

GABRIEL SOUZA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE *SOFTWARE* LIVRE PARA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES
UNITÁRIAS NO ENSINO DA ENGENHARIA QUÍMICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientadora: Rita de Cássia Superbi de Sousa

Coorientador: Moysés Naves de Moraes

**VIÇOSA – MINAS GERAIS
2023**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

R696u
2023
Rodrigues, Gabriel Souza, 1995-
Utilização de *software* livre para simulação de operações
unitárias no ensino da Engenharia Química / Gabriel Souza
Rodrigues. – Viçosa, MG, 2023.
1 dissertação eletrônica (89 f.): il. (algumas color.).

Inclui anexos.

Orientador: Rita de Cássia Superbi de Sousa.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Química, 2023.

Referências bibliográficas: f. 72-73.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2023.370>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Engenharia química - Estudo e ensino. 2. Destilação.
3. Evaporação. 4. Python (Linguagem de programação de
computador). 5. Linguagem de programação (Computadores).
6. Métodos de simulação. 7. DWSIM (Software). I. Sousa, Rita
de Cássia Superbi de, 1983-. II. Universidade Federal de Viçosa.
Departamento de Química. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Química. III. Título.

CDD 22. ed. 660.07


GABRIEL SOUZA RODRIGUES

**UTILIZAÇÃO DE *SOFTWARE* LIVRE PARA SIMULAÇÃO DE OPERAÇÕES
UNITÁRIAS NO ENSINO DA ENGENHARIA QUÍMICA**


Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2023

Assentimento:

Documento assinado digitalmente
 GABRIEL SOUZA RODRIGUES
Data: 23/06/2023 11:13:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gabriel Souza Rodrigues
Autor

Documento assinado digitalmente
 RITA DE CASSIA SUPERBI DE SOUSA
Data: 23/06/2023 14:45:56-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rita de Cássia Superbi de Sousa
Orientadora

AGRADECIMENTOS

A minha família, principalmente minha mãe. Jamais desisti de você, assim como você nunca desistiu de mim.

Ao DEQ/UFV, pela oportunidade de fazer parte do Programa de Pós-Graduação.

A minha orientadora, Prof. Rita de Cássia Superbi de Sousa, que foi tão importante na minha vida acadêmica e na entrega desta dissertação.

Ao Professor Moysés Naves de Moraes pela coorientação, pelas importantes discussões sobre o tema, pela disponibilidade, atenção e todo o apoio prestado.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de estudos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

RESUMO

RODRIGUES, Gabriel Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2023. **Utilização de *software* livre para simulação de operações unitárias no ensino da Engenharia Química.** Orientadora: Rita de Cássia Superbi. Coorientador: Moysés Naves de Moraes.

O avanço da tecnologia e das novas metodologias de ensino estimulam educadores a buscarem novas formas de aprendizado para seus alunos, adaptando-se às necessidades deles e da geração na qual estão inseridos. O uso de computadores e celulares pelos estudantes permite novas formas de aprendizado, utilizando de mecanismos rápidos e eficientes, como a linguagem de programação e softwares. No curso de Engenharia Química, ao introduzir metodologias ativas e tecnologia ao aprendizado, pode-se explorar a velocidade que os cálculos são realizados pelo computador no projeto de operações unitárias, mudando variáveis de processo e tendo a percepção das alterações diretas provocadas nos processos químicos industriais. Operações como a destilação e a evaporação são um exemplo disso, nas quais os cálculos são trabalhosos e demorados quando realizados à mão pelo estudante, podendo gerar frustração no aprendizado. Contudo, ao utilizar de recursos da programação e de softwares de simulação, o aprendizado torna-se mais visual e eficiente, pois permite que várias linhas de cálculo sejam realizadas em poucos segundos e que o estudante tenha independência para testar as variáveis que desejar. Diante do exposto, o presente trabalho tem por objetivo explorar o uso da tecnologia para o aprendizado de operações unitárias, primeiramente com a criação de um código em Python, em um ambiente colaborativo gratuito, para resolução de um problema de projeto de evaporadores de triplo efeito e, secundamente, a elaboração de um vídeo educativo sobre a resolução de um problema de projeto de coluna de destilação através do método gráfico de McCabe-Thiele e pelo *software* gratuito DWSIM, além de explorá-lo para simulações em relação à algumas variáveis e condições de processo. Ambas as entregas são destinadas aos alunos de Engenharia Química da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Palavras-chave: Destilação. Evaporação. Programação. Simulação. Python. DWSIM.

ABSTRACT

RODRIGUES, Gabriel Souza, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2023. **Use of free software to simulate unit operations in the teaching of Chemical Engineering.** Adviser: Rita de Cássia Superbi. Co-adviser: Moysés Naves de Moraes.

The advancement of technology and new teaching methodologies encourage educators to seek new ways of apprenticeship for their students, adapting to their needs and to their generation. The use of computers and cell phones by students allows new ways of learning, using fast and efficient mechanisms, such as programming language and software. In the Chemical Engineering graduation, by introducing active methodologies and technology into learning, the speed at which calculations are performed by the computer can be explored in the project of unit operations, changing process variables and having the perception of the direct changes caused in industrial chemical processes. Operations such as distillation and evaporation are an example in which calculations are laborious and time-consuming when performed by hand by the student, which can lead to frustration in learning. However, when using programming resources and simulation software, learning becomes more visual and efficient as it allows several lines of calculation to be carried out in a few seconds and the student has independence to test the variables he wants. The present work aims to explore the use of technology for learning unit operations, firstly with the elaboration of an educational video of the resolution of a distillation column project exercise through the McCabe-Thiele graphical method and through the free DWSIM software, in addition to exploring it for simulations, and secondly with the elaboration of a code in Python, in a free collaborative environment, for solving a project exercise of triple effect evaporators. Both deliveries are intended for UFV Chemical Engineering students.

Keywords: Distillation. Evaporation. Programming; Simulation. Python. DWSIM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática de um evaporador de simples efeito.	22
Figura 2 - Representação esquemática de um evaporador de duplo efeito com alimentações co-correntes.	23
Figura 3 - Representação esquemática de um evaporador de duplo efeito com alimentações contracorrentes.	24
Figura 4 - Sistema com três evaporadores com correntes de alimentação e vapor co-correntes.	24
Figura 5 - Representação esquemática de uma coluna de destilação fracionada.	26
Figura 6 - Variáveis do sistema com três evaporadores para concentrar solução de açúcar.	30
Figura 7 - Instalação da biblioteca CoolProp.	31
Figura 8 - Definindo variáveis do enunciado.	32
Figura 9 - Cálculo da temperatura no último estágio.	32
Figura 10 - Balanço de massa das correntes de vapor e líquido.	33
Figura 11 - Balanço de massa de sólidos.	34
Figura 12 - Elevação do Ponto de Ebulição nos três efeitos.	36
Figura 13 - Determinação das temperaturas em cada efeito.	37
Figura 14 - Determinação do calor específico em cada efeito.	37
Figura 15 - Cálculo do calor latente de vaporização das entalpias em cada efeito.	38
Figura 16 - Balanço de energia.	39
Figura 17 - Primeira iteração para correntes de vapor e líquido.	40
Figura 18 - Determinação da taxa de energia.	41
Figura 19 - Variáveis do processo de destilação de uma mistura de Benzeno e Tolueno.	43
Figura 20 - Tabela de vapor-pressão e fração molar no equilíbrio para um sistema de Benzeno e Tolueno.	44
Figura 21 - Diagrama xy.	44
Figura 22 - Plotagem da linha de equilíbrio e linha de 45°. O eixo x representa a fração molar de benzeno na mistura líquida, enquanto o eixo y representa a fração molar de benzeno no vapor da mistura.	45
Figura 23 - Dados de composição das três correntes.	46

Figura 24 - Linhas de operação da alimentação.	46
Figura 25 - Plotagem da linha de operação da alimentação.	49
Figura 26 - Plotagem da linha de operação da secção de retificação.	50
Figura 27 - Plotagem da linha de operação da secção de esgotamento.	51
Figura 28 - Determinação do número de estágios teóricos.	52
Figura 29 - Simulação de uma coluna de destilação no DWSIM.	54
Figura 30 - Número de estágios versus temperatura de alimentação.	64
Figura 31 - Número mínimo de estágios versus Temperatura de alimentação.	65
Figura 32 - Refluxo mínimo versus Temperatura de alimentação.	66
Figura 33 - Estágio para alimentação ótima versus Temperatura de alimentação.	67
Figura 34 - Número de estágios versus Taxa de Refluxo.	68
Figura 35 - Estágio para alimentação ótima versus taxa de refluxo.	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados obtidos no exercício.....	53
Tabela 2 - Simulação com as condições do enunciado do exercício.....	55
Tabela 3 - Simulação com alimentação líquida.....	56
Tabela 4 - Simulação com alimentação de vapor saturado.	57
Tabela 5 - Simulação com alimentação com vapor superaquecido.....	58
Tabela 6 - Simulação com diminuição da taxa de Refluxo.	59
Tabela 7 - Simulação com aumento da taxa de Refluxo.	60
Tabela 8 - Resultados obtidos com as simulações das correntes de alimentação sob diferentes temperaturas.	64
Tabela 9 - Resultados obtidos com as simulações sob diferentes taxas de refluxo.....	68

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Δ	Variação
$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
A	Área
B	Benzeno
CP	Capacidade térmica
D	Corrente de destilado
DCN	Diretrizes Curriculares Nacionais
EPE	Elevação do Ponto de Ebulição
F	Corrente da alimentação
g	Gramas
GPU	Unidade de Processamento Gráfico
H	Entalpia absoluta
h	Entalpia específica
h	Hora
J	Joules
K	Kelvin
kg	quilograma
L	Corrente de solução concentrada
NRTL	Modelo não alheatório de dois líquidos
P	Pressão
Pa	Pascal
PSF	Python Software Foundation
PVM	Máquina Virtual de Python
Q	Corrente de energia
q	Linha de operação da alimentação
R	Refluxo
S	Corrente de vapor da caldeira
SI	Sistema Internacional
T	Temperatura
T	Tolueno
Tb	Temperatura de bolha
U	Coefficiente de Transferência de Calor

UFV	Universidade Federal de Viçosa
V	Corrente de vapor
W	Corrente de fundo
x	Fração molar no líquido
y	Fração molar no vapor
α	Inclinação da reta
λ	Calor latente de vaporização

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2. OBJETIVOS	16
2.1. Geral	16
2.2. Específicos	16
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1. Ensino de operações unitárias	17
3.2. Uso da tecnologia como recurso didático	17
3.3. Softwares aliados à engenharia química	18
3.3.1. DWSIM	19
3.3.2. Google Colaboratory	20
3.3.3. Python	20
3.4. Evaporação	21
3.5. Destilação	25
3.5.1. Método De McCabe-Thiele	27
4. METODOLOGIA	29
4.1. Exercício Evaporador Triplo Efeito	29
4.1.1. Carregamento dos pacotes	30
4.1.2. Definição das variáveis	31
4.1.3. Cálculo da temperatura do terceiro evaporador	32
4.1.4. Balanço de Massa	33
4.1.5. Determinação da elevação do ponto de ebulição (EPE)	35
4.1.6. Determinação das temperaturas de ebulição em cada efeito	36
4.1.7. Determinação do calor específico em cada efeito	37
4.1.8. Determinação do calor latente de vaporização e entalpias nos três efeitos	38
4.1.9. Balanços de energia	38
4.1.10. Estimativa das novas correntes de vapor em cada estágio	39
4.1.11. Loop de iteração para correntes de vapor	40
4.1.12. Determinação da taxa de energia e área de troca térmica em cada efeito	40
4.1.13. Loop de iteração para as áreas de troca térmica	42
4.2. Exercício destilação mistura binária	42
4.2.1. Resolução pelo método de McCabe-Thiele	43
4.2.2. Resolução pelo DWSIM	53
4.2.3. Simulações utilizando o DWSIM	55
4.2.3.1. Alimentação líquida	55

4.2.3.2. Alimentação vapor saturado.....	56
4.2.3.3. Alimentação vapor superaquecido	57
4.2.3.4. Diminuição da taxa de refluxo	58
4.2.3.5. Aumento da taxa de refluxo	59
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1. Código em Python para evaporadores de três efeitos	61
5.1.1. A área em cada efeito	61
5.1.2. A vazão mássica de vapor utilizada para cada efeito	62
5.1.3. A economia de vapor.....	62
5.2. Vídeo educativo	62
6. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE.....	74

1. INTRODUÇÃO

As operações unitárias são as etapas básicas de um processo químico, baseadas em princípios teóricos e experimentais de transferência de calor, transferência de massa, transferência de movimento, termodinâmica, biotecnologia e cinética química.

Determinadas operações unitárias se relacionam à mudança de composição das misturas por métodos que, não necessariamente, envolvem reações químicas. Usualmente, essas operações são direcionadas de maneira a separar uma mistura em seus diferentes constituintes. O principal interesse é isolar as substâncias dessas misturas, geralmente visando purificar algumas delas para fins comerciais (OLIVEIRA, 2019).

Neste contexto, o evaporador é um trocador de calor usado para promover a concentração ou purificação de uma solução por meio do aquecimento dela, objetivando atingir a temperatura de ebulição da mistura. A transferência de calor promove a vaporização dos componentes mais voláteis presentes na mistura e, conseqüente, a concentração dos componentes menos voláteis. O aquecimento durante a operação de um evaporador geralmente é promovido pela corrente de vapor produzida pelas caldeiras.

Os evaporadores podem ser classificados de acordo com seu método de funcionamento (contínuo ou descontínuo), a sua função (concentração, troca de calor), tipo de construção (tubos verticais, horizontais, filme fino etc.) e configuração (circulação natural, forçada ou filme agitado) (MOREIRA, 2019). De acordo com o objetivo, as variáveis de operação e o tipo de processo, pode-se projetar o equipamento de modo a ter um evaporador simples (um efeito) ou evaporadores múltiplos (vários efeitos). No caso do evaporador de um efeito, terá apenas uma unidade de operação, enquanto nos de múltiplos efeitos existirão vários evaporadores em série, no qual o vapor produzido irá aquecer o evaporador consecutivo a ele (SILVA, 2018). A vantagem do uso de múltiplos efeitos é a economia de combustível na produção do vapor nas caldeiras. De acordo com Geankoplis (1993), os evaporadores de múltiplo efeito podem ter algumas variações na alimentação, como: alimentação em co-corrente, alimentação em contracorrente, alimentação mista e alimentação em paralelo.

Além da evaporação, promovida pela transferência de calor, outra operação unitária muito importante para a indústria química que também depende de muito aquecimento, mas é regida pela transferência de calor e de massa, é a destilação.

A técnica da destilação baseia-se no fato dos componentes constituintes de uma mistura apresentarem diferentes pontos de ebulição. Para tal operação, como explicado por Marques (2019), a separação baseia-se na diferença na volatilidade dos componentes, visto que os mais

voláteis tendem a vaporizar mais facilmente, saindo no topo da coluna, e os componentes menos voláteis são coletados no fundo da mesma. Além dos conhecidos usos para purificação de etanol e refino da indústria petroquímica, a destilação é amplamente usada em outros processos das indústrias química e de alimentos. De modo geral, a destilação demanda grande quantidade de energia, o que faz com que justifica os grandes investimentos em busca da melhoria e otimização dos seus processos (OLIVEIRA, 2019).

O método gráfico de McCabe-Thiele é um dos mais utilizados para simular a destilação de uma mistura binária e se baseia no traçado de linhas de operação. Por meio dele, é possível calcular o número de pratos teóricos necessários a partir de dados como a vazão de alimentação, a composição desejada do destilado e do produto de fundo, e a razão de refluxo (GEANKOPLIS, 1993). O método foi desenvolvido em 1925 e despence muito tempo e trabalho em seus cálculos. Atualmente, há ferramentas mais modernas e ágeis.

Nesse contexto, os *softwares* se tornaram essenciais nas simulações e otimização dos processos, melhorando a eficiência das operações e reduzindo o custo. A velocidade e a precisão dos cálculos fazem com que novos *softwares* sejam desenvolvidos e utilizados. Dentre eles, pode-se destacar o DWSIM, um *software* de simulação de processos químicos gratuito e desenvolvido por um brasileiro (VERÍSSIMO, 2020).

O simulador de processo químico DWSIM permite que seus usuários, incluindo estudantes de engenharia, modelem plantas de processos usando rigorosos modelos termodinâmicas e de operações unitárias. E por se tratar de um *software* gratuito e de código aberto, os usuários têm acesso à forma como os cálculos são realizados e podem inspecionar o código durante a execução. A linguagem de programação utilizada nos cálculos do DWSIM é a Python, sendo essa uma linguagem de programação de alto nível, dinâmica, interpretada, modular, multiplataforma e orientada a objetos. Uma forma específica de organizar *softwares* onde, de modo geral, os procedimentos estão submetidos às classes, o que possibilita maior controle e estabilidade de códigos para projetos de grandes proporções. Por ser uma linguagem de sintaxe relativamente simples e de fácil compreensão, a linguagem Python ganhou popularidade entre profissionais da indústria tecnológica que não são especificamente programadores, como engenheiros, matemáticos, cientistas de dados, pesquisadores e outros (KRIGER, 2022).

Atualmente, a engenharia e a computação caminham juntas, fornecendo melhorias nos processos industriais e incrementando a eficiência das plantas químicas. A tecnologia traz inovação para a indústria, que tem ganhos com a otimização de seus processos. A velocidade e exatidão dos cálculos assistidos por computador reduzem a complexidade e o tempo para

análises e estudos, tornando essencial o aprendizado de *softwares* e programação ao longo da graduação em engenharia, possibilitando que o estudante se familiarize com os instrumentos da engenharia contemporânea e se adeque à necessidade do mercado de trabalho.

Nesse sentido, a maneira como as operações unitárias são ministradas aos alunos de Engenharia Química em sua formação são de extrema importância para assimilação dos processos químicos industriais. A tecnologia aliada ao aprendizado pode proporcionar muito mais ao aluno moderno do que a aplicação manual de um método gráfico desde o século passado. Assim, o objetivo principal deste trabalho é mostrar as possibilidades de uso de ferramentas computacionais em disciplinas do curso de Engenharia Química e, em especial, em dois temas de grande importância para os processos químicos: a evaporação e a destilação.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Contribuir para o avanço do ensino de Engenharia Química, com a utilização de ferramentas computacionais que auxiliarão na resolução de exercícios relacionados às operações unitárias de evaporação e destilação.

2.2. Específicos

- Construir um código em linguagem Python capaz de simular o projeto de evaporadores em múltiplos efeitos e auxiliar no uso de tecnologia em sala de aula;
- Elaborar um vídeo para auxiliar no ensino do método de McCabe-Thiele para cálculo de coluna de destilação binária;
- Utilizar o *software* gratuito DWSIM como ferramenta de simulação e análise de sensibilidade da operação unitária de destilação;
- Disponibilizar os materiais didáticos elaborados para auxílio no ensino de Engenharia Química.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Ensino de operações unitárias

As novas Diretrizes Curriculares Nacionais (DCN) da engenharia articulam sobre a utilização das metodologias ativas como forma de promover uma educação mais centrada no aluno, além do uso de ferramentas tecnológicas no auxílio ao ensino (BRASIL, 2019). Nesse contexto, as formas de aprendizado se adequam às necessidades do aluno moderno, cada vez mais conectado com computadores e celulares. Como o código desenvolvido neste trabalho foi estruturado na nuvem em um ambiente colaborativo, há uma facilitação na integração entre os estudantes na discussão do que está ocorrendo.

O curso de Engenharia Química da Universidade Federal de Viçosa (UFV) está de acordo com as DCN estabelecidas pelo Ministério da Educação, através da Resolução do Conselho Nacional de Educação e a Câmara de Educação Superior publicada no Diário Oficial da União, com a Resolução CNE/CES 11/2002. O ensino de Operações Unitárias é especificado como um dos núcleos de conteúdo profissionalizantes para a graduação em Engenharia (BRASIL, 2002).

O ensino das operações unitárias geralmente é dividido em três disciplinas. A primeira tem por objetivo introduzir o estudante às operações unitárias que envolvem transferência de quantidade de movimento e partículas, como a fluidização e decantação. Já a segunda tem o objetivo de consolidar conceitos de transferência de calor e apresentar operações unitárias envolvendo transferência de calor, abordando os fundamentos, equipamentos utilizados, e os balanços de massa e de energia, como os trocadores de calor. Por último, a terceira tem o propósito de apresentar e definir os fundamentos teóricos de operações unitárias envolvendo transferência de massa de um sistema para o outro, como a extração e adsorção.

3.2. Uso da tecnologia como recurso didático

De acordo com Brito e Purificação (2008) a tecnologia está presente em toda a sociedade, inclusive na escola e na educação. Sua aproximação com a educação constitui, inclusive, uma parceria fundamental para o desenvolvimento educativo e intelectual do engenheiro. Assim,

[...] preparando-o para saber criar artefatos tecnológicos, operacionalizá-los e desenvolvê-los [...] estamos em um mundo em que as tecnologias interferem no cotidiano, sendo relevante, assim, que a educação também envolva a

democratização do acesso ao conhecimento, a produção e a interpretação das tecnologias (BRITO; PURIFICAÇÃO, 2008, p. 23).

