

PYTHON COMO FERRAMENTA DE SIMULAÇÃO PARA PROJETOS DE REATORES INDUSTRIAIS CONTÍNUOS

PYTHON AS A SIMULATION TOOL FOR INDUSTRIAL CONTINUOUS REACTOR PROJECTS

PYTHON COMO HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN PARA PROYECTOS DE REACTORES INDUSTRIALES CONTINUOS

Vinicius da Costa Martins¹
Pedro Alcantara Moreira de Azevedo²
Lucas Kovacic Bortoloto³
Fabrício Bruno Mendes⁴

RESUMO: Os reatores industriais são conhecidos por serem o coração das indústrias químicas devido a sua funcionalidade, permitindo a produção de diversos materiais. A utilização de uma ferramenta para a simulação de projetos de reatores se torna necessária, devido a fatores como complexidade, viabilidade produtiva e econômica do projeto além de permitir projetar de acordo com a capacidade e requisitos produtivos demandados pelo fabricante. Para auxiliar na preparação do projeto base, utilizou-se a programação Python como ferramenta para simular o comportamento reacional ao longo de reatores contínuos. Realizou-se o estudo individual dos dois modelos de reatores CSTR e PFR e desenvolveu-se a modelagem baseada em suas respectivas características. Os resultados demonstram a versatilidade da tecnologia como ferramenta de auxílio em tomadas de decisões e auxilia de forma clara a compreensão do comportamento cinético nos reatores industriais.

2581

Palavras-chave: Cinética Química. Projeto de Reatores. Simulação e Modelagem.

ABSTRACT: Industrial reactors are often referred as the “Core” for industrial chemistry due to their functionality, providing the production of different materials. The application of a tool to predict the reactor projects becomes mandatory given the complexity, economic features, and productive feasibility of according to demand. In order to prepare the standard project, Python programming has been employed as a simulation tool to analyze reaction process in the continuous reactors. The CSTR and PFR models were individually analysed, and modeling was developed to capture their unique characteristics. The results demonstrated the capability of using technological tools to support decision-making and provide a clearer understanding of reaction kinetics within reactors.

Keywords: Chemical Kinetic. Reactors Projects. Simulation and Modeling.

¹Discente, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Campus Suzano.

² Discente, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Campus Suzano.

³ Discente, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia - Campus Suzano.

⁴ Doutor em Bioenergia (UNICAMP), Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos, Engenheiro Químico.

RESUMEN: Los reactores industriales se caracterizan por ser el corazón de las industrias químicas debido a su funcionalidad, permitiendo la producción de diversos materiales. El uso de una herramienta de simulación de proyectos de reactores se hace necesario, debido a factores como la complejidad, la viabilidad productiva y económica del proyecto, además de permitir diseñar de acuerdo a los requisitos de capacidad y producción exigidos por el fabricante. Para ayudar en la preparación del proyecto base, se utilizó la programación Python como herramienta para simular el comportamiento de la reacción en reactores continuos. Se realizó un estudio individual de los dos modelos de reactor CSTR y PFR y se desarrolló una modelización en función de sus respectivas características. Los resultados demuestran la versatilidad de la tecnología como herramienta para ayudar en la toma de decisiones y ayudar claramente a comprender el comportamiento cinético en los reactores industriales.

Palabras clave: Cinética química. Proyecto Reactor. Simulación y Modelado.

INTRODUÇÃO

Os reatores químicos são equipamentos cuja finalidade consiste na realização de uma reação química por intermédio de condições controladas, nas quais os seus produtos deverão ter suas especificações estabelecidas previamente. Geralmente, são conhecidos por serem o coração de diversas indústrias químicas, sendo fundamental o conhecimento de etapas que envolvam os cálculos de reatores para que possibilite obter o sucesso econômico do processo (OLIVEIRA, 2017).

2582

Os principais fatores para o projeto de reatores são a identificação do modo de operação e a classificação das reações. Ao que se diz respeito ao modo de operação, os reatores são classificados como descontínuo, semi-contínuo e contínuo, e em relação a classificação das reações, pode-se classificar em reação homogêneas ou heterogêneas, catalíticas ou não catalíticas, isotérmicas, adiabáticas ou diferente sistemática de temperatura (PIRES et al., 2019 e OLIVEIRA, 2017).

Sendo equipamentos de extrema importância em transformações químicas, podem ser empregados em escala laboratorial, planta piloto e industrial, utilizados em diversas áreas da indústria, tais como petrolíferas, alimentícias, farmacêuticas e indústrias de transformação química. Ao projetar um reator, é importante considerar fatores como modelo de acordo com a reação, condições operacionais, o fluxo, o dimensionamento, as adversidades e os custos envolvidos no processo (AGUIAR, 2023).

Em relação aos modelos de reatores, podemos destacar o Reator Descontínuo (Batelada) que possui característica operacional em pequena escala, sendo empregado em processos difíceis de se converter em operações contínuas e na fabricação de produtos de alto custo. A respeito do

fluxo Semicontínuo, a principal característica é a ambiguidade operacional, ou seja, opera tanto como batelada quanto continuamente, sendo que as composições de suas reações variam com o decorrer do tempo (FOGLER, 2016).

