

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

**LAURA DE OLIVEIRA FIGUEREDO
LEONARDO HENRIQUE LEONELLO
MATEUS KINOUTI MACIEL**

**UTILIZAÇÃO DO DWSIM COMO FERRAMENTA DE APOIO À ANÁLISE DE
PROCESSOS EM DISCIPLINAS BÁSICAS DA ENGENHARIA**

POÇOS DE CALDAS

2025

**LAURA DE OLIVEIRA FIGUEREDO
LEONARDO HENRIQUE LEONELLO
MATEUS KINOUTI MACIEL**

**UTILIZAÇÃO DO DWSIM COMO FERRAMENTA DE APOIO À ANÁLISE DE
PROCESSOS EM DISCIPLINAS BÁSICAS DA ENGENHARIA**

Produto de Conclusão do PIEPEX-PCP apresentado como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas.

Orientador: Prof. Dr. Marlus Pinheiro Rolemberg

POÇOS DE CALDAS/MG

2025

Figueredo, Laura de Oliveira. Leonello, Leonardo Henrique. Maciel, Mateus Kinouti.

Utilização do DWSIM como ferramenta de apoio à análise de processos em disciplinas básicas da engenharia / Laura de Oliveira Figueredo, Leonardo Henrique Leonello, Mateus Kinouti Maciel. - Poços de Caldas, MG, 2025.

61 f. : il.

Orientador(a): Marlus Pinheiro Rolemberg.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Bacharelado Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2025.

Bibliografia.

1. DWSIM. 2. Simulação de processos. 3. Engenharia. 4. Primeira lei da termodinâmica. 5. Perda de carga. I. Figueredo, Laura de Oliveira II. Leonello, Leonardo Henrique. III. Maciel, Mateus Kinouti. IV. Rolemberg, Marlus Pinheiro, orient. V. Título.

LAURA DE OLIVEIRA FIGUEREDO

LEONARDO HENRIQUE LEONELLO

MATEUS KINOUTI MACIEL

**UTILIZAÇÃO DO DWSIM COMO FERRAMENTA DE APOIO À ANÁLISE DE
PROCESSOS EM DISCIPLINAS BÁSICAS DA ENGENHARIA**


O(A) Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação do(a) Produto de Conclusão do PIEPEX-PCP apresentado(a) como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Ciências e Tecnologia pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Simulação de processos.

Aprovada em: 05 de Dezembro de 2025

Prof. Dr. Marlus Pinheiro Rolemberg

Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Documento assinado digitalmente
 **MARLUS PINHEIRO ROLEMBERG**
Data: 18/12/2025 09:46:16-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Flávio Augusto Dias de Oliveira

Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

Prof. Dr. Marcos Vinícius Rodrigues

Universidade Federal de Alfenas

Assinatura:

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de expressar nossa sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradecemos, em especial, ao nosso orientador, Professor Marlus Rolemberg, pela dedicação, orientação e apoio durante todas as etapas do projeto. Sua experiência e disponibilidade foram fundamentais para o nosso desenvolvimento acadêmico e para a qualidade deste trabalho.

Estendemos nossos agradecimentos à Universidade Federal de Alfenas – UNIFAL-MG, pela estrutura, oportunidades e pelo ambiente de aprendizado proporcionado ao longo de nossa formação. Somos gratos a todos os professores, funcionários e colegas que, direta ou indiretamente, colaboraram para nossa trajetória acadêmica.

Agradecemos também às nossas famílias e amigos, pelo incentivo, compreensão e suporte nos momentos de desafio.

RESUMO

O presente trabalho investiga a eficácia e o potencial do simulador DWSIM como ferramenta de cálculo alternativa e rápida para a resolução de problemas em disciplinas básicas da Engenharia. O estudo prioriza exercícios complexos, cobrindo a Primeira Lei da Termodinâmica (Balanço de Energia) e a Mecânica dos Fluidos (Perda de Carga em Sistemas de Tubulação). A motivação deste trabalho se baseia na reconhecida complexidade dos cálculos manuais, uma vez que determinar a Entalpia e o Equilíbrio de Fases requer a solução de Equações de Estado não-lineares, e o cálculo do Fator de Atrito exige diversas iterações ou o uso de gráficos como o Diagrama de Moody. O objetivo geral é demonstrar a vantagem da simulação, comparando sua rapidez com o grande esforço necessário no método analítico. A metodologia incluiu a modelagem de sistemas a partir de exercícios de referência, onde os resultados mostram que o DWSIM calcula instantaneamente parâmetros como diferença de pressão e potência de bombeamento, eliminando as demoradas iterações. Conclui-se que o DWSIM é um recurso de excelência tanto para o ensino quanto para o uso profissional, comprovando a grande economia de esforço e seu potencial como uma solução eficiente para cálculos complexos.

Palavras-chave: DWSIM; simulação de processos; engenharia; primeira lei da termodinâmica; perda de carga.

ABSTRACT

This study investigates the effectiveness and potential of the DWSIM simulator as a rapid and alternative calculation tool for solving problems in basic Engineering disciplines. The research prioritizes complex exercises, covering the First Law of Thermodynamics (Energy Balance) and Fluid Mechanics (Head Loss in Piping Systems). The motivation for this work is based on the recognized difficulty of manual calculations, since determining Enthalpy and Phase Equilibrium requires solving non-linear Equations of State, and calculating the Friction Factor demands several iterations or the use of charts like the Moody Diagram. The general objective is to demonstrate the advantage of simulation by comparing its speed with the extensive effort required by the analytical method. The methodology included the modeling of systems using reference exercises, where the results show that DWSIM instantly calculates parameters such as pressure difference and pumping power, eliminating the time-consuming manual iterations. It is concluded that DWSIM is a resource of excellence for both teaching and professional use, proving the significant saving of effort and its potential as an efficient solution for complex calculations.

Keywords: DWSIM; process simulation; engineering; first law of thermodynamics; head loss.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama de Moody.....	16
Figura 2: Tabela de Singularidades (acessórios).....	17
Figura 3: Representação dos padrões de escoamento em tubulações horizontais e verticais... 18	
Figura 4: Visualização do problema proposto.....	21
Figura 5: Menu de criação de nova simulação no DWSIM.	25
Figura 6: Menu de seleção de compostos no DWSIM.	25
Figura 7: Menu de seleção de pacote de propriedades no DWSIM.	26
Figura 8: Menu de seleção de unidades.....	26
Figura 9: Menu de propriedades de corrente.....	27
Figura 10: Menu de características do tubo.....	29
Figura 11: Menu do perfil hidráulico do tubo.	30
Figura 12: Resultados da simulação de queda de pressão.	31
Figura 13: Características da bomba	32
Figura 14: Corrente de entrada do segundo problema proposto.....	35
Figura 15: Configuração do tubo para o exemplo 8.2.	36
Figura 16: Dados da simulação do Exemplo 8.2.....	37
Figura 17: Características da bomba para o Exemplo 8.2.....	37
Figura 18: Configurações de propriedade corrente de entrada 2.....	43
Figura 19: Fluxograma Exercício 3.18.....	44
Figura 20: Configurações de entrada aquecedor item (a) do exercício 3.18.....	44
Figura 21: Corrente de saída item (a) do exercício 3.18.....	45
Figura 22: Tabela de propriedades do DWSIM.....	45
Figura 23: Fluxograma Exercício 3.18. item (b).....	46
Figura 23: Corrente de saída item (b) do exercício 3.18.....	46
Figura 24 Configurações de saída aquecedor item (b) do exercício 3.18.....	47
Figura 25: Tabela de propriedades do DWSIM.....	47
Figura 26: Configuração de Entrada exercício 3.35.....	52
Figura 27: Fluxograma Exercício 3.35. item (a).....	52
Figura 28: Corrente de entrada do aquecedor do exercício 3.35 - item (a).....	53
Figura 29: Fluxograma Exercício 3.35 - item (b).....	53
Figura 30: Corrente de entrada do aquecedor do exercício 3.35 - item (b).....	54
Figura 31: Fluxograma Exercício 3.35 - item (c).....	54
Figura 32: Corrente de entrada do aquecedor do exercício 3.35 - item (c).....	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	11
2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1	SIMULADORES DE PROCESSOS QUÍMICOS	12
3.2	DWSIM	12
3.3	PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA.....	12
3.3.1	Variação de entalpia	13
3.3.2	Equações de estado	14
3.4	MECÂNICA DOS FLUIDOS	14
3.4.1	Perda de carga	15
3.4.1.1	Perda distribuída	15
3.4.1.2	Perda localizada	17
3.4.2	Escoamento bifásico	18
3.4.2.1	Mecanismo de cálculo e padrões de escoamento	19
3.4.3	Bombas	20
4	METODOLOGIA	22
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	23
5.1	EXEMPLO 8-1 - ÇENGEL & CIMBALA - MECÂNICA DOS FLUÍDOS.....	23
5.1.1	Resolução escrita	24
5.1.2	Resolução DWSIM	26
5.1.2.1	Criando uma nova simulação	26
5.1.2.2	Início da simulação e configuração da corrente de entrada.....	29
5.1.2.3	Configuração do tubo	30
5.1.2.4	Resolvendo a simulação e saída de dados	32
5.1.2.5	Cálculo da potência útil de bombeamento.....	33