Usada para apoiar o ensino e a aprendizagem, a tecnologia infunde nas salas de aula como ferramenta da educação. Os recursos *on-line*, o uso de aplicativos educacionais abertos e outras tecnologias podem aumentar a produtividade educacional, contribuindo com o aprendizado e reduzindo custos. Também proporciona uma melhor utilização do tempo do professor, pois as atividades diárias desempenhadas pelo docente podem ser cumpridas com o uso das facilidades oferecidas pela tecnologia, e no uso desses mesmos recursos como meio didático.

Para D'Ambrósio (2001), é preciso substituir os processos de ensino que priorizam a exposição e levam a um receber passivo do conteúdo por processos que estimulem os alunos à participação. Seguindo essa linha, é possível observar que o uso de tecnologias na sala de aula está crescendo, uma vez que os estudantes se interessam mais pelas atividades desenvolvidas com o uso desse artifício. É dever da escola estimular aluno e professor a vivenciar essa tendência, pois:

Nós, educadores, temos de nos preparar e preparar nossos alunos para enfrentar exigências desta nova tecnologia, e de todas que estão a sua volta – A TV, o vídeo, a telefonia celular. A informática aplicada à educação tem dimensões mais profundas que não aparecem à primeira vista (ALMEIDA, 2000. p. 78).

Utilizar variados recursos didáticos revigora a metodologia de ensino, o que propicia maior engajamento na construção do conhecimento tanto por parte do professor, como dos estudantes. São diversas as possibilidades de uso de tecnologias na sala de aula, como por meio de da utilização de *softwares*, simulações e linguagens de programação aliadas às aulas expositivas e o conteúdo dos livros.

3.3. *Softwares* aliados à engenharia química

Os engenheiros químicos são peças fundamentais para o funcionamento e crescimento das indústrias, uma vez que esses profissionais são responsáveis por projetar e operar instalações de uma planta química. Para auxiliá-los nessa tarefa, surgem os *softwares* como ferramentas essenciais para agilizar as atividades desenvolvidas na execução e manutenção de projetos (VERÍSSIMO, 2020).

Na Engenharia Química, os programas computacionais são capazes de resolver problemas como dimensionamento de colunas de destilação, reatores químicos, trocadores de calor e na simulação de funcionamento de equipamentos. No geral, os *softwares* não apenas facilitam o trabalho, mas também ajudam a evitar erros e distrações que ocorrem naturalmente nos cálculos manuais e que podem resultar em impactos negativos nos projetos. Além de apresentar como diferencial a alta velocidade na resolução de cálculos recursivos.

Há no mercado os *softwares* proprietários, desenvolvidos por empresas que cobram pela licença de uso de seus programas e os livres, que são de download gratuito na internet. Entre os programas pagos, pode-se citar o Aspen Hysys, *software* de simulação de processo orientado para a otimização de projeto conceitual e operações, e o MATLAB, que é especializado para cálculos científicos e de engenharia, no qual se implementa a linguagem própria, juntamente com uma biblioteca de funções pré-definidas. E entre os *softwares* gratuitos, pode-se destacar o DWSIM para simulações de processos químicos e o Scilab para computação numérica.

No campo da programação, há diversos *softwares* livres, como o Anaconda e Visual Studio Code. Já o Google Colab é um ambiente em nuvem para construir códigos de programação, sem que haja necessidade de instalação ou até mesmo de um computador para sua utilização, podendo o usuário executar a rotina de um celular por exemplo.

Basicamente, a diferença está no tipo de licença que cada um adota e liberdades de uso. O software proprietário tem um tipo de licença comercial, onde é necessário pagar ao desenvolvedor para usar o sistema e, geralmente, não é possível ter acesso ou editar o código-fonte. Enquanto o software livre permite pode ser utilizado sem a necessidade do pagamento de licenças ao desenvolvedor, além de permitir disponibilizar, estudar e editar o código-fonte do sistema (HOSTNET, 2021).

3.3.1. DWSIM

O DWSIM é um simulador de processos químicos compatível com o padrão CAPE-OPEN¹, desenvolvido pelo brasileiro Daniel Medeiros, que oferece ao usuário uma interface gráfica moderna e didática, permitindo que os profissionais e estudantes da área de engenharia

¹ CAPE-OPEN (CAPE é a abreviação de Computer Aided Process Engineering) é uma norma para escrever as interfaces de software de computador. É aplicada principalmente na engenharia de processos e permite uma comunicação padronizada entre os simuladores de processo (por exemplo, Aspen Plus) e produtos desenvolvidos por terceiros. A vantagem do CAPE-OPEN é que estes produtos são aplicáveis a mais do que apenas um simulador de processo, são destinadas a todos os simuladores de processo que são CAPEOPEN compatíveis. Mais informações: CAPE-OPEN Laboratories Network - <http://www.colan.org/>

química possam simular e compreender diversos processos industriais, e de maneira gratuita. Escrito em VB.NET, o DWSIM apresenta um conjunto abrangente de operações unitárias, modelos termodinâmicos avançados, suporte para sistemas de reação, ferramentas de caracterização de petróleo e uma interface gráfica com todos os recursos. Compatível com os sistemas operacionais Windows, Linux, macOS, iOS e Android, oferece uma experiência completa e semelhante aos principais simuladores comerciais. Desta forma, o usuário pode ter acesso a um poderoso simulador de processos na palma da mão usando um sistema *mobile*, por exemplo. Foi utilizado esse *software* para desenvolver as simulações de destilação neste presente trabalho.

3.3.2. Google Colaboratory

Comumente conhecido como Google Colab, o Google Colaboratory é um serviço de nuvem gratuito, hospedado pelo próprio Google, para incentivar a pesquisa de aprendizado de máquina e inteligência artificial. Nenhuma configuração é necessária, os acessos às Unidade de Processamento Gráfico (GPU) são sem custo financeiro e possuem fácil compartilhamento. É uma ferramenta que permite que se misture código fonte (geralmente em Python) e documentação técnica (geralmente em Markdown). Além disso, é um ambiente colaborativo, podendo ser compartilhado com colegas e outros estudantes de forma livre, permitindo que eles rodem o código e até modifiquem-no, criando suas próprias versões (SANTOS, 2022).

3.3.3. Python

De acordo com Melo (2020), Python é uma linguagem de programação de alto nível, ou seja, com sintaxe mais simplificada e próxima da linguagem humana, utilizada nas mais diversas aplicações, como *desktop*, *web*, servidores e ciência de dados. A linguagem Python é multiparadigma, o que significa que pode-se programar com base em diferentes estilos de programação, como a programação funcional, a procedural e a orientada a objetos. É uma linguagem de fácil aprendizado, quando comparado às outras, graças à sua sintaxe, que é familiar à língua inglesa.

Python é uma linguagem multiplataforma, pois tem versões para diversos sistemas operacionais, entre eles: Windows, Linux e macOS e é mantida pela Python Software Foundation (PSF), uma organização sem fins lucrativos. Além disso, trata-se de uma linguagem interpretada, pois não gera arquivos executáveis como acontece na linguagem C, por exemplo.

Em vez disso, ela contém um interpretador, que é responsável por traduzir o código fonte em linguagem de máquina e, assim, executar o programa. Na prática, o interpretador transforma o código fonte para o formato byte code, que corresponde à linguagem de máquina ou código binário, e envia para um ambiente chamado PVM — Python Virtual Machine —, sendo uma máquina virtual Python que contém o ambiente capaz de executar o programa.

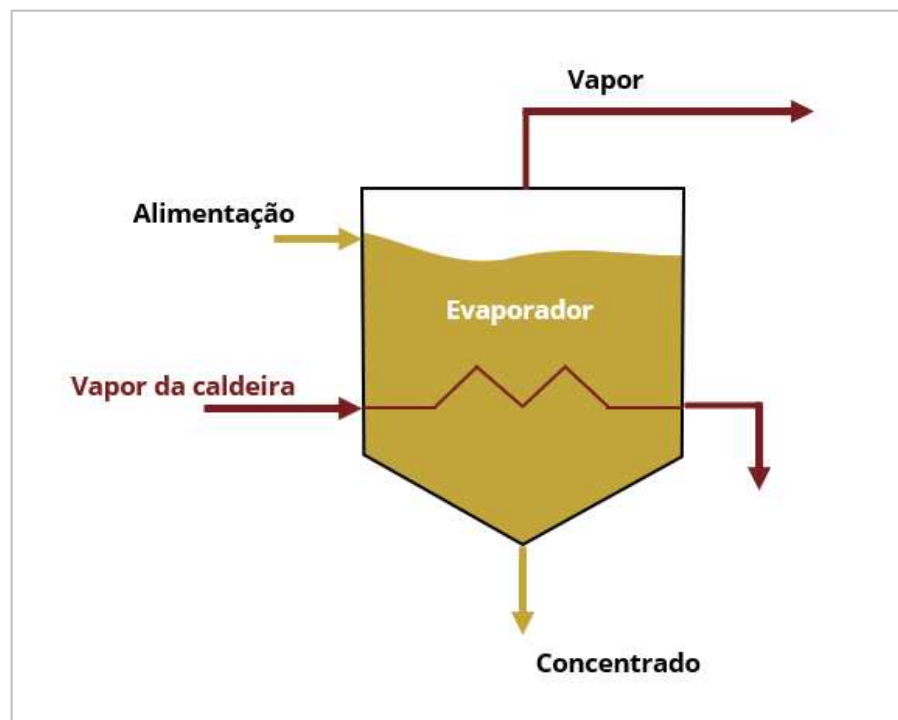
No presente trabalho foi escolhida essa linguagem de programação para desenvolver o projeto de destiladores por ser uma das mais usadas no mundo, tornando o trabalho mais acessível em seu entendimento e visualização.

3.4. Evaporação

Segundo Geankoplis (1993), a operação de evaporação consiste em remover parcialmente ou totalmente o líquido mais volátil de uma solução em ebulição, concentrando-a. Na maioria dos casos, a evaporação corresponde à eliminação de água de uma solução aquosa. Exemplos típicos dessa operação são a concentração de uma solução aquosa de açúcar, cloreto de sódio, hidróxido de sódio, glicerol, leite e sucos de frutas em geral. Nesses casos, a concentração da solução é o objetivo do processo e o vapor de água removido da solução é descartado ou reaproveitado como fluido de aquecimento em outros processos de uma planta industrial, até mesmo em outros evaporadores como é o caso dos equipamentos de múltiplos efeitos.

Na Figura 1 é apresentada a representação de um evaporador de simples efeito.

Figura 1 - Representação esquemática de um evaporador de simples efeito.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Geankoplis (1993), o evaporador é um tipo específico de trocador de calor. Esse pode ser de tacho aberto, tubular horizontal, tubular vertical, tubular longo vertical, circulação forçada, entre outros. A área de troca térmica é projetada com materiais de alta condutividade térmica, como cobre e suas ligas, para maximizar a transferência de calor. Já a carcaça do equipamento é projetada com materiais de baixa condutividade térmica, comumente chamados de isolantes térmicos (como lã de rocha, poliuretano etc.), de modo a minimizar a perda de energia para o ambiente (TERCAL, 2022).

O aquecimento do sistema é promovido pelo uso de vapor d'água normalmente produzido em caldeiras, em evaporadores de simples efeito ou no primeiro efeito dos equipamentos com múltiplos efeitos. Nesse último, o vapor d'água produzido no estágio anterior é utilizado para aquecimento do estágio subsequente. Com a vaporização parcial do solvente da alimentação (F), componente mais volátil, formam-se duas correntes: a de vapor (V) e a de concentrado (C) (Figura 1).

Segundo Geankoplis (1993), há um desperdício de energia nos evaporadores de simples efeitos, visto que o calor latente do vapor desprendido da solução não é convenientemente aproveitado. Uma alternativa interessante do ponto de vista energético é o evaporador de múltiplo efeito, o qual reaproveita o vapor produzido no estágio anterior como meio de

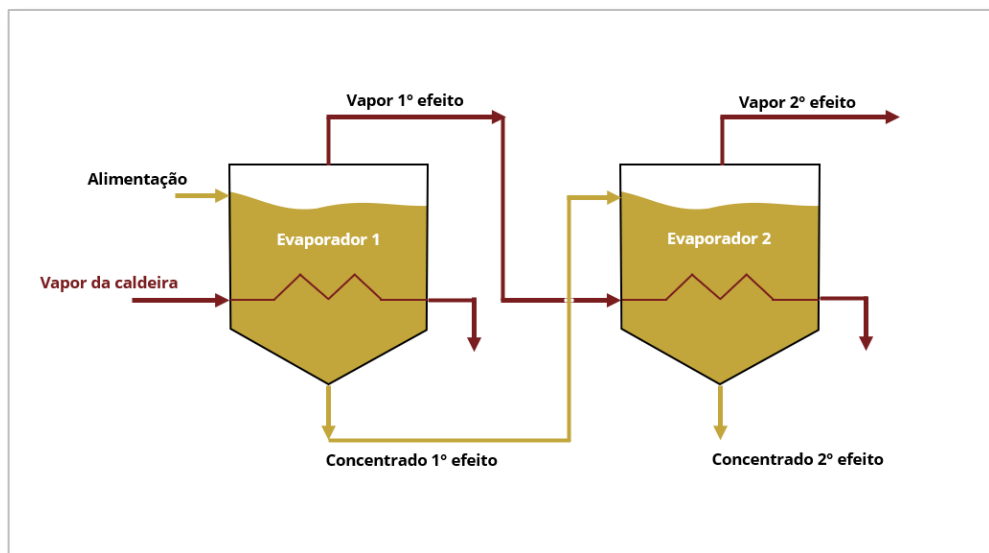
aquecimento do estágio subsequente. Assim, um sistema de evaporadores em série pode ser projetado para economia energética do processo.

Os evaporadores múltiplos efeitos são basicamente estruturados com as seguintes condições:

- O evaporador consecutivo é alimentado com a corrente líquida do evaporador anterior;
- O evaporador consecutivo opera com a energia térmica da corrente de vapor produzida no evaporador anterior;
- As correntes de alimentação e de vapor podem seguir co-correntes, quando ambos os fluidos entram no conjunto de evaporadores pela mesma extremidade (ou seja, no 1º efeito), ou contracorrentes, quando os fluidos entram no equipamento por extremidades opostas (isto é, vapor entra no 1º efeito e a alimentação entra no último efeito do conjunto em série).

Na Figura 2, tem-se a representação de um sistema de evaporadores de duplo efeito com correntes de alimentação e vapor co-correntes, ou seja, configurando com alimentação direta.

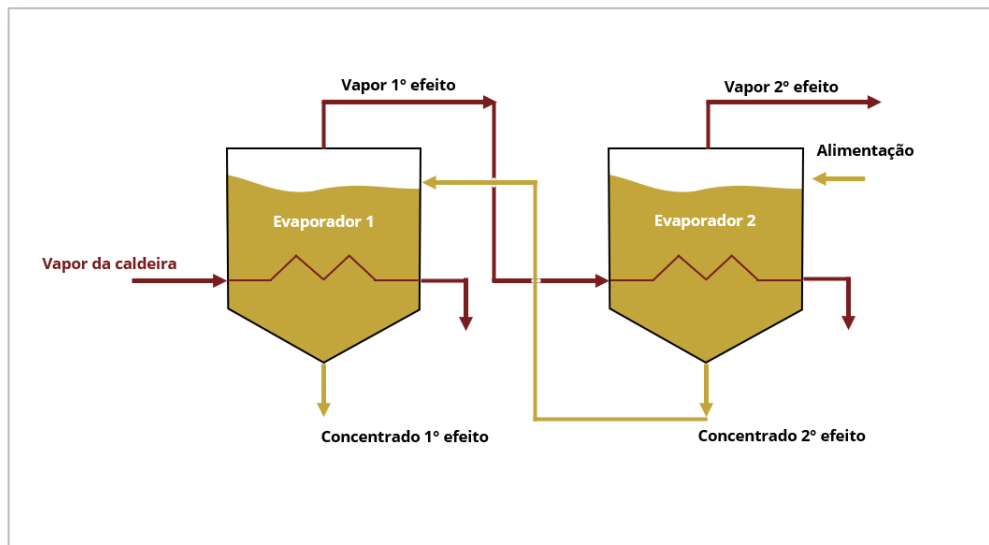
Figura 2 - Representação esquemática de um evaporador de duplo efeito com alimentações co-correntes.



Fonte: Elaboração própria.

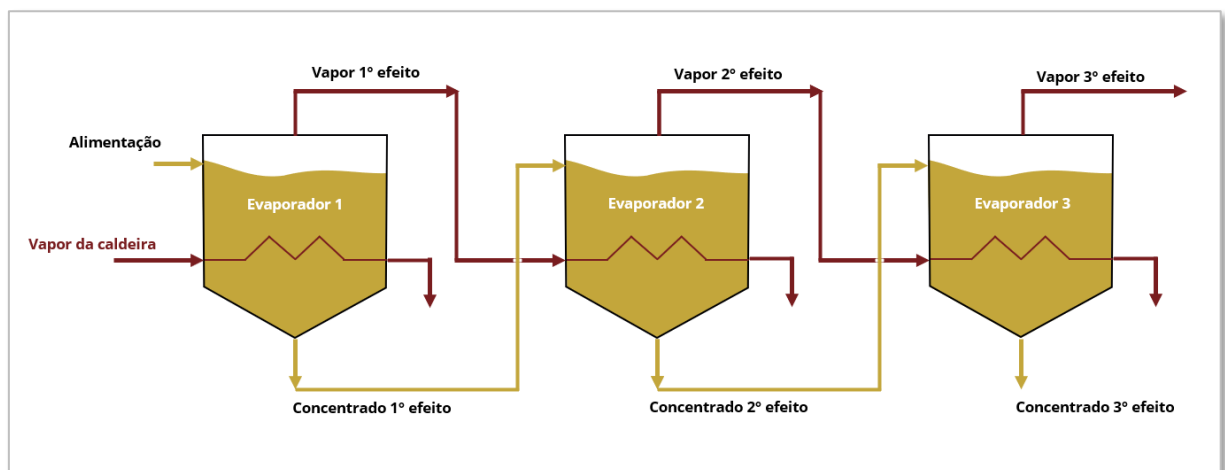
Já na Figura 3, está representado também um sistema de evaporadores de duplo efeito, porém com correntes de alimentação e vapor em contracorrentes, ou seja, com alimentação inversa.

Figura 3 - Representação esquemática de um evaporador de duplo efeito com alimentações contracorrentes.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 4 - Sistema com três evaporadores com correntes de alimentação e vapor co-correntes.



Fonte: Elaboração própria.

A eficiência dos evaporadores múltiplos-efeitos é medida com base no cálculo de economia de vapor, descrita pela razão abaixo:

$$S_{Eco} = \frac{\text{quantidade de água evaporada}}{\text{quantidade de vapor consumido}} \quad (1)$$

Se o equipamento possui eficiência maior que 1, associação é energeticamente mais vantajosa do que se fosse usado vapor proveniente da caldeira para aquecimento em todos os estágios. Quanto maior a eficiência, mais econômico o projeto.

O cálculo e o projeto de evaporadores em série demandam muito tempo e trabalho quando feitos à mão. A quantidade de cálculos e iterações para simular condições de operação é desmotivadora devido ao trabalho braçal demandado. Assim, trabalhar com *softwares* e linguagens de programação torna essas análises mais rápidas e eficientes, permitindo ao estudante uma visibilidade melhor da operação de evaporação.

3.5. Destilação

A destilação é uma operação unitária de separação líquido-vapor. Sua operação e projeto dependem da composição, temperatura e diferença de volatilidade dos componentes da mistura, seja ela de dois componentes (binária) ou mais (multicomponente) (GEANKOPLIS, 1993).

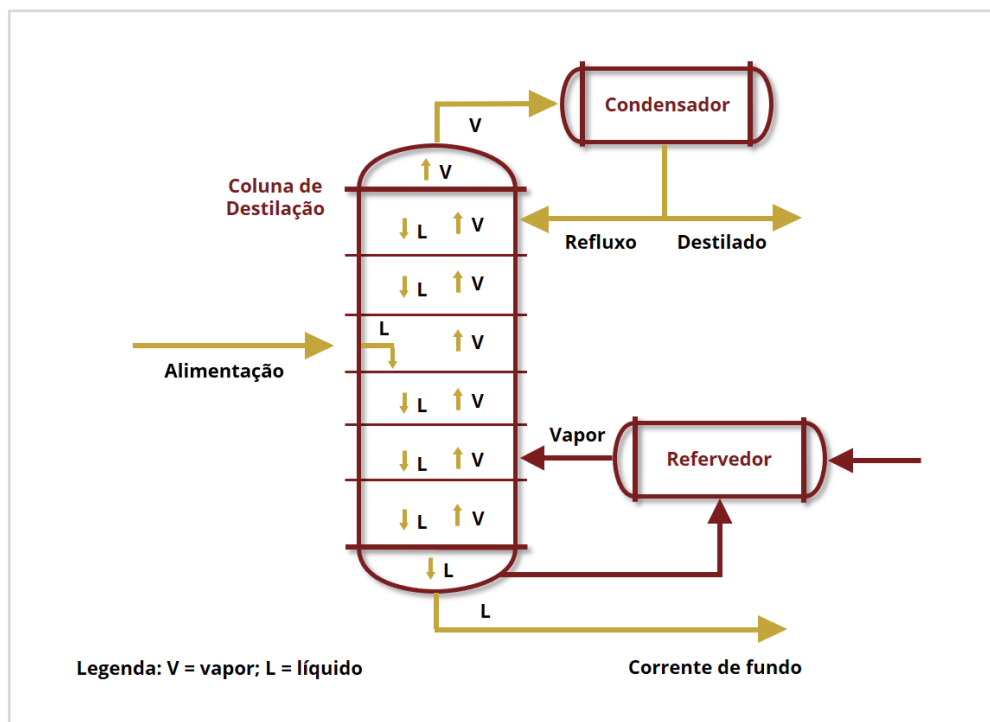
O objetivo da destilação é separar os componentes da mistura em duas correntes diferentes: a corrente de topo e a corrente de fundo. A primeira deverá ser mais rica do componente mais volátil, enquanto última será mais rica do componente menos volátil. A alimentação da coluna de destilação pode ocorrer em diversos estados termodinâmicos, como líquido sub resfriado, líquido saturado, mistura líquido-vapor, vapor saturado e vapor superaquecido. Em estado líquido, a mistura realiza um fluxo descendente até o refeedor, onde é aquecida pelo gradiente de temperatura extremamente favorável e o componente mais volátil entra em estado de vapor, realizando um fluxo ascendente na coluna. O componente menos volátil continua o fluxo descendente (MCCABE, 1993).