Os Reatores Contínuos - do interesse deste artigo - são operados geralmente em um sistema estacionário, sendo os mais comuns o Reator de Escoamento Uniforme (PFR - Plug Flow Reactor) e o Reator Tanque Contínuo (CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor). Dessa forma, o PFR é característico pelo seu formato de tubo cilíndrico horizontalizado, onde os reagentes alimentados no processo reacional são consumidos continuamente ao decorrer de seu comprimento, e por conta disso é utilizado em processos de grande escala e em reações gasosas heterogêneas devido a sua alimentação e retirada de produtos continuamente (AGUIAR, 2023). Enquanto o CSTR é usualmente conhecido por possuir um agitador que homogeneiza os reagentes de forma perfeita, em escoamento contínuo e sem acúmulo de reagentes. É muito comum em reações que ocorrem em fases líquidas (MENDES, 2019).

Na Tabela 1, é possível comparar as vantagens e desvantagens dos Reatores Contínuos para identificar suas principais características.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens entre os diferentes modelos de reatores contínuos (PFR e CSTR).

| Reator de Escoamento Uniforme (PFR - Plug Flow Reactor) | | 583 |
|--|---|-----|
| Vantagem | Desvantagem | |
| Opera continuamente | Gradientes de temperatura ao longo do tubo | |
| Maior conversão do volume para grande parte de suas reações | Alto custo para implementação | |
| Baixo custo operacional | Fácil obtenção de queda de pressão | |
| Reator Tanque Contínuo (CSTR - Continuous Stirred Tank Reactor) | | |
| Vantagem | Desvantagem | |
| Opera continuamente | Alto investimento | |
| Controle de temperatura | Menor conversão do volume para grande parte de suas reações | |
| Ótima mistura | | |
| Facilidade de limpeza | | |

Fonte: Elaborado a partir de FOGLER, 2016.

Em relação ao gerenciamento de projetos, que visam a redução de custos, otimização e excelência operacional, principalmente em áreas de segmentos tecnológicos, energéticos, telecomunicações, serviços e a própria engenharia, englobando valores técnicos e metodológicos para o embasamento do sucesso da execução de projetos (BARCAUI, 2012).

A fim de evitar custos adicionais e auxiliar no processamento de etapas do projeto de um reator químico, é de suma importância a utilização de simuladores, os quais representam processos industriais por meio da aplicação matemática e princípios básicos dos conceitos de Cinética e Reatores. Durante décadas, a aplicação da simulação era limitada, porém, com o avanço tecnológico em áreas de ciências da computação e o aumento dos processadores

computacionais, essas limitações foram superadas, tornando-se possível o desenvolvimento de modelos aplicáveis (SILVA, 2015).

Diante dessa situação, entre as mais diversas tecnologias desenvolvidas e do amplo ramo de linguagem de programação, é apresentada a linguagem Python, a qual é uma das mais utilizadas por estar em constante desenvolvimento e em plena expansão no mercado. Além disso, outra vantagem, se tratando de uma das mais utilizadas no mundo, o Python possui uma vasta biblioteca de códigos abertos e que são atualizados frequentemente (SILVA, 2023).

Dentre as bibliotecas úteis disponíveis no Python, destaca-se para a aplicação de um simulador de reatores a biblioteca tkinter, que é capaz de construir interfaces gráficas de usuário e facilita a criação de um programa em Python (ROCHA, 2020). Além desta, existe também a biblioteca numpy, a qual auxilia na organização de grandes fluxos de dados, sua manipulação e elaboração estatística (COUTINHO, 2020) e a biblioteca matplotlib, que é destinada para visualização de dados e plotagem gráfica, possuindo extensão com a própria biblioteca numpy (COUTINHO, 2021).

A coesão de representação gráfica com os dados obtidos é uma vantagem para todos os campos que pertencem a STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática), trazendo benefícios para a compreensão dos dados com maior facilidade. Esta visualização por interfaces gráficas é uma forma mais acessível de entender exceções, tendências, padrões e efetuar uma análise. Além disso, com o mundo em direção a Big Data, as ferramentas e tecnologias utilizadas em dados são essenciais para analisar inúmeras quantidades de informações e proporcionar uma tomada de decisão impulsionada pela análise dos dados (TABLEAU, n.d.).

2584

Dessa forma, tornou-se possível realizar a simulação por um modelo, ou seja, um simulador por meio da abstração matemática de um processo real (SEBORG et al., 2004) ressaltando a não incorporação de todas as características macroscópicas e microscópicas de um processo real. Outrossim, vale destaque para a relação do tempo e o esforço para obtê-lo e verificá-lo, a fim de analisar seu nível de detalhamento, bem como os benefícios cogitados pela expectativa de aplicação. Portanto, define-se simulação como uma resposta temporal às variáveis de interesse, ou seja, variáveis dependentes de um modelo, ao qual aplica-se valores de entrada com seus sinais desejados (GARCIA, 2005).

