implementaram-se três trocadores de calor adicionais com água de resfriamento, representados como C1, C2 e C3,

tendo em vista que não havia mais correntes frias. Com isso, o processo de troca térmica entre as correntes recuperou 942,7 W na limpeza do *syngas*, sendo necessário ainda remover 2186 W de calor por meio de água de resfriamento.

CONCLUSÕES:

Este trabalho envolveu diversos desafios que envolveram conceitos de integração energética, gaseificação, limpeza do *syngas* e trocadores de calor, além de conhecimentos técnicos dos softwares de simulação, *Aspen Plus*® e *HINT*. Os resultados obtidos indicam o potencial da metodologia para reduzir o consumo de utilidades no processo de limpeza do *syngas*, melhorando sua eficiência térmica. Além disso, a metodologia evidenciou o limitante para se reduzir ainda mais o consumo de utilidades nesse caso: a ausência de mais correntes frias. Para trabalhos futuros, o estudo de um reaproveitamento do calor disponível no processo de limpeza pode aumentar a eficiência energética do processo, além de reduzir custos.

BIBLIOGRAFIA

ALVES, E. P. R. *et al.* **Renewable Energy Potential and CO2 Performance of Main Biomasses Used in Brazil**. **Energies**, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en16093959>.

ASADULLAH, M. **Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review**. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.132>.

DUTTA, A.; PHILLIPS, S. D. **Thermochemical Ethanol via Direct Gasification and Mixed Alcohol Synthesis of Lignocellulosic Biomass**. Disponível em: <http://www.osti.gov/bridge>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL BRAZILIAN ENERGY BALANCE**. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>.

LEIBOLD, H.; HORNUNG, A.; SEIFERT, H. **HTHP syngas cleaning concept of two stage biomass gasification for FT synthesis.** Powder Technology, v. 180, n. 1–2, p. 265–270, 14 jan. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2007.05.012>.

LIU, Z. *et al.* **Assessing the effectiveness of biomass energy in mitigating CO2 emissions: Evidence from Top-10 biomass energy consumer countries.** Renewable Energy, v. 191, p. 842–851, 1 maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.053>.

MAHINPEY, N. *et al.* **Power generation from syngas**. Advances in Synthesis Gas: Methods, Technologies and Applications: Volume 3: Syngas Products and Usages. Elsevier, 2022. p. 289–319. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323- 91878-7.00001-0>.

MARCH, Linnhoff. **Introduction to Pinch Technology**. Disponível em: <www.linnhoffmarch.com>.

MOTTA, I. L. *et al.* **Biomass gasification in fluidized beds: A review of biomass moisture content and operating pressure effects**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 1 out. 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.042>.

MOTTA, I. L. *et al.* **Correlating biomass properties, gasification performance, and syngas applications of Brazilian feedstocks via simulation and multivariate analysis**. Industrial Crops and Products, v. 181, 1 jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114808>.

ROSTRUP-NIELSEN, Jens R. **New aspects of syngas production and useCatalysis Today**. 2000. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/S0920-5861(00)00455-7>.

SHEN, Y.; YOSHIKAWA, K. **Recent progresses in catalytic tar elimination during biomass gasification or pyrolysis - A review**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.12.062>.

SMITH, R. **Chemical Process Design and Integration**. 2005.

ZHAO, Y. *et al.* **Pinch Analysis for Heat Integration of Pulverized Coke Chemical Looping Gasification Coupled with Coke-Oven Gas to Methanol and Ammonia.** Processes, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/pr10091879>.