A coluna é constituída por diversos estágios que podem ser de 2 tipos principais: pratos ou recheios. Os estágios têm a função de permitir a ascensão do vapor do componente mais volátil e a condensação do componente menos volátil presente na corrente ascendente. Além disso, a coluna de destilação é composta por dois componentes principais: o condensador e o refeedor. O condensador possui o papel de resfriar a corrente de vapor de topo para a obtenção de uma corrente líquida e o refeedor é responsável pelo aquecimento da mistura alimentada à coluna (MCCABE, 1993).

Todo o processo de destilação ocorre na coluna de destilação. Esse equipamento permite que seja realizada uma vaporização parcial da mistura, de forma que as fases líquidas e vapor sigam em contracorrente.

A coluna é dividida em estágios, nos quais as correntes de vapor e líquido são colocadas em contato através de pratos ou enchimentos (OLIVEIRA, 2019). Na Figura 5 é ilustrado um esquema de coluna de destilação para separação dos componentes da mistura, de modo que o mais volátil ascende pela corrente de topo, enquanto o menos volátil descende, na corrente de fundo.

Figura 5 - Representação esquemática de uma coluna de destilação fracionada.



Fonte: Elaboração própria.

O refrervedor é um trocador de calor que tem a finalidade de promover a vaporização do componente mais volátil da mistura e atua transferindo calor para a mistura a ser separada na parte inferior da coluna de destilação. As caldeiras são responsáveis pela energia necessária nos refrervedores, produzindo vapor saturado ou superaquecido, o qual é utilizado como meio de aquecimento, sendo o saturado o mais usado (GEANKOPLIS, 1993).

O condensador possui a função oposta do refrervedor, ou seja, tem por objetivo remover energia térmica de uma corrente. É encontrado no topo da coluna de destilação, condensando a corrente de vapor. Esse trocador de calor é alimentado por um fluido refrigerante, sendo a água

à temperatura ambiente o refrigerante mais comum. O gradiente de transferência de calor é o inverso do refeedor, de forma que o vapor transfere energia para o fluido refrigerante, se liquefaz e forma uma corrente líquida (GEANKOPLIS, 1993).

3.5.1. Método De McCabe-Thiele

O método de McCabe-Thiele é um dos mais simples para descrever a separação de misturas de dois componentes, sendo datado do início do século XX. É bastante utilizado como um método introdutório para o projeto de colunas de destilação, pois combina equilíbrio e balanço de massa, utiliza o conceito de fluxo molar constante e aproximações dos efeitos do balanço de energia (PERRY, 1997).

A principal hipótese admitida no método é que o vapor ao chegar a um determinado prato, entra em contato com o líquido saindo do mesmo prato, deixando-o em um estado de equilíbrio. Também se supõem que os fluxos de vapor e líquido são constantes, mas não necessariamente iguais. E por ser um método gráfico, possibilita uma boa visualização do número de estágios de equilíbrio e do número mínimo de pratos necessários (MCCABE, 1993; SYEDA, 2007).

Esse método gráfico utiliza como base o equilíbrio líquido-vapor de misturas binárias, as quais podem ser definidas como ideais e não ideais. As primeiras apresentam componentes de estrutura molecular e grupos funcionais semelhantes, podendo-se desconsiderar as interações entre os mesmos e utilizar a Lei de Raoult para modelar o equilíbrio (FOUST, 1982). Para as misturas não ideais, a interação entre os grupos funcionais é relevante, deve-se utilizar a Lei de Raoult modificada e calcular os coeficientes de atividade dos componentes por meio de métodos como o de Wilson, Van Laar, NRTL e UNIFAC (SMITH, 2007).

O método consiste, inicialmente, em traçar a reta $y = x$, partindo da origem. Depois, é traçada a curva de equilíbrio xy , na qual x e y são frações molares do componente analisado no líquido e no vapor, respectivamente. Em seguida, deve-se traçar as linhas de operação da alimentação, da seção de retificação e da seção de esgotamento. Por fim, traça-se degraus do ponto das condições do destilado até o ponto das condições do produto de fundo. O método será dividido em 5 etapas neste trabalho para simplificar o entendimento e equacionamento.

Ao projetar uma coluna de destilação aplicada a misturas não ideais, mudar as condições de alimentação e operação da colunar e refazer os cálculos e gráficos pode desmotivar os estudantes de fazer uma análise de sensibilidade da operação unitária, pois a tarefa se torna meramente mecânica e braçal, uma vez que o estudante está apenas mudando valores de entrada

para avaliar o impacto desse no resultado. Assim, com o presente estudo, objetiva-se trazer visibilidade do tamanho do trabalho manual para projetar a coluna, quando comparado com a simulação em *software*.

4. METODOLOGIA

4.1. Exercício Evaporador Triplo Efeito

Desenvolveu-se um código em linguagem Python, de forma didática com explicações e passos bem definidos para o melhor entendimento de cada etapa do processo e acompanhamento dos cálculos ao longo da resolução de um exercício extraído do livro de Operações Unitárias do Geankoplis (1993) que emprega o uso de evaporadores triplo efeito para concentração de uma solução de sacarose. Para isso, foi utilizado um editor de código gratuito. O código criado destina-se ao ensino de operações unitárias no curso de Engenharia Química da UFV e qualquer outra instituição de ensino superior.

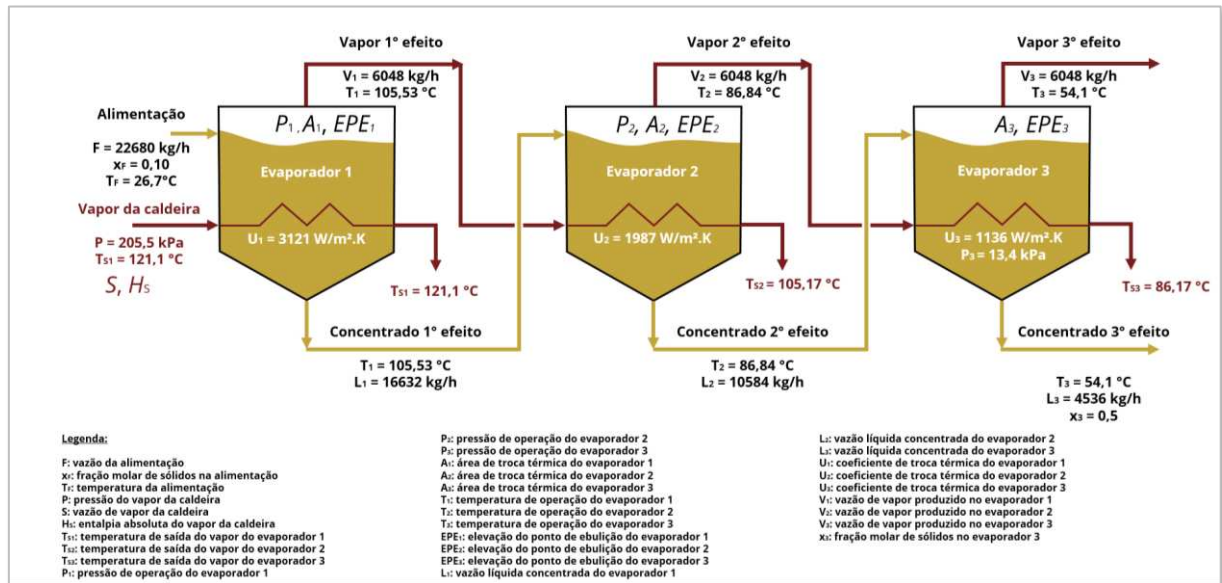
O seguinte exercício foi utilizado para a elaboração do código em linguagem Python, aplicado em sua resolução:

EXEMPLO 8.5-1. Evaporação de uma solução de açúcar em um evaporador triplo efeito.

Um evaporador triplo efeito de alimentação co-corrente está sendo usado para evaporar uma solução de açúcar contendo 10% em peso de sólidos para uma solução concentrada de 50%. O aumento do ponto de ebulição das soluções (independente da pressão) pode ser estimado a partir de $EPE (^{\circ}C) = 1,78*x + 6,22*x^2$ ($EPE (^{\circ}F) = 3,2*x + 11,2 *x^2$), onde x é a fração em peso de açúcar em solução (K1). Está sendo usado vapor saturado a 205,5 kPa (29,8 psia) [temperatura de saturação de 121,1°C (250°F)]. A pressão no terceiro efeito é de 13,4 kPa (1,94 psia). A vazão de alimentação é de 22680 kg/h (50000 lbm/h) a 26,7 °C (80 °F). A capacidade térmica das soluções líquidas é (K1) $cp = 4,19 - 2,35*x$ kJ/kg.K ($1,0 - 0,56*x$ btu/lbm.°F). O calor de solução é considerado desprezível. Os coeficientes de transferência de calor foram estimados como $U1 = 3123$, $U2 = 1987$ e $U3 = 1136$ W/m².K ou 550, 350 e 200 btu/h.ft².°F. Se cada efeito tiver a mesma área de superfície, calcule a área, a taxa de vapor utilizada e a economia de vapor (GEANKOPLIS, 1997, p. 505).

A Figura 6 foi elaborada para visualização dos dados fornecidos pelo enunciado.

Figura 6 - Variáveis do sistema com três evaporadores para concentrar solução de açúcar.



Fonte: Elaboração própria.

Foi utilizando o Google Colab, ambiente gratuito que permite qualquer pessoa escrever e executar códigos Python arbitrários pelo navegador e é especialmente adequado para aprendizado de máquina, análise de dados e educação. O primeiro passo consistiu em acessar o Google Colab pelo navegador de internet e a partir dele deu-se a construção do código de acordo com as seguintes etapas:

4.1.1. Carregamento dos pacotes

O Python possui diversas bibliotecas e que empregado de forma eficiente possibilitam ao usuário uma utilização mais simples por meio do uso de comandos específicos de cada uma. Para não ser necessário o uso de tabelas de propriedades termodinâmicas de vapor d'água, importou-se a biblioteca CoolProp. Além dessa biblioteca, também foram usados os pacotes numpy e scipy, que auxiliam na resolução de sistema de equações utilizando cálculo numérico e interpolação. Destaca-se que o CoolProp deve ser instalado toda vez que reabrir o Google Colab, pois ao fechar o *browser* de internet, a máquina virtual apaga da memória sua prévia instalação.

A instalação dessa biblioteca está descrita na Figura 7.

Figura 8 - Definindo variáveis do enunciado.

```

▶ # Para o evaporador

P_kPa = 13.4          # pressão de operação do terceiro efeito do evaporador em kPa
P = P_kPa * 10**3    # pressão de operação do terceiro efeito do evaporador em Pa

U1 = 3123           # coeficiente global de transferência de calor par ao efeito 1 em W/(m^2 K)
U2 = 1987           # coeficiente global de transferência de calor par ao efeito 2 em W/(m^2 K)
U3 = 1136           # coeficiente global de transferência de calor par ao efeito 3 em W/(m^2 K)

def EPE(x):
    return 1.78*x+6.22*x**2    # °C ou K pois é variação de temperatura e as duas são escalas centígradas

def cp(x):
    return 4.19-2.35*x        # calor específico em função da fração de sólidos kJ/(kg K)

# Para a alimentação:

XF = 0.1              # fração de sólidos na alimentação
TF_C = 26.7          # temperatura de alimentação em °C
TF = TF_C + 273.15   # temperatura de alimentação em K

F_kgh = 22680        # taxa mássica da alimentação em kg/h
F = F_kgh/3600       # taxa mássica da alimentação em kg/s

# Para o produto:

xP = 0.5             # fração de sólidos no produto

# Para o vapor vegetal:

xV = 0              # fração de sólidos no vapor (consideramos que não há arraste de sacarose)

# Para o vapor de alimentação:

Ps_kPa = 205.5       # pressão do vapor de alimentação em kPa
Ps = Ps_kPa * 10**3  # pressão do vapor de alimentação em Pa

Ts1 = CP.PropsSI('T', 'P', Ps, 'Q', 1, 'IF97::Water') # temperatura do vapor de alimentação em K
Ts1_C = Ts1-273.15  # temperatura do vapor de alimentação em °C

```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.3. Cálculo da temperatura do terceiro evaporador

Levando em conta a elevação do ponto de ebulição (EPE), foi calculada a temperatura de operação do último estágio de evaporação.

Figura 9 - Cálculo da temperatura no último estágio.

```

[ ] EPE3 = EPE(xP)          # Elevação do ponto de ebulição em °C ou K ambos são centígrados
    Tvs3 = CP.PropsSI('T', 'P', P, 'Q', 1, 'IF97::Water') # Temperatura do vapor saturado para pressão de P =13.4 kPa do 3º efeito do evaporador em K
    T3 = Tvs3 + EPE3      # Temperatura de trabalho 3º efeito do evaporador em K
    T3_C = T3-273.15     # Temperatura de trabalho 3º efeito do evaporador em °C

print(' ')
print('A temperatura no terceiro estágio é T3_C={:.3f} '.format(T3_C), '°C ou T3 = {:.3f} '.format(T3), 'K')
print(' ')

```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.4. Balanço de Massa

Realizou-se o balanço de massa global e de sólidos a fim de se estimar o total de vapor produzido e a corrente líquida do terceiro efeito.

O balanço de massa global pode ser expresso pela Equação 2:

$$F = L_3 + V_1 + V_2 + V_3 \quad (2)$$

Sendo F a corrente de alimentação, L_3 a corrente líquida do último evaporador, V_1 a corrente de vapor produzida no primeiro estágio, V_2 a produzida no segundo e V_3 produzida no terceiro. Como especificado pelo enunciado, a quantidade de vapor produzido em cada efeito é igual, de modo que:

$$V = V_1 = V_2 = V_3 \quad (3)$$

Dessa forma, o balanço de massa global se resume a:

$$F = L_3 + 3V \quad (4)$$

Na Figura 10 está descrito o código para cálculo dos balanços de massa.

Figura 10 - Balanço de massa das correntes de vapor e líquido.

```

▶ L3 = (F*xF)/xP          # Taxa mássica de produto L3 em kg/s
Vt = F - L3             #Total water vaporised from three evaporators (V = V1 + v2 +v3 ), kg/s
V1 = Vt/3               #Assumindo a quantida de vapor igual nos três efeitos V1 = V2 = V3
V2 = V1
V3 = V1

print(' ')
print('A taxa mássica de vapor que deve ser retirado é V1 = V2 = V3 ={: .3f} '.format(V1), 'kg/s' )
print(' ')

# Fazendo o balanço de massa para cada efeito:

L1 = F - V1             #A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 1, kg/s
L2 = L1 - V2            #A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 2, kg/s
L3 = L2 - V3

print(' ')
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 1 é L1 = {: .3f} '.format(L1), 'kg/s' )
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 2 é L2 = {: .3f} '.format(L2), 'kg/s' )
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 3 é L3 = {: .3f} '.format(L3), 'kg/s' )
print(' ')

```

Fonte: Elaboração própria.

Para o balanço de massa de sólidos, considerando que não há arraste de sacarose nas correntes de vapor:

$$F * x_F = L_3 * x_3 \quad (5)$$

Sendo x_F a concentração, em fração mássica, dos sólidos na corrente de alimentação F e x_3 a fração mássica na corrente líquida no terceiro estágio. Portanto,

$$L_3 = F * \frac{x_F}{x_3} \quad (6)$$

Substituindo a (6) na (4),

$$V_1 = \frac{F - L_3}{3} \quad (7)$$

Fica-se com:

$$V_1 = V_2 = V_3 \quad (8)$$

1º efeito:

$$L_1 = F - V_1 \quad (9)$$

$$x_1 = \frac{F * x_F}{L_1} \quad (10)$$

2º efeito:

$$L_2 = L_1 - V_2 \quad (11)$$

$$x_2 = \frac{L_1 * x_1}{L_2} \quad (12)$$

3º efeito:

$$L_3 = L_2 - V_3 \quad (13)$$

$$x_3 = \frac{L_2 * x_2}{L_3} \quad (14)$$

Na Figura 11 estão as linhas do código responsáveis pelo balanço de massa de sólidos em cada efeito.

Figura 11 - Balanço de massa de sólidos.

```
[ ] # Fazendo o balanço de sólidos para cada efeito
x1 = (F*xF)/L1
x2 = (L1*x1)/L2
x3 = (L2*x2)/L3 # só confirmando se x3 daria igual xp

print(' ')
print('A fração mássica do concentrado que sai do efeito 1 é x1 = {:.4f}'.format(x1))
print('A fração mássica do concentrado que sai do efeito 2 é x2 = {:.4f}'.format(x2))
print('A fração mássica do concentrado que sai do efeito 3 é x3 = {:.4f}'.format(x3))
print(' ')
```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.5. Determinação da elevação do ponto de ebulição (EPE)

A partir do cálculo da elevação do ponto de ebulição para cada efeito (Eq. 15-17), estimou-se as temperaturas de ebulição em cada efeito:

$$EPE_1(x_1) = 1,78x_1 + 6,22x_1^2 \quad (15)$$

$$EPE_2(x_2) = 1,78x_2 + 6,22x_2^2 \quad (16)$$

$$EPE_3(x_3) = 1,78x_3 + 6,22x_3^2 \quad (17)$$

Para calcular o potencial térmico (ΔT) para cada efeito:

$$\sum \Delta T = T_{S1} - T_{Sat3} - (EPE_1 + EPE_2 + EPE_3) \quad (18)$$

Sendo T_{S1} a temperatura de saída da corrente de energia do primeiro efeito, T_{Sat3} a temperatura de saturação para o terceiro efeito, EPE_1 a elevação do ponto de ebulição para o primeiro efeito, EPE_2 a elevação do ponto de ebulição para o segundo efeito e a EPE_3 para o terceiro efeito.

Para o primeiro efeito:

$$\Delta T_1 = \sum \Delta T * \frac{\frac{1}{U_1}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \quad (19)$$

Para o segundo efeito:

$$\Delta T_2 = \sum \Delta T * \frac{\frac{1}{U_2}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \quad (20)$$

Ou

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 * \frac{U_1}{U_2} \quad (21)$$

Para o terceiro efeito:

$$\Delta T_3 = \sum \Delta T * \frac{\frac{1}{U_3}}{\frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \frac{1}{U_3}} \quad (22)$$

Ou

$$\Delta T_3 = \Delta T_1 * \frac{U_1}{U_3} \quad (23)$$

O cálculo das elevações dos pontos de ebulição e do potencial térmico para os três efeitos pode ser observado na Figura 12.

Figura 12 - Elevação do Ponto de Ebulição nos três efeitos.

```
[ ] # Cálculos das elevações dos pontos de ebulição para os três efeitos:
EPE1 = EPE(x1)
EPE2 = EPE(x2)
EPE3 = EPE(x3)

SDeIT = Ts1 - Tvs3 - (EPE1+EPE2+EPE3)
ISU13 = 1/U1+1/U2+1/U3

DeIT1 = SDeIT*(1/U1)/ISU13
DeIT2 = SDeIT*(1/U2)/ISU13
DeIT3 = SDeIT*(1/U3)/ISU13
```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.6. Determinação das temperaturas de ebulição em cada efeito

Como a alimentação é fria no 1º efeito, este requer maior energia térmica. Então, pode-se aumentar ΔT_1 e reduzir ΔT_2 e ΔT_3 proporcionalmente. Posteriormente, determinou-se os pontos de ebulição da solução em cada efeito.

Para o primeiro efeito, $T_{S1} = 121$ °C.

$$T_1 = T_{S1} - \Delta T_1 \quad (24)$$

Para o segundo efeito:

$$T_{S2} = T_1 - EPE_1 \quad (25)$$

$$T_2 = T_{S2} - \Delta T_2 \quad (26)$$

Para o terceiro efeito:

$$T_{S3} = T_2 - EPE_2 \quad (27)$$

$$T_3 = T_{S3} - \Delta T_3 \quad (28)$$

$$T_{S4} = T_3 - EPE_3 \quad (29)$$

A determinação do ponto de ebulição da solução em cada efeito pode ser observada nas linhas do código apresentadas na Figura 13.

