

INTEGRAÇÃO DE SIMULAÇÃO DINÂMICA NA EDUCAÇÃO DE CONTROLE DE PROCESSO: UM ESTUDO DE CASO SOBRE SEPARAÇÃO METANOL-ÁGUA USANDO SIMULAÇÃO DE PROCESSO AVEVA



<https://doi.org/10.56238/arev7n1-061>

Data de submissão: 06/12/2024

Data de publicação: 06/01/2025

Felipi Luiz de Assunção Bezerra

Departamento de Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina (PR) Brasil
E-mail: felipibezerra@utfpr.edu.br

Lucas Bonfim Rocha

Departamento de Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina (PR) Brasil
E-mail: lucasrocha@utfpr.edu.br

Guilherme Henrique Gallo Lanza

Departamento de Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina (PR) Brasil
E-mail: glanza@alunos.utfpr.edu.br

RESUMO

Este estudo explora a implementação de uma nova metodologia de ensino para educação em controle de processos usando o software AVEVA Process Simulation. A metodologia integra simulações interativas e exercícios práticos de resolução de problemas, com foco na simulação dinâmica de um processo de destilação etanol-água. Nesse cenário, os alunos têm a tarefa de avaliar o desempenho dos controladores integrados à simulação, permitindo que eles se envolvam com comportamentos dinâmicos de processos em um ambiente virtual. Os resultados indicam uma melhoria significativa na compreensão e assimilação dos conceitos de controle de processos pelos alunos. O feedback coletado por meio de questionários, com seis participantes, destacou a eficácia da metodologia adotada. Todos os seis participantes relataram uma compreensão aprimorada do ajuste do controlador PID (pontuação média de 4,83), demonstrando o impacto positivo no aprendizado prático e teórico. Essa estratégia de ensino inovadora demonstra seu potencial para modernizar a educação de controle de processos e preencher a lacuna entre a instrução acadêmica e as aplicações industriais.

Palavras-chave: Controle de DIP. Educação em Controle de Processos. Simulação de Processos Aveva. Simulação dinâmica. Destilação contínua.

1 INTRODUÇÃO

Preencher a lacuna entre teoria e prática continua sendo um desafio primordial no ensino de engenharia química (JARAMILLO E REYES, 2024). Esse desafio é particularmente significativo no controle de processos, onde os fundamentos matemáticos da teoria de controle muitas vezes dificultam a demonstração prática para alunos de graduação. Para resolver isso, o uso de exemplos gráficos e práticos tem se mostrado altamente eficaz para melhorar a compreensão dos alunos sobre esses conceitos complexos (RANADE, 2012).

Para melhorar a aprendizagem cognitiva no controle de processos, os educadores introduziram várias ferramentas de software de simulação, estudos de caso, Aprendizagem Baseada em Projetos (PBL) e outras metodologias de ensino inovadoras (JARAMILLO E REYES, 2024; DOMINGUES, 2010; ROMANO, 2025; SALAZAR-PEÑA, 2023). Essas abordagens incentivam os alunos a se envolverem ativamente com aplicações do mundo real, promovendo uma compreensão mais integrada dos princípios teóricos. No entanto, o limitado tempo instrucional disponível para esta disciplina, combinado com seu conteúdo extenso e complexo, ressalta a necessidade de adotar estratégias de ensino modernas para otimizar os resultados de aprendizagem (BEQUETTE, 2019).

A simulação dinâmica de sistemas desempenha um papel fundamental nos cursos de Controle de Processos, auxiliando na análise de processos e no projeto de controladores. No entanto, para estudantes de graduação, as demandas computacionais da simulação dinâmica muitas vezes a tornam impraticável para sistemas complexos. Essa limitação pode ser resolvida por meio de simuladores que simplificam a análise, mantendo a precisão. Entre eles, o AVEVA Process Simulation se destaca por seus robustos recursos de simulação dinâmica de processos e uma extensa biblioteca de exemplos prontos para uso, tornando-o particularmente eficaz para fins educacionais (AVEVA, 2024).

A integração de software de simulação no ensino de engenharia provou ser uma estratégia transformadora, preenchendo a lacuna entre o conhecimento teórico e a aplicação prática. As ferramentas de simulação permitem que os alunos visualizem sistemas complexos, se envolvam na resolução de problemas e explorem cenários do mundo real em um ambiente controlado e interativo. Yusof et al. (2005) enfatizam que os métodos de aprendizagem interativa, como abordagens baseadas em simulação, melhoram significativamente a compreensão dos alunos sobre os princípios de engenharia, permitindo que eles experimentem os parâmetros do sistema e observem os impactos em tempo real. Essa abordagem prática promove o pensamento crítico e um envolvimento mais profundo com o assunto. Da mesma forma, Kolb e Kolb (2017) destacam que os ambientes de aprendizagem experiencial fornecidos pelo software de simulação ajudam a desenvolver habilidades cognitivas de ordem superior, como análise, síntese e avaliação.

Na engenharia de processos, onde a modelagem matemática e o comportamento dinâmico do sistema são fundamentais, as ferramentas de simulação permitem que os alunos investiguem sistemas complexos que podem ser inseguros, financeiramente onerosos ou demorados para estudar em cenários da vida real (KOMULAINEN et al., 2012). Ferramentas como Aspen, Matlab, DWSIM e AVEVA Process Simulation aprimoram a experiência educacional, permitindo que os alunos interajam com simulações de processos realistas, promovendo uma compreensão mais profunda da dinâmica operacional e das estratégias de controle.