5.1.3	Comparação de resultados.....	34
5.2	EXEMPLO 8-2 - ÇENGEL & CIMBALA - MECÂNICA DOS FLUÍDOS.....	35
5.2.1	Resolução escrita.....	35
5.2.2	Resolução DWSIM	36
5.2.3	Comparação de resultados.....	39
5.3	EXEMPLO 3.18 - FUNDAMENTALS OF CHEMICAL ENGINEERING THERMODYNAMICS - THEMIS MATSOUKAS.....	40
5.3.1	Resolução escrita.....	41
5.3.2	Resolução DWSIM	45
5.3.2.1	Início da simulação e configuração da corrente	45
5.3.2.2	Resolução do item (a) adicionando um resfriador ao sistema	45
5.3.2.3	Resolução do item (b) adicionando um resfriador ao sistema.....	48
5.3.3	Comparação de resultados.....	50
5.4	EXERCICIO 3.35 - FUNDAMENTALS OF CHEMICAL ENGINEERING THERMODYNAMICS - THEMIS MATSOUKAS.....	50
5.4.1	Resolução escrita.....	51
5.4.2	Resolução DWSIM	53
5.4.2.1	Início da simulação e configuração da corrente de entrada.....	53
5.4.2.2	Resolução do item (a) adicionando um aquecedor no sistema para ter 75% de qualidade de vapor	54
5.4.2.3	Resolução do item (b) mantendo um aquecedor no sistema com 2000 kw para determinar a temperatura	55
5.4.2.4	Resolução do item (c) adicionando um aquecedor no sistema de 3000 kw para determinar a temperatura	56
5.4.3	Comparação de resultados.....	57
6	TRABALHOS FUTUROS	59
7	CONCLUSÃO	60
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O estudo da Engenharia tem como base a aplicação das Leis de Conservação, fundamentais para a compreensão e o dimensionamento de processos industriais. Quando o assunto é conservação de energia, a Primeira Lei da Termodinâmica torna-se essencial, pois permite calcular as trocas de energia em sistemas abertos e fechados, sendo aplicada em equipamentos como trocadores de calor, turbinas e bombas. Paralelamente, na Mecânica dos Fluidos – ramo que estuda o comportamento de líquidos e gases em repouso e em movimento –, a análise do desempenho de sistemas de tubulação representa um grande desafio técnico. O cálculo manual desses sistemas, que envolve a determinação das perdas de carga e o dimensionamento de componentes, é um processo trabalhoso, demorado e suscetível a erros (Bastos, 2021).

Diante do cenário de complexidade de resolução de problemas de Engenharia evidenciado, o simulador DWSIM se torna um recurso essencial, sendo um software de código aberto e gratuito capaz de solucionar exercícios de forma rápida e precisa. Fundamental para melhorar processos, o DWSIM, com sua tecnologia e compatibilidade com vários sistemas, não só facilita o acesso a essa ferramenta, mas também se mostra uma opção eficiente, diminuindo o esforço necessário para resolver sistemas manualmente (Bastos, 2021).

Desta forma, o presente trabalho utilizará o DWSIM para solucionar problemas práticos envolvendo a Primeira Lei da Termodinâmica e na Mecânica dos Fluidos visando demonstrar o potencial do software como uma alternativa eficaz para os cálculos manuais e suporte técnico para processos industriais.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho é demonstrar a eficiência do simulador DWSIM como uma ferramenta alternativa e rápida para a resolução de exercícios de Engenharia, comparando a complexidade do cálculo analítico com a agilidade da simulação em sistemas que envolvem disciplinas básicas da Engenharia, como a Primeira Lei da Termodinâmica e a Mecânica dos Fluidos.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Modelar diferentes sistemas de tubulação e trocadores de calor no DWSIM para demonstrar sua aplicabilidade na solução de problemas industriais que exigem o cálculo da perda de carga e balanço de energia.
- b) Comparar os resultados obtidos pela simulação no DWSIM com os resultados de referência, comprovando a economia de esforço na resolução de problemas mais complexos.
- c) Validar o DWSIM como um recurso didático, técnico e eficiente para estudantes e profissionais da Engenharia.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 SIMULADORES DE PROCESSOS QUÍMICOS

Os simuladores de processos químicos são ferramentas de extrema importância para os engenheiros nos tempos atuais, pois são uma ferramenta que realizam cálculos de maneira automatizada, abrangendo diversos tipos de balanços de massa e energia em processos industriais, além claro de trabalhar com diversas propriedades físicas e termodinâmicas, o que auxilia em ter resultados mais precisos. (Seider, 2010).

Atualmente há diversos simuladores presentes no mercado, há simuladores gratuitos e pagos, alguns exemplos de simuladores de processos químicos são: Aspen HYSYS, AVEVA PRO/II Simulation, CHEMCAD, DWSIM e ProSimPlus.

O simulador que será utilizado para realização dos problemas neste trabalho é o DWSIM, um simulador de processos químicos gratuitos que já consegue suportar todos os problemas propostos.

3.2 DWSIM

O DWSIM é um software gratuito o com padrão CAPE-OPEN em um ambiente de modelagem de processos criado em 2004 pelo engenheiro químico Daniel Wagner Oliveira de Medeiros utilizado para simulação de processos químicos industriais, permitindo esquematizar os processos e aplicar modelos matemáticos a ele, como Peng-Robinson, SRK, NRTL e outros (Medeiros, 2022).

Uma área de destaque na literatura acadêmica é a validação do DWSIM. Vários estudos comparam seus resultados com dados experimentais ou com os obtidos por simuladores comerciais (como Aspen Plus® e SuperPro Designer®), demonstrando que o DWSIM oferece resultados comparáveis e com boa concordância, muitas vezes com desvios inferiores a 5% ou até 1% para casos específicos (Medeiros, 2022).

3.3 PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

O princípio da conservação de energia é estabelecido pela Primeira Lei da Termodinâmica (Matsoukas, 2012). Formulada pelo físico alemão Rudolf Clausius em 1850,

essa lei afirma que a energia não pode ser criada nem destruída, apenas convertida de uma forma para outra. A aplicação desse princípio aos processos industriais fundamenta o Balanço de Energia, uma ferramenta essencial para quantificar o consumo e a produção de energia em unidades de operação, como trocadores de calor, reatores químicos, turbinas, compressores e bombas.

Para um sistema aberto, operando em regime permanente e isotérmico, o balanço é formulado como (Matsoukas, 2012):

$$Q - W_S = \Delta H + \Delta E_C + \Delta E_P \quad (1)$$

Onde Q é a taxa de transferência de calor, W_S a taxa de trabalho de eixo, ΔH a variação da entalpia e ΔE_C e ΔE_P são as variações de energia cinética e potencial (MATSOUKAS, 2012).

3.3.1 Variação de entalpia

A variação de entalpia (ΔH) é a soma da entalpia das correntes de saída menos a das correntes de entrada. Para um processo, esta variação deve incluir as energias associadas a mudanças de temperatura, mudanças de fase e misturas (Koretsky, 2016).

A contribuição do calor sensível (mudança de temperatura) exige a integração da capacidade calorífica (C_p) em função da temperatura (Koretsky, 2016). O cálculo da entalpia pode ser obtido através da equação (2).

Cálculo da Entalpia Sensível:

$$\Delta H_{sens.} = \int_{T_{ref}}^T C_p(T) dT \quad (2)$$

Em que $C_p(T)$ assume a forma polinomial ($C_p = a + bT + cT^2 + \dots$), tornando a integração manual um processo extenso e trabalhoso.

A contribuição do calor latente exige o conhecimento da entalpia de vaporização (λ) no ponto de ebulição (Koretsky, 2016), crucial para processos de condensação ou evaporação. Em que, n é igual ao número de mols da substância.

Cálculo da Entalpia Latente:

$$\Delta H_{latente} = \lambda \cdot n \quad (3)$$

Em misturas multifásicas, o cálculo se torna ainda mais extenso e complexo, pois é necessário determinar o Equilíbrio de Fases (ELV) por meio da igualdade das fugacidades (\widehat{f}_i^L) de cada componente (i) na mistura (Matsoukas, 2012):

$$\widehat{f}_i^L = \widehat{f}_i^V \quad (4)$$

3.3.2 Equações de estado

Para garantir a precisão exigida pela Engenharia Química, o cálculo das propriedades do fluido e das fugacidades (\widehat{f}_i^L) deve utilizar as Equações de Estado (EoS), como a de Peng-Robinson (Matsoukas, 2012).

A EoS de Peng-Robinson, por exemplo, é uma equação cúbica não-linear em volume que exige um processo iterativo para a determinação do volume molar e, conseqüentemente, da entalpia de resíduo.

Equação Geral de Estado Cúbica (Peng-Robinson, simplificada):

$$P = \frac{RT}{v - b} - \frac{a(T)}{v(v + b) + b(v - b)} \quad (5)$$

Resolver esta equação para o volume molar (v), e utilizá-lo para calcular o equilíbrio de fase de cada componente e em cada fase (líquida e vapor) é um processo extremamente trabalhoso e demorado para ser realizado manualmente (Matsoukas, 2012).

3.4 MECÂNICA DOS FLUIDOS

A Mecânica dos Fluidos é a ciência que permite entender e planejar o movimento de fluidos (líquidos e gases) em indústrias (Brunetti, 2008). O objetivo principal é garantir que as

tubulações e os equipamentos operem com segurança e eficiência. Para atingir essa meta, é fundamental calcular a quantidade de energia que o fluido gasta ao longo do seu caminho.

3.4.1 Perda de carga

Para analisar o transporte de fluidos em sistemas de tubulação, é necessário calcular a energia dissipada devido o atrito do fluido com as paredes rugosas do tubo. Esta energia dissipada é a Perda de Carga Distribuída (h_p), que é somada ao longo do sistema e é essencial para o dimensionamento de bombas e turbinas (Brunetti, 2008).

A perda de carga total é a soma de dois componentes: a perda distribuída (h_f) que ocorre em trechos retos de tubulação com a perda de carga causada pelos acessórios, como válvulas, joelhos e cotovelos chamada de perda localizada (h_L):

$$h_p = h_f + h_L \quad (6)$$

Onde a Perda Distribuída (h_f) ocorre em trechos retos do tubo, causada pelo atrito constante do fluido com a parede e a Perda Localizada (h_L) se concentra nos pontos onde há mudança na geometria ou direção do escoamento, como em conexões e acessórios (Brunetti, 2008).

3.4.1.1 Perda distribuída

Para calcular a perda distribuída (h_f), usa-se a equação de Darcy-Weisbach, também conhecida como Fórmula Universal (Brunetti, 2008).

Fórmula de Darcy-Weisbach:

$$h_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

O cálculo do fator de atrito (f) depende do regime de escoamento, que é descrito pelo número de Reynolds (Re): (White, 2018)

$$Re = \rho v \frac{D}{\mu} \tag{8}$$

onde μ é a viscosidade dinâmica do fluido ($Pa \cdot s$).