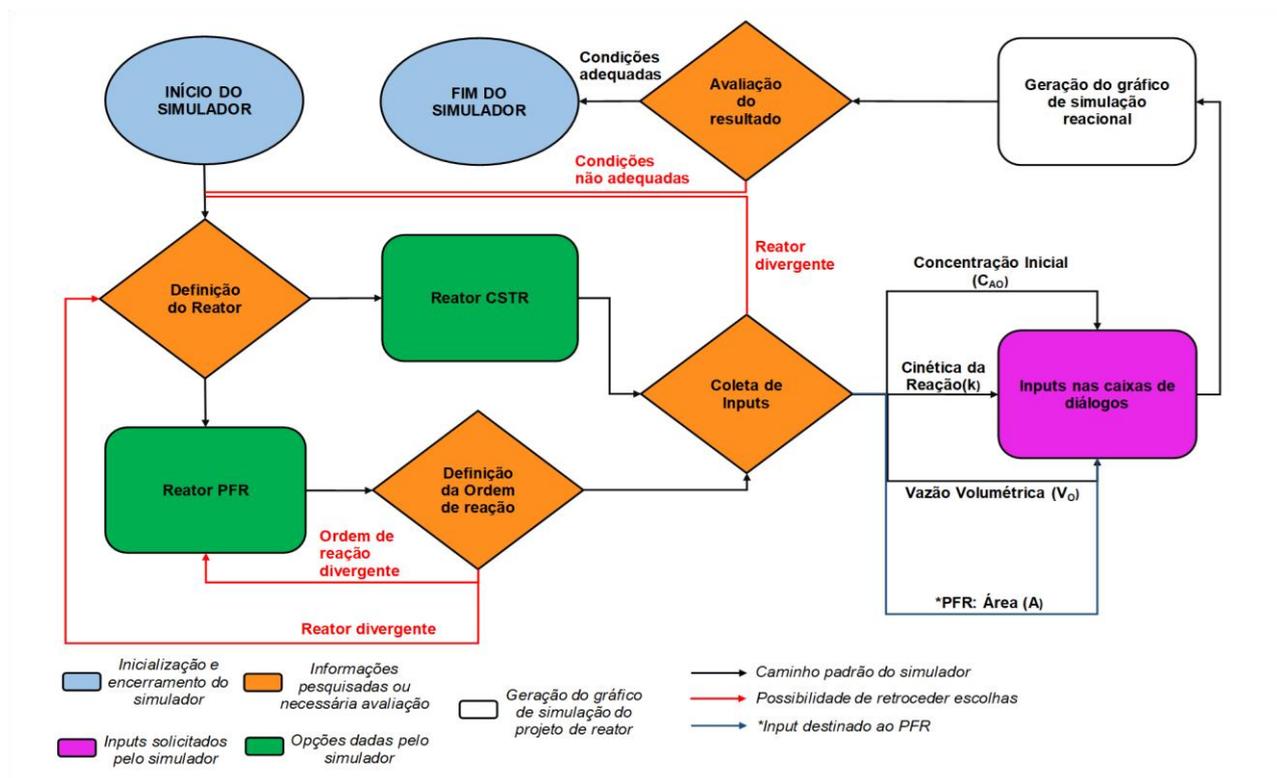
Dessa maneira, esta pesquisa buscou viabilizar a criação de um simulador capaz de servir de modelo para a aplicação e previsão de projetos de reatores industriais contínuos por meio da linguagem de programação em Python.

MÉTODOS

Nesta pesquisa, utilizou-se o estudo de Projeto de Reatores para identificar a cinética comportamental, sendo escolhido os reatores contínuos CSTR e PFR, operando adiabaticamente e isotermicamente. Os inputs escolhidos para fomentação da simulação foram a Concentração Inicial do reagente principal - Entrada (C_{AO}); a Vazão Volumétrica Inicial - Entrada (V_0); e a Constante Cinética (k : em h). Essas informações de entrada são cruciais ao realizar um projeto de reator.

Como ferramenta para criação do simulador, utilizou-se a biblioteca de programação Python, com os códigos transcritos no software Visual Studio Code, pois esta ferramenta facilita a visualização da estrutura do programa, além de gerar caixas interativas e gráficos de visualização do comportamento das reações, observando-se o fluxograma desenvolvido para a interação no simulador (FIGURA 1).

Figura 1 - Fluxograma do modo de operação do simulador.



Fonte: Próprios autores.

O Fluxograma do modo de operação do simulador evidencia os caminhos do processo na interface do software. Nas etapas que sucedem a modelagem, temos o “Caminho padrão do simulador” com setas na cor preta que direciona do início até o final do simulador, em contra partida, temos a “Possibilidade de retroceder escolhas”, evidenciado na cor vermelha e criado a

partir da reflexão do interesse de retorno a etapas dentro do sistema, adequando-se a facilidade e agilidade na navegação.

Temos como base para a modelagem o requisito de obter anteriormente as informações necessárias, sendo de origem teórica ou vinculada a projetos anteriores (caixas laranjas), as opções dadas pelo simulador (caixas verdes) que dizem a respeito da escolha entre o “Reator CSTR” e o “Reator PFR”, além dos inputs coletados para inserir na modelagem (caixa roxa) e a geração do gráfico para análise dos dados (caixa branca).

RESULTADO E DISCUSSÕES

De maneira a evidenciar o funcionamento do simulador, realizou-se uma pesquisa bibliográfica registrando os dados obtidos (TABELA 2 e TABELA 3) e colocando-os em comparação no simulador.