A incorporação da simulação na aprendizagem baseada em projetos melhora ainda mais os resultados dos alunos. Prince e Felder (2006) demonstram que métodos de aprendizagem ativa combinados com ferramentas tecnológicas melhoram a retenção de conhecimento e a aplicação a problemas práticos. Por meio de projetos baseados em simulação, os alunos colaboram, tomam decisões e desenvolvem uma compreensão abrangente dos sistemas de engenharia, alinhando suas habilidades com as demandas da indústria por solucionadores de problemas eficazes.

Este estudo adota a Taxonomia de Bloom como uma estrutura para classificar os objetivos de aprendizagem cognitiva. Originalmente desenvolvida por Bloom et al. (1956), a taxonomia organiza a aprendizagem em seis níveis hierárquicos: Lembrar, Compreender, Aplicar, Analisar, Avaliar e Criar. Essa estrutura garante uma progressão estruturada da aquisição de conhecimento fundamental para habilidades cognitivas avançadas.

O estudo de caso aqui apresentado visa orientar os alunos em direção ao nível de análise da taxonomia de Bloom, capacitando-os a dissecar informações complexas e identificar relações e padrões dentro do processo de separação etanol-água. Embora o curso tenha se concentrado até agora no nível de Aplicação, onde os alunos usam conhecimentos teóricos para resolver problemas e operar ferramentas de simulação, este estudo busca aprofundar sua compreensão. Ao avançar para o nível de Análise, os alunos avaliarão criticamente os comportamentos do sistema, explorarão os mecanismos subjacentes e tomarão decisões informadas por dados com base nos resultados da simulação.

2 OBJETIVOS DA PESQUISA

Com base nos pontos acima expostos, este trabalho aborda as seguintes questões:

- Como atingir o nível cognitivo de análise no currículo de controle de processos usando simuladores?
- Como um modelo dinâmico do processo de destilação de metanol-água pode melhorar a compreensão dos alunos sobre a aplicação prática dos conceitos da teoria de controle?

Assim, este estudo tem como objetivo propor um estudo de caso para alunos do currículo de controle de processos e instrumentação em nível de graduação, elaborado para abordar as questões mencionadas acima.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo de caso foi implementado no curso de Controle de Processos dentro do curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O estudo foi realizado ao longo de 8 horas de atividades em sala de aula em um laboratório de informática. Para garantir seu sucesso, os alunos devem possuir conhecimento prévio dos principais tópicos fundamentais, incluindo funções de transferência e sua derivação de dados experimentais, uma introdução ao controle de feedback, a lei de controle PID e métodos para ajuste do controlador. A metodologia adotada neste estudo foi um estudo de caso centrado no processo de separação metanol-água, modelado utilizando o software AVEVA Process Simulation™. Essa abordagem permitiu uma exploração detalhada e prática dos parâmetros operacionais e da dinâmica inerentes ao processo de separação.

3.1 SIMULAÇÃO DE PROCESSO AVEVA

O AVEVA Process Simulation permite simulações dinâmicas e de estado estacionário, tornando-o uma solução versátil para projetistas, engenheiros e pesquisadores que analisam e otimizam sistemas complexos. As simulações de estado estacionário analisam processos em condições estáveis, enquanto as simulações dinâmicas permitem estudar o comportamento do sistema ao longo do tempo, refletindo transições e variações operacionais.

Este trabalho utilizou a versão 2024.2 do AVEVA Process Simulation (AVEVA, 2024), que oferece avanços significativos em relação às versões anteriores. Um dos principais recursos desta versão é a capacidade de exportar dados dinâmicos dos gráficos gerados no simulador. Essa funcionalidade é benéfica para análises aprofundadas e visualizações detalhadas, facilitando o processamento e a interpretação dos resultados obtidos ao longo do estudo.