Figura 13 - Determinação das temperaturas em cada efeito.

```
[ ] # Como a alimentação entra "fria" no 1º efeito, esse requer mais calor. Vamos então aumentar De1T1 e reduzir De1T2 e De1T3 proporcionalmente:
De1T1 = De1T1+3.13
De1T2 = De1T2-1.21
De1T3 = De1T3-2.12

# Determinação do ponto de ebulição da solução em cada efeito:
T1 = Ts1 - De1T1
T1_C = T1-273.15

Ts2 = T1 - EPE1
Ts2_C = Ts2-273.15

T2 = Ts2 - De1T2
T2_C = T2-273.15

Ts3 = T2 - EPE2
Ts3_C = Ts3-273.15

T3 = Ts3 - De1T3
T3_C = T3-273.15

Ts4 = T3 - EPE3
Ts4_C = Ts4-273.15

print(' ')
print('A temperatura no efeito 1 levando em consideração a elevação do ponto de ebulição é T1_C = {:.3f} '.format(T1_C),'°C ou T3 = {:.3f} '.format(T1),'K')
print('A temperatura no efeito 2 levando em consideração a elevação do ponto de ebulição é T2_C = {:.3f} '.format(T2_C),'°C ou T3 = {:.3f} '.format(T2),'K')
print('A temperatura no efeito 3 levando em consideração a elevação do ponto de ebulição é T3_C = {:.3f} '.format(T3_C),'°C ou T3 = {:.3f} '.format(T3),'K')
print(' ')
```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.7. Determinação do calor específico em cada efeito

Determinou-se o calor específico (c_p) em cada efeito a partir das concentrações das correntes de líquido previamente determinadas pelos balanços de massa (ver item 4.1.4):

$$c_{pF} = 4,19 - 2,35x_F \quad (30)$$

$$c_{p1} = 4,19 - 2,35x_1 \quad (31)$$

$$c_{p2} = 4,19 - 2,35x_2 \quad (32)$$

$$c_{p3} = 4,19 - 2,35x_3 \quad (33)$$

Para o cálculo do calor específico em cada efeito, dispõe-se as linhas de comando da Figura 14.

Figura 14 - Determinação do calor específico em cada efeito.

```
[ ] # Calcular o calor específico em cada efeito
CpF = cp(xF) # Cálculo do calor específico na alimentação em kJ/(kg K)
Cp1 = cp(x1) # Cálculo do calor específico no efeito 1 em kJ/(kg K)
Cp2 = cp(x2) # Cálculo do calor específico no efeito 2 em kJ/(kg K)
Cp3 = cp(x3) # Cálculo do calor específico no efeito 3 em kJ/(kg K)
```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.8. Determinação do calor latente de vaporização e entalpias nos três efeitos

Para este fim, foi utilizado um comando do pacote CoolProp instalado no início. Essa biblioteca dispõe de ferramentas para cálculo das entalpias de corrente. As linhas do código para uso dessa função estão descritas na Figura 15.

Figura 15 - Cálculo do calor latente de vaporização das entalpias em cada efeito.

```
[ ] #Cálculo do calor latente de vaporização e as entalpias para os três efeitos:

Tref_C = 0
Tref = Tref_C + 273.15 # Temperatura de referência em °C
                        # Temperatura de referência em K

# Corrente de alimentação:

hF = CpF*(TF-Tref) # Entalpia em S em kJ/kg

# Correntes S:

Hs1= CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',1,'IF97::Water')/1000 # Entalpia do vapor saturado S1 em kJ/kg
hs1= CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',0,'IF97::Water')/1000 # Entalpia do líquido saturado S1 em kJ/kg

Hs2= CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',1,'IF97::Water')/1000 # Entalpia do vapor saturado S2 em kJ/kg
hs2= CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',0,'IF97::Water')/1000 # Entalpia do líquido saturado S2 em kJ/kg

Hs3= CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',1,'IF97::Water')/1000 # Entalpia do vapor saturado S3 em kJ/kg
hs3= CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',0,'IF97::Water')/1000 # Entalpia do líquido saturado S3 em kJ/kg

# Correntes L:

hL1 = Cp1*(T1-Tref) # Entalpia em L1 em kJ/kg
hL2 = Cp2*(T2-Tref) # Entalpia em L2 em kJ/kg
hL3 = Cp3*(T3-Tref) # Entalpia em L3 em kJ/kg

# Correntes V:

Hv1 = Hs1+1.884*EPE1 # Entalpia em V1 em kJ/kg
Hv2 = Hs2+1.884*EPE2 # Entalpia em V2 em kJ/kg
Hv3 = Hs3+1.884*EPE3 # Entalpia em V3 em kJ/kg

# Os valores de entalpia em cada efeito uma vez que V e L estão em equilíbrio e possuem a mesma temperatura temos:

H1 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884*EPE1 # Entalpia para o primeiro efeito em kJ/kg
lambdas1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',1,'IF97::Water')/1000 -CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',0,'IF97::Water')/1000 # Calor latente de vaporização para o primeiro efeito em kJ/kg

H2 = CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884*EPE2 # Entalpia para o segundo efeito em kJ/kg
lambdas2 = H1 - CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',0,'IF97::Water')/1000 # Calor latente de vaporização para o segundo efeito em kJ/kg

H3 = CP.PropsSI('H','T',Ts4,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884*EPE3 # Entalpia para o terceiro efeito em kJ/kg
lambdas3 = H2 -CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',0,'IF97::Water')/1000 # Calor latente de vaporização para o terceiro efeito em kJ/kg
```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.9. Balanços de energia

Foi utilizada a temperatura de referência $T_{ref} = 0$ °C nos balanços de energia para cada efeito.

$$F * h_F + S * H_{S1} = s * h_{S1} + L_{1n} * h_{L1} + (F - L_{1n}) \quad (34)$$

$$L_{1n} * h_{L1} + (F - L_{1n}) * H_1 = (F - L_{1n}) * h_{S2} + L_{2n} * h_{L2} + (L_{1n} - L_{2n}) * H_2 \quad (35)$$

$$L_{2n} * h_{L2} + (L_{1n} - L_{2n}) * H_2 = (L_{1n} - L_{2n}) * h_{S3} + L_3 * h_{L3} + (L_{2n} - L_3) * H_3 \quad (36)$$

Destaca-se que o subscrito n, como em L_{2n} nas equações acima, foi utilizado para não sobrescrever os antigos valores da variável “L” armazenadas pelo código.

Sendo h a entalpia do líquido e H a entalpia do vapor, as entalpias dos líquidos são dadas por:

$$h_F = c_{pF} * (T_F - T_{ref}) \quad (37)$$

$$h_{L1} = c_{p1} * (T_1 - T_{ref}) \quad (38)$$

$$h_{L2} = c_{p2} * (T_2 - T_{ref}) \quad (39)$$

$$h_{L3} = c_{p3} * (T_3 - T_{ref}) \quad (40)$$

E as entalpias dos vapores são dadas por:

$$H_{V1} = H_{S1} + 1,884 * EPE_1 \quad (41)$$

$$H_{V2} = H_{S2} + 1,884 * EPE_2 \quad (42)$$

$$H_{V3} = H_{S3} + 1,884 * EPE_3 \quad (43)$$

Determina-se a corrente de vapor proveniente da caldeira e as novas taxas mássicas que saem de cada efeito. Os cálculos envolvidos no balanço de energia estão mostrados na figura abaixo.

Figura 16 - Balanço de energia.

```
[ ] #Montando as matricizes para resolver o sistema de equações (são três equações e três incognitas S, L1 e L2):

a11 = Hs1-hs1
a12 = H1 - hL1
a13 = 0
b1 = (H1-hF)*F

a21 = 0
a22 = hL1 + hs2 - H1 - H2
a23 = H2-hL2
b2 = (hs2 - H1)*F

a31 = 0
a32 = H2 - hs3
a33 = hL2 + hs3 - H2 - H3
b3 = L3*(hL3-H3)

a = np.array([[a11,a12,a13], [a21,a22,a23], [a31,a32,a33]])
b = np.array([b1,b2,b3])

S,L1n,L2n = np.linalg.solve(a, b)

S_h = S*3600
L1_hn = L1n*3600
L2_hn = L2n*3600
L3_h = L3*3600

print(' ')
print('A taxa mássica do vapor saturado que entra no primeiro efeito é S_h = {:.3f}'.format(S_h), 'kg/h' )
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 1 é L1 = {:.3f}'.format(L1_hn), 'kg/h' )
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 2 é L2 = {:.3f}'.format(L2_hn), 'kg/h' )
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 3 é L3 = {:.3f}'.format(L3_h), 'kg/h' )
print(' ')
```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.10. Estimativa das novas correntes de vapor em cada estágio

De posse dos valores de L_1 e L_2 , calculou-se os novos valores para V_1 , V_2 e V_3 . a fim de comparar os novos valores de V_1 , V_2 e V_3 com os calculados determinados anteriormente, conforme o item 4.2.4.

$$V_1 = F - L_1 \quad (44)$$

$$V_2 = L_1 - L_2 \quad (45)$$

$$V_3 = L_2 - L_3 \quad (46)$$

Na Figura 17 são apresentadas as linhas de código referentes a esses cálculos.

Figura 17 - Primeira iteração para correntes de vapor e líquido.

```
[ ] #De posse dos valores calculados de L1 e L2 podemos calcular os novos valores para V1, V2 e V3:

V1n = F - L1n                                     #Do balanço de massa é possível calcular a taxa mássica do vapor vegetal que sai do primeiro efeito (V1) [kg/s]
V1_hn = V1n*3600                                  #Do balanço de massa é possível calcular a taxa mássica do vapor vegetal que sai do primeiro efeito (V1_h) [kg/h]

V2n = L1n - L2n                                   #Do balanço de massa é possível calcular a taxa mássica do vapor vegetal que sai do segundo efeito (V2) [kg/s]
V2_hn = V2n*3600                                  #Do balanço de massa é possível calcular a taxa mássica do vapor vegetal que sai do segundo efeito (V2_h) [kg/h]

V3n = L2n - L3n                                   #Do balanço de massa é possível calcular a taxa mássica do vapor vegetal que sai do terceiro efeito (V3) [kg/s]
V3_hn = V3n*3600                                  #Do balanço de massa é possível calcular a taxa mássica do vapor vegetal que sai do terceiro efeito (V3_h) [kg/h]

print(' ')
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 1 é V1 = {:.0f}'.format(V1_hn), 'kg/h' )
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 2 é V2 = {:.0f}'.format(V2_hn), 'kg/h' )
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 3 é V3 = {:.0f}'.format(V3_hn), 'kg/h' )
print(' ')

delta_V1 = abs((V1-V1n))/V1*100
delta_V2 = abs((V2-V2n))/V2*100
delta_V3 = abs((V3-V3n))/V3*100

print(' ')
print('O valor do delta_V1 = {:.3f}'.format(delta_V1), '%' )
print('O valor do delta_V2 = {:.3f}'.format(delta_V2), '%' )
print('O valor do delta_V3 = {:.3f}'.format(delta_V3), '%' )
print(' ')
```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.11. Loop de iteração para correntes de vapor

O programa refaz todos os cálculos anteriores até o item 4.1.10, iterando a variável das correntes de vapor de cada efeito (V_1 , V_2 e V_3) até que seus valores apresentem uma variação menor que 1% em relação aos valores anteriores. As iterações têm o intuito de obter valores mais exatos possíveis.

O código da iteração para correntes de vapor se encontra disponível no **Apêndice**.

4.1.12. Determinação da taxa de energia e área de troca térmica em cada efeito

Primeiramente, calculou-se o calor latente de vaporização (λ) para cada uma das correntes de vapor que entram nos evaporadores 1, 2 e 3, respectivamente:

$$\lambda_{S1} = H_{S1} - h_{S1} \quad (47)$$

$$\lambda_{S2} = H_{V1} - h_{S2} \quad (48)$$

$$\lambda_{S3} = H_{V2} - h_{S3} \quad (49)$$

Em seguida, determinou-se o calor transferido por essas correntes de vapor para cada um dos evaporadores:

$$Q_1 = S * \lambda_{S1} \quad (50)$$

$$Q_2 = V_1 * \lambda_{S2} \quad (51)$$

$$Q_3 = V_3 * \lambda_{S3} \quad (52)$$

Por fim, de posse de todos os valores de Q, pôde-se calcular as áreas para cada um dos evaporadores, tal que:

$$A_1 = \frac{Q_1}{U_1 * \Delta T_1} \quad (53)$$

$$A_2 = \frac{Q_2}{U_2 * \Delta T_2} \quad (54)$$

$$A_3 = \frac{Q_3}{U_3 * \Delta T_3} \quad (55)$$

As linhas do código da Figura 18 retornam o valor das áreas calculadas.

Figura 18 - Determinação da taxa de energia.

```
[ ] #Passo 5: Determinar a taxa de energia (Q) e a área (A) em cada efeitoo

q1 = S_h/3600*lambdaS1*1000
q2 = V1_h/3600*lambdaS2*1000
q3 = V2_h/3600*lambdaS3*1000

print('----- As taxa de energia foram:-----')
print(' ')
print('A quantidade de calor transferida do vapor (S) para o primeiro efeito foi Q1 = {:.4f} '.format(q1/10**6), 'MW' )
print('A quantidade de calor transferida do vapor (V1) para o segundo efeito foi Q2 = {:.4f} '.format(q2/10**6), 'MW' )
print('A quantidade de calor transferida do vapor (V2) para o terceiro efeito foi Q3 = {:.4f} '.format(q3/10**6), 'MW' )
print(' ')

A1 = q1/(U1*DelT1)
A2 = q2/(U2*DelT2)
A3 = q3/(U3*DelT3)

print('----- As áreas de cada efeito foram:-----')
print(' ')
print('A área calculada para o primeiro efeito foi A1 = {:.4f} '.format(A1), 'm^2' )
print('A área calculada para o segundo efeito foi A2 = {:.4f} '.format(A2), 'm^2' )
print('A área calculada para o terceiro efeito foi A3 = {:.4f} '.format(A3), 'm^2' )
print(' ')

Am = Am1 = (A1+A2+A3)/3

print('----- A área média calculada:-----')
print(' ')
print('A área média calculada para os três efeito foi Am = {:.4f} '.format(Am), 'm^2' )
print(' ')

delta_A1 = abs(A1 - Am)/Am*100
delta_A2 = abs(A2 - Am)/Am*100
delta_A3 = abs(A3 - Am)/Am*100

print('----- O delta da área é:-----')
print(' ')
print('O valor do delta_A1 = {:.3f} '.format(delta_A1), '%' )
print('O valor do delta_A2 = {:.3f} '.format(delta_A2), '%' )
print('O valor do delta_A3 = {:.3f} '.format(delta_A3), '%' )
print(' ')

```

Fonte: Elaboração própria.

4.1.13. Loop de iteração para as áreas de troca térmica

Em busca de valores mais precisos, as áreas de troca térmica foram iteradas até que a variação da área determinada em relação ao valor anteriormente estabelecido seja menor que 1%. O código dessa iteração se encontra no **Apêndice**.

Com essas últimas linhas, são obtidas as variáveis de projeto solicitadas no enunciado do exercício (a saber: área de troca térmica dos evaporadores, taxa de vapor consumido e economia de vapor).

4.2. Exercício destilação mistura binária

O intuito dessa parte do trabalho foi apresentar a resolução de um exercício extraído do livro de Operações Unitárias do Geankoplis (1993), o qual envolve a destilação de uma mistura binária de benzeno e tolueno por meio do método do McCabe-Thiele com a utilização do PowerPoint. Em seguida, foi realizada a resolução do mesmo exercício com o *software* DWSIM e realizadas algumas simulações em cima das condições de operação da coluna de destilação. Os resultados foram plotados em tabelas para análise.

Toda execução foi gravada utilizando a ferramenta de gravação de tela do próprio Windows e editada no *software* de edição de vídeo Movavi. O vídeo produzido é dedicado ao ensino de operações unitárias do curso de Engenharia Química da UFV e qualquer outra instituição de ensino superior.

Ademais, foi criado um conjunto de *slides* interativos para a explicação do método gráfico, além de ter sido elaborado um roteiro para seguir com as gravações e edições. O vídeo contém a resolução do mesmo exercício pelo *software* DWSIM, além outras simulações.

A seguir, será descrita em 5 passos a resolução analítica do problema adotado utilizando-se o método McCabe-Thiele e depois os resultados das simulações:

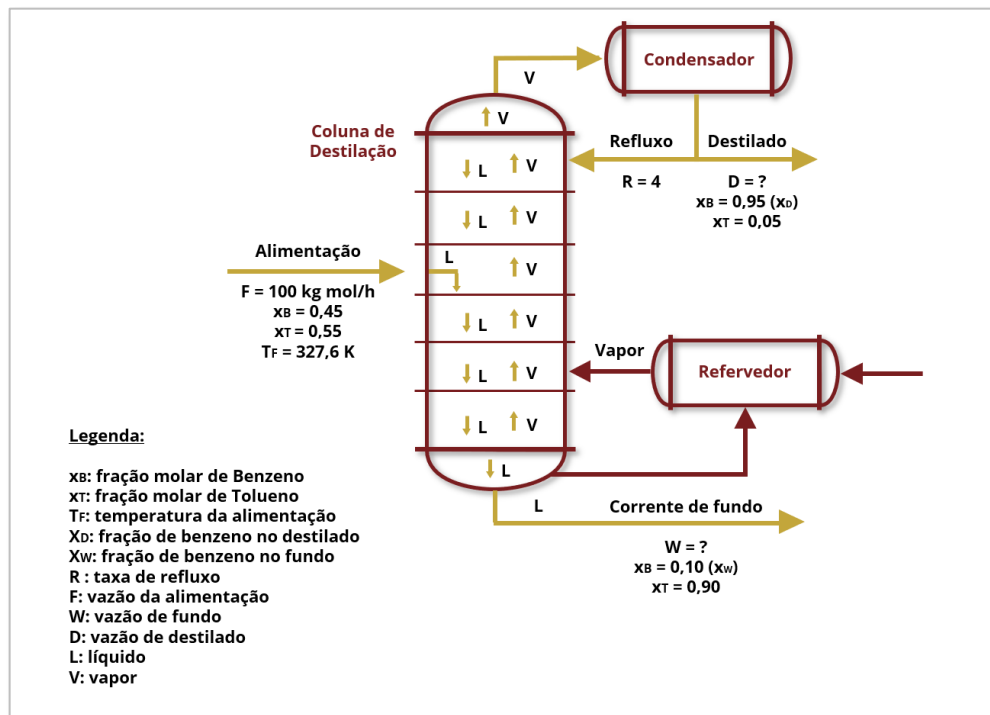
EXEMPLO 11.4-1. Retificação de uma mistura de Benzeno-Tolueno

Uma mistura líquida de benzeno-tolueno deve ser destilada em uma torre de fracionamento a 101,3 kPa. A alimentação de 100 kg mol/h é líquida e contém 45% mol de benzeno e 55% mol de tolueno e entra a 327,6 K (130°F). Obtém-se um destilado contendo 95% molar de benzeno e 5% molar de tolueno e um fundo contendo 10% molar de benzeno e 90% molar de tolueno. A razão de refluxo é de 4:1. A capacidade térmica média da alimentação é de 159 kJ/kg mol.K (38 btu/lb mol.°F) e o calor latente médio é de 320099 kJ/kg.mol (13800 btu/lb mol). Os dados de equilíbrio para este sistema são dados na Tabela 11.1-1 e na Fig. 11.1-1. Calcule os

kg moles por hora de destilado, kg moles por hora de fundo e o número de bandejas teóricas necessárias (GEANKOPLIS, 1997, p.656).

A Figura 19 foi elaborada para visualização dos dados fornecidos pelo enunciado.

Figura 19 - Variáveis do processo de destilação de uma mistura de Benzeno e Tolueno.



Fonte: Elaboração própria.

4.2.1. Resolução pelo método de McCabe-Thiele

Para a resolução do exercício foram necessários os valores de fração molar em equilíbrio para um sistema binário de benzeno e tolueno a 101,3 kPa (Figura 20).

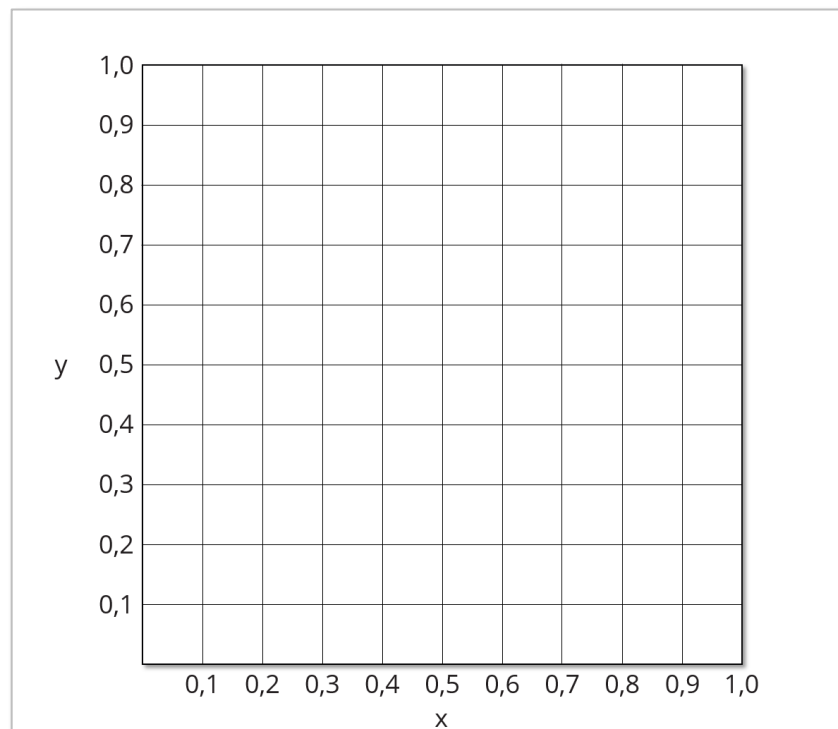
Figura 20 - Tabela de vapor-pressão e fração molar no equilíbrio para um sistema de Benzeno e Tolueno.