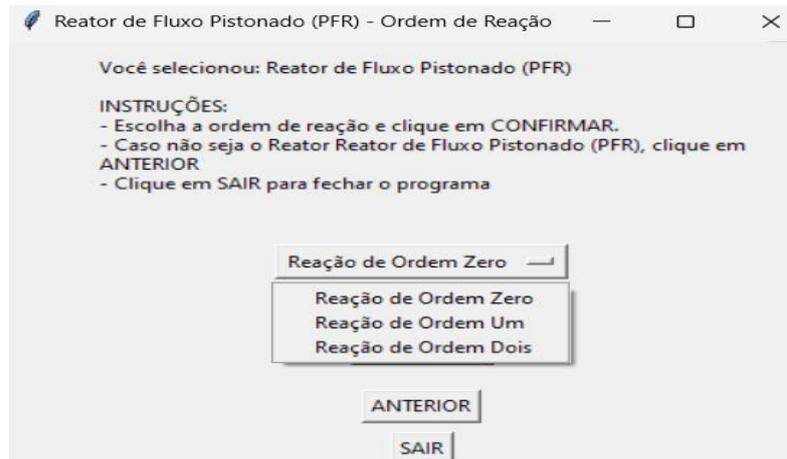
Tabela 2 - Dados utilizados na simulação do “Reator PFR” referentes a Ordens de Reação 1 e 0.

| Reator de Escoamento Uniforme (PFR - PLUG FLOW REACTOR) | | | |
|--|----------|-----------|-----------|
| Ordem de Reação (1) | | | |
| Dados adaptados da referência | Sigla | Valor | Unidade |
| Concentração Inicial | C_{AO} | 900000,00 | g / m^3 |
| Vazão volumétrica | V_O | 0,148 | m^3 / h |
| Constante cinética | k | 0,846459 | h^{-1} |
| Resultados obtidos pelo autor | Sigla | Valor | Unidade |
| <i>Conversão</i> | X_A | 0,97 | - |
| <i>Volume do reator</i> | V | 0,60 | m^3 |
| *Adaptado de SANTOS, et al, 2019. | | | |
| Reator de Escoamento Uniforme (PFR - PLUG FLOW REACTOR) | | | |
| Ordem de Reação (0) | | | |
| Dados adaptados da referência | Sigla | Valor | Unidade |
| Concentração Inicial | C_{AO} | 40,093 | g / m^3 |
| Vazão volumétrica | V_O | 0,03 | m^3 / h |
| Constante cinética | k | 7,077 | h^{-1} |
| Resultados obtidos pelo autor | Sigla | Valor | Unidade |
| <i>Conversão</i> | X_A | 0,474 | - |
| <i>Volume do reator</i> | V | 80,00 | m^3 |
| *Adaptado de BAUER e RODRIGUES, 2021. | | | |

Fonte: Próprios autores.

Após selecionar a opção “Reator de Fluxo Pistonado (PFR)”, primeiramente escolhe-se a ordem da reação que se deseja trabalhar para em seguida adicionar os parâmetros na simulação como demonstrado na Figura 2.

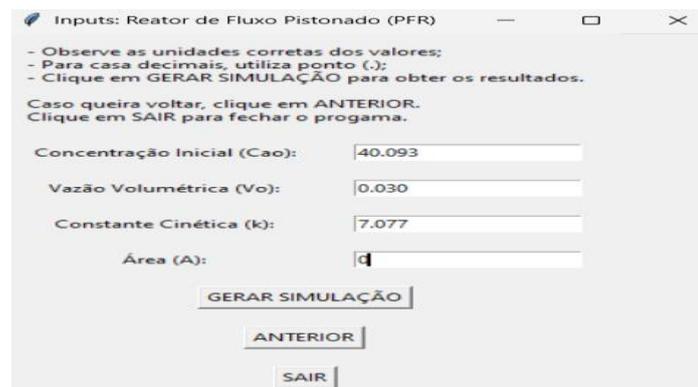
Figura 2 - Interface do programa de simulação para o “Reator PFR”.



Fonte: Próprios autores.

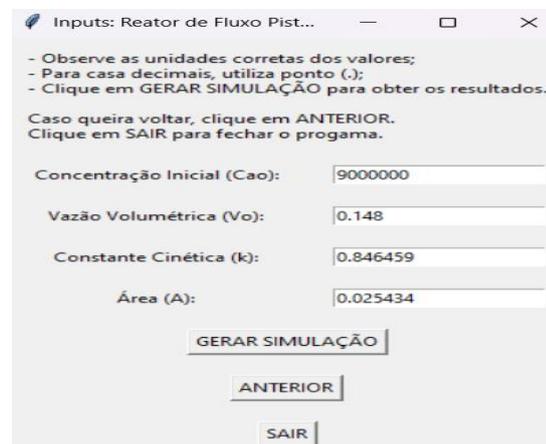
A Figura 3 e a Figura 4 representam o painel de controle do simulador para reatores PFR de ordem de reação 0 e 1, ao qual apresentam os dados obtidos anteriormente.

Figura 3 - Painel de controle do simulador para reação de ordem 1.



Fonte: Próprios autores.

Figura 4 - Painel de controle do simulador para reação de ordem 0.