Quando $Re < 2300$, o escoamento é considerado laminar; entre 2300 e 4000, transitório; e acima de 4000, turbulento (White, 2018).

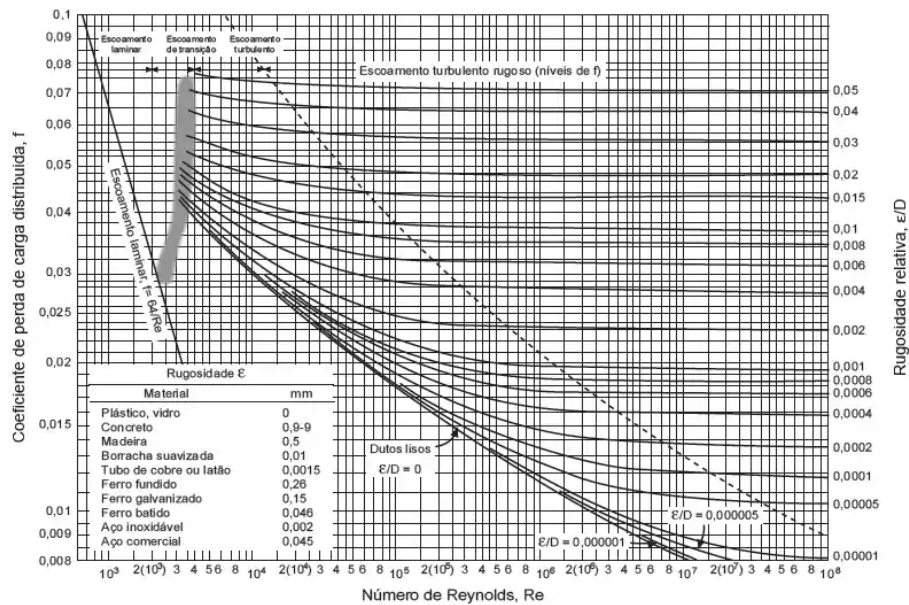
Para escoamento turbulento, o valor de f é calculado pela equação de Colebrook-White (White, 2018):

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \cdot \log\left(\frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{2,51}{Re\sqrt{f}}\right) \tag{9}$$

onde (ϵ/D) é a rugosidade relativa.

O problema é que essa equação é implícita, o que significa que exige cálculos repetitivos ou a leitura de gráficos como o Diagrama de Moody, como mostra a Figura 1:

Figura 1: Diagrama de Moody



Fonte: Brunetti (2008)

A impossibilidade de isolar o fator f torna a resolução manual de problemas (especialmente aqueles onde a vazão, Q , ou o diâmetro, D , são as incógnitas) um processo

iterativo deve ser utilizado da seguinte forma:

- Estimar um valor inicial para f (ou usar o Diagrama de Moody);
- Calcular a incógnita (Vazão ou Diâmetro);
- Recalcular o número de Reynolds (Re);
- Recalcular f com a equação de Colebrook-White;
- Repetir os passos até que o valor de f convergir;

O cálculo manual é demorado e propício a erros, o que reforça a necessidade de busca por soluções em simuladores.

3.4.1.2 Perda localizada

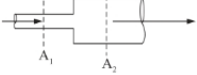
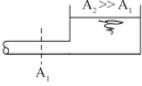
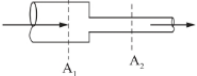
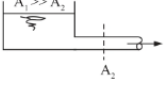

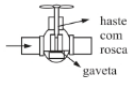
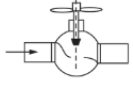

As Perdas Localizadas (h_L) são causadas por peças como cotovelos, válvulas, alargamentos e estreitamentos. Esses acessórios provocam turbulência e desvios no fluxo, gerando perdas de energia. A perda em cada acessório é calculada pelo método do coeficiente de perda (K) (Brunetti, 2008).

Matematicamente, o coeficiente de perda é expressado por:

$$h_L = K \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (10)$$

A complexidade surge na necessidade de consultar tabelas de coeficientes K específicos para cada acessórios, os valores de K para os diferentes acessórios é mostrado na Figura 2. Em sistemas complexos, o trabalho de somatória e integração de todas as perdas distribuídas e localizadas é extenso e sujeito a erros na transcrição dos dados e na execução dos cálculos (Brunetti, 2008).

Figura 2: Tabela de Singularidades (acessórios)

Singularidade	Esquema	k_s
Alargamento		$(1 - A_1/A_2)$ (no caso, $v = v_1$)
Caso limite		1
Estreitamento		$\phi (A_1/A_2)$
Caso limite		0,5
Cotovelo a 90°		0,9
Válvula de gaveta		Totalmente aberta 0,2
Válvula tipo globo		Totalmente aberta 10
Válvula de retenção		0,5

Fonte: Brunetti (2008)

Em instalações com muitas singularidades, a perda localizada pode ser a parte mais importante da perda de carga total. Por exemplo, uma válvula pode gerar uma perda maior do que vários metros de tubo reto. Por isso, calcular h_L com precisão é essencial para o projeto de qualquer sistema (Brunetti, 2008).

3.4.2 Escoamento bifásico

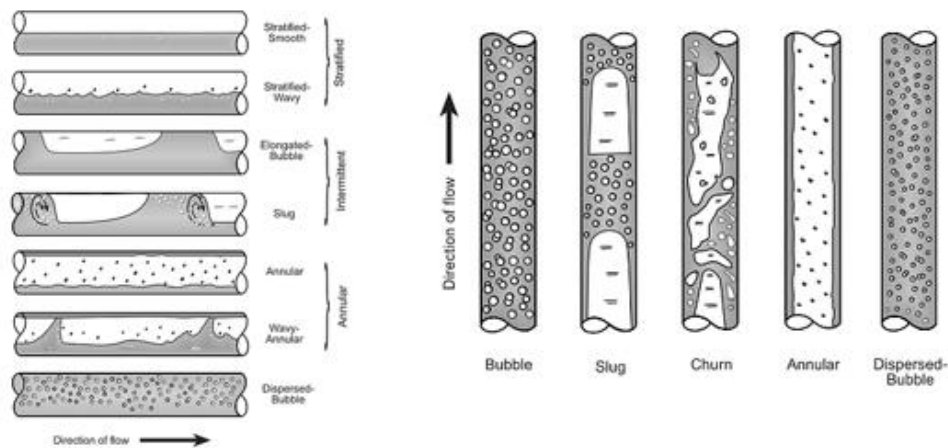
A correlação de Beggs & Brill é um método prático e essencial para calcular a perda de pressão em escoamentos bifásicos, sendo muito útil por sua aplicação em tubulações de diversos ângulos – horizontal, vertical e inclinada. Este cálculo é fundamental para projetar sistemas de transporte onde o fluido não é uniforme, como é comum na indústria de óleo e gás (Guedes, 2015).

3.4.2.1 Mecanismo de cálculo e padrões de escoamento

Diferente de métodos mais básicos, o Beggs & Brill calcula a perda de carga levando em conta o padrão de escoamento. Ela não é representada por uma única fórmula simples, mas sim por um conjunto complexo de equações iterativas que modificam a Equação Geral de Perda de Pressão para escoamento multifásico (Guedes, 2015).

O resultado do cálculo da Beggs & Brill é a Perda de Pressão Total (ΔP_T), dada pela soma dos componentes hidrostático e de fricção, ambos modificados pela fração de volume ocupada pelo líquido no local do escoamento (E_L) e pelo padrão de escoamento (Beggs; Brill, 1973). A Figura 3 demonstra algumas representações de padrões de escoamento.

Figura 3: Representação dos padrões de escoamento em tubulações horizontais e verticais.



Fonte: SHOHAM (2006)

A Equação fundamental que a correlação resolve é a Equação Geral de Perda de Pressão:

$$\Delta P_T = \Delta P_{HH} + \Delta P_f \quad (11)$$

onde (ΔP_{HH}) é o Componente Hidrostático:

$$\Delta P_{HH} \propto \rho_m \cdot g \cdot L \cdot \text{Sen}(\theta) \quad (12)$$

este componente é calculado usando a densidade da mistura no local (ρ_m), que é determinada por (E_L):

$$\rho_m = E_L \cdot \rho_L + (1 - E_L) \cdot \rho_G \quad (13)$$

Em que: (ρ_L) e (ρ_G) são as densidades do líquido e do gás, respectivamente.

Já o Componente de Fricção (ΔP_f) é a perda por fricção. A correlação de Beggs & Brill utiliza o fator de atrito bifásico (f_{tp}), que é obtido através de um fator de correção (S) aplicado ao fator de atrito *no-slip* (Guedes, 2015):

$$\Delta P_f \propto f_{tp} \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (14)$$

Em que $f_{tp} = f_{ns}$. O valor de S é uma função complexa do E_L e do *no-slip holdup*.

Em resumo, a correlação de Beggs & Brill funciona como um mecanismo que calcula os valores de (E_L) e (f_{tp}) , que são indispensáveis para obter a solução correta da Equação Geral de Perda de Pressão em sistemas bifásicos (Beggs; Brill, 1973).

3.4.3 Bombas

A análise final de um sistema de transporte envolve integrar a perda de carga total (h_p) com a ação de máquinas de fluxo, especialmente as bombas (Brunetti, 2008). Este processo exige a aplicação da Equação da Energia, também conhecida como Equação de Bernoulli estendida, a qual relaciona as formas de energia entre os pontos de entrada (1) e de saída (2) de um sistema (White, 2018):

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 + H_B = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_p \quad (15)$$

onde a pressão (P) se dá em Pa, o peso específico do fluido (ρg) em N/m³, a velocidade do fluido (v) em m/s, altura geométrica (z) em metros, a carga manométrica da bomba (H_B) em metros e a perda de carga total (h_p) em metros

A carga manométrica da bomba representa, fisicamente, a energia líquida fornecida pela bomba por unidade de peso de fluido e é o parâmetro principal para a seleção do equipamento (Brunetti, 2008). Ela deve ser suficiente para vencer a resistência de todo o circuito. Assim, a H_B é determinada pela somatória das necessidades do sistema:

$$H_B = \left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right) + (z_2 - z_1) + \left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}\right) + h_p \quad (16)$$

Onde $\left(\frac{P_2 - P_1}{\gamma}\right)$ representa a diferença de pressão, $(z_2 - z_1)$ a diferença de elevação, e $\left(\frac{V_2^2 - V_1^2}{2g}\right)$ a diferença na carga cinética. Portanto, o dimensionamento correto da bomba é diretamente dependente da precisão com que a perda de carga total é calculada, pois é a carga manométrica da bomba que define a curva de desempenho e a potência do equipamento para levar o fluido ao destino (White, 2018).