<i>Vapor-Pressure and Equilibrium-Mole-Fraction Data for Benzene-Toluene System</i>							
<i>Vapor Pressure</i>							
<i>Temperature</i>		<i>Benzene</i>		<i>Toluene</i>		<i>Mole Fraction Benzene at 101.325 kPa</i>	
<i>K</i>	<i>°C</i>	<i>kPa</i>	<i>mm Hg</i>	<i>kPa</i>	<i>mm Hg</i>	<i>x_A</i>	<i>y_A</i>
353.3	80.1	101.32	760			1.000	1.000
358.2	85	116.9	877	46.0	345	0.780	0.900
363.2	90	135.5	1016	54.0	405	0.581	0.777
368.2	95	155.7	1168	63.3	475	0.411	0.632
373.2	100	179.2	1344	74.3	557	0.258	0.456
378.2	105	204.2	1532	86.0	645	0.130	0.261
383.8	110.6	240.0	1800	101.32	760	0	0

Fonte: GEANKOPLIS, 1997, p.642.

Como trata-se de um método gráfico, foi utilizado um diagrama para mistura binária.

Figura 21 - Diagrama xy.



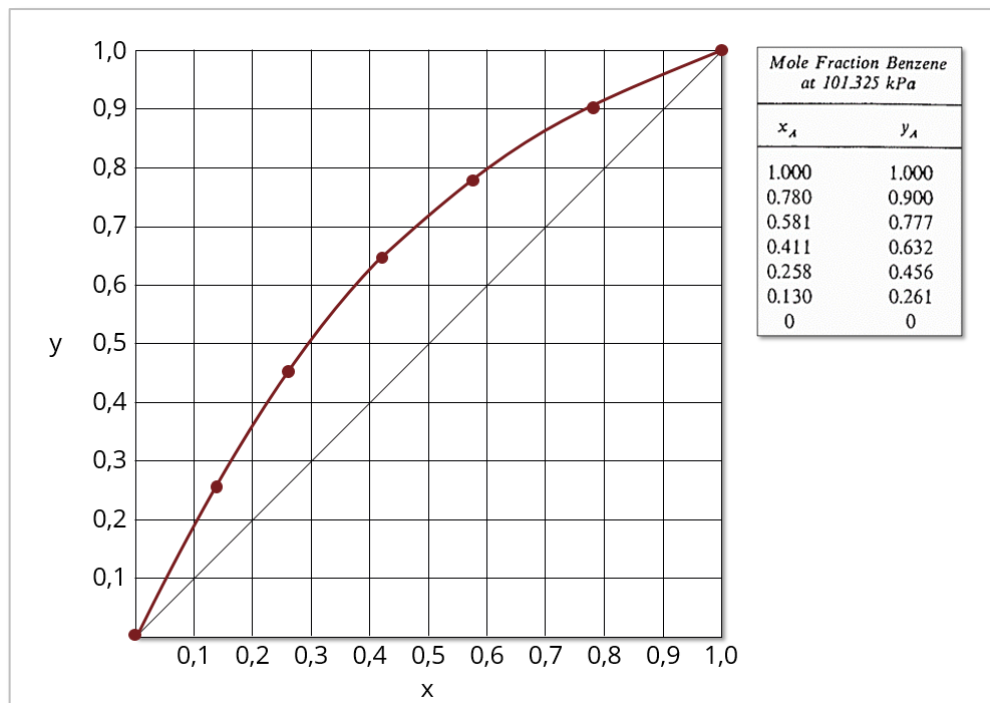
Fonte: Elaboração própria.

A resolução foi dividida em 5 passos, com o objetivo de simplificar o entendimento das etapas de resolução.

1º passo: plotar linha de 45° e linha de equilíbrio

No diagrama de mistura binária, foi traçada a reta $y = x$. Em seguida, foram plotados os pontos de fração molar em equilíbrio fornecidos na Figura 20 e traçada a curva de equilíbrio por esses pontos, como mostrado na Figura 22.

Figura 22 - Plotagem da linha de equilíbrio e linha de 45°. O eixo x representa a fração molar de benzeno na mistura líquida, enquanto o eixo y representa a fração molar de benzeno no vapor da mistura.



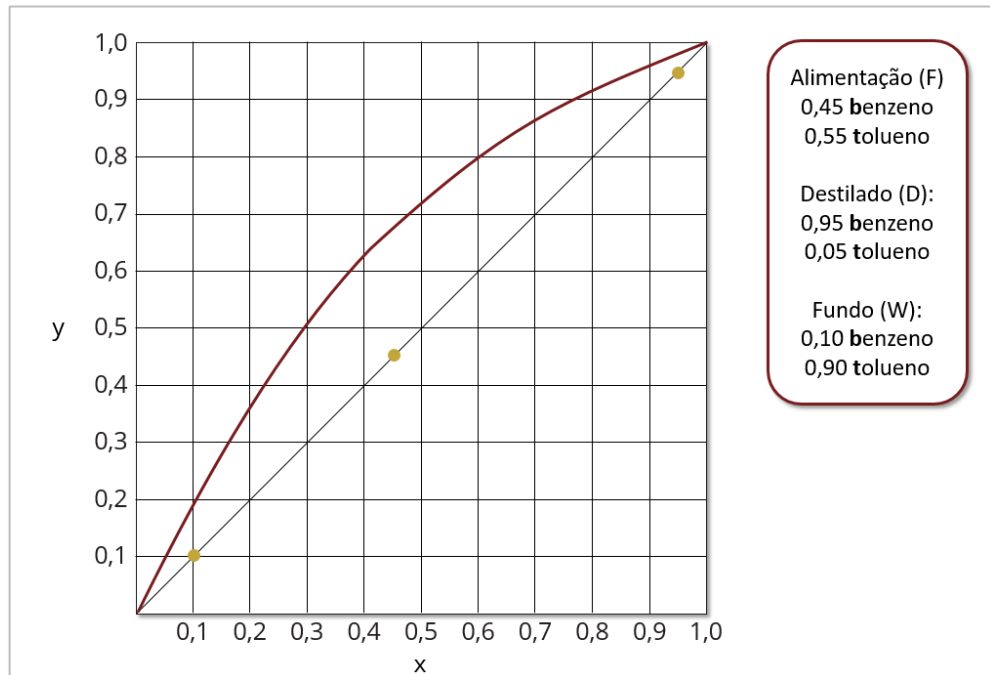
Fonte: Elaboração própria.

A tabela à direita do diagrama na Figura 22 foi retirada da Figura 20 e representa resultados de experimentos das frações molares em estado líquido e vapor de benzeno em equilíbrio à pressão de 101,325 kPa.

2º passo: marcar no gráfico os dados de composição da alimentação, do destilado e do resíduo.

O ponto referente à fração molar do componente mais leve das correntes de alimentação, do produto e do fundo são plotados sobre a reta $y = x$, assim feito na Figura 23.

Figura 23 - Dados de composição das três correntes.

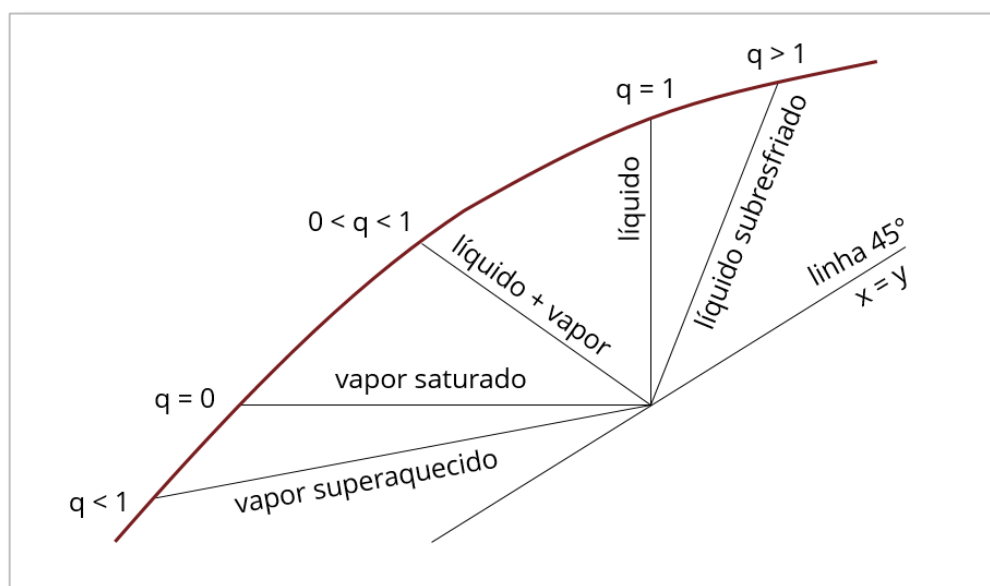


Fonte: Elaboração própria.

3º passo: traçar as linhas de operação.

A linha de operação da alimentação depende da condição da alimentação, como exemplificado na Figura 24.

Figura 24 - Linhas de operação da alimentação.



Fonte: Elaboração própria.

De acordo com o enunciado da questão utilizada, a alimentação é líquida a 54,4°C.

Por definição, tem-se:

$$q = \frac{\text{calor necessário para vaporizar 1 mol da alimentação nas condições de alimentação}}{\text{calor latente molar de vaporização da alimentação}} \quad (56)$$

Escrito em termos das Entalpias:

$$q = \frac{H_v - H_F}{H_v - H_l} \quad (57)$$

Em que H_v é a entalpia da alimentação no ponto de orvalho, H_l é a entalpia da alimentação no ponto de bolha e H_F é a entalpia da alimentação nas condições de alimentação.

Manipulando matematicamente o numerador da equação (57), tem-se:

$$H_v - H_F = H_v - H_F + H_l - H_l \quad (58)$$

Reorganizando os termos:

$$H_v - H_F = (H_v - H_l) + (H_l - H_F) \quad (59)$$

Por definição, tem-se:

$$\Delta Q = C_p \Delta T \quad (60)$$

Em que C_p é a capacidade calorífica da mistura, Q é a variação da energia do sistema e ΔT é a variação de temperatura do sistema.

Aplicado a Equação 60 ao ponto de bolha das condições da alimentação:

$$(H_l - H_F) = c_{pL}(T_b - T_F) \quad (61)$$

Na qual C_{pL} é a capacidade calorífica da mistura no ponto de bolha e T_b é a temperatura de bolha do sistema.

Substituindo a Equação 61 na Equação 59:

$$H_v - H_F = (H_v - H_l) + c_{pL}(T_b - T_F) \quad (62)$$

E substituindo a Equação 62 na Equação 57, chega-se finalmente à equação:

$$q = \frac{(H_v - H_l) + c_{pL}(T_b - T_F)}{H_v - H_l} \quad (63)$$

Para se calcular a temperatura de bolha nas condições da alimentação, foi preciso utilizar a Figura 20 e interpolar os valores. A interpolação é descrita na equação abaixo.

$$\frac{T_b - 363,2}{368,2 - 363,2} = \frac{0,45 - 0,581}{0,411 - 0,581} \quad (64)$$

A temperatura de bolha (T_b) resultante da interpolação linear é 367 K.

Dessa forma, substituindo os valores na Equação 63, tem-se:

$$q = \frac{32099 + 159 * (367 - 327,6)}{32099} \quad (65)$$

Assim, chegou-se ao valor numérico para $q = 1,195$. Conclui-se que a alimentação é subresfriada, pois $q > 1$.

Para calcular a inclinação ou coeficiente angular (α) da linha de operação da alimentação, tem-se a equação:

$$\alpha = \frac{q}{q - 1} \quad (66)$$

Inserindo o valor de q :

$$\alpha = \frac{1,195}{1,195 - 1} = 6,128 \quad (67)$$

Para plotar a linha de operação na alimentação, por definição tem-se que o cálculo do coeficiente angular de uma reta pode ser feito pela razão da diferença entre dois pontos pertencentes a ela. Dessa forma:

$$\alpha = \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (68)$$

Como a alimentação possui 45% de benzeno e 55% de tolueno em mols, a Equação 68 fica:

$$\alpha = 6,128 = \frac{y - 0,55}{x - 0,45} \quad (69)$$

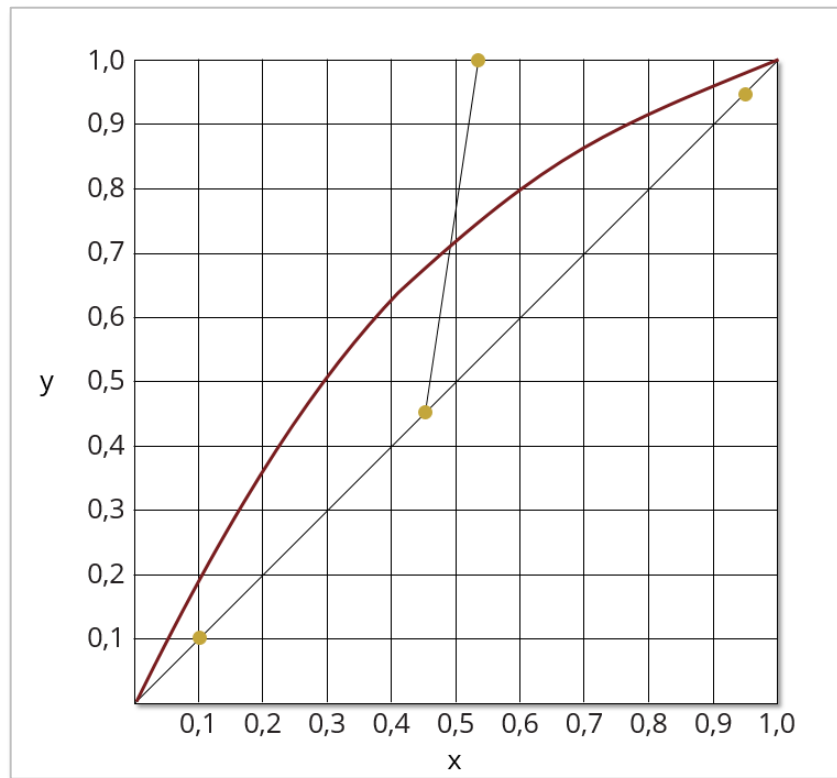
Para traçar a reta, foi utilizado um ponto qualquer no diagrama. Para facilitar, foi escolhido o ponto $y = 1,0$.

Então, a Equação 69 fica:

$$6,128 = \frac{1,0 - 0,55}{x - 0,45} \quad (70)$$

A partir da igualdade acima, obteve-se o ponto $y = 1,0$ e $x = 0,52$. Dessa forma, foi traçada uma reta entre o ponto das condições de operação da corrente de alimentação (0,45; 0,45) e o ponto (1,0; 0,52), como mostrado abaixo na Figura 25.

Figura 25 - Plotagem da linha de operação da alimentação.



Fonte: Elaboração própria.

Para a linha de operação da seção de retificação foi utilizada a equação de reta abaixo, sendo x_D a fração molar de benzeno na corrente do destilado e R a taxa de refluxo:

$$y = \frac{R}{R+1} * x + \frac{x_D}{R+1} \quad (71)$$

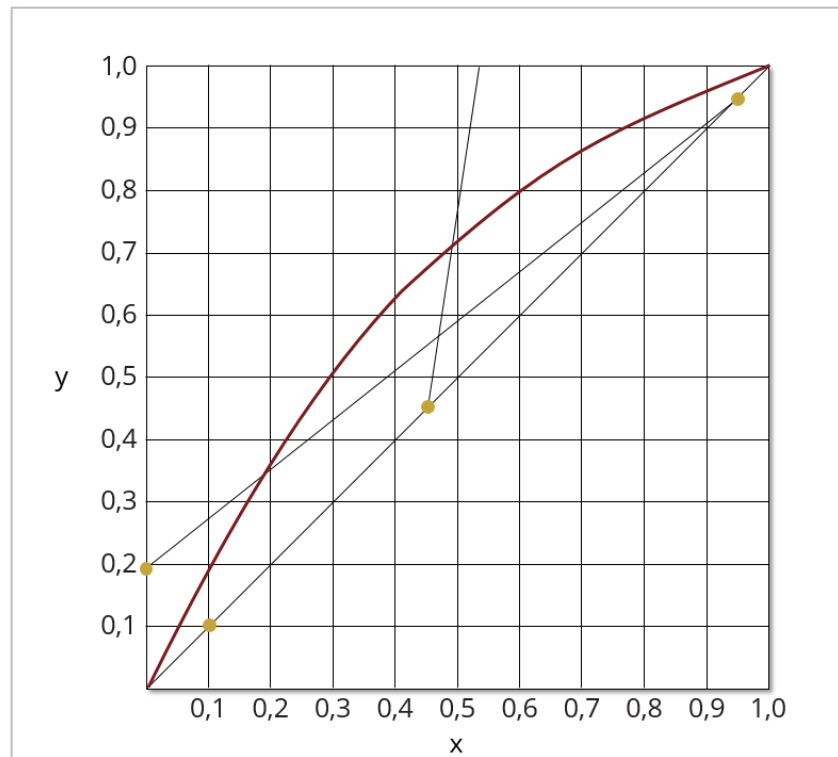
É informado no enunciado da questão que a coluna de destilação opera com uma taxa de refluxo de 4:1, portanto $R = 4$, e que a corrente de destilado possui uma concentração molar de benzeno de 95%. Inserindo os valores na Equação 71, tem-se:

$$y = \frac{4}{4+1} * x + \frac{0,95}{4+1} = 0,8 * x + 0,19 \quad (72)$$

Para traçar a reta, foi utilizado um ponto qualquer no diagrama. Para facilitar, foi escolhido o ponto $x = 0$.

Dessa forma, obteve-se o ponto $y = 0,19$ e $x = 0$. Então foi traçada a reta entre o ponto das condições de operação da corrente do destilado (0,95; 0,95) e o ponto (0,19; 0), como mostrado abaixo na Figura 26.

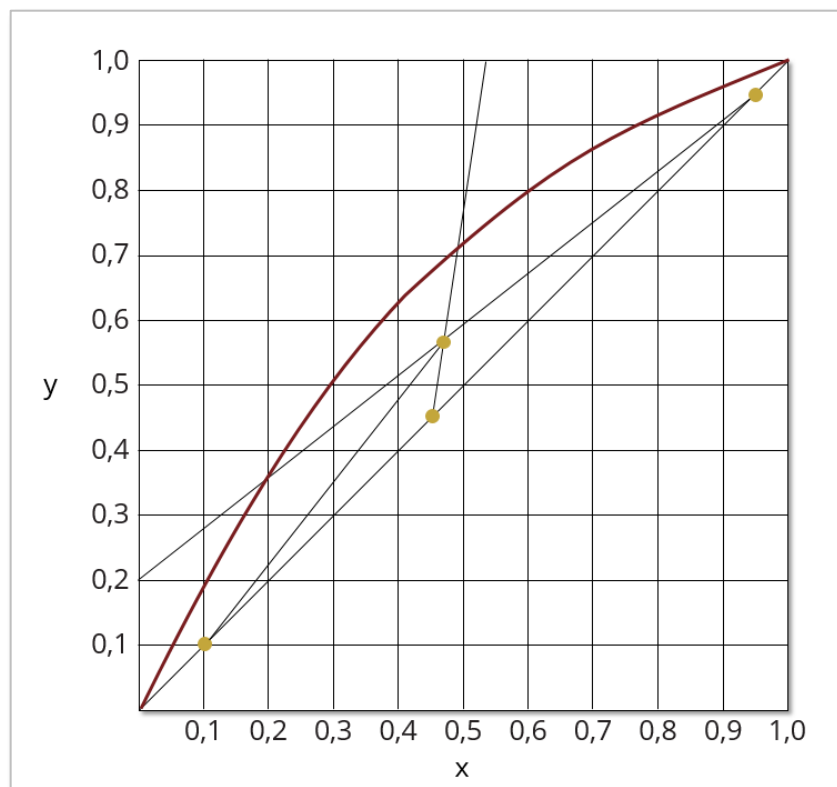
Figura 26 - Plotagem da linha de operação da secção de retificação.



Fonte: Elaboração própria.

A linha de operação da secção de esgotamento foi traçada graficamente através do ponto de interseção das linhas de operação da alimentação e de retificação, e o ponto das condições de operação da corrente de fundo (0,10; 0,10), como realizado na Figura 27.

Figura 27 - Plotagem da linha de operação da secção de esgotamento.