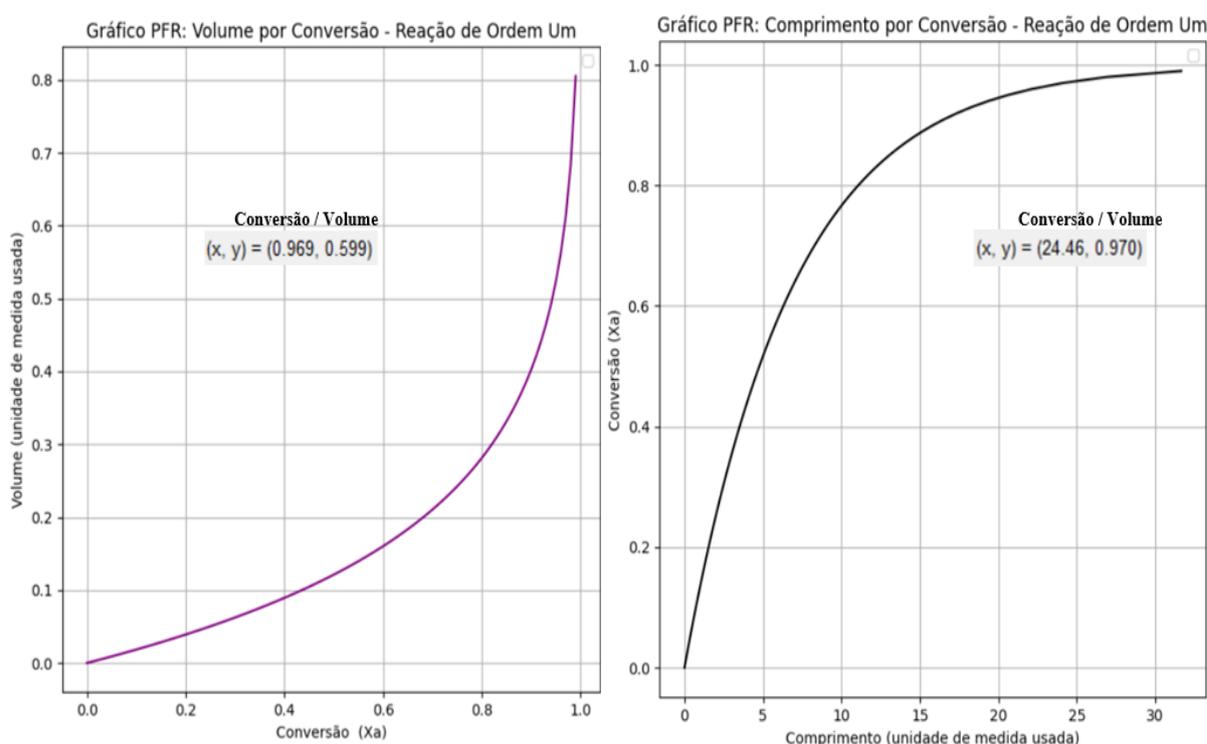
Fonte: Próprios autores.

Para o cálculo da área da secção utilizada no “Reator PFR”, utilizou-se das referências adaptadas, tais quais foram fomentadas do valor fornecido do diâmetro da secção.

Na reação de ordem 1, a área utilizada foi calculada a partir do diâmetro fornecido na referência. Em contra-partida, conforme observada na Figura 4, o valor da área utilizado foi zero, isso porque é uma reação utópica de ordem 0, na qual não há variação da concentração dos reagentes ao longo do comprimento do reator, ou seja, a velocidade da reação não está em função do comprimento (ISHIDA, 2017).

Após adicionados todos os valores, foi gerada a modelagem.

Gráfico 1 - Modelagem do “Reator PFR” de ordem de reação 1.

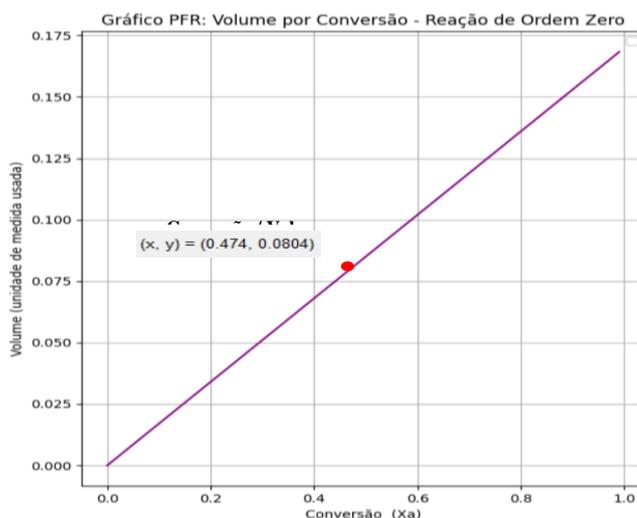


Fonte: Próprios autores.

Com base nos gráficos para reações de ordem 1, fica claro que a taxa de conversão é diretamente proporcional ao comprimento do reator, ou seja, quanto maior o comprimento, maior será a conversão dos reagentes em produtos (ISHIDA, 2017). Portanto, usando de base o valor da conversão proposta pelo artigo (97%), foi possível definir o comprimento aproximado de 24,46 m para se construir um reator PFR nessas condições.

Ainda que, comprovando a eficiência da utilização da modelagem, evidenciado pela comparação dos resultados obtidos do artigo referenciado (97% de Conversão para 0,6 m³ de Volume) com os resultados do simulador (96,9% de Conversão para 0,599 m³).

Gráfico 2 - Modelagem do “Reator PFR” de ordem de reação 0.



Fonte: Próprios autores.

Na ocasião da Ordem de Reação 0, não fora utilizada a área da secção como mencionado anteriormente. Outrora, na adaptação e comparação com o artigo, encontramos a taxa de Conversão de 47,4% pressuposta pelo autor e 0,080 dm³, que por sua vez, mencionou-se na referência que o “Reator PFR” operava em volume constante de 0,100 dm³.

Em outra ocasião, comparou-se os parâmetros para a simulação entre um “Reator PFR” e um “Reator CSTR”, ambos em meio reacional de segunda ordem, com valores da Concentração Inicial, Vazão Volumétrica e Constante Cinética iguais apresentados na Tabela 3.