4 METODOLOGIA

A metodologia adotada para resolução dos exercícios presentes neste trabalho foi a realização por dois caminhos diferentes. Primeiramente foi realizada uma resolução escrita, que se baseia em uma resolução um pouco mais demorada, pois é necessário a realização de cálculos e procura de informações de forma manual. Já a segunda forma de resolução é por meio do aplicativo de simulação DWSIM, que é um meio muito mais rápido e prático de se realizar, já que o aplicativo já vem com um banco de dados com as informações sobre os compostos que foram utilizados, além de contar com dados de propriedades termodinâmicas, como exemplo Peng-Robinson (PR), Lei de Raoult, dentre outras.

Após ser obtido o resultado da forma escrita e da forma por meio computacional, foi realizada uma comparação entre os dois valores para que seja comprovada a utilização do DWSIM para resolução de problemas relacionados a Mecânica dos fluidos e sobre termodinâmica, especialmente sobre a primeira lei.

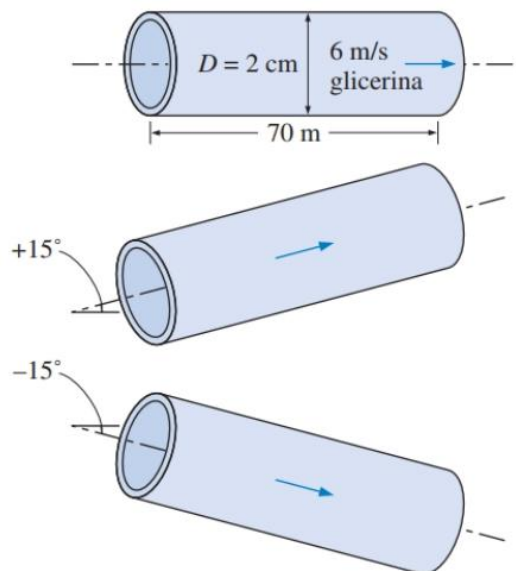
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 EXEMPLO 8-1 - ÇENGEL & CIMBALA - MECÂNICA DOS FLUÍDOS

Este exemplo traz um problema relacionado ao escoamento laminar em tubos, além de analisar a influência da inclinação do tubo no escoamento. O enunciado do exercício é mostrado abaixo:

Considere o escoamento completamente desenvolvido de glicerina a 40°C por meio de um tubo circular horizontal de 4 cm de diâmetro e 70 m de comprimento. Se a velocidade na linha central é medida como 6 m/s, determine o perfil de velocidade e a diferença de pressão através dessa seção de 70 m de comprimento do tubo, e a potência útil de bombeamento necessária para manter esse escoamento. Para a mesma potência útil de bombeamento de entrada, determine a percentagem de aumento da vazão se o tubo for inclinado 15° para baixo, e a percentagem de diminuição se for inclinado 15° para cima. A bomba está localizada fora dessa seção do tubo. A figura 4 representa o esquema fornecido pelo livro:

Figura 4: Visualização do problema proposto.



Fonte: Çengel (2015)

Hipóteses: **1.** O escoamento é permanente, laminar, incompressível e completamente desenvolvido. **2.** Não há bombas ou turbinas na seção de escoamento. **3.** Não há válvulas,

cotovelos ou outros dispositivos que possam causar perdas locais.

Propriedades: A densidade e viscosidade dinâmica da glicerina a 40°C são $\rho = 1252 \text{ kg/m}^3$ e $\mu = 0,3073 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, respectivamente.

5.1.1 Resolução escrita

O perfil de velocidade em escoamento laminar completamente desenvolvido em um tubo circular é expresso como:

$$u(r) = u_{m\acute{a}x} \left(1 - \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (17)$$

Substituindo, o perfil de velocidade é:

$$u(r) = (6\text{m/s}) \left(1 - \frac{r^2}{(0,02 \text{ m})^2}\right) = 6(1 - 2500r^2) \quad (18)$$

onde u é em m/s e r é em m. A velocidade média, a vazão e o número de Reynolds são:

$$v = v_{med} = \frac{u_{m\acute{a}x}}{2} = \frac{6\text{m/s}}{2} = 3\text{m/s} \quad (19)$$

$$V = v_{med} \cdot A = v(\pi D^2/4) = (3\text{m/s})[\pi(0,04\text{m})^2/4] = 3,77 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (20)$$

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} = \frac{(1252 \text{ kg/m}^3)(3\text{m/s})(0,04 \text{ m})}{0,3073 \text{ kg/m}\cdot\text{s}} = 488,9 \quad (21)$$

Como Re é inferior a 2300, o escoamento é laminar. Em seguida, o fator de atrito e a perda de carga tornam-se:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{488,9} = 0,1309 \quad (22)$$

$$h_L = f \frac{LV^2}{D2g} = 0,1309 \frac{(70 \text{ m})}{(0,04 \text{ m})} \frac{(3 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)} = 105,1 \text{ m} \quad (23)$$

O balanço de energia para o escoamento unidimensional permanente e incompressível é dado pela equação:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{bomba} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbina} + h_L \quad (24)$$

Para escoamento completamente desenvolvido em um tubo de diâmetro constante, sem bombas ou turbinas, reduz-se a:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g(z_2 - z_1 + h_L) \quad (25)$$

Em seguida, a diferença de pressão e a potência de bombeamento útil necessária para o caso horizontal tornam-se:

Diferença de pressão:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \rho g(z_2 - z_1 + h_L)$$

$$\Delta P = (1252 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)(0 - 105,1 \text{ m})\left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ kg/m}\cdot\text{s}^2}\right) \quad (26)$$

$$\Delta P = 1291 \text{ kPa}$$

Potência da bomba:

$$W_{bomba,u} = V \cdot \Delta P = (3,77 \cdot 10^3 \text{ m}^3/\text{s})(1291 \text{ kPa})\left(\frac{1 \text{ kW}}{\text{kPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}}\right) = 4,87 \text{ kW} \quad (27)$$

A diferença de elevação e a diferença de pressão para um tubo inclinado 15° para cima é:

$$\Delta z = z_2 - z_1 = L \text{ sen} 15^\circ = (70 \text{ m}) \text{ sen} 15^\circ = 18,1 \text{ m} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \Delta P_{asc} &= (1252 \text{ kg/m}^3)(9,81 \text{ m/s}^2)(18,1 \text{ m} + 105,1 \text{ m})\left(\frac{1 \text{ kPa}}{1000 \text{ kg/m} \cdot \text{s}^2}\right) \\ &= 1366 \text{ kPa} \end{aligned}$$

Em seguida, a vazão através do tubo inclinado para cima torna-se:

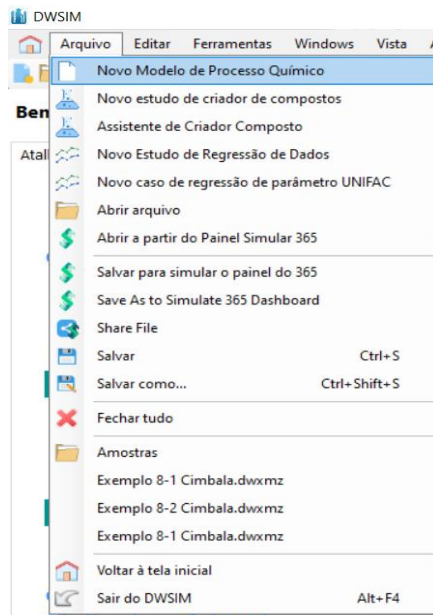
$$V_{asc} = \frac{W_{bomba,u}}{\Delta P_{asc}} = \frac{4,87 \text{ kW}}{1366 \text{ kPa}} \left(\frac{1 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{s}}{1 \text{ kW}}\right) = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s} \quad (29)$$

Que representa uma diminuição de 5,6% na vazão. Pode ser mostrado similarmente que quando o tubo está inclinado 15° para baixo a partir da horizontal, a vazão irá aumentar em 5,6%.

i. Resolução DWSIM

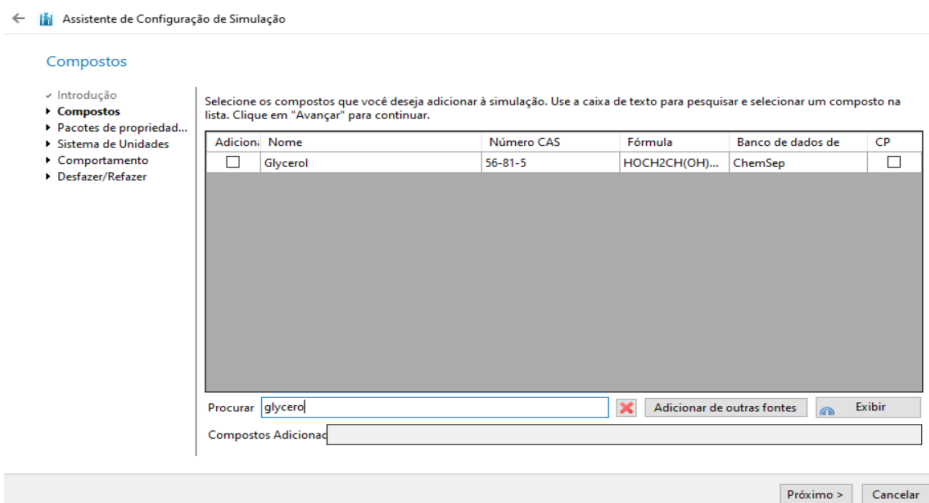
5.1.2.1 Criando uma nova simulação

Para dar início à resolução do problema proposto, é necessário criar a simulação no aplicativo, para isso, com o software instalado, na aba arquivos deve ser selecionada a opção de “Novo Modelo de Processo Químico”, como mostra a figura abaixo.