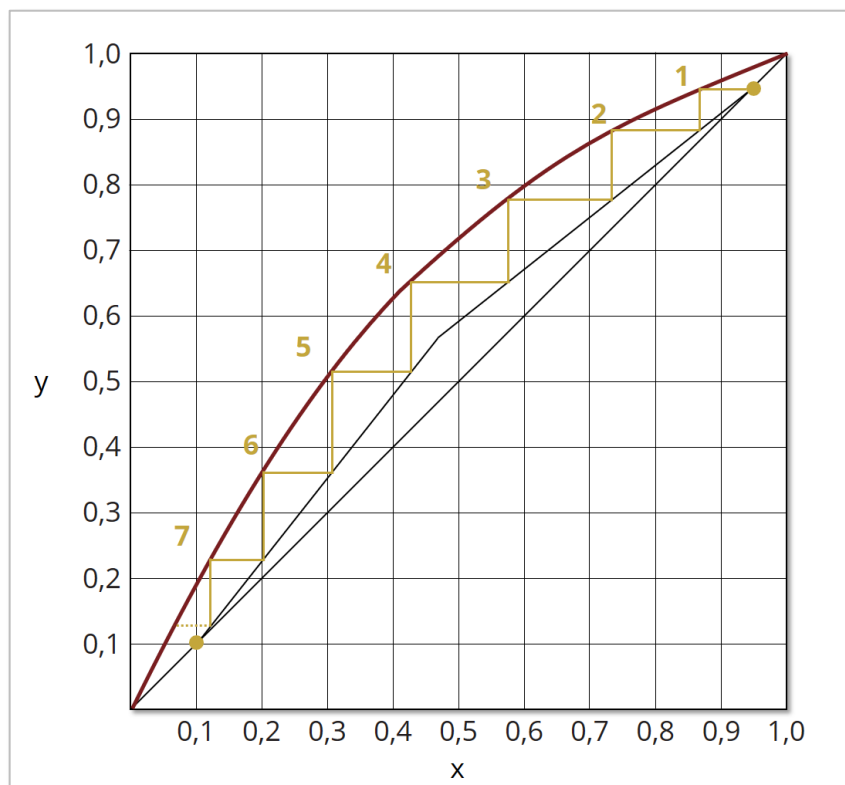
Fonte: Elaboração própria.

4º passo: traçar os degraus de x_D até x_W .

Sendo x_D a fração molar de benzeno na corrente do destilado e x_W a fração molar de benzeno na corrente de fundo, faz-se os degraus sempre entre a linha de equilíbrio e as linhas de operação. Em cada momento que o degrau tocar a linha de equilíbrio, tem-se 1 estágio teórico. Inicia-se na horizontal, tem-se o primeiro estágio. Seguindo com uma linha para baixo na vertical e retorna-se à linha de equilíbrio com o segundo estágio.

Analogamente, o terceiro estágio e sucessivamente até extrapolar o ponto de x_W , que é a fração molar da corrente de fundo, como mostrado na Figura 28.

Figura 28 - Determinação do número de estágios teóricos.



Fonte: Elaboração própria.

Dessa forma, a coluna de destilação analisada no problema deve ter entre 7 e 8 estágios teóricos.

5º passo: calcular o balanço de massa.

A equação do balanço de massa global é expressa pela Equação 73.

$$F = D + W \quad (73)$$

É informado no enunciado da questão que a coluna de destilação é alimentada com uma vazão (F) de 100 kg mol/h.

O balanço de massa para o benzeno pode ser expresso pela Equação 74.

$$(x_F)F = (x_D)D + (x_W)W \quad (74)$$

Ressalta-se que os valores necessários são informados no enunciado.

Substituindo os valores e resolvendo um sistema composto com as Equações 73 e 74:

$$100 = D + W \quad (75)$$

$$(0,45) * 100 = (0,95)D + (0,10)W \quad (76)$$

Tem-se que $D = 41,18$ kg mol/h e $W = 58,82$ kg mol/h

A Tabela 1 foi elaborada para visualizar com mais clareza todos os resultados obtidos durante a execução.

Tabela 1 - Resultados obtidos no exercício.

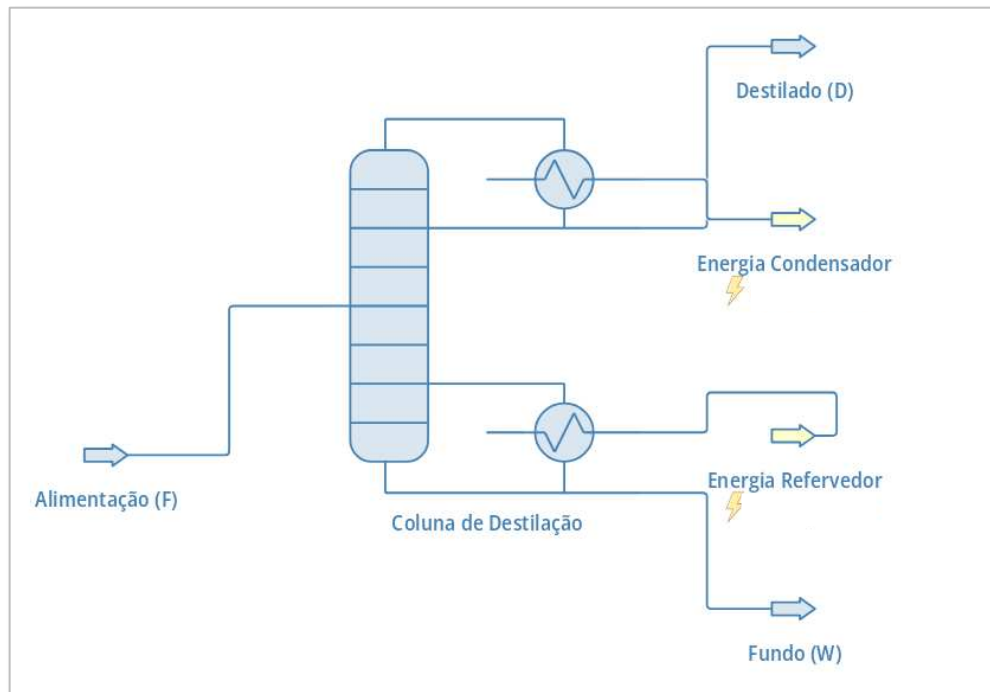
Objeto	Grandeza	Valor	Unidade
Alimentação (F)	Vazão molar	100	kg mol/h
	Temperatura	54,4	°C
	Fração molar de benzeno	0,45	
Destilado (D)	Vazão molar	41,18	kg mol/h
	Fração molar de benzeno	0,95	
Fundo (W)	Vazão molar	58,82	kg mol/h
	Fração molar de benzeno	0,10	
Coluna de Destilação	Taxa de Refluxo (R)	4	
	Número de estágios teóricos	7	

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Geankoplis (1993).

4.2.2. Resolução pelo DWSIM

As condições do mesmo enunciado foram levadas para o *software* DWSIM utilizando uma coluna *Shortcut*, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Simulação de uma coluna de destilação no DWSIM.



Fonte: Elaboração própria com auxílio do *software* DWSIM.

As condições de operação são as mesmas do exercício em questão, com a mistura contendo 45% de benzeno e 55% de tolueno (em mols) entrando na coluna de destilação a 54,4 °C como líquido subresfriado.

Após inserir todas as informações no programa, exporta-se uma tabela com os parâmetros que serão analisados. A Tabela 2 corresponde aos resultados obtidos pela simulação referente às mesmas condições do exercício extraído do Geankoplis (1993) e analisado de forma manual no método de McCabe-Thiele.

Tabela 2 - Simulação com as condições do enunciado do exercício.

Objeto	Grandeza	Valor	Unidade
Alimentação (F)	Temperatura	54,45	°C
	Vazão molar	100	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,45	
Destilado (D)	Temperatura	81,1881	°C
	Vazão molar	41,1768	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,94996	
Fundo (W)	Temperatura	106,044	°C
	Vazão molar	58,816	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,1	
Coluna de Destilação	Taxa de Refluxo	4	
	Taxa mínima de Refluxo	0,953633	
	Nº mínimo de estágios	4,77702	
	Estágio ótimo para Alimentação	2,35962	
	Nº real de estágios	6,07655	

Fonte: Elaboração própria a partir dos dados do Geankoplis (1993).

4.2.3. Simulações utilizando o DWSIM

Após a resolução do exercício em questão, foram feitas algumas modificações nas condições de alimentação e na taxa de refluxo para avaliar os efeitos em:

- taxa mínima de refluxo;
- número mínimo de estágios;
- em qual estágio a alimentação é ótima;
- número real de estágios.

4.2.3.1. Alimentação líquida

A temperatura da alimentação foi ajustada para a temperatura de ponto de bolha de uma solução 45% de benzeno e 55% de tolueno (em mols). O valor foi obtido a partir da interpolação

de dados de uma tabela fornecida no livro do Geankoplis (1997) e utilizada na resolução do problema por meio do método McCabe-Thiele, na Equação 64. Os valores obtidos foram apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Simulação com alimentação líquida.

Objeto	Grandeza	Valor	Unidade
Alimentação (F)	Temperatura	93,85	°C
	Vazão molar	100	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,45	
Destilado (D)	Temperatura	81,1881	°C
	Vazão molar	41,1768	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,94996	
Fundo (W)	Temperatura	106,044	°C
	Vazão molar	58,8216	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,1	
Coluna de Destilação	Taxa de Refluxo	4	
	Taxa mínima de Refluxo	1,27028	
	N° mínimo de estágios	5,65088	
	Estágio ótimo para Alimentação	2,91344	
	N° real de estágios	7,50276	

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.2. Alimentação vapor saturado

No DWSIM, foi averiguado que acima de 100,0 °C, a mistura de 45% de benzeno e 55% de tolueno da alimentação se encontra em sua totalidade no estado de vapor. A partir dessa informação, a corrente de alimentação foi ajustada para entrar na coluna de destilação a 102 °C, na condição de vapor saturado da mistura, como mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Simulação com alimentação de vapor saturado.

Objeto	Grandeza	Valor	Unidade
Alimentação (F)	Temperatura	102	°C
	Vazão molar	100	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,45	
Destilado (D)	Temperatura	81,1881	°C
	Vazão molar	41,1768	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,94996	
Fundo (W)	Temperatura	106,044	°C
	Vazão molar	58,8216	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,1	
Coluna de Destilação	Taxa de Refluxo	4	
	Taxa mínima de Refluxo	2,54817	
	N° mínimo de estágios	5,85733	
	Estágio ótimo para Alimentação	3,89205	
	N° real de estágios	10,0229	

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.3. Alimentação vapor superaquecido

A temperatura da corrente de alimentação foi ajustada para a região de vapor superaquecido da mistura da alimentação, entrando na coluna de destilação a 130 °C, como mostrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Simulação com alimentação com vapor superaquecido.

Objeto	Grandeza	Valor	Unidade
Alimentação (F)	Temperatura	130	°C
	Vazão molar	100	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,45	
Destilado (D)	Temperatura	81,1881	°C
	Vazão molar	41,1768	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,94996	
Fundo (W)	Temperatura	106,044	°C
	Vazão molar	58,8216	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,1	
Coluna de Destilação	Taxa de Refluxo	4	
	Taxa mínima de Refluxo	2,83201	
	N° mínimo de estágios	6,62172	
	Estágio ótimo para Alimentação	4,72389	
	N° real de estágios	12,1651	

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.4. Diminuição da taxa de refluxo

Utilizando das mesmas condições de operação do enunciado da questão, admitindo a alimentação a 54,45 °C, foi reduzida a taxa de refluxo de 4:1 para 2:1, a fim de observar os parâmetros analisados. Os resultados encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Simulação com diminuição da taxa de Refluxo.

Objeto	Grandeza	Valor	Unidade
Alimentação (F)	Temperatura	54,45	°C
	Vazão molar	100	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,45	
Destilado (D)	Temperatura	81,1881	°C
	Vazão molar	41,1768	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,94996	
Fundo (W)	Temperatura	106,044	°C
	Vazão molar	58,8216	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,1	
Coluna de Destilação	Taxa de Refluxo	2	
	Taxa mínima de Refluxo	0,953633	
	N° mínimo de estágios	4,77702	
	Estágio ótimo para Alimentação	2,99605	
	N° real de estágios	7,7155	

Fonte: Elaboração própria.

4.2.3.5. Aumento da taxa de refluxo

Analogamente, foi aumentada a taxa de refluxo para 6:1. Os resultados encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Simulação com aumento da taxa de Refluxo.

Objeto	Grandeza	Valor	
Alimentação (F)	Temperatura	54,45	°C
	Vazão molar	100	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,45	
Destilado (D)	Temperatura	81,1881	°C
	Vazão molar	41,1768	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,94996	
Fundo (W)	Temperatura	106,044	°C
	Vazão molar	58,8216	kmol/h
	Fração molar de Benzeno da mistura	0,1	
Coluna de Destilação	Taxa de Refluxo	6	
	Taxa mínima de Refluxo	0,953633	
	Nº mínimo de estágios	4,77702	
	Estágio ótimo para Alimentação	2,18125	
	Nº real de estágios	5,611721	

Fonte: Elaboração própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Código em Python para evaporadores de três efeitos

Foram programadas mais de 200 linhas de código para construir a resolução do problema-modelo adotado. Toda a resolução pode ser dividida em: texto com as explicações e equações a serem usadas; o código gerado; e os resultados devolvidos pelo código. Dessa forma, o aluno pode acompanhar o raciocínio analítico de cada passo da resolução, juntamente com o código que desenvolve toda parte de cálculo e o resultado obtido em cada etapa. A parte final do código foi estruturada com comandos para rodar todas as linhas e imprimir na tela a resposta dos itens requeridos pelo problema.

Ao longo de todo código, os resultados são gradativamente expostos para acompanhamento e entendimento das fases da resolução pelo estudante. Além disso, há dois fluxogramas que ilustram o processo de evaporação em evaporadores de triplo efeito, para acompanhamento visual das variáveis de operação calculadas e das que ainda precisam ser determinadas. Conjuntamente, algumas linhas do código possuem comentário para melhor entendimento dos equacionamentos que são adotados ao longo da execução. Nos próximos itens são apresentados os valores retornados pelo código desenvolvido.

5.1.1. A área em cada efeito

A área de troca térmica do primeiro efeito (A_1) é 105,26 m², do segundo (A_2) é 105,58 m² e do terceiro (A_3) é 105,40 m². Já a área média dos três efeitos é igual a 105,414 m².

O cálculo de erro relativo percentual em relação à resolução apresentada no livro texto do Geankoplis (1993) foi realizado pela equação a seguir:

$$\%(\text{erro}) = \frac{|\text{valor calculado} - \text{valor da resolução}|}{\text{valor da resolução}} \quad (77)$$

Aplicando essa Equação às áreas calculadas, obteve-se um erro de 0,63%, 0,0019% e 0,48% em relação às áreas do primeiro (A_1), segundo (A_2) e terceiro (A_3), respectivamente. Para a área média o erro foi de 0,38%. Observa-se a partir desses valores que os resultados foram muito próximos, demonstrando a exatidão nas iterações do código.

5.1.2. A vazão mássica de vapor utilizada para cada efeito

A vazão de vapor proveniente da caldeira (S) utilizada como meio de aquecimento no primeiro efeito foi 8958,62 kg/h, a vazão de vapor utilizada no segundo efeito (V_1) foi 5648,16 kg/h e a vazão utilizada no terceiro (V_2) foi 5648,16 kg/h.

Aplicando novamente a Equação 77, o erro para a vazão de vapor da caldeira calculada (S) é de 0,015%, enquanto o erro para a vazão de vapor no segundo efeito (V_1) é de 0,47% e da vazão utilizada no terceiro efeito (V_2) é de 6,69%. Esse erro mais elevado e destoante dos demais pode ser explicado pela quantidade de iterações realizadas. No livro do Geankoplis (1993) foram realizadas 2 iterações, enquanto o código desenvolvido realiza 10 iterações.

5.1.3. A economia de vapor

Expressa pela Equação 1, foi calculado uma razão de economia de vapor para o conjunto de três efeitos de 2,025. O resultado é idêntico ao obtido por Geankoplis (1993), portanto o erro relativo é de 0,0%.

5.2. Vídeo educativo

O resultado foi a elaboração de um vídeo de 26:34 minutos, destinado ao aprendizado do ensino de Operações Unitárias na Universidade Federal de Viçosa. Foi utilizado um conjunto de 26 *slides* animados para a resolução completa do exercício por meio do método de McCabe-Thiele, além da gravação da tela do computador durante a realização das simulações no DWSIM. O link para o vídeo encontra-se no **Apêndice**.

Ressalta-se que por se tratar de um método gráfico, a resolução fica muito suscetível a erro humano. O simples ato de marcar o ponto no gráfico pode gerar resultados diferentes dependendo do tamanho do diâmetro do círculo desenhado. Além disso, traçar a curva de equilíbrio, as linhas de operação e os degraus geram mais fontes de incertezas que se propagam até o resultado.

Porém, o método é eficiente em simular uma destilação de dois componentes. Mais que isso, o método traz visibilidade da operação nas seções de retificação e esgotamento da coluna. As retas dependem das condições de operação do sistema, como taxa de refluxo e a concentração dos componentes nas correntes de destilado e de fundo. As linhas de operação

dependem diretamente dessas variáveis e a visibilidade desses parâmetros na construção da resolução fica valorizada.

O método gráfico de McCabe-Thiele retornou uma coluna de destilação com 7 estágios teóricos, valor esse próximo ao retornado pelo *software* DWSIM (6,0765) sob as mesmas condições do enunciado. Porém, o tempo demandado para se chegar à resposta é muito discrepante. O método gráfico é extremamente demorado e conta com muitos recursos para a resolução completa, enquanto no *software* a resolução foi realizada questão de segundos.

Nos valores obtidos nos balanços de massa pelo método de McCabe-Thiele correspondem aos valores apresentados na resolução do livro do Geankoplis (1993), o que demonstra que todos os cálculos referentes ao balanço de massa global e balanço de massa de componente foram executados de forma correta. O balanço de massa realizado pelo DWSIM também retorna os mesmos valores, uma vez que as propriedades das correntes de destilado e de fundo são parâmetros inseridos na coluna de *Shortcut*.

O comparativo de simulações permite visualizar de forma imediata a influência das condições de alimentação na operação e no projeto de uma coluna de destilação. Observou-se que quanto maior a temperatura da corrente de alimentação, maior será o número de estágios e, conseqüentemente, maior será o tamanho da coluna de destilação. Além disso, todos os outros fatores, como número mínimo de estágios, taxa de refluxo mínimo e estágio para alimentação ótimo também aumentaram a cada simulação.

Para fins comparativos, os valores obtidos nas simulações foram dispostos na Tabela 8. Nela, pode-se perceber a influência do aumento da temperatura da alimentação sobre a operação da coluna.

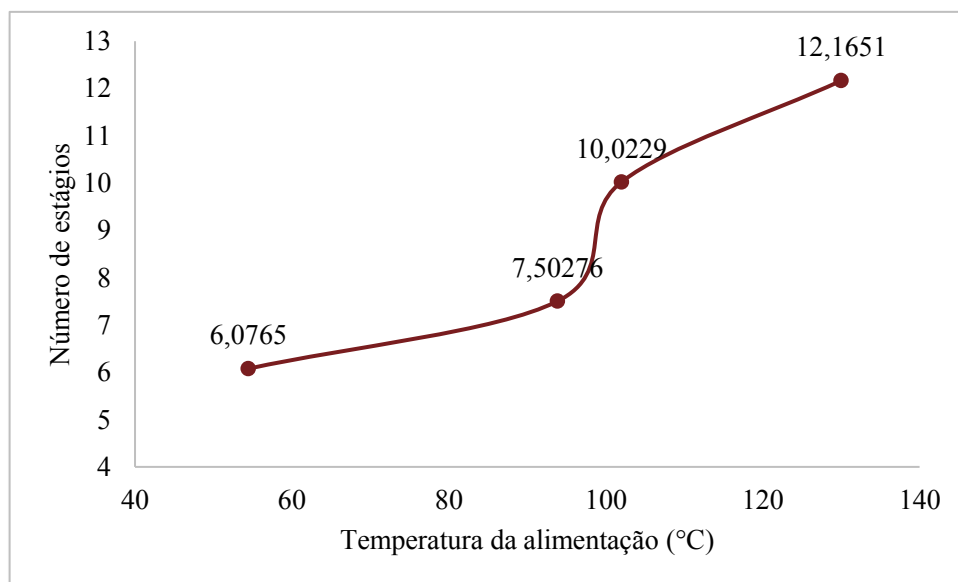
Tabela 8 - Resultados obtidos com as simulações das correntes de alimentação sob diferentes temperaturas.

Parâmetro	Líquido subresfriado	Líquido	Vapor saturado	Vapor superaquecido
Temperatura (°C)	54,45	93,85	102	130
Número de estágios	6,0765	7,50276	10,0229	12,1651
Número mínimo de estágios	4,77702	5,65088	5,85733	6,62172
Refluxo mínimo	0,953633	1,27028	2,54817	2,83201
Estágio para alimentação ótima	2,35962	2,91344	3,89205	4,72389

Fonte: Elaboração própria.

Para cada um dos quatro resultados obtidos pelas simulações, foi plotado um gráfico do parâmetro sob análise em função da temperatura da alimentação para analisar o comportamento da variável à medida que a coluna é alimentada com uma corrente mais quente.

Figura 30 - Número de estágios versus temperatura de alimentação.