2589

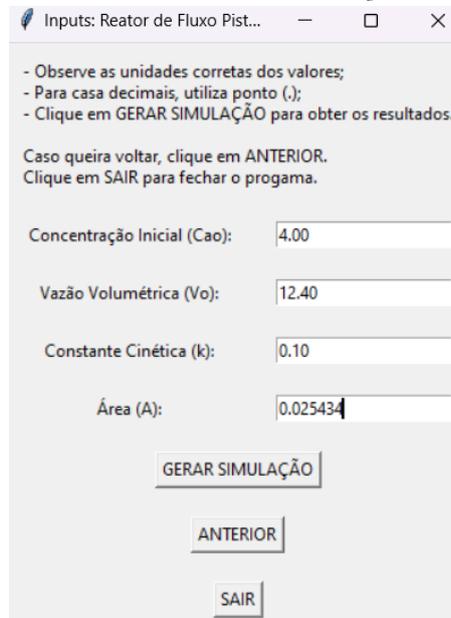
Tabela 3 - Dados utilizados na simulação do “Reator PFR” e do “Reator CSTR” de ordem de reação 2

| Reator de Escoamento Uniforme (PFR - PLUG FLOW REACTOR) | | | |
|---|----------|--------|--------------------|
| Ordem de Reação (2) | | | |
| Dados adaptados da referência | | | |
| Concentração Inicial | Sigla | Valor | Unidade |
| | C_{AO} | 4,00 | g / m ³ |
| Vazão volumétrica | V_O | 12,40 | m ³ / h |
| Constante cinética | k | 0,10 | h ⁻¹ |
| Resultados obtidos pelo autor | | | |
| Conversão | Sigla | Valor | Unidade |
| | X_A | 0,80 | - |
| Volume do reator | V | 500,00 | m ³ |
| *Adaptado de Elements of Chemical Reaction Engineering 6th Edition. | | | |
| Reator de Tanque Contínuo (CSTR - CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR) | | | |
| Ordem de Reação (2) | | | |
| Dados adaptados da referência | | | |
| Concentração Inicial | Sigla | Valor | Unidade |
| | C_{AO} | 4,00 | g / m ³ |
| Vazão volumétrica | V_O | 12,40 | m ³ / h |
| Constante cinética | k | 0,10 | h ⁻¹ |
| Resultados obtidos pelo autor | | | |
| Conversão | Sigla | Valor | Unidade |
| | X_A | 0,80 | - |
| Volume do reator | V_R | 500,00 | m ³ |
| *Adaptado de Elements of Chemical Reaction Engineering 6th Edition. | | | |

Fonte: Próprios autores.

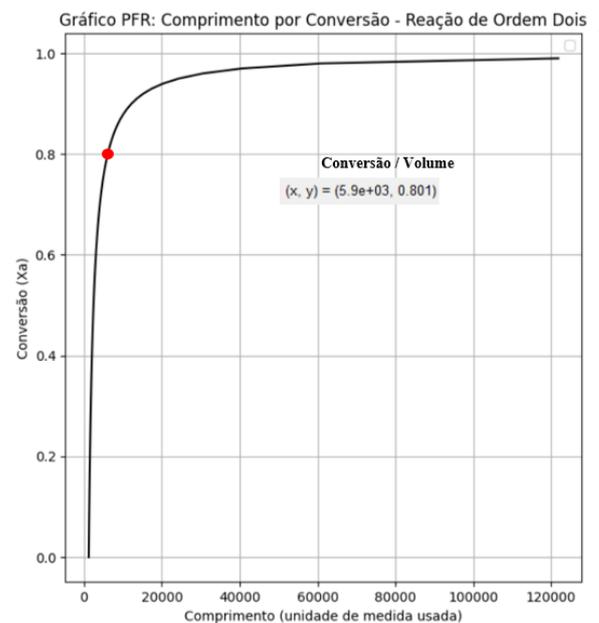
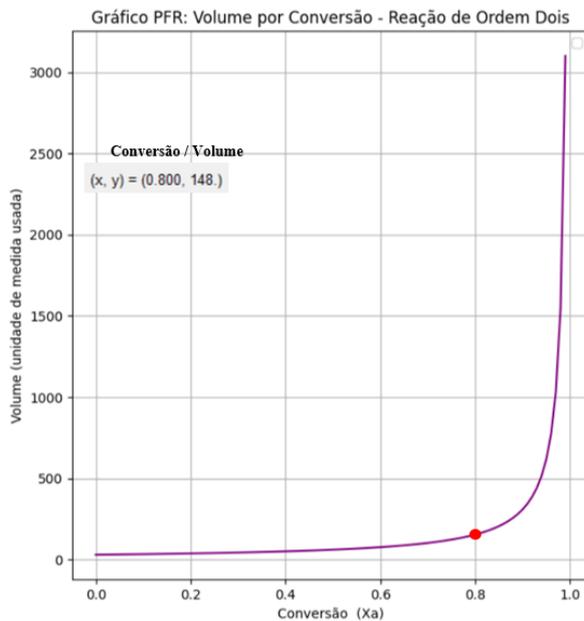
No artigo usado como base para este caso, não foi especificado o valor da área para o “Reator PFR”, então utilizou-se o mesmo valor do exemplo anterior.

Figura 5 - Painel de controle do simulador do “Reator PFR” para a reação de ordem 2.



Fonte: Próprios autores.

Gráfico 3 - Modelagem do “Reator PFR” de ordem de reação 2.