Figura 5: Menu de criação de nova simulação no DWSIM.

Fonte: Autor (2025)

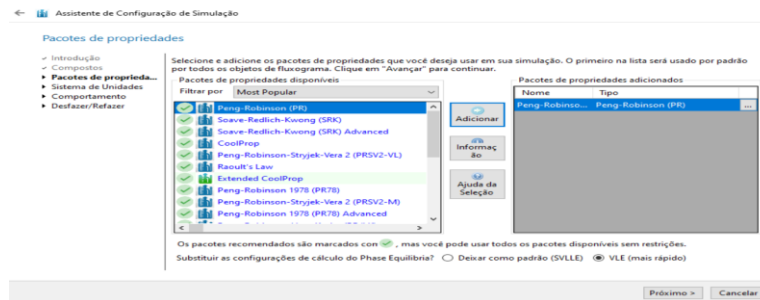
O programa irá exibir o Assistente de Configuração de Simulação. A primeira página do assistente será uma aba introdutória, contendo algumas informações sobre a guia. Após dar prosseguimento, foi possível adicionar os componentes de trabalho, para o caso deste exercício será a Glicerina. Apesar de ser um software criado por um brasileiro, os nomes dos compostos estão exibidos em inglês, mas é possível fazer a busca com base na fórmula do composto ou pelo seu número CAS, como mostra a figura abaixo.

Figura 6: Menu de seleção de compostos no DWSIM.

Fonte: Autor (2025)

Com o(s) composto(s) de trabalho selecionados, ao dar prosseguimento no assistente, foi necessário selecionar e adicionar um dos pacotes de propriedades disponíveis no simulador. Para o exercício que está sendo trabalhado, foi escolhido o modelo de Peng-Robinson. Como mostra a Figura 7:

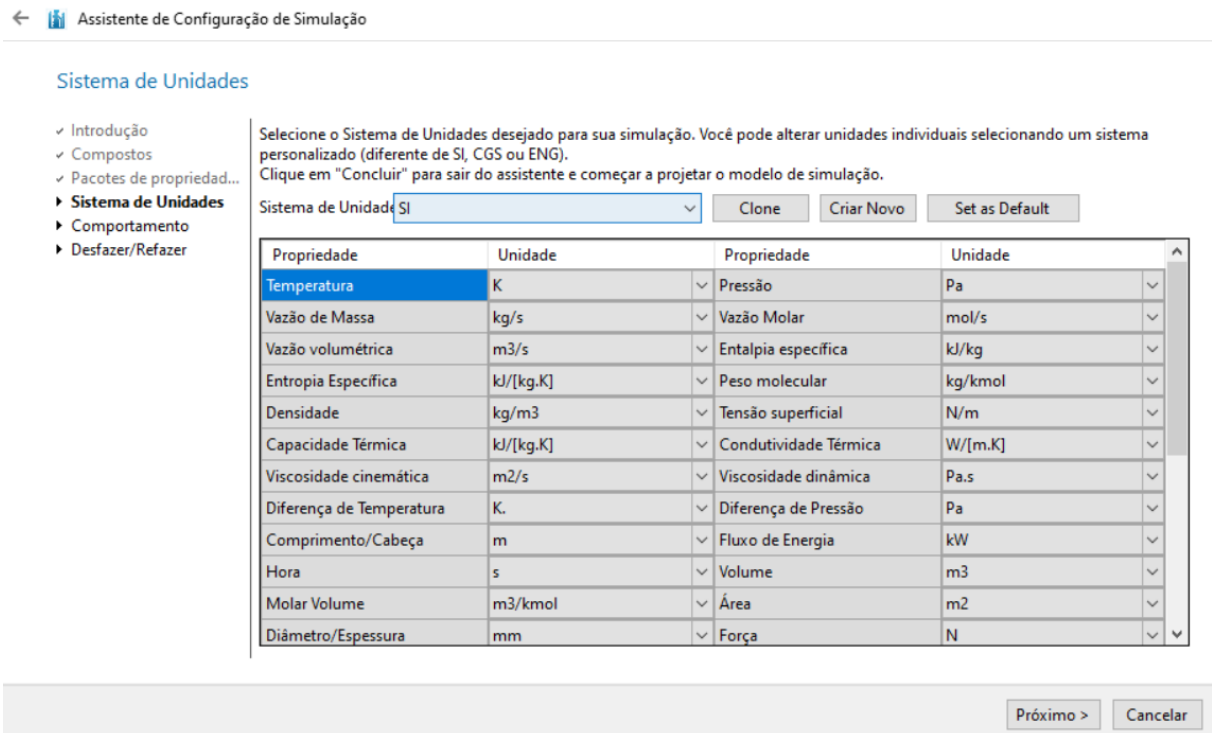
Figura 7: Menu de seleção de pacote de propriedades no DWSIM.



Fonte: Autor (2025)

Após o pacote de propriedades, o software solicita ao usuário que escolha o sistema de unidades que deseja utilizar na simulação, seguindo as unidades fornecidas no exercício, foi escolhido o sistema internacional (SI).

Figura 8: Menu de seleção de unidades.



Fonte: Autor (2025)

Nas páginas de Comportamento e Desfazer/Refazer, todas as opções foram mantidas da forma que foram exibidas com o início da simulação.

5.1.2.2 Início da simulação e configuração da corrente de entrada

Com a simulação configurada, o problema proposto foi esquematizado no software, para isso, foi adicionado ao simulador um Segmento de Tubo, disponível no menu lateral direito na aba de trocadores de pressão. Ao adicionar o segmento de tubo, automaticamente o DWSIM cria as correntes de entrada e saída conectadas ao objeto.

Para definir as propriedades da corrente de entrada, ao clicar na seta que estará denominada como “1”, um menu de configuração será aberto como mostra a figura:

Figura 9: Menu de propriedades de corrente.

Configurações do pacote de propriedades	
Pacote de propriedades	Peng-Robinson (PR) (1)
Dados de entrada	
Condições do fluxo	
Especificações do Flash	
Temperatura	313,15 K
Pressão	5,06625E+06 Pa
Fluxo de Massa	10,8203 kg/s
Fluxo Molar	117,492 mol/s
Fluxo Volumétrico	0,00377 m3/s
Entalpia específica	-1556,01 kJ/kg
Entropia Específica	-2,78715 kJ/[kg.K]
Vapor Phase Mol. Frac.	0

Fonte: Autor (2025)

A temperatura foi convertida de Celsius para Kelvin automaticamente pelo simulador,

ao inserir 40 na caixa de texto e à direita selecionar °C, o simulador alterou a unidade para K e fez a sua conversão.

O enunciado não fornece uma pressão de entrada, então o valor de 5 atm foi inserido da mesma forma que a temperatura e seu valor convertido para Pa. Como a queda de pressão calculada na resolução escrita foi superior a 1 atm, portanto uma pressão maior que 1 atm foi inserida para que a simulação fosse executada sem erros.

O último dado importante para a corrente de entrada nesta resolução é o Fluxo Volumétrico, como o enunciado do exercício não traz diretamente o valor da vazão, foi necessário realizar o cálculo utilizando a mesma fórmula da resolução escrita com base no perfil de velocidade determinado:

$$V = v_{med} \cdot A = v(\pi D^2/4) = (3m/s)[\pi(0,04m)^2/4] = 3,77 \cdot 10^{-3}m^3/s \quad (30)$$

Com isso, todos os dados necessários para a corrente de entrada foram definidos e foi necessário definir as especificações da tubulação de trabalho.

5.1.2.3 Configuração do tubo

Para configurar o Segmento de Tubo, ao clicar em cima dele, será aberto um menu semelhante ao da corrente de entrada.

Figura 10: Menu de características do tubo.

The image shows a software window titled "TUBO HORIZONTAL (Pipe Segment)". It is divided into several sections:

- General Info:**
 - Objeto: TUBO HORIZONTAL
 - Estado: Calculado (03/11/2025 21:51:10) with a green checkmark icon.
 - Vinculado a:
- Connections:**
 - Fluxo de entrada: ENTRADA (with a dropdown arrow, a yellow lightning bolt icon, and a blue cube icon).
 - Fluxo de Outlet: SAÍDA (with a dropdown arrow, a yellow lightning bolt icon, and a blue cube icon).
 - Fluxo de Energia: (with a dropdown arrow, a yellow lightning bolt icon, and a blue cube icon).
- Calculation Parameters:**
 - Tabs: Geral (selected), Perfil hidráulico, Thermal Profile.
 - Calculation mode: Specify Length/Hydraulic Profile (Default) (with a dropdown arrow).
 - Outlet temperature (spec): 298,15 K (with a dropdown arrow).
 - Outlet pressure (spec): 101325 Pa (with a dropdown arrow).
 - Pressure drop correlation: Beggs & Brill (with a dropdown arrow and an information icon).
 - Temp. error tolerance: 0,1 K. (with a dropdown arrow).
 - Pressure error tolerance: 1000 Pa (with a dropdown arrow).
 - Calculate equilibria at each X sections (with a spinner set to 1).
 - Calculate thermal balance with surroundings.
 - Include emulsion effect.
 - Slurry viscosity calculation: Disabled (with a dropdown arrow).
 - Pacote de propriedades: Peng-Robinson (PR) (1) (with a dropdown arrow and a gear icon).

Fonte: Autor (2025)

As opções disponíveis na primeira aba foram mantidas da forma que foram criadas, apenas mudando o nome do objeto para melhor visualização na simulação. As especificações do tubo estão localizadas na guia de “Perfil Hidráulico”, localizada no campo de “Calculation Parameters”.

Figura 11: Menu do perfil hidráulico do tubo.