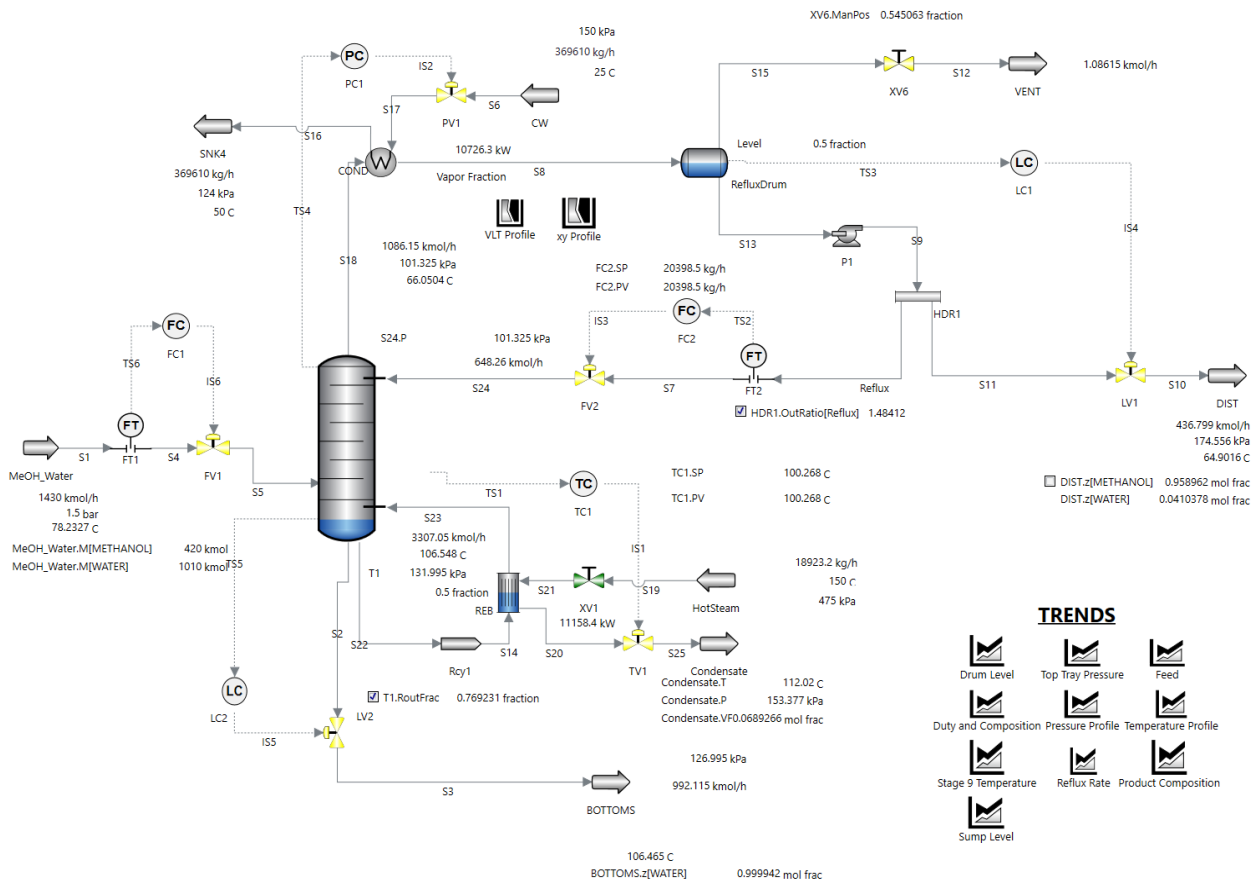
O AVEVA Process Simulation inclui uma coleção abrangente de exemplos de processos pré-configurados e documentação detalhada. Esses exemplos fornecem um ponto de partida robusto para várias análises e testes, servindo como base para aplicações acadêmicas e industriais.

3.2 SIMULAÇÃO DINÂMICA DE DESTILAÇÃO DE ÁGUA DE ETANOL

Para este trabalho, foi selecionado o modelo "C1 - Water Methanol Separation Detailed Engineering" disponível nos arquivos do software (AVEVA, 2024) (Figura 1). Este modelo foi

escolhido devido à sua relevância e complexidade, permitindo a exploração e validação da funcionalidade do software em cenários de engenharia detalhados.

Figura 1. Simulação de separação água-metanol com tags e variáveis clicáveis.



Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

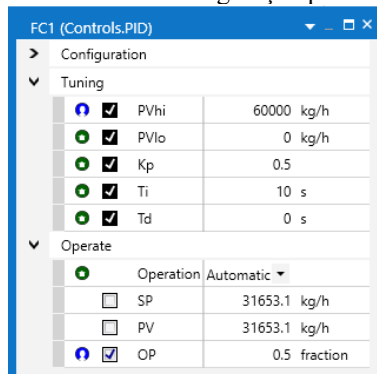
3.3 ETAPAS PARA IMPLEMENTAR O ESTUDO DE CASO

O procedimento para o estudo de caso envolve a obtenção de um modelo dinâmico do processo em cada malha de controle e o estabelecimento da relação entre a variável manipulada (OP) e a variável controlada (PV). O método de ajuste do controlador AMIGO (ASTROM; HAGGLUND, 2006) é aplicada para calcular as novas constantes do controlador, então seu desempenho é avaliado. As etapas realizadas são as seguintes: obter a função de transferência a partir dos dados de simulação, calcular novas constantes para controle PID e analisar o desempenho dos novos parâmetros do controlador PID.

3.3.1 Etapa 1: Obtendo a função de transferência a partir de dados de simulação

A simulação do processo inclui cinco controladores identificados pelas seguintes tags: FC1, FC2, PC1, TC1, LC2 e FC2 (Figura 1). As variáveis manipuladas são representadas como (OP), as variáveis controladas como (PV) e o setpoint como (SP) (Figura 2).

Figura 2. Imagem da tabela de configuração para o controlador FC1.



| FC1 (Controls.PID) | | |
|-------------------------------------|-----------|--------------|
| Configuration | | |
| Tuning | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | PVhi | 60000 kg/h |
| <input checked="" type="checkbox"/> | PVlo | 0 kg/h |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Kp | 0.5 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Ti | 10 s |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Td | 0 s |
| Operate | | |
| <input checked="" type="checkbox"/> | Operation | Automatic |
| <input type="checkbox"/> | SP | 31653.1 kg/h |
| <input type="checkbox"/> | PV | 31653.1 kg/h |
| <input checked="" type="checkbox"/> | OP | 0.5 fraction |

Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

FC1 controla a vazão de alimentação para a coluna, usando a abertura da válvula de FV1 como variável manipulada (OP) e a vazão mássica medida pelo sensor FT1 como variável controlada (PV). O controlador FC2 ajusta a abertura da válvula FV2 para controlar a vazão (PV).

