

Simulação da emissão de gases de combustão de uma Caldeira Aquatubular

Simulation of combustion gas emission from an Aquatubulare Boiler

Maria Gabriela Ranucci Carneiro¹, Kádimo Augusto da Silva², Gabrielly dos Santos Novais³, Felipe Luiz de Assunção Bezerra⁴, Lucas Bonfim Rocha⁵

RESUMO

O presente trabalho busca realizar uma análise detalhada da quantidade de gases, liberados para a atmosfera, nocivos ao meio ambiente e à saúde humana, que são gerados de acordo com a quantidade de cavaco de eucalipto queimado em caldeiras industriais do tipo aquatubular. Estas caldeiras desempenham um papel fundamental em diversas indústrias, pois são responsáveis pela geração de energia térmica e elétrica, as quais são utilizadas no funcionamento de diversos equipamentos industriais. No entanto, é importante destacar que a geração deste tipo de energia também está associada a emissão de poluentes, como dióxido de enxofre, óxido de carbono, dióxido de carbono e óxidos de nitrogênio. Portanto, este trabalho desenvolveu um simulador imersivo para o estudo e operação de uma caldeira aquatubular. A simulação é baseada no software SimCIAT, desenvolvido pelos autores, aliando à um ambiente virtual com alta imersão e interação do usuário.

PALAVRAS-CHAVE: Caldeira; Gases; Simulação.

ABSTRACT

The present work seeks to carry out a detailed analysis of the amount of gases released into the atmosphere, harmful to the environment and human health, which are generated according to the amount of eucalyptus chips burned in industrial watertube boilers. These boilers play a fundamental role in several industries, as they are responsible for generating thermal and electrical energy, which are used in the operation of various industrial equipment. However, it is important to highlight that the generation of this type of energy is also associated with the emission of pollutants, such as sulfur dioxide, carbon oxide, carbon dioxide and nitrogen oxides. Therefore, this work developed an immersive simulator for the study and operation of a water tube boiler. The simulation is based on the SimCIAT software, developed by the authors, combining a virtual environment with high immersion and user interaction.

KEYWORDS: Boiler; Gases; Simulation.

INTRODUÇÃO

Para diversos processos industriais existe uma grande demanda por energia, sem esta seria impossível o desenvolvimento da humanidade, dentre as formas de energia a

¹ Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: mariagabrielacarneiro@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6095361973242331>.

² Aluno voluntário de Inovação Tecnológica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: kadimo@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8625694899212522>.

³ Bolsista do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: gnovais@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6392420555211629>.

⁴ Docente no Departamento de Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: felipibezerra@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8529742705597350>.

⁵ Docente no Departamento de Engenharia Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, Paraná, Brasil. E-mail: lucasrocha@utfpr.edu.br. ID Lattes: <http://lattes.cnpq.br/8628427682289404>.

energia térmica e elétrica (MENEZES, 2022). Normalmente, para gerar estas formas de energia são empregadas caldeiras, um conjunto de equipamentos que visam a transformação da água, em seu estado líquido, para o estado de vapor, através da transferência de calor gerada na combustão, este vapor é levado para turbinas que o transformam em energia para o abastecimento da indústria (LINCK, 2022).

Com a crescente exploração da cogeração pelas indústrias têm-se um aumento da queima de combustíveis, com isto, temos um aumento na emissão desses gases oriundos da combustão, que são o dióxido de enxofre (SO_2), sulfeto de hidrogênio (H_2S), amônia (NH_3), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4) (FLANDOLI, 2014). Por conta deste aumento, em 2011 a CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente, colocou em vigor a resolução Nº 436 permitindo a uma produção de mais de 50 MW, a partir da queima de cavaco em caldeira, a emissão de 1000 mg/Nm^3 de CO e 500 mg/Nm^3 de NO_x , já em 2014 a SEMA, Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Recursos Naturais, colocou em vigência a resolução Nº 016 que permite a uma produção de 50 a 70 MW através da queima de cavaco em caldeira a liberação de 1000 mg/Nm^3 de CO e 500 mg/Nm^3 de NO_x . Com base nesta demanda, e utilizando o *software* SimCIAT, um simulador de caldeira aquatubular, criado pelos próprios autores, o presente trabalho tem por objetivo fazer uma análise ambiental, por meio de simulações, da emissão dos gases emitidos após a queima do cavaco de eucalipto em caldeiras aquatubulares de grande porte.