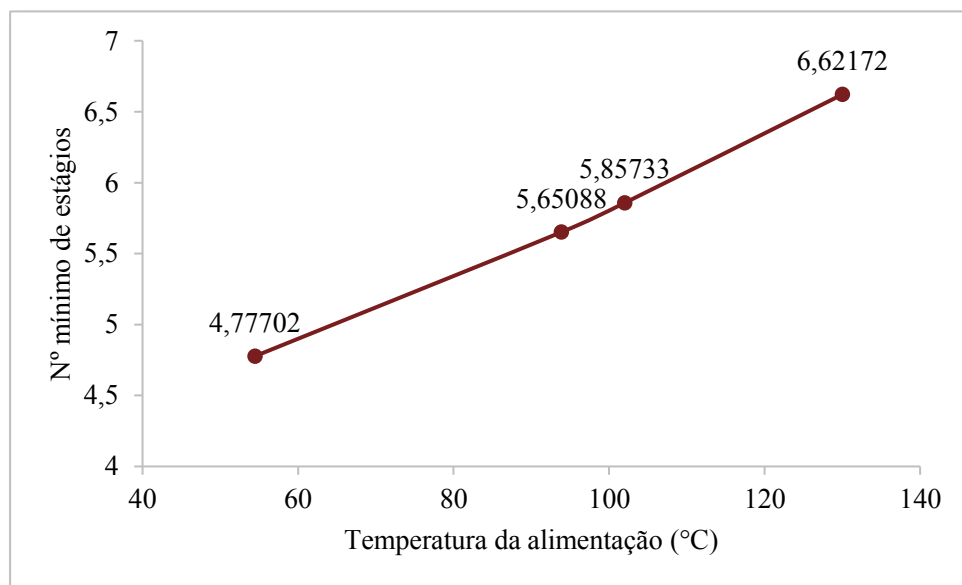
Fonte: Elaboração própria.

Pela Figura 30, percebe-se um comportamento crescente não linear do número de estágios em função do aumento da temperatura da alimentação. O número de estágios quando a alimentação é feita como vapor superaquecido (12,1651) é 100,2% maior quando comparado

à alimentação com líquido resfriado (6,0765). Dessa forma, o aumento da temperatura acarreta uma coluna maior para atender às especificações do projeto.

Pela Figura 31 é perceptível o comportamento crescente praticamente linear entre o número mínimo de estágios e a temperatura de alimentação. Essa análise demonstra que o limite mínimo de estágios para operação da coluna cresce à medida que a alimentação é realizada à temperatura mais elevada.

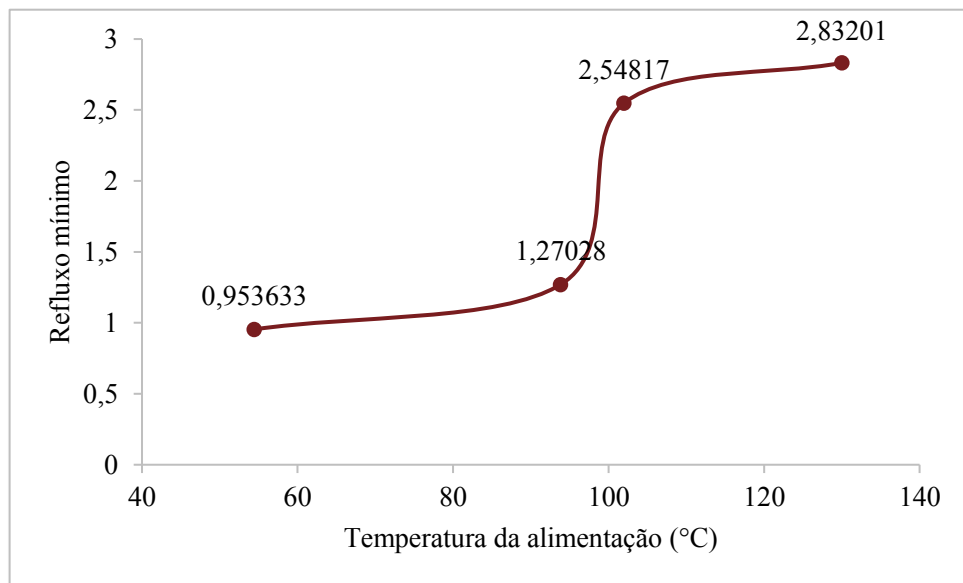
Figura 31 - Número mínimo de estágios *versus* Temperatura de alimentação.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 32 também apresenta um comportamento crescente não linear do refluxo mínimo com a temperatura da alimentação. Quanto mais energética a corrente de entrada, maior o refluxo para manter a operação dentro do projetado. Ao comparar a coluna com alimentação como líquido saturado e líquido subresfriado, a taxa mínima de refluxo é 33,204% maior para a primeira condição. O simples fato de elevar a temperatura da alimentação até o ponto de bolha da mistura eleva em aproximadamente um terço a corrente que refluxa para dentro da coluna.

Figura 32 - Refluxo mínimo *versus* Temperatura de alimentação.

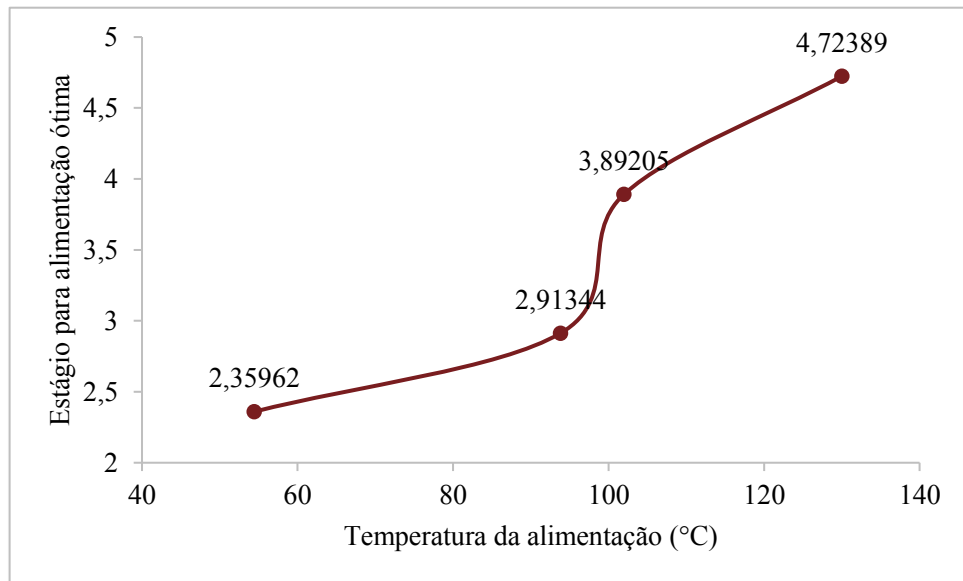


Fonte: Elaboração própria.

Quanto mais quente for a corrente, maior será o estágio para alimentação na coluna (Figura 33). De forma análoga, as Figuras 30, 32 e 33 apresentam um comportamento muito semelhante para as variáveis analisadas, de forma crescente com curva em “S”.

Esse comportamento crescente é observado porque o tolueno, componente majoritário da corrente de fundo, ao adentrar na coluna com uma temperatura mais elevada, cria maior dificuldade para liquefazer, devido ao fato de que as moléculas de tolueno já adentram a coluna próximas à sua temperatura de ebulição. Ao simular a corrente de alimentação próxima à temperatura de ebulição do tolueno (110,6 °C), faz-se necessário um maior número de estágios para liquefazer as moléculas já volatilizadas. Além disso, uma taxa de refluxo maior é necessária para aumentar a eficiência da separação, de modo a acentuar a corrente de líquido descendente na coluna.

Figura 33 - Estágio para alimentação ótima *versus* Temperatura de alimentação.



Fonte: Elaboração própria.

Já para as simulações para analisar o efeito das taxas de refluxo na coluna de destilação, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 9. A temperatura de alimentação foi mantida a 54,45 °C.

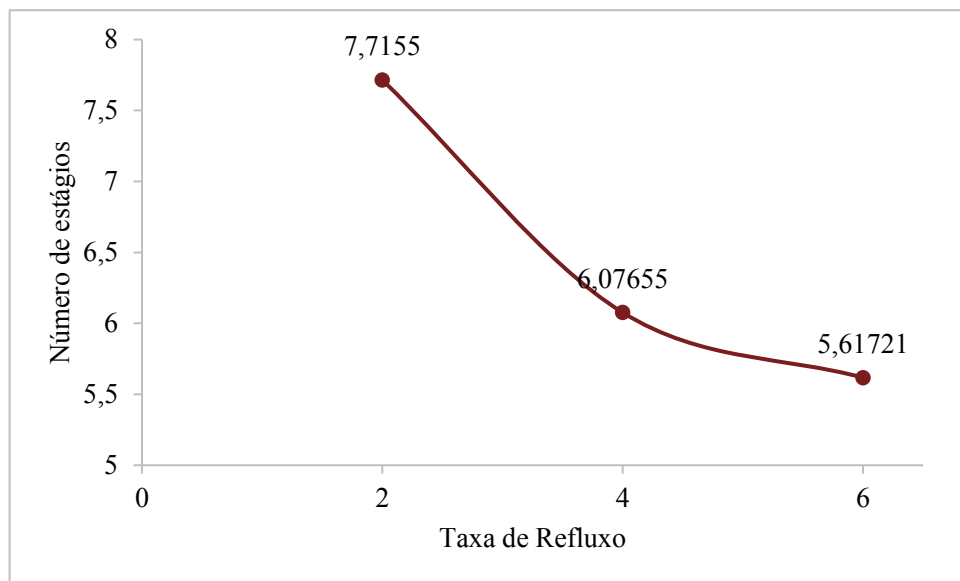
Tabela 9 - Resultados obtidos com as simulações sob diferentes taxas de refluxo.

	R = 2	R = 4	R = 6
Número de estágios	7,7155	6,07655	5,61721
Número mínimo de estágios	4,77702	4,77702	4,77702
Refluxo mínimo	0,953633	0,953633	0,953633
Estágio para alimentação ótima	2,99605	2,35962	2,18125

Fonte: Elaboração própria.

Analisando a Tabela 9, nota-se que a variação da taxa de refluxo da coluna não interfere no número mínimo de estágios e na taxa de refluxo mínimo. Isso acontece porque esses parâmetros dependem apenas das condições das correntes de alimentação, de destilado e de fundo.

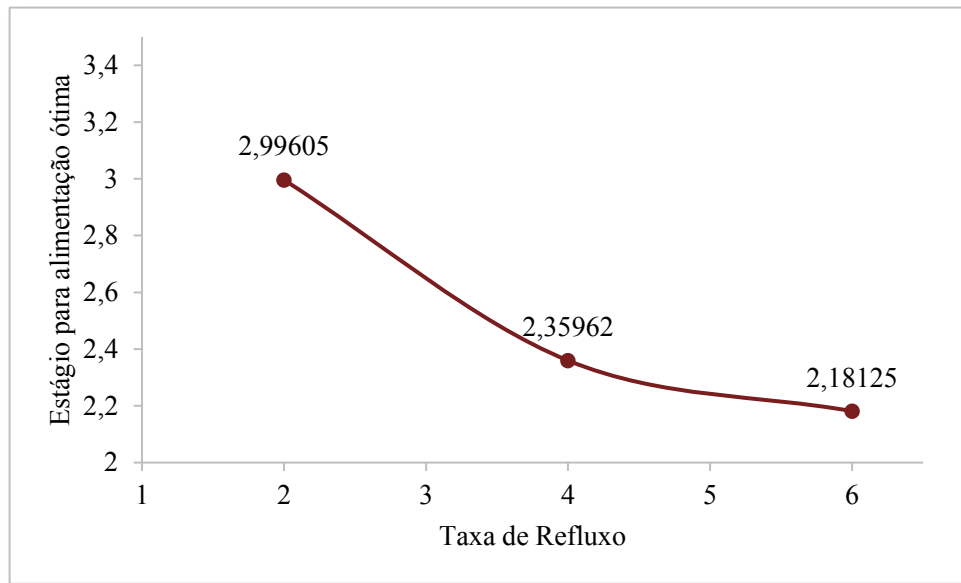
Além disso, pode-se perceber que o aumento da taxa de refluxo diminui o número de estágios da coluna. Isso se deve ao aumento da eficiência da separação dos componentes na coluna ao aumentar o refluxo, necessitando de uma coluna menor para o mesmo processo, como ilustrado na Figura 34.

Figura 34 - Número de estágios *versus* Taxa de Refluxo

Fonte: Elaboração própria.

O aumento do refluxo também diminui a altura da alimentação na coluna. Como a eficiência aumenta, a coluna será menor e, conseqüentemente, a alimentação será proporcionalmente mais baixa. O comportamento decrescente é ilustrado na Figura 35.

Figura 35 - Estágio para alimentação ótima versus taxa de refluxo



Fonte: Elaboração própria.

6. CONCLUSÕES

A tecnologia precisa ser cada vez mais empregada como ferramenta didática na assimilação do conhecimento pelos estudantes. Com a ampla utilização do computador e do celular, novas metodologias de ensino precisam ser incorporadas no aprendizado, integrando o estudante ao meio virtual de forma colaborativa e modernizando a relação da educação com a computação. Metodologias antigas devem ser aprimoradas na didática, de modo que o estudante utilize de recursos atuais para um melhor entendimento dos problemas, lançando mão de análises extensas em poucos segundos ou minutos.

O estudo das operações unitárias pode ser favorecido com a utilização de instrumentos modernos, como a programação e a utilização de *softwares* de simulação. Tratando-se das metodologias ativas, o estudante torna-se o centro do aprendizado contando com maior independência do professor para avaliar e analisar como as variáveis de projeto interferem nos processos químicos. Seja simulando pelo próprio celular ou pelo computador, o aluno poderá ter uma melhor experiência no seu aprendizado com a aplicação da tecnologia.

O cálculo de um projeto de evaporador triplo efeito realizado à mão é muito trabalhoso e demorado, de modo a desmotivar por vezes análises que podem ser feitas em segundos em linguagem Python de programação. O código elaborado neste trabalho é validado com base nos resultados obtidos quando comparados à resolução apresentada no livro do Geankoplis (1993), além de ter uma interface pensada no entendimento do aluno ao longo da resolução. A mistura de texto, equações, código e respostas é ideal para visualização e assimilação dos passos adotados para a resolução dos problemas.

Apesar do método gráfico de McCabe-Thiele ter sido desenvolvido no início do século passado, há recursos disponíveis para facilitar sua utilização e promover seu melhor entendimento nos dias de hoje. Não somente isso, mas também há recursos mais eficientes que o método para o projeto de uma coluna de destilação, como os *softwares* de simulação. O DWSIM permitiu a resolução de um exercício trabalhoso em questão de segundos, além de possibilitar a realização de rápidas simulações do processo de destilação com base na variação das condições de alimentação e de operação da coluna. As simulações permitem análises ágeis e interativas, ilustrando como parâmetros de projeto se comportam quando as condições do processo são modificadas. Todas essas percepções são exibidas no vídeo produzido para a graduação em Engenharia Química da UFV. Metade do vídeo é destinada à resolução pelo método gráfico de McCabe-Thiele para um projeto de destilação, enquanto a metade restante é ocupada com 6 simulações do mesmo projeto e suas respectivas análises no DWSIM.

Ademais, o acesso ao conhecimento deve ser democrático. Neste trabalho foi utilizado apenas ferramentas gratuitas e livres, de modo que todo estudante de engenharia química pode ter acesso a esse aprendizado.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, M. E. de. **Informática e formação de professores**. Brasília: Ministério da Educação, 2010.
- BRASIL. Resolução CNE/CES 11/2002. Diário Oficial da União, Brasília, 9 de abril de 2002. Seção 1, p. 32.
- BRASIL. Resolução N°2 CNE/CES 1/2019. Diário Oficial da União, Brasília, 23 de abril de 2019.
- BRITO, G. S.; PURIFICAÇÃO, I. **Educação e novas tecnologias um repensar**. 2ª. ed. Curitiba: Ibpex, 2008.
- D'AMBRÓSIO, U. **Educação matemática: da teoria à prática**. Campinas: Papyrus, 2001.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L.B. **Princípios das operações unitárias**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois/LTC, 670p. 2008;
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport Process and Unit Operations**. Third Edition. New Jersey: Prentice-Hall International, Inc., 1993.
- HOSTNET. **Diferença e benefícios do software livre em relação ao software proprietário**. E-book, Notícias, 2021. Disponível em: <<https://www.hostnet.com.br/blog/diferenca-entre-software-livre-e-software-proprietario/#:~:text=Basicamente%2C%20a%20diferen%C3%A7a%20est%C3%A1%20no,o u%20editar%20o%20c%C3%B3digo%2Dfonte.>>. Acesso em: 26 de março de 2023.
- KRIGER, D. O que é python, para que serve e por que aprender? Kenzie, 2022. Disponível em: <<https://kenzie.com.br/blog/o-que-e-python/>>. Acesso em: 09 de nov. de 2022.
- MARQUES, W. P.; SANTORIO, R. **Desenvolvimento de Ferramenta Didática para Simulação de Coluna de Destilação por meio do método De McCabe-Thiele**. Revista IFES Ciência. ISSN 2359-4799. Volume 5, n° 1, 2019 – p.01-10.
- MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1993.
- MELO, D. O que é Python? Tecnoblog, 2020. Disponível em: <<https://tecnoblog.net/responde/o-que-e-python-guia-para-iniciantes/>>. Acessado em: 09 de dezembro de 2022.
- MOREIRA, J. **Análise exergética do sistema de evaporadores de múltiplo efeito da etapa de recuperação da indústria kraft de obtenção de celulose**, 2019. Tese (Mestrado em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2019.
- OLIVEIRA, F. M. **Estudo de diagramas de fase líquido-vapor e destilação**, 2019. Tese (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

Operações Unitárias. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1982;

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perry's Chemical Engineers' Handbook**. 7. ed. Nova York: McGraw-Hill, 1997.

SANTOS, T. G. Google Colab: o que é, tutorial de como usar e criar códigos, 2022. Disponível em: < <https://www.alura.com.br/artigos/google-colab-o-que-e-e-como-usar> >. Acessado em: 12 de fevereiro de 2023.

SILVA, M. B., PETRY, F., SANTINI, I., LIZ, J., & BOTH, T. (2018). Análise do comportamento da troca térmica em trocador de calor de placas com fluxos contra e co-correntes. Anuário Pesquisa E Extensão Unoesc Videira, 3, e17621. Disponível em: <<https://periodicos.unoesc.edu.br/apeuv/article/view/17621>>. Acesso em: 07 de nov. de 2022.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**. 7. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2007.

SYEDA, S. R.; AFACAN, A.; CHUANG, K. T. A **Fundamental Model for Prediction of Sieve Tray Efficiency**. **Chemical Engineering Research and Design**, v.85, n.2, p.269-277, 2007.

TERCAL. Isolamento Térmico Industrial, c2022. Manutenção Industrial. Disponível em: < <https://www.educamaisbrasil.com.br/enem/lingua-portuguesa/citacao-de-site> >. Acesso em: 09 de nov. de 2022.

TERRON, L. R. Destilação. Poli-USP, 2000. Disponível em: < <http://vectra.pqi.ep.usp.br/destilacao/Default.htm> >. Acesso em: 09 de novembro de 2022.

VERÍSSIMO, J. **3 Simuladores de Processos Gratuitos para Engenharia Química**. Medium, 2020. Disponível em: < <https://jeffersonverissimo.medium.com/3-simuladores-de-processos-gratuitos-para-engenharia-qu%C3%ADmica-cb8d320100d0> >. Acessado em: 09 de dezembro de 2022.