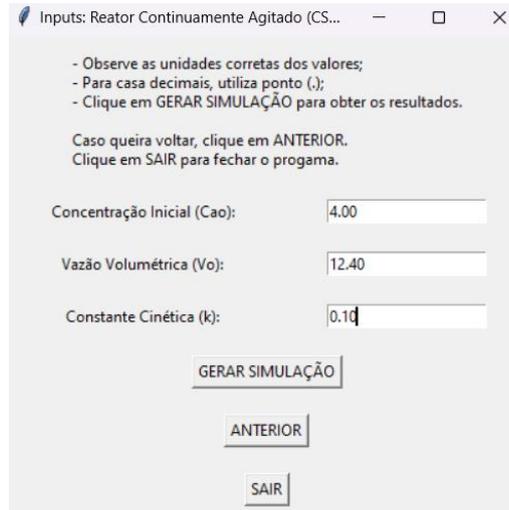


Fonte: Próprios autores.

Como é possível observar, para uma conversão de 80%, o volume do reator deverá ser de aproximadamente 148,00 m³, com um comprimento de 5900 m.

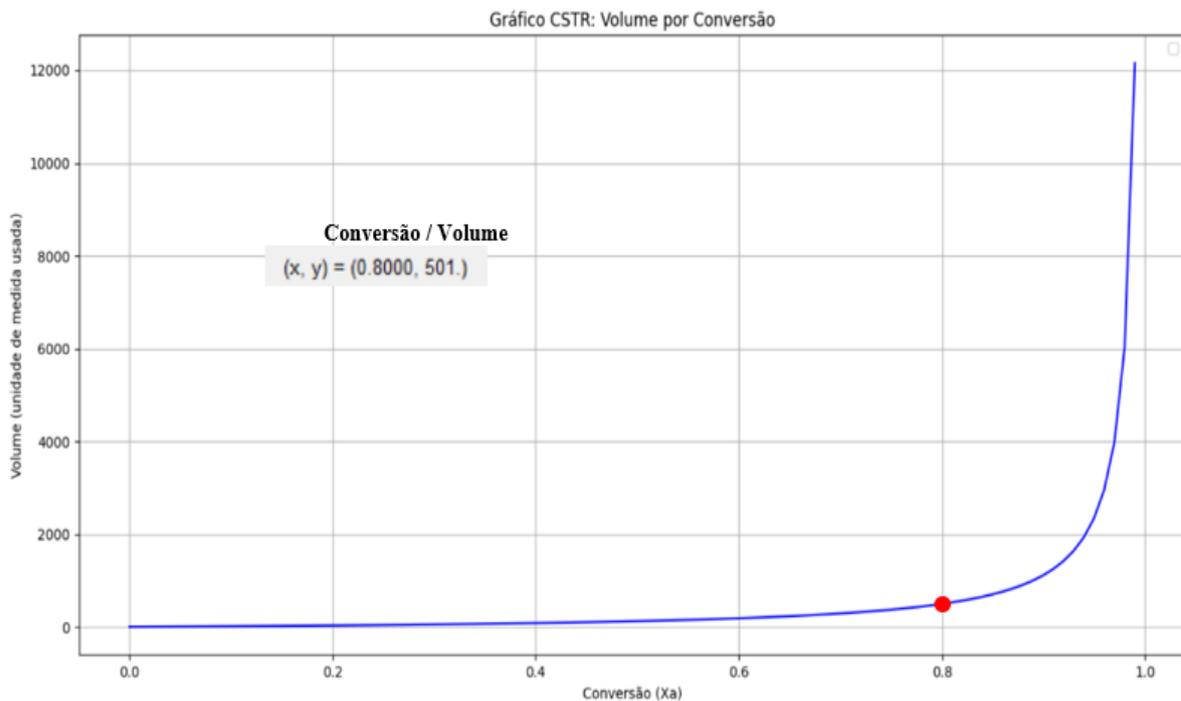
Em outrora, para efeitos comparativos, foi realizada a simulação para o “Reator CSTR” de ordem de reação 2.

Figura 6 - Painel de controle do simulador do “Reator CSTR” para a reação de ordem 2



Fonte: Próprios autores.

Gráfico 4 - Modelagem do “Reator CSTR” de ordem de reação 2



Fonte: Próprios autores.

Isto posto, é possível observar no gráfico que para uma mesma Conversão de 80%, o volume para o “Reator CSTR” será de aproximadamente 501 dm³, valor próximo ao mencionado na referência. Este valor é muito maior que o volume calculado do “Reator PFR”, evidenciado pela eficiência maior que o reator tubular tem em comparação com o reator de tanque agitado (FERNANDES *et al.*, 2023).

Outrossim, é importante ressaltar que o “Reator CSTR” trabalha com 80% da sua capacidade, ou seja, se o reator for construído com exatamente o volume simulado (o chamado volume reacional, que é o efetivamente disponível para ocorrência da reação química), ele não atingirá a taxa de conversão desejada. Dessa forma, o volume real do reator necessitará ser 20% maior que o volume reacional calculado, a fim de evitar acidentes e garantir a taxa de conversão requerida (FOGLER, 2016).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Dito isso, pode-se concluir que os simuladores, como o apresentado no trabalho, são ferramentas de extrema importância para o desenvolvimento de projetos de reatores, trazendo uma análise precisa e detalhada, multifatorial de impactos na viabilidade econômica e operacional dos projetos.

Quando utilizados de maneira correta, os simuladores permitem uma previsão de desempenho do reator, tempo de reação, bem como a produção estimada, além de otimizar as dimensões do equipamento em questão, ajudando na redução de custos relacionados à construção e materiais, garantindo uma boa eficiência de projeto.