METODOLOGIA

MODELAGEM DO SIMCIAT

O *software* SimCIAT foi desenvolvido com o intuito de resolver todos os balanços de massa e energia, usando de correlações termodinâmicas, existente no processo da caldeira, promovendo assim simulações, que podem ser estáticas ou dinâmicas, de acordo com o que o usuário deseja. Sua primeira versão foi elaborada em uma linguagem VBA com uma interface simples, e teve seu registro feito pelo Instituto Nacional da Propriedade Industrial (INPI), com o nome “SimCIAT - SIMULADOR DE CALDEIRA INDUSTRIAL AQUATUBULAR” e número de registro BR512021002444-3 (CARNEIRO, 2022).

Visando uma melhor experiência ao usuário, os autores iniciaram o desenvolvimento de uma nova versão para o SimCIAT em 3D com pontos de interação. Para isso, criou-se uma interface desenvolvida com a modelagem dos elementos presentes na caldeira aquatubular a partir de referências do site *GrabCAD* utilizando o Blender, um *software* que possibilita a criação de modelagem em 3D (O BLENDER, 2003). Cada elemento da caldeira foi projetado, dimensionado e modelado para o simulador.

AMBIENTAÇÃO DO SIMCIAT E EXPERIÊNCIA DO USUÁRIO

Na segunda etapa de criação da interface foi feita a ambientação do simulador, utilizando do *software Unreal Engine*, nele há uma vasta biblioteca de dados básico para um jogo ou no caso um simulador imersivo (BASSO, 2022), facilitando assim uma parte da programação e tendo um ambiente pronto. A Unreal trás vários ambientes pré-

estabelecidos e pré-programados em linguagem blueprint e/ou c++, porém, após uma análise de todas, a escolhida pelos autores, pensando na melhor opção para um ambiente que deve simular um pátio industrial, foi o “*First Person*” e neste template a céu aberto, após a texturização e pintura dos equipamentos, esses foram transferidos para a Unreal e foi realizada a montagem da caldeira.

A criação de simuladores imersivos que tenham um desempenho se torna complexa pela necessidade de conhecimentos em programação, ferramentas e outros softwares, no entanto, quando bem realizados, esses simuladores proporcionam uma experiência realista, permitindo que os usuários interajam livremente com vários aspectos da simulação (MANDOLA, 2021). Pensando nisso, o ambiente virtual do SimCIAT possibilita ao usuário interagir com vários equipamentos da caldeira e ter acesso a cada espaço projetado.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO SIMULADOR

Com relação à modelagem matemática desenvolvida, as equações foram escritas com base nos conceitos de conservação de massa e energia, aplicando os mesmos em volumes de controle convenientes, com base nas propriedades que devem ser calculadas (HIMMELBLAU e RIGGS, 2012). Essas equações estão dispostas a seguir.

$$\frac{dM}{dt} = \sum_{i=1}^l (\dot{m}_i)_{in} - \sum_{j=1}^m (\dot{m}_j)_{out} \pm \sum_{k=1}^n r_k \cdot V \cdot MM_k \quad (1)$$

$$\frac{dE}{dt} = \sum_{i=1}^l [\dot{m}_i(h + e_k + e_p)]_{i,in} - \sum_{j=1}^m [\dot{m}_j(h + e_k + e_p)]_{j,out} + \dot{Q} - W_{eixo} \pm r_k \cdot V \quad (2)$$

sendo: M e E a massa e energia do sistema; \dot{m} a vazão mássica; h , e_k e e_p a entalpia, energia cinética e energia potencial; \dot{Q} e W_{eixo} o calor e trabalho de eixo; r_k a velocidade da reação; V o volume do sistema; t o tempo.

O calor específico dos componentes que compõe o sistema foram calculados em função da temperatura do meio, a partir da Equação 3 (HIMMELBLAU e RIGGS, 2012).

$$C_p = A + B \frac{T}{1000} + C \left(\frac{T}{1000} \right)^2 + D \left(\frac{T}{1000} \right)^3 \quad (3)$$

Por fim, a eficiência da caldeira foi determinada empregando o método indireto, levando em consideração as perdas por gases secos, hidrogênio e umidade presentes no combustível, umidade no ar, combustão incompleta, radiação e convecção, cinzas não queimadas no ar e na grelha.

$$\eta = 1 - \frac{\sum Q_{perdas}}{Q_{disponível}} \quad (4)$$

sendo: a eficiência da caldeira; a energia perdida através das formas citadas anteriormente; a energia disponível no sistema.