Parâmetros de cálculo

Geral Perfil hidráulico Thermal Profile

Profile Sections View Profile Default Material and Diameters

▶ Segment	1
Fitting	Tubo Reto ▾
Amount	1
Sections	5
Material	Aço Bruto ▾
Rugosidade (m)	4,57E-05
Therm. Conduct. (W/[m.K])	T-Dep
Length (m)	70
Elevation (m)	0
External Diameter (mm)	50
Internal Diameter (mm)	40

Status: OK

Open Hydraulic Profile Editor in New Window

Fonte: Autor (2025)

Como o exercício não especifica o material do tubo, foi mantido o tubo de aço bruto. O comprimento do tubo (70 m) foi inserido no campo “Length” e sua elevação foi dada como 0 pois é um tubo horizontal. Para o diâmetro, o principal é definir o diâmetro interno do tubo, dado pelo enunciado de 4 cm ou 40 mm.

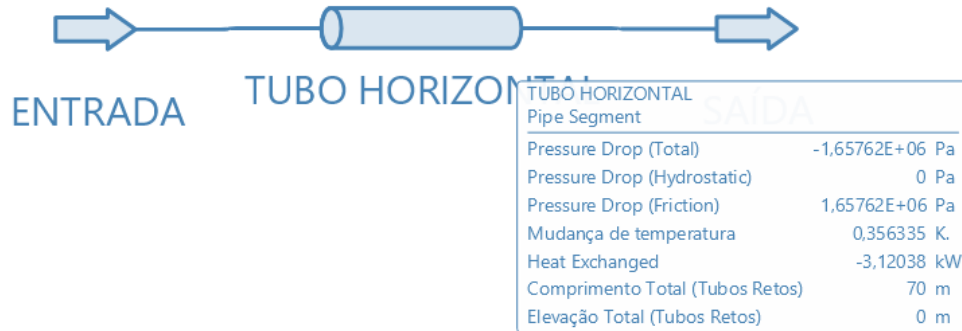
Após configurar o tubo, é necessário confirmar as alterações no símbolo de “check” disponível na parte inferior do menu.

5.1.2.4 Resolvendo a simulação e saída de dados

Com os parâmetros da corrente de entrada e do tubo configurados, basta clicar no botão “Resolver” disponível no menu superior do aplicativo que os cálculos serão realizados. Para

este problema, os resultados da simulação são:

Figura 12: Resultados da simulação de queda de pressão.



Fonte: DWSIM.

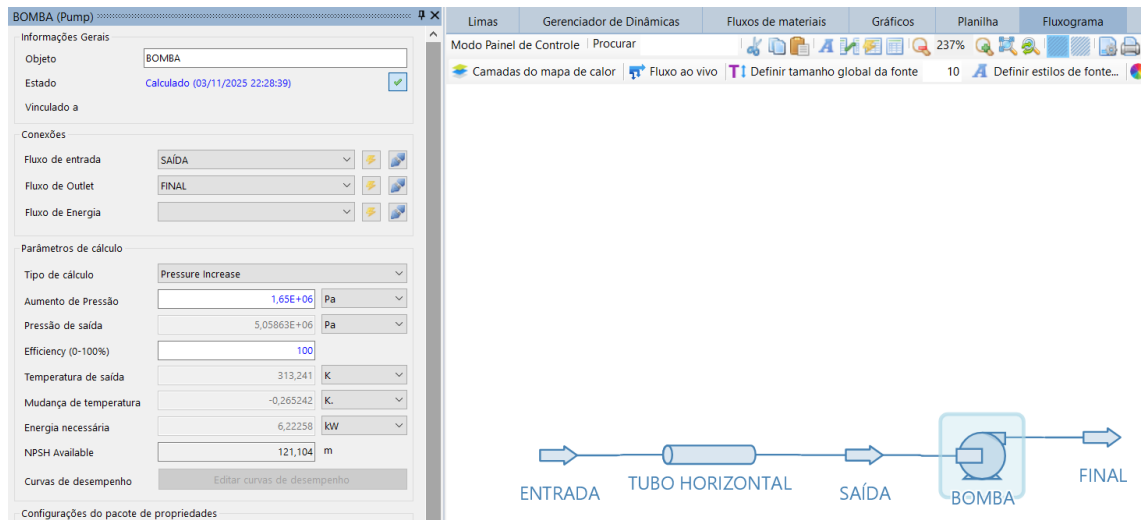
A queda de pressão pedida no enunciado do exercício está demonstrada no primeiro dado dos resultados “Pressure Drop (Total)”, como foi definido Pascal como unidade de medida de pressão, a saída mostra que a queda foi de $1,65 \times 10^6 \text{ Pa}$, o que corresponde a 1650 kPa.

5.1.2.5 Cálculo da potência útil de bombeamento

A potência de bombeamento necessária para manter o escoamento compensando a perda de pressão foi calculada a partir da inserção do componente Bomba, também localizado no menu lateral direito na aba de trocadores de pressão. Ao inserir a bomba, a corrente de saída do Segmento de Tubo foi conectada à bomba como corrente de entrada e a corrente de saída foi definida automaticamente pelo simulador.

Ao clicar na bomba, o menu de configuração da bomba foi aberto e nele inserido o aumento de pressão desejado, neste caso, o mesmo valor da queda de pressão calculado anteriormente.

Figura 13: Características da bomba



Fonte: Autor (2025)

Ao inserir o valor de aumento de pressão desejado, a potência da bomba é automaticamente calculada e mostrada no campo “Energia Necessária”. Como o exercício não especifica a eficiência da bomba, foi assumido o valor de 100% para realização dos cálculos.

5.1.3 Comparação de resultados

O exercício propõe o cálculo de diferença de pressão ao longo dos 70 m de comprimento do tubo e a potência útil de bombeamento necessária para manter o escoamento da glicerina, além de determinar o perfil de velocidade no escoamento. Além de fornecer duas situações com o mesmo tubo variando a inclinação em 15° para cima e para baixo para determinar o aumento ou queda da vazão a depender da situação.

O DWSIM não possui uma função específica para determinar a velocidade de escoamento, por isso, esse passo foi realizado replicando o método da resolução escrita.

O resultado obtido para diferença de pressão ao longo do tubo por meio da resolução escrita foi de 1.291 kPa enquanto por meio do DWSIM foi obtido o valor de 1.650 kPa, a diferença de, aproximadamente, 20% entre os resultados é explicada pelos métodos usados para cálculo, enquanto a resolução escrita utiliza a correlação de Darcy-Weisbach, o DWSIM utiliza a correlação de Beggs & Brill, uma correlação mais robusta e utilizada em escoamentos multifásicos. Embora o problema não envolva um escoamento bifásico, são oferecidas no simulador apenas correlações deste tipo, como Lockhart & Martinelli ou Petalas & Aziz.

Com relação à potência útil de bombeamento necessária para superar a queda de pressão no tubo, o resultado obtido na resolução escrita foi de 4,87 kW enquanto o DWSIM sugere 6,22 kW de potência. A diferença está atrelada à diferença de queda de pressão explicada anteriormente por conta da diferença das correlações utilizadas.

Para simular as inclinações do tubo é necessário calcular a elevação da ponta do tubo em metros para que o ângulo seja de 15° , para isso, o comprimento do tubo foi multiplicado pelo seno do ângulo desejado, obtendo uma inclinação de, aproximadamente, 18,12 m.

O de aumento da vazão é mostrado por similaridade com base na porcentagem de diminuição. Para a resolução escrita, o resultado foi de 5,6% e, para a resolução por meio do DWSIM, não houve diferença significativa para as inclinações. A ausência de diferença nas simulações com os tubos inclinados se deve ao fato da vazão ser uma variável fixa durante a simulação, não foi possível alterá-la para que fosse tratada como uma variável calculável.

5.2 EXEMPLO 8-2 - ÇENGEL & CIMBALA - MECÂNICA DOS FLUÍDOS

Este exemplo introduz um problema sobre escoamento de água em um tubo horizontal em estado permanente, com medidas no sistema da engenharia e pede ao estudante que faça o cálculo de perda de carga, queda de pressão e o requisito de potência de bomba para superar a queda de pressão. O enunciado é descrito abaixo:

A água a 40°F ($\rho = 62,42 \text{ lbm/ft}^3$ e $\mu = 1,038 \cdot 10^{-3} \text{ lbm/ft} \cdot \text{s}$) escoam em estado permanente através de um tubo horizontal com diâmetro de 0,12 in (= 0,010 ft) e 30 ft de comprimento a uma velocidade média de 3,0 ft/s (Fig. 8–18). Determine (a) a perda de carga, (b) a queda de pressão e (c) o requisito de potência de bombeamento para superar essa queda de pressão.

5.2.1 Resolução escrita

Hipóteses: **1.** O escoamento é permanente e incompressível **2.** Os efeitos da entrada são desprezíveis e, portanto, o escoamento é completamente desenvolvido **3.** O tubo não envolve nenhum componente tais como curvas, válvulas e conectores.

Propriedades: A densidade e a viscosidade dinâmica da água são dadas por $\rho = 62,42 \text{ lbm/ft}^3$ e $\mu = 1,038 \cdot 10^{-3} \text{ lbm/ft} \cdot \text{s}$, respectivamente.

(b) Em primeiro lugar, precisamos determinar o regime de escoamento. O número de Reynolds é:

$$Re = \frac{\rho V_{med} D}{\mu} = \frac{(62,42 \text{ lbm/ft}^3)(3 \text{ ft/s})(0,01 \text{ ft})}{1,038 \times 10^{-3} \text{ lbm/ft}\cdot\text{s}} = 1803 \quad (31)$$

Que é menor que 2.300. Assim, o escoamento é laminar. Então, o fator de atrito e a perda de carga tornam-se:

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64}{1803} = 0,0355$$

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V_{med}^2}{2g} = 0,0355 \frac{30 \text{ ft}}{0,01 \text{ ft}} \frac{(3 \text{ ft/s})^2}{2(32,2 \text{ ft/s}^2)} = 14,9 \text{ ft} \quad (32)$$

(b) Observando que o tubo é horizontal e que seu diâmetro é constante, a queda de pressão no tubo é totalmente devido às perdas por atrito e é equivalente à perda de pressão:

$$\Delta P = \Delta P_L = f \frac{L}{D} \frac{V_{med}^2}{2g} = 0,0355 \frac{30 \text{ ft}}{0,01 \text{ ft}} \frac{(62,42 \text{ lbm/ft}^3)(3 \text{ ft/s})^2}{2} \left(\frac{1 \text{ lbf}}{32,2 \text{ lbm/ft}\cdot\text{s}^2} \right) = 929 \text{ lbf/ft}^2 \quad (33)$$

(c) A vazão de volume e os requisitos de potência de bombeamento são:

$$V = V_{med} A_c = V_{med} \left(\frac{\pi D^2}{4} \right) = (3 \text{ ft/s}) \left(\frac{\pi (0,01 \text{ ft})^2}{4} \right) = 0,000236 \text{ ft}^3/\text{s}$$

$$W_{bomba} = V \Delta P = (0,000236 \text{ ft}^3/\text{s})(929 \text{ lbf/ft}^2) \left(\frac{1 \text{ W}}{0,737 \text{ lbf}\cdot\text{ft/s}} \right) = 0,30 \text{ W} \quad (34)$$

Assim, uma potência de entrada na quantidade de 0,30 W é necessária para superar as perdas por atrito no escoamento devido à viscosidade.