APÊNDICE

1 Link para vídeo educativo elaborado

https://www.youtube.com/watch?v=n7cIBHrbBVg&ab_channel=GabrielRodrigues

2 Código para simulação de evaporador triplo efeito

```
!pip install CoolProp
```

```
import CoolProp
from CoolProp.Plots import PropertyPlot
import CoolProp.CoolProp as CP
T_teste = CP.PropsSI('T','P',101450,'Q',1,'IF97::Water')
print("O valor da temperatura teste é: %4.3f°C" %(T_teste-273.15))
```

```
import numpy as np
import scipy as sci
from scipy.interpolate import interp1d
```

```
import CoolProp
from CoolProp.Plots import PropertyPlot
plot = PropertyPlot('HEOS::Water', 'PH', unit_system='EUR', tp_limits='ORC')
plot.calc_isolines(CoolProp.iQ, num=10)
plot.calc_isolines(CoolProp.iT, num=20)
plot.calc_isolines(CoolProp.iSmass, num=10)
plot.show()
```

```
import CoolProp
from CoolProp.Plots import PropertyPlot
plot = PropertyPlot('HEOS::water', 'TS', unit_system='EUR', tp_limits='ORC')
plot.calc_isolines(CoolProp.iQ, num=11)
plot.calc_isolines(CoolProp.iP, iso_range=[1,50], num=10, rounding=True)
plot.draw()
```

```

import CoolProp
from CoolProp.Plots import PropertyPlot
plot = PropertyPlot('HEOS::water', 'TS', unit_system='EUR', tp_limits='ORC')
plot.calc_isolines(CoolProp.iQ, num=11)
plot.calc_isolines(CoolProp.iP, iso_range=[1,50], num=10, rounding=True)
plot.draw()
plot.isolines.clear()
plot.props[CoolProp.iP]['color'] = 'green'
plot.props[CoolProp.iP]['lw'] = '0.5'
plot.calc_isolines(CoolProp.iP, iso_range=[1,50], num=10, rounding=False)
plot.show()

```

```

P_kPa = 13.4
P = P_kPa * 10**3
U1 = 3123
U2 = 1987
U3 = 1136
def EPE(x):
    return 1.78*x+6.22*x**2
def cp(x):
    return 4.19-2.35*x
xF = 0.1
TF_C = 26.7
TF = TF_C + 273.15
F_kgh = 22680
F = F_kgh/3600
xP = 0.5
xV = 0
Ps_kPa = 205.5
Ps = Ps_kPa * 10**3
Ts1 = CP.PropsSI('T','P',Ps,'Q',1,'IF97::Water')
Ts1_C = Ts1-273.15

```

```

EPE3 = EPE(xP)
Tvs3 = CP.PropsSI('T','P',P,'Q',1,'IF97::Water')
T3 = Tvs3 + EPE3
T3_C = T3-273.15
print(' ')
print('A temperatura no terceiro estágio é T3_C={:.3f} '.format(T3_C), '°C ou T3 = {:.3f} '.format(T3), 'K' )
print(' ')

L3 = (F*xF)/xP
Vt = F - L3
V1 = Vt/3
V2 = V1
V3 = V1
print(' ')
print('A taxa mássica de vapor que deve ser retirado é V1 = V2 = V3 = {:.3f} '.format(V1), 'kg /s' )
print(' ')
L1 = F - V1
L2 = L1 - V2
L3 = L2 - V3
print(' ')
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 1 é L1 = {:.3f} '.format(L1), 'kg/s' )
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 2 é L2 = {:.3f} '.format(L2), 'kg/s' )
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 3 é L3 = {:.3f} '.format(L3), 'kg/s' )
print(' ')

x1 = (F*xF)/L1
x2 = (L1*x1)/L2
x3 = (L2*x2)/L3
print(' ')
print('A fração mássica do concentrado que sai do efeito 1 é x1 = {:.4f} '.format(x1))
print('A fração mássica do concentrado que sai do efeito 2 é x2 = {:.4f} '.format(x2))
print('A fração mássica do concentrado que sai do efeito 3 é x3 = {:.4f} '.format(x3))

```

```
print('')
```

$$\text{EPE1} = \text{EPE}(\text{x1})$$

$$\text{EPE2} = \text{EPE}(\text{x2})$$

$$\text{EPE3} = \text{EPE}(\text{x3})$$

$$\text{SDelT} = \text{Ts1} - \text{Tvs3} - (\text{EPE1} + \text{EPE2} + \text{EPE3})$$

$$\text{ISU13} = 1/\text{U1} + 1/\text{U2} + 1/\text{U3}$$

$$\text{DelT1} = \text{SDelT} * (1/\text{U1}) / \text{ISU13}$$

$$\text{DelT2} = \text{SDelT} * (1/\text{U2}) / \text{ISU13}$$

$$\text{DelT3} = \text{SDelT} * (1/\text{U3}) / \text{ISU13}$$

$$\text{DelT1} = \text{DelT1} * 3.13$$

$$\text{DelT2} = \text{DelT2} * 1.21$$

$$\text{DelT3} = \text{DelT3} * 2.12$$

$$\text{T1} = \text{Ts1} - \text{DelT1}$$

$$\text{T1_C} = \text{T1} - 273.15$$

$$\text{Ts2} = \text{T1} - \text{EPE1}$$

$$\text{Ts2_C} = \text{Ts2} - 273.15$$

$$\text{T2} = \text{Ts2} - \text{DelT2}$$

$$\text{T2_C} = \text{T2} - 273.15$$

$$\text{Ts3} = \text{T2} - \text{EPE2}$$

$$\text{Ts3_C} = \text{Ts3} - 273.15$$

$$\text{T3} = \text{Ts3} - \text{DelT3}$$

$$\text{T3_C} = \text{T3} - 273.15$$

$$\text{Ts4} = \text{T3} - \text{EPE3}$$

$$\text{Ts4_C} = \text{Ts4} - 273.15$$

```
print('')
```

print('A temperatura no efeito 1 levando em consideração a elevação do ponto de ebulição é

$\text{T1_C} = \{:.3f\}$ '.format(T1_C), °C ou $\text{T3} = \{:.3f\}$ '.format(T1), 'K')

print('A temperatura no efeito 2 levando em consideração a elevação do ponto de ebulição é

$\text{T2_C} = \{:.3f\}$ '.format(T2_C), °C ou $\text{T3} = \{:.3f\}$ '.format(T2), 'K')

print('A temperatura no efeito 3 levando em consideração a elevação do ponto de ebulição é

$\text{T3_C} = \{:.3f\}$ '.format(T3_C), °C ou $\text{T3} = \{:.3f\}$ '.format(T3), 'K')

```
print('')
```

$$CpF = cp(xF)$$

$$Cp1 = cp(x1)$$

$$Cp2 = cp(x2)$$

$$Cp3 = cp(x3)$$

$$Tref_C = 0$$

$$Tref = Tref_C + 273.15$$

$$hF = CpF*(TF-Tref)$$

$$Hs1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',1,'IF97::Water')/1000$$

$$hs1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$Hs2 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',1,'IF97::Water')/1000$$

$$hs2 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$Hs3 = CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',1,'IF97::Water')/1000$$

$$hs3 = CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$hL1 = Cp1*(T1-Tref)$$

$$hL2 = Cp2*(T2-Tref)$$

$$hL3 = Cp3*(T3-Tref)$$

$$Hv1 = Hs1 + 1.884 * EPE1$$

$$Hv2 = Hs2 + 1.884 * EPE2$$

$$Hv3 = Hs3 + 1.884 * EPE3$$

$$H1 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884 * EPE1$$

$$lambdas1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',1,'IF97::Water')/1000 -$$

$$CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$H2 = CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884 * EPE2$$

$$lambdas2 = H1 - CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$H3 = CP.PropsSI('H','T',Ts4,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884 * EPE3$$

$$lambdas3 = H2 - CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$a11 = Hs1 - hs1$$

$$a12 = H1 - hL1$$

$$a13 = 0$$

$$b1 = (H1 - hF) * F$$

$$a21 = 0$$

```

a22 = hL1 + hs2 - H1 - H2
a23 = H2-hL2
b2 = (hs2 - H1)*F
a31 =0
a32 =H2 - hs3
a33 =hL2 + hs3 - H2 - H3
b3 =L3*(hL3-H3)
a = np.array([[a11,a12,a13], [a21,a22,a23], [a31,a32,a33]])
b = np.array([b1,b2,b3])
S,L1n,L2n = np.linalg.solve(a, b)
S_h = S*3600
L1_hn = L1n*3600
L2_hn = L2n*3600
L3_h = L3*3600
print(' ')
print('A taxa mássica do vapor saturado que entra no primeiro efeito é S_h = {:.3f} '.format(S_h), 'kg/h' )
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 1 é L1 = {:.3f} '.format(L1_hn), 'kg/h' )
)
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 2 é L2 = {:.3f} '.format(L2_hn), 'kg/h' )
)
print('A taxa mássica de concentrado que sai do efeito 3 é L3 = {:.3f} '.format(L3_h), 'kg/h' )
print(' ')

V1n = F - L1n
V1_hn = V1n*3600
V2n = L1n - L2n
V2_hn = V2n*3600
V3n = L2n - L3
V3_hn = V3n*3600
print(' ')
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 1 é V1 = {:.0f} '.format(V1_hn), 'kg/h' )
)

```

```

print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 2 é V2 = {:.0f} '.format(V2_hn), 'kg/
h' )
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 3 é V3 = {:.0f} '.format(V3_hn), 'kg/
h' )
print(' ')
delta_V1 = abs((V1-V1n))/V1*100
delta_V2 = abs((V2-V2n))/V2*100
delta_V3 = abs((V3-V3n))/V3*100
print(' ')
print('O valor do delta_V1 = {:.3f} '.format(delta_V1), '%')
print('O valor do delta_V2 = {:.3f} '.format(delta_V2), '%')
print('O valor do delta_V3 = {:.3f} '.format(delta_V3), '%')
print(' ')

i =1
V = np.zeros((2,3), dtype=np.float64)
L = np.zeros((2,3), dtype=np.float64)
V[0,0] = V1
V[0,1] = V2
V[0,2] = V3
V[1,0] = V1n
V[1,1] = V2n
V[1,2] = V3n
L[0,0] = L1
L[0,1] = L2
L[0,2] = L3
L[1,0] = L1n
L[1,1] = L2n
L[1,2] = L3
while delta_V1>= 1 or delta_V2>= 1 or delta_V3>= 1:
    i += i
    print('----- Iteração nº {:.0f}'.format(i), '-----
-----')

```

```

print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 1 é V1 = {:.0f} '.format(V1_hn), 'kg
/h' )
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 2 é V2 = {:.0f} '.format(V2_hn), 'kg
/h' )
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 3 é V3 = {:.0f} '.format(V3_hn), 'kg
/h' )
print(' ')
V1 = V1n
V2 = V2n
V3 = V3n
L1 = L1n
L2 = L2n
L3 = F-(V1+V2+V3)
Vt = V1+V2+V3
L1 = F - V1
L2 = L1 - V2
L3 = L2 - V3
x1 = (F*xF)/L1
x2 = (L1*x1)/L2
x3 = (L2*x2)/L3
EPE1 = EPE(x1)
EPE2 = EPE(x2)
EPE3 = EPE(x3)
SDeIT = Ts1 - Tvs3 - (EPE1+EPE2+EPE3)
ISU13 = 1/U1+1/U2+1/U3
DeIT1 = SDeIT*(1/U1)/ISU13
DeIT2 = SDeIT*(1/U2)/ISU13
DeIT3 = SDeIT*(1/U3)/ISU13
DeIT1 = DeIT1+3.13
DeIT2 = DeIT2-1.21
DeIT3 = DeIT3-2.12
T1 = Ts1 - DeIT1
T1_C = T1-273.15
Ts2 = T1 - EPE1

```

$$Ts2_C = Ts2 - 273.15$$

$$T2 = Ts2 - \Delta T2$$

$$T2_C = T2 - 273.15$$

$$Ts3 = T2 - EPE2$$

$$Ts3_C = Ts3 - 273.15$$

$$T3 = Ts3 - \Delta T3$$

$$T3_C = T3 - 273.15$$

$$Ts4 = T3 - EPE3$$

$$Ts4_C = Ts4 - 273.15$$

$$CpF = cp(xF)$$

$$Cp1 = cp(x1)$$

$$Cp2 = cp(x2)$$

$$Cp3 = cp(x3)$$

$$Tref_C = 0$$

$$Tref = Tref_C + 273.15$$

$$hF = CpF * (TF - Tref)$$

$$Hs1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',1,'IF97::Water')/1000$$

$$hs1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$Hs2 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',1,'IF97::Water')/1000$$

$$hs2 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$Hs3 = CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',1,'IF97::Water')/1000$$

$$hs3 = CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$hL1 = Cp1 * (T1 - Tref)$$

$$hL2 = Cp2 * (T2 - Tref)$$

$$hL3 = Cp3 * (T3 - Tref)$$

$$Hv1 = Hs1 + 1.884 * EPE1$$

$$Hv2 = Hs2 + 1.884 * EPE2$$

$$Hv3 = Hs3 + 1.884 * EPE3$$

$$H1 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884 * EPE1$$

$$\lambda_{das1} = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',1,'IF97::Water')/1000 -$$

$$CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$H2 = CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884 * EPE2$$

$$\lambda_{das2} = H1 - CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',0,'IF97::Water')/1000$$

$$H3 = CP.PropsSI('H','T',Ts4,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884 * EPE3$$

```

lambdas3 = H2 -CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',0,'IF97::Water')/1000
a11 = Hs1-hs1
a12 = H1 - hL1
a13 = 0
b1 = (H1-hF)*F
a21 = 0
a22 = hL1 + hs2 - H1 - H2
a23 = H2-hL2
b2 = (hs2 - H1)*F
a31 =0
a32 =H2 - hs3
a33 =hL2 + hs3 - H2 - H3
b3 =L3*(hL3-H3)
a = np.array([[a11,a12,a13], [a21,a22,a23], [a31,a32,a33]])
b = np.array([b1,b2,b3])
S,L1n,L2n = np.linalg.solve(a, b)
S_h = S*3600
L1_hn = L1n*3600
L2_hn = L2n*3600
L3_h = L3*3600
V1n = F - L1n
V1_hn = V1n*3600
V2n = L1n - L2n
V2_hn = V2n*3600
V3n = L2n - L3
V3_hn = V3n*3600
delta_V1 = abs((V1-V1n))/V1*100
delta_V2 = abs((V2-V2n))/V2*100
delta_V3 = abs((V3-V3n))/V3*100
print('Iteração n ',i)
print('O valor do delta_V1 = {:.3f} '.format(delta_V1), '%')
print('O valor do delta_V2 = {:.3f} '.format(delta_V2), '%')
print('O valor do delta_V3 = {:.3f} '.format(delta_V3), '%')
print(' ')

```

```

V = np.vstack((V,[0.,0.,0.]))
L = np.vstack((L,[0.,0.,0.]))
V[i,0] = V1n
V[i,1] = V2n
V[i,2] = V3n
L[i,0] = L1n
L[i,1] = L2n
L[i,2] = L3
V1 = V1n
V1_h = V1*3600
V2 = V2n
V2_h = V2*3600
V3 = V3n
V3_h = V3*3600
print("")
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 1 é V1 = {:.0f} '.format(V1_h), 'kg/
h' )
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 2 é V2 = {:.0f} '.format(V2_h), 'kg/
h' )
print('A taxa mássica de vapor vegetal que sai do efeito 3 é V3 = {:.0f} '.format(V3_h), 'kg/
h' )
print(' ')
print('A taxa mássica de saída de concentrado do efeito 1 é L1 = {:.0f} '.format(L1_h), 'kg/h'
)
print('A taxa mássica de saída de concentrado do efeito 2 é L2 = {:.0f} '.format(L2_h), 'kg/h'
)
print('A taxa mássica de saída de concentrado do efeito 3 é L3 = {:.0f} '.format(L3_h), 'kg/h'
)
print(' ')
print('A taxa mássica de vapor saturado que entra no primeiro efeito é S = {:.0f} '.format(S_h)
, 'kg/h' )
print(' ')

q1 = S_h/3600*lambda_s1*1000

```

```

q2 = V1_h/3600*lambdas2*1000
q3 = V2_h/3600*lambdas3*1000
print('----- As taxa de energia foram:-----
-----')
print(' ')
print('A quantidade de calor transferida do vapor (S) para o primeiro efeito foi Q1 = {:.4f} '.f
ormat(q1/10**6), 'MW' )
print('A quantidade de calor transferida do vapor (V1) para o segundo efeito foi Q2 = {:.4f} '.
format(q2/10**6), 'MW' )
print('A quantidade de calor transferida do vapor (V2) para o terceiro efeito foi Q3 = {:.4f} '.f
ormat(q3/10**6), 'MW' )
print(' ')
A1 = q1/(U1*DelT1)
A2 = q2/(U2*DelT2)
A3 = q3/(U3*DelT3)
print('----- As áreas de cada efeito foram:-----
-----')
print(' ')
print('A área calculada para o primeiro efeito foi A1 = {:.4f} '.format(A1), 'm^2' )
print('A área calculada para o segundo efeito foi A2 = {:.4f} '.format(A2), 'm^2' )
print('A área calculada para o terceiro efeito foi A3 = {:.4f} '.format(A3), 'm^2' )
print(' ')
Am = Am1 = (A1+A2+A3)/3
print('----- A área média calculada:-----
-----')
print(' ')
print('A área média calculada para os três efeito foi Am = {:.4f} '.format(Am), 'm^2' )
print(' ')
delta_A1 = abs(A1 - Am)/Am*100
delta_A2 = abs(A2 - Am)/Am*100
delta_A3 = abs(A3 - Am)/Am*100
print('----- O delta da área é:-----
-----')
print(' ')

```

```

print('O valor do delta_A1 = {:.3f} '.format(delta_A1), '%')
print('O valor do delta_A2 = {:.3f} '.format(delta_A2), '%')
print('O valor do delta_A3 = {:.3f} '.format(delta_A3), '%')
print(' ')

```

```

while delta_A1 >= 1 or delta_A2 >= 1 or delta_A3 >= 1:

```

```

    DelT1n = (DelT1*A1)/Am

```

```

    DelT2n = (DelT2*A2)/Am

```

```

    DelT3n = (DelT3*A3)/Am

```

```

    DelT1 = DelT1n

```

```

    DelT2 = DelT2n

```

```

    DelT3 = DelT3n

```

```

    T1 = Ts1 - DelT1

```

```

    T1_C = T1-273.15

```

```

    Ts2 = T1 - EPE1

```

```

    Ts2_C = Ts2-273.15

```

```

    T2 = Ts2 - DelT2

```

```

    T2_C = T2-273.15

```

```

    Ts3 = T2 - EPE2

```

```

    Ts3_C = Ts3-273.15

```

```

    T3 = Ts3 - DelT3

```

```

    T3_C = T3-273.15

```

```

    Ts4 = T3 - EPE3

```

```

    Ts4_C = Ts4-273.15

```

```

    CpF = cp(xF)

```

```

    Cp1 = cp(x1)

```

```

    Cp2 = cp(x2)

```

```

    Cp3 = cp(x3)

```

```

    Tref_C = 0

```

```

    Tref = Tref_C + 273.15

```

```

    hF = CpF*(TF-Tref)

```

```

    Hs1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',1,'IF97::Water')/1000

```

```

    hs1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',0,'IF97::Water')/1000

```

```

    Hs2 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',1,'IF97::Water')/1000

```

```

hs2= CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',0,'IF97::Water')/1000
Hs3= CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',1,'IF97::Water')/1000
hs3= CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',0,'IF97::Water')/1000
hL1 = Cp1*(T1-Tref)
hL2 = Cp2*(T2-Tref)
hL3 = Cp3*(T3-Tref)
Hv1 = Hs1+1.884*EPE1
Hv2 = Hs2+1.884*EPE2
Hv3 = Hs3+1.884*EPE3
H1 = CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884*EPE1
lambdas1 = CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',1,'IF97::Water')/1000 -
CP.PropsSI('H','T',Ts1,'Q',0,'IF97::Water')/1000
H2 = CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884*EPE2
lambdas2 = H1 - CP.PropsSI('H','T',Ts2,'Q',0,'IF97::Water')/1000
H3 = CP.PropsSI('H','T',Ts4,'Q',1,'IF97::Water')/1000 + 1.884*EPE3
lambdas3 = H2 -CP.PropsSI('H','T',Ts3,'Q',0,'IF97::Water')/1000
a11 = Hs1-hs1
a12 = H1 - hL1
a13 = 0
b1 = (H1-hF)*F
a21 = 0
a22 = hL1 + hs2 - H1 - H2
a23 = H2-hL2
b2 = (hs2 - H1)*F
a31 =0
a32 =H2 - hs3
a33 =hL2 + hs3 - H2 - H3
b3 =L3*(hL3-H3)
a = np.array([[a11,a12,a13], [a21,a22,a23], [a31,a32,a33]])
b = np.array([b1,b2,b3])
S,L1n,L2n = np.linalg.solve(a, b)
S_h = S*3600
L1_hn = L1n*3600
L2_hn = L2n*3600

```

```

L3_h = L3*3600
V1n = F - L1n
V1_hn = V1n*3600
V2n = L1n - L2n
V2_hn = V2n*3600
V3n = L2n - L3
V3_hn = V3n*3600
q1 = S_h/3600*lambda1*1000
q2 = V1_h/3600*lambda2*1000
q3 = V2_h/3600*lambda3*1000
A1 = q1/(U1*DelT1)
A2 = q2/(U2*DelT2)
A3 = q3/(U3*DelT3)
Am = Am1 = (A1+A2+A3)/3
delta_A1 = abs(A1 - Am)/Am*100
delta_A2 = abs(A2 - Am)/Am*100
delta_A3 = abs(A3 - Am)/Am*100
SEco = (V1+V2+V3)/S
print('----- As taxa de energia foram:-----
-----')
print(' ')
print('A quantidade de calor transferida do vapor (S) para o primeiro efeito foi Q1 = {:.4f} '.f
ormat(q1/10**6), 'MW' )
print('A quantidade de calor transferida do vapor (V1) para o segundo efeito foi Q2 = {:.4f} '.
format(q2/10**6), 'MW' )
print('A quantidade de calor transferida do vapor (V2) para o terceiro efeito foi Q3 = {:.4f} '.f
ormat(q3/10**6), 'MW' )
print(' ')
print('----- As áreas de cada efeito foram:-----
-----')
print(' ')
print('A área calculada para o primeiro efeito foi A1 = {:.4f} '.format(A1), 'm^2' )
print('A área calculada para o segundo efeito foi A2 = {:.4f} '.format(A2), 'm^2' )
print('A área calculada para o terceiro efeito foi A3 = {:.4f} '.format(A3), 'm^2' )

```

```
print(' ')
print('----- A área média calculada:-----
-----')
print(' ')
print('A área média calculada para os três efeito foi Am = {:.4f} '.format(Am), 'm^2' )
print(' ')
```