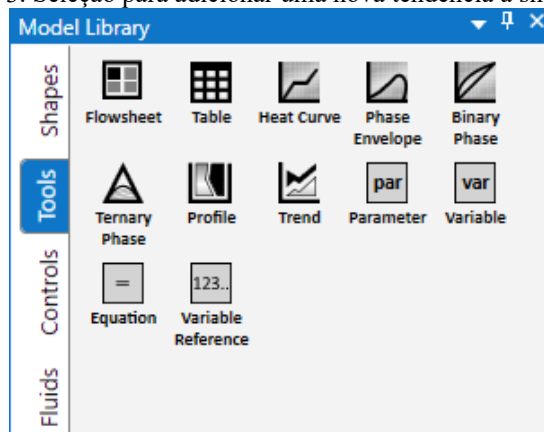
O controlador TC1 regula a temperatura no estágio 9 da coluna de destilação abrindo a válvula TV1. A abertura desta válvula afeta diretamente o vapor fornecido ao refeedor, influenciando a temperatura da coluna. O PC1 ajusta a abertura da válvula PV1 para controlar a pressão superior da coluna. Esta válvula modula a vazão do fluido refrigerante no condensador no topo da coluna, afetando diretamente a pressão do último estágio.

Este modelo também inclui dois controladores de nível, LC1 e LC2. LC2 manipula a abertura da válvula LV2 para controlar o nível do líquido no estágio de base da coluna. Da mesma forma, LC1 ajusta a abertura da válvula LV1 para controlar o nível de líquido no tambor de refluxo. Dados experimentais de malha aberta podem ser obtidos para cada controlador para estabelecer a relação entre a variável manipulada (OP) e a variável de processo controlada (PV). Para o controlador FC1, foram realizadas as seguintes etapas:

1. Abra o exemplo "C1 - Engenharia Detalhada de Separação de Metanol de Água" (AVEVA, 2024). A simulação estará inicialmente no modo Processo.
2. Alterne para o modo Fluxo de fluido para atualizar os parâmetros de simulação para essa condição e, em seguida, selecione o modo Dinâmica.
3. O modo Dinâmica permite a simulação dinâmica do sistema e o registro de dados usando uma Tendência.
4. Para adicionar uma tendência, navegue até a seção Ferramentas na Biblioteca de modelos (Figura 3) e arraste-a para o ambiente de simulação.

Essa configuração permite a captura e análise de dados dinâmicos para estudar a relação entre OP e PV.

Figura 3. Seleção para adicionar uma nova tendência à simulação.

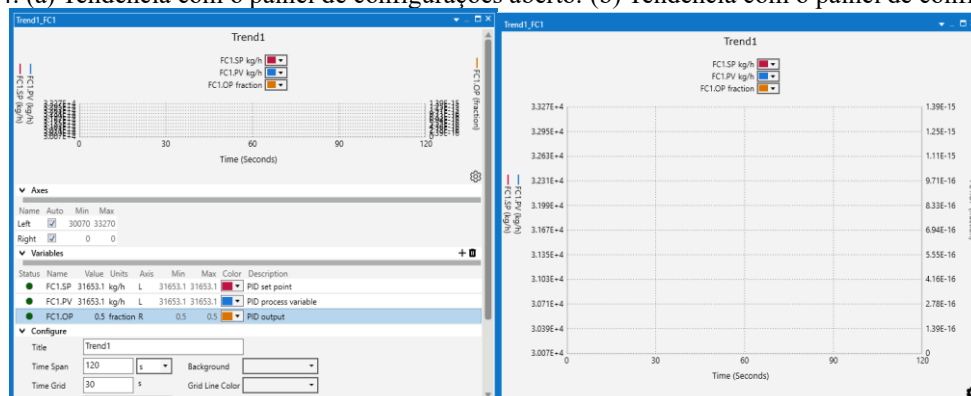


Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

Qualquer variável desejada no bloco controlador FC1 pode ser "arrastada" para a Tendência para observar seu comportamento ao longo do tempo. Para essa análise, as variáveis SP, PV e PO foram adicionadas à Tendência (Figura 2).

Uma vez que as variáveis foram adicionadas, a tendência foi aberta e o ícone de engrenagem foi clicado para acessar suas configurações (Figura 4a). A variável PO foi atribuída ao eixo direito do gráfico. Após configurar o Trend, a janela de configurações foi fechada, deixando apenas o gráfico visível (Figura 4b).

Figura 4. (a) Tendência com o painel de configurações aberto. (b) Tendência com o painel de configurações



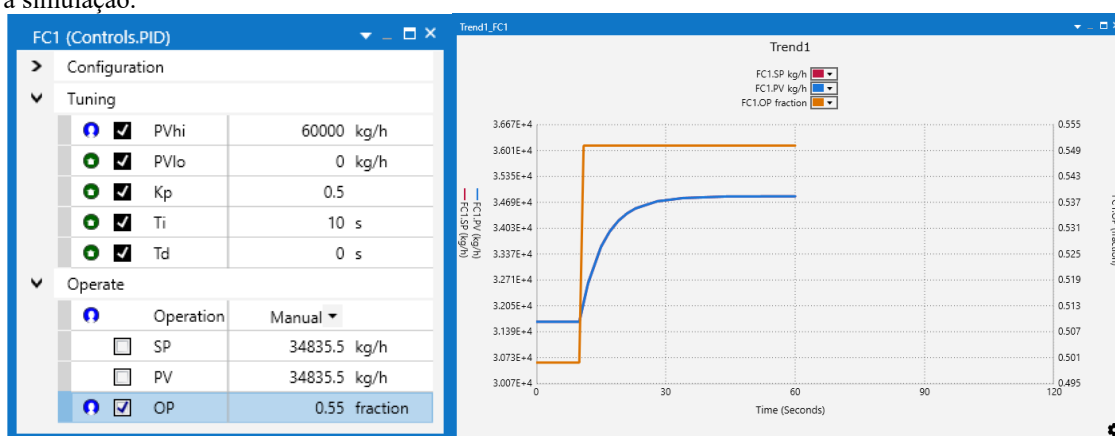
Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