SIMULAÇÃO DINÂMICA DA EMISSÃO DE GASES APÓS A COMBUSTÃO

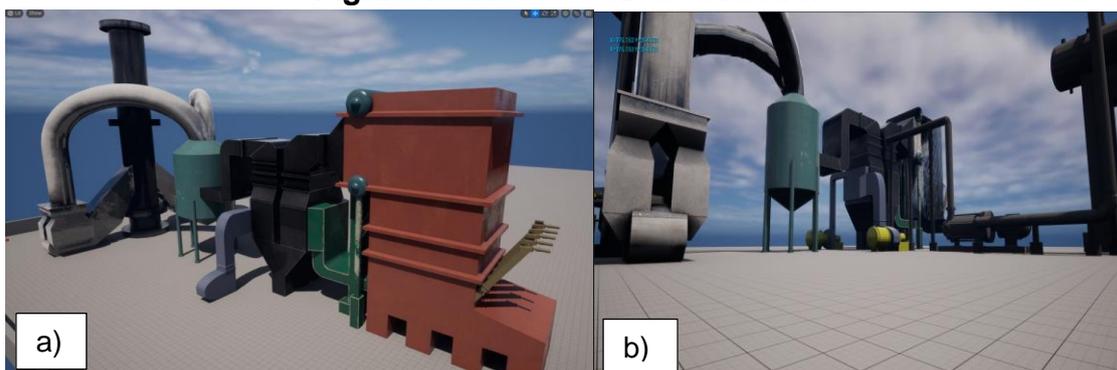
O SimCIAT é um simulador capaz de prever as várias situações recorrentes em uma caldeira aquatubular, através de simulações estáticas e também pode realizar simulações dinâmicas, que auxiliam nas análises do comportamento das variáveis em relação a perturbações recorrentes através do tempo (SOUZA, 2020). Sabendo disso, foi rodado no SimCIAT uma simulação dinâmica com cavaco com umidade de 40%, uma vazão de ar com 50% em excesso, temperatura ambiente a 25°C, 10 execuções e um intervalo de 10 segundos entre elas para assim gerar um gráfico com os resultados da emissão de gases através deste tempo e perturbações possíveis de acordo com a alimentação de cavaco.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

SIMCIAT SIMULADOR IMERSIVO COM PONTOS DE INTERAÇÃO

Após a conclusão da modelagem, pintura e texturização de cada equipamento listado anteriormente eles foram ambientados montando a caldeira aquatubular na Unreal como é possível observar na Figura 1a. Com isso foi programada uma parte que estabelece os pontos de interação, possibilitando que o usuário possa andar pelo ambiente, olhar e interagir nos equipamentos da caldeira. Na Figura 1b é possível visualizar a caldeira do ponto de vista do jogador. Examinando a Figura 1 é possível constatar que a modelagem feita atendeu as expectativas nelas impostas, ficando próximas da realidade.

Figura 1 - Interface 3D do SimCIAT



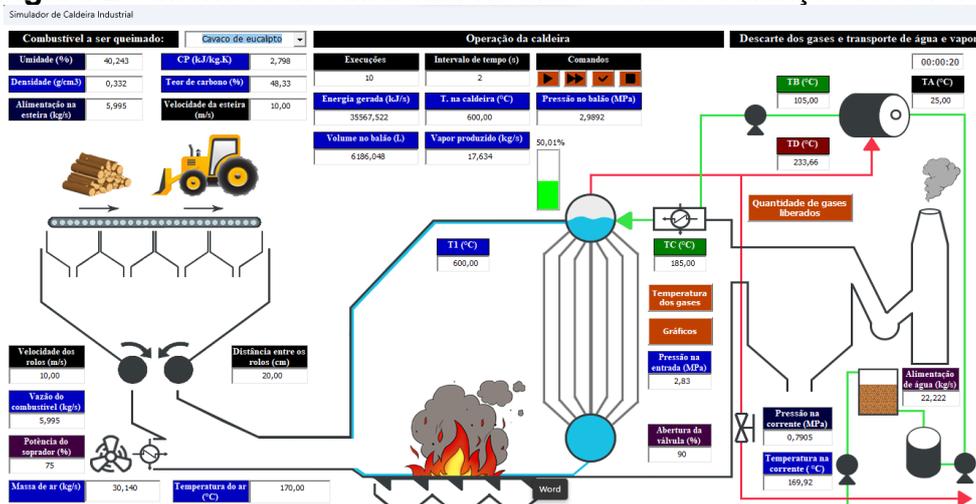
Fonte: Autoria própria, 2023.

MODELAGEM MATEMÁTICA DO SIMULADOR

Com toda a modelagem matemática realizada e transcrita para a linguagem VBA no excel, foi concluída a primeira versão do simulador com a interface simples que resolve todos os balanços de massa e energia envolvidos na caldeira, como mostra a figura 2.

Examinando a interface na figura 2 e os resultados obtidos através da simulação é possível constatar que todos os balanços foram bem elaborados e resolvidos pelo simulador, atendendo assim às expectativas nele colocadas.