5.2.2 Resolução DWSIM

Para a resolver o problema proposto utilizando o simulador, novamente foi necessária a criação de uma simulação de processo químico conforme a realizada na resolução do Exemplo 8.1. Desta vez, o composto de trabalho é a água e para trabalhar com ela, foi selecionado o modelo de Steam Tables que é o mais adequado para simulações que contém somente água como composto.

Este exemplo também utiliza apenas os componentes de Segmento de Tubo e uma Bomba para determinação da potência útil necessária, as unidades de medida usadas estão no sistema de engenharia.

A simulação foi criada inserindo um segmento de tubo com uma corrente de entrada e uma de saída, posteriormente uma bomba foi ligada à corrente de saída seguindo a mesma metodologia do Exemplo 8.1 para simular a potência necessária para superar a queda de pressão ocasionada pelo tubo. As especificações da corrente de entrada estão demonstradas na figura abaixo:

Figura 14: Corrente de entrada do segundo problema proposto.

The screenshot shows the 'ENTRADA (Material Stream)' window with the following data:

Informações Gerais	
Objeto	ENTRADA
Estado	Calculado (03/11/2025 16:51:05)
Vinculado a	

Configurações do pacote de propriedades	
Pacote de propriedades	Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

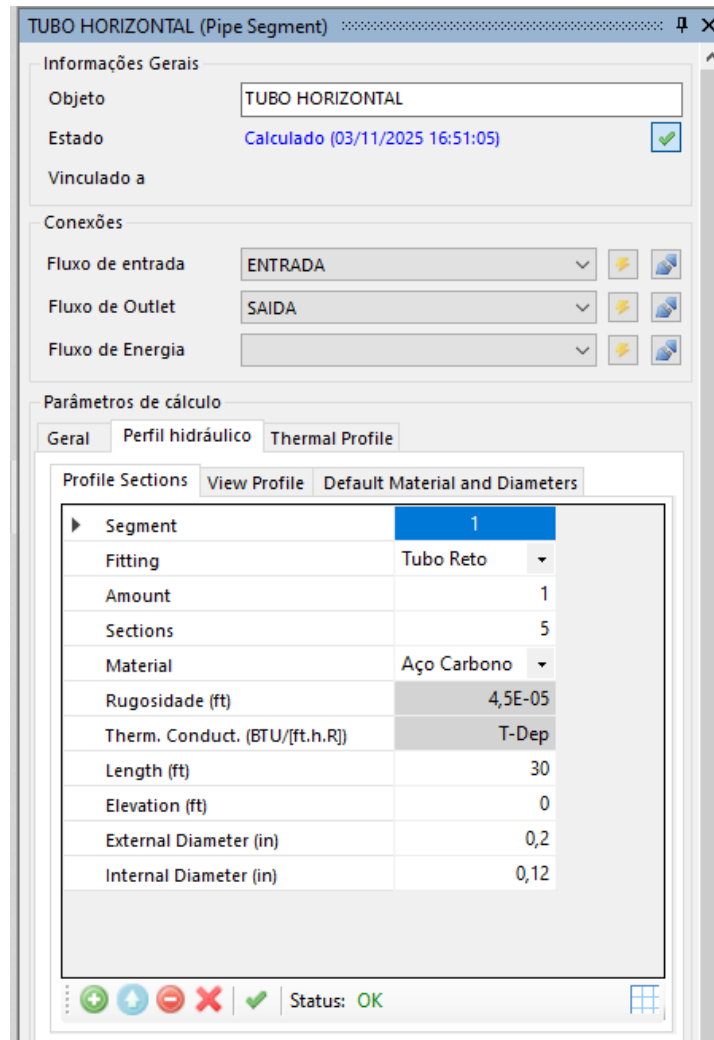
Dados de entrada	
Especificações do Flash: Temperature and Pressure (TP)	
Temperatura	40 F
Pressão	10581,1 lbf/ft2
Fluxo de Massa	52,8232 lbm/h
Fluxo Molar	2,93213 lbmol/h
Fluxo Volumétrico	0,000235 ft3/s
Entalpia específica	8,24904 BTU/lbm
Entropia Específica	0,0162029 BTU/[lbm.R]
Vapor Phase Mol. Frac.	0

Fonte: Autor (2025)

O segmento de tubo foi configurado de acordo com as especificações fornecidas no enunciado, o material do tubo não foi fornecido então foi assumido que se tratava de um tubo

de aço carbono, um tipo comum de tubo utilizado na indústria.

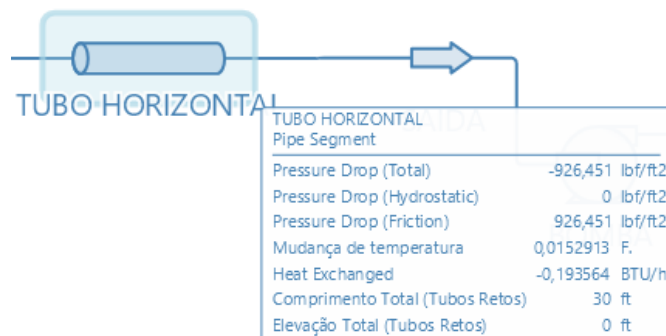
Figura 15: Configuração do tubo para o exemplo 8.2.



Fonte: Autor (2025)

Após solicitar a resolução da simulação, o aplicativo forneceu os seguintes dados:

Figura 16: Dados da simulação do Exemplo 8.2.



Fonte: Autor (2025)

Sabendo a queda de pressão que ocorre dentro do tubo, é possível calcular a potência útil da bomba inserindo uma bomba na corrente de saída e fornecendo o aumento de pressão que ela deve produzir. Dessa forma, temos as seguintes características da bomba:

Figura 17: Características da bomba para o Exemplo 8.2.

The screenshot shows a software window titled 'BOMBA (Pump)'. It is divided into three main sections: 'Informações Gerais', 'Conexões', and 'Parâmetros de cálculo'.

- Informações Gerais:**
 - Objeto: BOMBA
 - Estado: Calculado (03/11/2025 21:19:42)
 - Vinculado a:
- Conexões:**
 - Fluxo de entrada: SAIDA
 - Fluxo de Outlet: 4
 - Fluxo de Energia:
- Parâmetros de cálculo:**
 - Tipo de cálculo: Pressure Increase
 - Aumento de Pressão: 926,451 lbf/ft2
 - Pressão de saída: 10581,1 lbf/ft2
 - Efficiency (0-100%): 100
 - Temperatura de saída: 40,0154 F
 - Mudança de temperatura: 8,22429E-05 F
 - Energia necessária: 1,00723 BTU/h
 - NPSH Available: 154,296 Ft
 - Curvas de desempenho: Editar curvas de desempenho

Fonte: Autor (2025)

Como a energia necessária é baseada no aumento de pressão exigido, a informação é mostrada diretamente no menu da bomba acima. Novamente o enunciado não fornece o rendimento da bomba, portanto, foi assumido que a eficiência é de 100%.

5.2.3 Comparação de resultados

O exercício propõe ao aluno a determinação da perda de carga, queda de pressão e o requisito de potência da bomba para superar a queda de pressão.

A queda de pressão calculada por meio da resolução escrita foi de 929 lbf/ft^2 , já no DWSIM, o valor obtido foi de 926 lbf/ft^2 . Novamente houve a diferença nas correlações usadas para o cálculo entre as resoluções escrita e via DWSIM, porém devido ao fato de o composto de trabalho ser a água e o pacote de propriedades em uso é a tabela de vapor, a diferença não se mostrou significativa.

O DWSIM não é capaz de fornecer a perda de carga em metros, para calcular essa variável, foi feito o cálculo de maneira inversa ao da resolução escrita. Na resolução escrita a queda de pressão foi calculada em função da perda de carga ao multiplicar a perda de carga pelo peso específico da água, no caso da resolução por meio do DWSIM, o valor da queda de pressão foi dividido pelo peso específico da água para obter a perda de carga, o que resultou no valor de 14,83 m.

Por fim, no DWSIM, o cálculo da potência necessária de bombeamento para superar a queda de pressão foi feito automaticamente ao inserir uma bomba na corrente de saída do tubo e informando o aumento de pressão necessário. Ao inserir o valor de 926 lbf/ft^2 nas especificações da bomba, o valor da potência obtido foi de 1,00723 BTU/h, para realizar a conversão do valor de BTU/h para kW basta multiplicar o valor por 0,000293071, que resulta em 0,00029519 kW ou aproximadamente 0,0003 kW que é igual a 0,3 W.

Como a diferença entre os resultados obtidos para queda de pressão entre as resoluções era de 3 lbf/ft^2 , o resultado aproximado das potências foi o mesmo.

5.3 EXEMPLO 3.18 - FUNDAMENTALS OF CHEMICAL ENGINEERING THERMODYNAMICS - THEMIS MATSOUKAS

Este exercício traz um problema relacionado a uma corrente úmida com certa qualidade de vapor em um sistema fechado, buscando encontrar a Temperatura e a quantidade de trabalho PV nos casos pedidos . O enunciado do exercício é mostrado abaixo:

Um vapor úmido com título de 63,1% troca calor em um sistema fechado sob pressão constante $P = 6 \text{ bar}$. Determine a temperatura final e a quantidade de trabalho PV em cada um dos seguintes casos:

- a) O sistema é resfriado pela remoção de 1500 kJ/kg de calor.
- b) O sistema é aquecido pela adição de 1500 kJ/kg de calor.