Com o Trend configurado, a simulação dinâmica do sistema começa para garantir que ele esteja em um estado estacionário. No controlador FC1, o modo de operação é alternado para manual (Figura

5a), permitindo que a variável manipulada seja especificada diretamente pelo usuário em vez de calculada pelo controlador.

Para iniciar a simulação, clique em Executar. Após executar o processo por aproximadamente 10 segundos, a variável manipulada (OP) é ajustada de 0,5 a 0,55, representando uma variação de +5% em relação à faixa de abertura da válvula, que varia de 0 a 1. A simulação continua até 60 segundos, quando o processo atinge um novo estado estacionário para as variáveis especificadas (Figura 5b).

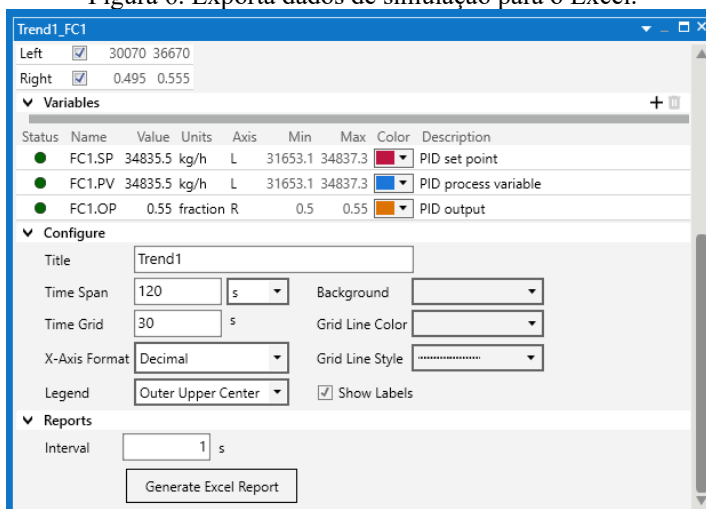
Figura 5. (a) Configuração do controlador e mudança de passo na abertura da válvula. b) Resposta do caudal mássico durante a simulação.



Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

Os dados da simulação são então exportados para um arquivo Excel clicando em "Gerar relatório do Excel" nas configurações de Tendência (Figura 6). Esses dados são usados para aplicar um método para derivar uma função de transferência de atraso de primeira ordem mais tempo (FOPTD) a partir de dados experimentais, conforme descrito por Seborg (2010). Se os dados de saída representarem uma função de transferência de segunda ordem ou superior, os alunos devem realizar uma revisão da literatura para explorar os métodos apropriados para obter esse tipo de modelo.

Figura 6. Exporta dados de simulação para o Excel.



Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

Ao exportar dados, a variável controlada (*PV*) do processo deve ser dimensionada entre 0 e 1 (*PV_{scaled,k}*) usando a Equação 1.

$$PV_{escalado,k} = \frac{PV_k - PV_{hi}}{PV_{hi} - PV_{lo}} = \frac{PV_k - 60000}{60000 - 0} \quad (1)$$

Essa escala é necessária porque o cálculo do erro (*E*) no controle PID do simulador é baseado no valor *PV* escalado, tanto para ação direta (Equação 2) quanto para ação reversa (Equação 3).

$$E_{direto} = PV_{escalado} SP_{escalado,k} \quad (2)$$

$$E_{reverso} = SP_{escalado} - PV_{escalado,k} \quad (3)$$

Onde *PV_k* é o valor *PV* no passo de tempo *k*, *PV_{min}* e *PV_{max}* são os valores mínimo e máximo que *PV* pode ser obtido. Esses valores estão disponíveis na guia de configurações do controlador (Figura 5a).

Na estimativa da função de transferência FOPTD, três parâmetros devem ser determinados: o ganho do processo (*K_p*); a constante de tempo do processo (*τ_p*) e o atraso (*θ*) (Equação 4). O atraso foi assumido *θ* = 0. para este sistema, já que muitos métodos de ajuste baseados em modelo requerem este parâmetro.

$$G_p(s) = \frac{PV(s)}{OP(s)} = \frac{1.06}{6s+1} e^{-0.1s} \quad (4)$$

Esta função de transferência descreve o comportamento do PV em resposta a uma mudança no OP. Os valores desses parâmetros podem variar um pouco dependendo do método usado pelo aluno para estimar o modelo.