Olhando para as perspectivas econômicas, os simuladores permitem uma projeção de custo-benefício para diferentes estratégias, como por exemplo, uso de catalisadores para a diminuição do volume do reator, reduzindo despesas operacionais e otimizando o processo químico. São também peças-chave a maximização de rendimento, a redução de tempo de reação e melhor uso da mão de obra dentro de uma indústria.

Além dos pontos acima citados, temos um ponto crucial para indústria, que é o de antecipar cenários e desafios, aprimorando as tomadas de decisões antes e durante a execução de um projeto, reduzindo também custos associados a ajustes pós construção, facilitando a compreensão de variáveis complexas que influenciam na operação de um reator, contribuindo para uma gestão mais eficiente e sustentável dos processos industriais.

Por fim, o simulador Phyton ofereceu um diferencial competitivo, quando permitiu avaliar custos industriais e operacionais de um projeto de reator em escala industrial. Tornam os simuladores então possíveis análises sensíveis sobre cálculo de custos e planejamento de expansão, tornando o projeto mais seguro, economicamente estando alinhado às demandas do mercado. Assim, investir em softwares de simulação não é apenas uma estratégia técnica, mas também um potencial investimento econômico para sustentabilidade de operações industriais.

REFERÊNCIAS

AGUIAR LG de. Problemas de Cinética e Reatores Químicos: 100 problemas resolvidos 500 problemas propostos (com respostas). Appris Editora e Livraria Eireli - ME, 2023. ISBN: 9786525043609

BARCAUI A. PMO: Escritórios de Projetos, Programas e Portfólio na prática. 1. ed. Brasport. 2012. 708 p. ISBN: 978-8574527222

FOGLER HS. *Elements of chemical reaction engineering*. 5. ed. Boston: Pearson Education, 2016. 992 p. ISBN: 9780133887822.

MENDES FB. Introdução à Cinética e Reatores: com exercícios resolvidos. IFSP, 2019. Pgs. 54-55. ISBN: 978-85-5790-004-2.

OLIVEIRA NMB. Fundamentos de cinética e introdução ao cálculo de reatores. Editora e Distribuidora Educacional, S.A., 2017. 212 P. ISBN: 978-85-522-0177-9

SEBORG DE, et al. *Process Dynamics and Control*. 2. ed. AIChE Journal. 2004. 732 p. ISBN: 978-0471000778

SILVA S. Introdução ao Python para Engenharia Química. Blucher, 2023. 598 p. ISBN: 9786555066715

PIRES JF de M, et al. Construção de reatores contínuos: tanque agitado e reator tubular para avaliação de desempenho na reação de Saponificação do acetato de etila. Disponível em: <https://lyceumonline.usf.edu.br/salavirtual/documentos/3117.pdf>. Acesso em: 14 out. 2024. 2593

GARCIA C. Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Eletromecânicos. Google Books. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=PdxwQs6PonIC&printsec=frontcover&hl=pt-#v=onepage&q&f=false>. Acesso em: 15 out. 2024.

SILVA F. *Dynamic Process Simulation*. Disponível em: <https://processecology.com/articles/dynamic-process-simulation-when-do-we-really-need-it>. Acesso em: 18 out. 2024.

TABLEAU SOFTWARE. *What is data visualization? A definition, examples, and resources*. Disponível em: <https://www.tableau.com/visualization/what-is-data-visualization#:~:text=Data%20visualization%20is%20the%20graphical,outliers%2C%20and%20patterns%20in%20data..> Acesso em: 15 out. 2024.

COUTINHO T. Python Matplotlib: a biblioteca de software que cria gráficos. Disponível em: https://voitto.com.br/blog/artigo/o-que-e-python-matplotlib?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA6aW6BhBqEiwA6KzDconZB5-Og_1SR_loBB1VVW45zcFILWwD7iyJ1TXXvv58MYU_4-_RihoC9TgQA_vD_BwE. Acesso em: 19 out. 2024.

COUTINHO T. Veja as 11 Principais Bibliotecas Python para Data Science. Disponível em: <https://voitto.com.br/blog/artigo/principais-bibliotecas-python>. Acesso em: 19 out. 2024.

ROCHA J. Por que aprender Python: 11 bons motivos para começar agora. Disponível em: <https://voitto.com.br/blog/artigo/por-que-aprender-python>. Acesso em: 19 out. 2024.

BAUER PE, RODRIGUES CP. **Laboratório de reatores químicos simulados**. Disponível em: <https://www.abenge.org.br/cobenge/legado/arquivos/18/trabalhos/MTEo79.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2024.

SANTOS SBF, et al. Modelagem de um Reator Químico do Tipo PFR não Isotérmico com Jaqueta como Instrumento Didático no Ensino de Engenharia Química: Um Estudo de Caso. Revista Virtual de Química, 2019. Disponível em: <https://revistas.uepg.br/index.php/ret/article/view/14464/209209213138>. Acesso em: 11 nov. 2024.

FERNANDES A, et al. Cálculo de reatores. São Paulo: Repositório Cognia, 2024. Disponível em: <https://repositorio.pgsscogna.com.br/bitstream/123456789/52932/1/Calculo%20de%20reatores.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2024.

ISHIDA, Sabrina. Desenvolvimento de simulador para otimização de reatores químicos. 2017. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2017. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/16562/1/PG_COENQ_2017_2_24.pdf.