Figura 2 - Interface do simulador no excel com os balanços resolvidos

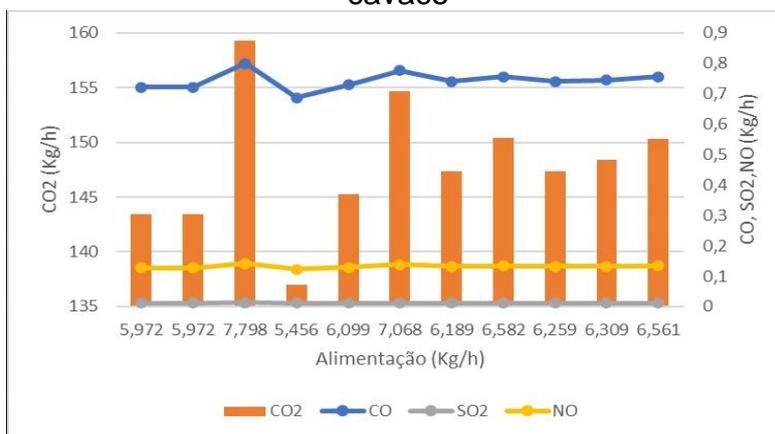


Fonte: autoria própria, 2023.

SIMULAÇÃO DINÂMICA DA EMISSÃO DE GASES APÓS A COMBUSTÃO

Após inserir na interface do simulador, mostrada na figura 2, os dados de combustível, que o escolhido foi o cavaco, e a quantidade de execuções e o tempo entre elas, sendo 10 e 10, respectivamente, foi rodado pelo SimCIAT a simulação dinâmica, que depois de terminada gerou uma tabela com os valores e a partir desses foi gerado um gráfico, exposto na figura 3. Analisando o gráfico gerado podemos concluir que a quantidade alimentada de cavaco influencia diretamente na quantidade de gases liberados, pois ela varia conforme a alimentação vai variando também.

Figura 3 - Gráfico da quantidade de gases liberados de acordo com a alimentação de cavaco



Fonte: autoria própria, 2023.

CONCLUSÃO

Analisando tudo o que foi exposto pelo presente trabalho, considerando que alguns parâmetros ainda podem ser ajustados, é possível concluir através das simulações

realizadas pelo SimCIAT que a queima do cavaco é diretamente proporcional a emissão de gases liberados à atmosfera. Logo, para empresas que tenham caldeiras de grande porte se faz necessário uma inspeção detalhada da quantidade de gases que estão emitindo para atender as normas citadas na seção introdutória do trabalho.

Agradecimentos

Agradecemos todo o auxílio prestado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) e as bolsas de iniciação tecnológica concedidas pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológicos (CNPq).

Conflito de interesse

Não há conflito de interesses.

REFERÊNCIAS

BASSO, Letícia. **Entenda como funciona o motor de jogos Unreal Engine da Epic Games**. Voitto. 2022.

CARNEIRO MG, LINCK B, SOUZA KAS, BEZERRA FL, BONFIM-ROCHA L, **Estado da Arte do uso do bagaço de cana-de-açúcar para cogeração frente a sua codigestão na produção de biogás**. In: SEMINÁRIO DE EXTENSÃO E INOVAÇÃO, 12; SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 27., 2022, Santa Helena. Anais eletrônicos [...] Santa Helena: Even3. 2022.

HIMMELBLAU, D. M.; RIGGS, J. B. **BASIC PRINCIPLES AND CALCULATIONS IN CHEMICAL ENGINEERING**, 8ª Edição. Pearson, 2012.

MANDOLA, Juliana Bambini; GRATON, Fernando Gargantini; IMAI, César. **SIMULAÇÕES VIRTUAIS IMERSIVAS EM PROJETOS ARQUITETÔNICOS: OS MOTORES DE JOGOS COMO PRÁTICA NO PROJETO COLABORATIVO. SIMPÓSIO BRASILEIRO DE QUALIDADE DE PROJETO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO**, v. 7, p. 1-10, 2021.

MENEZES, Emanuelle Santos de. **Avaliação técnica de caldeiras a óleo (package boilers), utilizando simulação de processos**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Maranhão.

LINCK, Bruno Fonseca. **Propostas de aprimoramento do projeto e operação do balão de vapor da caldeira aquatubular de uma cooperativa agroindustrial**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

O BLENDER, Baixe. **O que é Blender?**. 2003.

SOUZA KAS, LINCK BF, VIEIRA AL, SRUTKOSKE CL, BONFIM-ROCHA L, **SimCIAT: Um simulador de caldeira industrial aquatubular em visual basic for applications**. 2020.

XIII Seminário de Extensão e Inovação
XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - *Campus Ponta Grossa, PR*