3.3.2 Etapa 2: Calculando novos parâmetros de ajuste para controle PID

O método AMIGO (ASTROM; HAGGLUND, 2006) é aplicada para estimar as novas constantes do controlador FC1 para o controlador PI em processos FOPTD (Equações 5 e 6).

$$K_c = \frac{0.15}{K_p} + \left(0.35 - \frac{\theta\tau_p}{(\theta+\tau_p)^2}\right) \frac{\tau_p}{K_p\theta} \quad (5)$$

$$\tau_I = 0.35\theta + \frac{13\theta\tau^2}{\tau_p^2 + 12\theta\tau_p + 7\theta^2} \quad (6)$$

Onde K_c , τ_I e τ_D são os parâmetros das ações Proporcionais, Integrais e Derivadas do controlador, respectivamente. Para este exemplo, as constantes obtidas são $K_c = 19,02$, $\tau_I = 1,11$ s e $\tau_D = 0$ s. Nessa etapa, outros métodos de sintonia também podem ser utilizados, como o método IMC, o método ITAE ou o método Ziegler-Nichols Step-Test (SEBORG, 2010). Uma vez que os parâmetros de ajuste são determinados, o desempenho do controlador pode ser avaliado.

3.3.3 Etapa 3: Analisar o desempenho dos novos parâmetros do controlador PID

Para avaliar o desempenho do controlador, o modo de controle é primeiro definido como "automático". Em seguida, o SP é alterado para 32.000 e o processo é simulado até atingir um estado estável. A simulação é então pausada e um "Snapshot" é gravado clicando no ícone destacado na Figura X. Salvar um Snapshot permite retornar ao mesmo estado do processo posteriormente, permitindo a análise de diferentes constantes do controlador sob condições idênticas.

Figura 7. Janela para salvar o instantâneo.

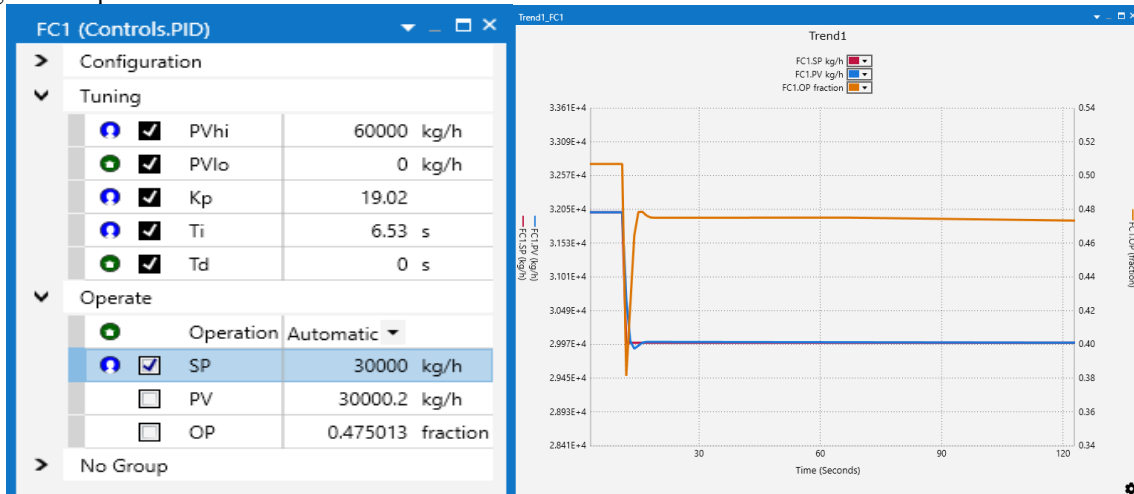


Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

Nessas condições de simulação, observa-se que a variável manipulada do processo (PO) oscila dentro de uma faixa abaixo de 2% de seu valor máximo. Assim, pode ser considerado em estado estacionário. A partir deste ponto, o set point (SP) é ajustado de 32.000 kg/h para 30.000 kg/h, e a

simulação é reiniciada para gerar novos dados (Figura 8). Os dados são então exportados novamente para um arquivo do Excel.

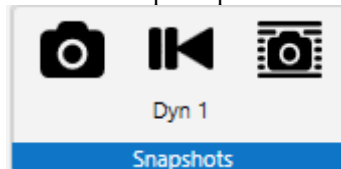
Figura 8. (a) Configuração e parâmetros de controle FC1. (b) Tendência mostrando PV (azul), SP (vermelho) e OP (laranja) ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

O processo deve ser retornado ao seu estado anterior à simulação para analisar diferentes constantes do controlador. Para fazer isso, clique no botão destacado na Figura 9.

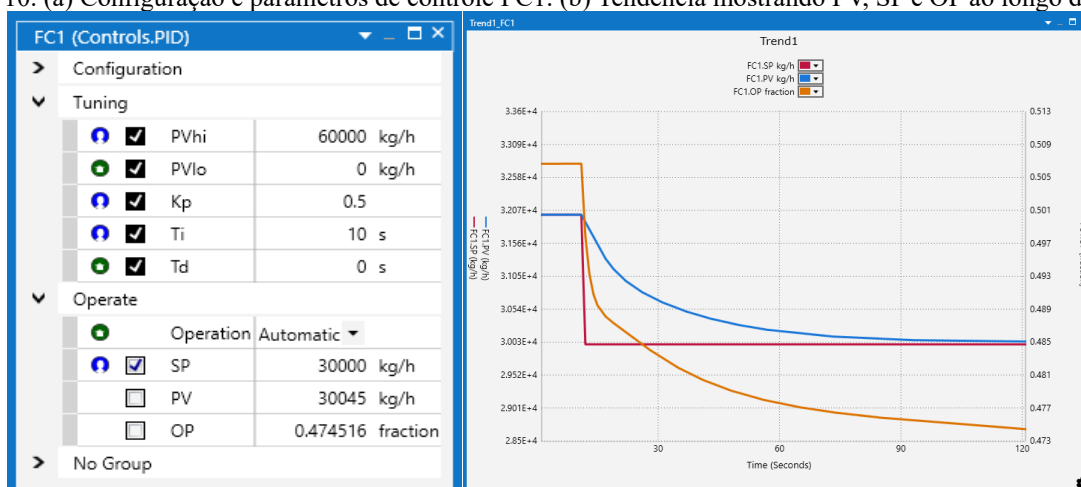
Figura 9. Reverta o snapshot para o estado anterior.



Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

Agora substitua os valores no controlador PID pelos parâmetros iniciais do sistema: $Kc = 0,5$, $tI = 10$ e $Td = 0$. Simule o sistema por aproximadamente 10 segundos e, em seguida, altere o SP de 32.000 para 30.000 kg/h novamente. Aguarde até que o sistema atinja um estado estável e exporte os dados (Figura 10).

Figura 10. (a) Configuração e parâmetros de controle FC1. (b) Tendência mostrando PV, SP e OP ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelos autores utilizando o software AVEVA Process Simulation.

Os alunos avaliam o desempenho do controlador usando parâmetros como tempo de estabilização, Integral de Erro Absoluto (IAE) e determinando qual das duas respostas exibe uma ação de controle mais suave. O tempo de estabilização é necessário para que a variável de processo (PV) permaneça dentro de uma porcentagem específica (por exemplo, 2% ou 5%) do valor final do estado estacionário após uma perturbação ou mudança de ponto de ajuste. Indica a rapidez com que o sistema se estabiliza.

O IAE é calculado integrando o valor absoluto do erro $E(t)$ ao longo do tempo t (equação 7).

$$IAE = \int_0^T |E(t)| dt \quad (7)$$

O IAE mede o erro total acumulado, fornecendo informações sobre o desempenho geral do controlador. Essa mesma análise é realizada para todos os outros controladores na simulação. Como cada controlador tem um tempo de resposta diferente, o Timespan (faixa do eixo X) deve ser ajustado para garantir que toda a resposta transitória do processo seja visível no gráfico gerado. O dimensionamento adequado é essencial para observar e comparar com precisão a dinâmica e o desempenho de cada controlador. Ao analisar essas métricas, os alunos podem entender melhor as compensações entre velocidade de resposta e suavidade nas ações de controle e avaliar a eficácia de diferentes métodos de ajuste.

3.4 AVALIAÇÃO DO IMPACTO DO ESTUDO DE CASO

O impacto pedagógico do estudo de caso foi avaliado por meio de um questionário estruturado aplicado aos alunos. O questionário incluía perguntas quantitativas e qualitativas destinadas a avaliar

sua compreensão dos conceitos teóricos, a eficácia do software de simulação na ponte entre teoria e prática e sua progressão nas habilidades cognitivas, conforme descrito pela Taxonomia de Bloom (BLOOM et al., 1956). Além disso, a pesquisa coletou feedback sobre a experiência geral, desafios encontrados e sugestões de melhoria, fornecendo uma análise abrangente dos resultados educacionais e das percepções dos alunos sobre a atividade. Cada uma dessas afirmações é avaliada usando uma escala de 5 pontos para avaliar o nível de concordância.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na conclusão do estudo de caso, seis alunos responderam a um questionário composto por nove perguntas destinadas a avaliar suas percepções individuais sobre a atividade. As respostas para cada questão foram classificadas em uma escala de 5 pontos, e a pontuação média para cada questão foi calculada Tabela 1.

Tabela 1. Pontuações médias das respostas dos alunos ao questionário que avalia as percepções individuais da atividade de estudo de caso, com base em uma escala de 5 pontos.

| Pergunta | Pontuação |
|---|-----------|
| 1 - A atividade contribuiu para aprimorar sua compreensão sobre a aplicação prática da teoria de controle de processos? | 4.83 |
| 2 - Você se sente confiante em ajustar um controlador PID após concluir esta atividade? (1 nada confiante - 5 muito confiante) | 4.17 |
| 3 - A simulação forneceu informações claras sobre como as mudanças nos parâmetros de controle (P, I, D) afetam o desempenho do sistema? | 4.5 |
| 4 - Qual a relevância deste estudo de caso para sua formação em controle de processos? (1 nada relevante – 5 muito relevante) | 4.5 |
| 5 - Você é capaz de identificar as principais variáveis do processo e entender como elas influenciam a resposta dinâmica do sistema? (1 discordo - 5 concordo totalmente) | 4.5 |
| 6 - O uso do AVEVA Process Simulation foi útil para melhorar sua compreensão do comportamento dinâmico do sistema controlado? (1 discordo totalmente - 5 concordo totalmente) | 5 |
| 7 - A interface e as ferramentas do software AVEVA Process Simulation foram intuitivas e fáceis de usar? (1 discordo totalmente - 5 concordo totalmente) | 4.17 |
| 8 - Você é capaz de propor uma avaliação dinâmica para outros processos na indústria de manufatura? (1 discordo totalmente - 5 concordo totalmente) | 4.17 |
| 9 - Qual é o seu grau de satisfação com a abordagem metodológica adotada no estudo de caso? (1 Muito Insatisfeito – 5 Muito Satisfeito) | 4.48 |

Fonte: Elaborado pelos autores.

De acordo com a atividade do estudo de caso, com base em uma escala de 5 pontos, as seguintes observações podem ser feitas com base nos resultados apresentados na Tabela 1:

- Os alunos relataram uma compreensão aprimorada do conteúdo aprendido até agora e expressaram satisfação com o estudo de caso.

- O simulador contribuiu significativamente para melhorar a compreensão dos alunos sobre os conceitos teóricos estudados anteriormente.
- Os alunos foram capazes de preencher a lacuna entre teoria e prática, aplicando seus conhecimentos ao ajuste de controladores.

No geral, o estudo de caso melhorou efetivamente a compreensão dos alunos sobre a dinâmica e o controle do processo. As avaliações de desempenho demonstraram tempos de estabilização reduzidos e IAE minimizado, refletindo o melhor desempenho do controlador com parâmetros otimizados. O feedback dos questionários estruturados ressaltou os seguintes pontos-chave:

- Compreensão aprimorada do ajuste do PID.
- Maior confiança na aplicação da teoria de controle.
- Percepções positivas da interface e funcionalidade do AVEVA Process Simulation.

Esses resultados se alinham com os objetivos cognitivos descritos na Taxonomia de Bloom, promovendo habilidades de pensamento de ordem superior, como análise e avaliação. Com base na experiência adquirida com a implementação deste estudo de caso e no feedback dos alunos, uma melhoria na metodologia pode envolver a apresentação do conteúdo instrucional por meio de videoaulas. Durante as sessões presenciais, os alunos replicavam o procedimento para outros controladores. Essa abordagem aborda os desafios que eles enfrentaram durante sua interação inicial com o software e otimiza o tempo em sala de aula para um aprendizado mais eficaz.

5 CONCLUSÃO

A implementação do estudo de caso de separação etanol-água usando a Simulação de Processo AVEVA teve um impacto positivo significativo nos níveis cognitivos e nos resultados de aprendizagem dos alunos. A atividade preencheu com sucesso a lacuna entre conceitos abstratos e cenários do mundo real, progredindo do conhecimento teórico para a aplicação e análise prática. Os alunos demonstraram uma compreensão aprimorada dos princípios de controle de processo, maior confiança no ajuste de controladores PID e uma compreensão mais profunda de como as variáveis do sistema influenciam o comportamento dinâmico. Além disso, a integração de ferramentas de simulação promoveu o pensamento crítico e as habilidades analíticas, alinhando-se com os objetivos cognitivos de ordem superior descritos na Taxonomia de Bloom. Este estudo destaca o valor de incorporar simulações dinâmicas no ensino de engenharia para promover o aprendizado ativo, o engajamento e o

desenvolvimento de habilidades, preparando os alunos para os desafios do controle de processos moderno.

REFERÊNCIAS

- RANADE, S. M.; SALAZAR, H.; RODRIGUEZ, L. A. Process control: Domains, disciplines and cognitive difficulties. *Education for Chemical Engineers*, v. 7, n. 1, p. e1–e6, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2011.10.003>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- SALAZAR-PEÑA, R. et al. Project-based learning for an online course of simulation engineering: From bioreactor to epidemiological modeling. *Education for Chemical Engineers*, v. 42, p. 68–79, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2022.12.002>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- DOMINGUES, L. et al. Virtual laboratories in (bio)chemical engineering education. *Education for Chemical Engineers*, v. 5, n. 2, p. e22–e27, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2010.02.001>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- ROMAN, C.; DELGADO, M. Á.; GARCÍA-MORALES, M. Embracing the efficient learning of complex distillation by enhancing flipped classroom with tech-assisted gamification. *Education for Chemical Engineers*, v. 50, p. 14–24, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2024.11.001>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- BEQUETTE, B. W. Process control practice and education: Past, present and future. *Computers & Chemical Engineering*, v. 128, p. 538–556, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.06.011>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- BLOOM, B. S. et al. Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain. Longmans, Green, 1956.
- YUSOF, K. M. et al. Promoting problem-based learning in engineering education: A case study at Universiti Teknologi Malaysia. *Global Journal of Engineering Education*, v. 9, n. 2, p. 175–184, 2005.
- KOLB, A. Y.; KOLB, D. A. Experiential learning theory as a guide for experiential educators in higher education. *A Journal for Engaged Educators*, v. 1, n. 1, p. 5–17, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.46787/elthe.v1i1.3362>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- KOMULAINEN, T. M. et al. Experiences on dynamic simulation software in chemical engineering education. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 90, n. 10, p. 1741–1750, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ece.2012.07.003>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- PRINCE, M. J.; FELDER, R. M. Inductive teaching and learning methods: Definitions, comparisons, and research bases. *Journal of Engineering Education*, v. 95, n. 2, p. 123–138, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/j.2168-9830.2006.tb00884.x>. Acesso em: 23 jan. 2025.
- AVEVA. C1-water methanol separation detailed engineering. Aveva Process Simulation, 2024.
- SEBORG, D. E.; MELLICHAMP, D. A.; EDGAR, T. F.; DOYLE, F. J. *Process dynamics and control*. 3. ed. Wiley, 2010.
- ÅSTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Revisiting the Ziegler-Nichols step response method for PID control. *Journal of Process Control*, v. 14, n. 6, p. 635–650, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2004.01.002>. Acesso em: 23 jan. 2025.

JARAMILLO, J. S.; REYES, L. H. Critique: YEASTsim - A Matlab-based simulator for teaching process control in fed-batch yeast fermentations. Education for Chemical Engineers, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ece.2024.06.005>. Acesso em: 23 jan. 2025.