5.3.1 Resolução escrita

Duas considerações devem ser feitas para esse exercício proposto, primeiro que o calor transferido é igual a variação de entalpia:

$$q = \Delta h = h_2 - h_1 \quad (35)$$

Segundo consideração é que o trabalho PV é calculado pela integral da pressão em relação a variação de volume, essa seria a segunda fórmula:

$$w = \int_{v_1}^{v_2} P dv \quad (36)$$

Porém com a Pressão constante ela sai da integral transformando a equação em:

$$w = P * (v_2 - v_1) \quad (37)$$

Para resolução do exercício também precisa ser utilizada uma tabela de propriedade da água (Tabelas de Vapor IAPWS-IF97).

Dados Iniciais (Tabelas de Vapor a P = 6 bar)	
Pressão	6 bar
Temperatura de Saturação	158,83 °C
Entalpia específica (Líquido)	670,38 KJ/Kg
Entalpia específica (Vapor)	2756,2 KJ/Kg
Volume específico (Líquido)	0,001101 m³/Kg
Volume específico (Vapor)	0,3156 m³/Kg

Fonte: (Brunetti, 2008)

Primeiro é necessário o cálculo da entalpia inicial, é utilizado o valor de qualidade de vapor igual 63,1%, presente no enunciado do exercício proposto. É utilizado a regra da alavanca para realizar esse cálculo.

$$h_{M\u00e9dio} = h_l * (1 - x) + h_v * x \quad (38)$$

Onde:

h_l = Entalpia espec\u00edfica (Liquido)

h_v = Entalpia espec\u00edfica (Vapor)

x = Qualidade do Vapor.

Portanto, utilizando os valores presentes na tabela acima para vapor a $P = 6$ bar.

$$h_{M\u00e9dio} = 670,38 \frac{KJ}{Kg} * (1 - 0,631) + 2756,2 \frac{KJ}{Kg} * 0,631 \quad (39)$$

$$h_{M\u00e9dio} = 1986,53 \frac{KJ}{Kg}$$

Para c\u00e1lculo de trabalho PV \u00e9 preciso saber o volume espec\u00edfico inicial, e para isso \u00e9 utilizado a mesma regra da alavanca que foi utilizado para c\u00e1lculo da entalpia espec\u00edfica, portanto:

$$v_{M\u00e9dio} = v_l * (1 - x) + v_v * x$$

$$v_{M\u00e9dio} = 0,001101 \frac{m^3}{Kg} * (1 - 0,631) + 0,3156 \frac{m^3}{Kg} * 0,631 \quad (40)$$

$$v_{M\u00e9dio} = 0,19955 \frac{m^3}{Kg}$$

(a) Remo\u00e7\u00e3o de 1500 KJ/Kg de calor

Utilizando equa\u00e7\u00e3o n\u00b0 \u00e9 poss\u00edvel encontrar o valor de entalpia final do sistema para tal condi\u00e7\u00e3o:

$$q = h_2 - h_1$$

$$h_2 = h_1 - q$$

$$h_2 = 1986,53 \frac{KJ}{Kg} - 1500 \frac{KJ}{Kg} \quad (41)$$

$$h_2 = 486,53 \frac{KJ}{Kg}$$

É preciso determinar a temperatura e o estado em que se encontra a saída do sistema. Observando que o valor de $h_2 < h_l$, podemos concluir que o sistema é um líquido subresfriado, logo utilizando a tabela pode-se achar a temperatura, porém não tem o valor correspondente para a entalpia encontrada, então é realizado a interpolação para descoberta do valor exato de temperatura de saída.

Valores Interpolados:

$$\begin{aligned}
 T &= 115 \text{ }^\circ\text{C} ; h_l = 483,0 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\
 T &= 120 \text{ }^\circ\text{C} ; h_l = 503,7 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\
 T_{interpolado} &= 115 + 5 * \frac{486,53 - 483}{503,7 - 483} \\
 T_{interpolado} &\approx 115,85 \text{ }^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{42}$$

Para determinar o trabalho PV precisa-se saber o valor do volume específico de saída, para isso usamos a relação que $v_{saída} \approx v_l(115,85 \text{ }^\circ\text{C})$, na Tabela de Vapor IAPWS-IF97, achamos o valor de $v_l(115,85 \text{ }^\circ\text{C}) \approx 0,001057 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}}$

Utiliza-se a equação n° para determinação do trabalho PV:

$$\begin{aligned}
 w &= P * (v_2 - v_1) \\
 w &= 600 \text{ kPa} * 0,001057 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} - 0,19955 \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} \\
 w &= -119,1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}
 \end{aligned} \tag{43}$$

(b) Adição de 1500 KJ/Kg de calor

Para a determinação de temperatura e trabalho PV com a adição de calor, utiliza-se o mesmo passo a passo que a resolução (a). Portanto primeiro de tudo é necessário o cálculo da entalpia específica final do sistema:

$$\begin{aligned}
 h_2 &= h_1 + q \\
 h_2 &= 1986,53 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 1500 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}
 \end{aligned} \tag{44}$$

$$h_2 = 3486,53 \frac{KJ}{Kg}$$

Levando em consideração que a entalpia de vapor saturado ser 2756,2 KJ/Kg, observa-se que o valor encontrado de $h_2 > h_{Vapor\ Saturado}$, logo o sistema se encontra como vapor superaquecido. Utilizando a tabela para vapor superaquecido é retirado os valores para realização da interpolação para encontrar o valor de temperatura de saída do sistema.

Valores interpolados:

$$\begin{aligned} T &= 500 \text{ } ^\circ C ; h_v = 3482,8 \frac{KJ}{Kg} \\ T &= 600 \text{ } ^\circ C ; h_v = 3702,4 \frac{KJ}{Kg} \end{aligned} \quad (45)$$

$$T_{interpolado} = 500 + 100 * \frac{3486,53 - 3482,8}{3702,4 - 3482,8}$$

$$T_{interpolado} \approx 501,7 \text{ } ^\circ C$$

Para determinação do trabalho PV também interpolamos o valor do volume específico e após é realizado o cálculo do valor de trabalho seguindo o passo do item (a).

$$\begin{aligned} T &= 500 \text{ } ^\circ C ; v_v = 0,5226 \frac{m^3}{Kg} \\ T &= 600 \text{ } ^\circ C ; v_v = 0,6136 \frac{m^3}{Kg} \end{aligned}$$

$$v_{interpolado} = 0,5226 + (0,6136 - 0,5226) * \frac{3486,53 - 3482,8}{3702,4 - 3482,8}$$

$$v_{interpolado} \approx 0,5241 \frac{m^3}{Kg} \quad (46)$$

Agora o cálculo do trabalho PV:

$$\begin{aligned} w &= P * (v_2 - v_1) \\ w &= 600 \text{ kPa} * 0,5241 \frac{m^3}{Kg} - 0,19955 \frac{m^3}{Kg} \end{aligned} \quad (47)$$

$$w = +194,73 \frac{KJ}{Kg}$$

5.3.2 Resolução DWSIM

Para a resolver o problema proposto utilizando o simulador DWSIM, novamente foi necessária a criação de uma simulação de processo químico conforme a realizada na resolução do Exemplo 8.1. Para esse exercício termodinâmico foi utilizado o pacote de propriedade Steam Tables e também foram utilizadas as unidades no sistema SI Engenharia.

5.3.2.1 Início da simulação e configuração da corrente

Figura 18: Configurações de propriedade corrente de entrada 2

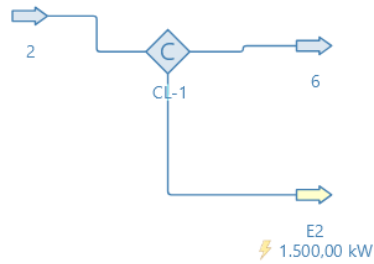
Property Package Settings	
Pacote de propriedades	Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)
Dados de entrada Resultados Anotações Dinâmica Tabelas flutuantes	
Condições do fluxo Quantidades Compostas	
Especificações do Flash	Pressure and Vapor Fraction (PVF)
Temperatura	158,832 C
Pressão	6 bar
Fluxo de Massa	1 kg/s
Fluxo Molar	55,5084 mol/s
Fluxo Volumétrico	0,199534 m3/s
Entalpia específica	1986,54 kJ/kg
Entropia Específica	4,97761 kJ/[kg.K]
Fração Mole de Fase de Vapor	0,631
Fase de fluxo de força	Global Definition
Não altere essa configuração a menos que você saiba o que está fazendo.	

Fonte: Autor (2025)

Para configuração da corrente de entrada na parte de especificação do Flash foi determinada a entrada de dados de “Pressure and Vapor Fraction (PVF)”. Na configuração foi colocado o valor de pressão à 6 bar e fração de mole de fase vapor em 0,631.

Com isso a corrente de entrada está totalmente configurada como proposto no exercício.

5.3.2.2 Resolução do item (a) adicionando um resfriador ao sistema

Figura 19: Fluxograma Exercício 3.18

Fonte: Autor (2025)

A imagem demonstra como ficou a representação final do sistema com a adição do resfriador na simulação, as configurações alteradas no resfriador foram:

Figura 20: Configurações de entrada aquecedor item (a) do exercício 3.18

Connections	
Fluxo de entrada	2
Fluxo de Outlet	6
Energy Stream (Primary)	E2
Energy Stream (Secondary)	
Calculation Parameters	
Tipo de cálculo	Heat Added/Removed
Pressure Drop	0 bar
Efficiency (0-100%)	100
Temperatura de saída	115,868 C
Mudança de temperatura	-42,9646 C.
Outlet Vapor Fraction	0
Aquecimento/Arrefecimento	1500 kW
Property Package Settings	
Pacote de propriedades	Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

Fonte: Autor (2025)

O tipo de cálculo que foi utilizado foi o de “Heat Added/Removed”, utilizando esse parâmetro foi adicionado o valor de 1500 kW na parte de Arrefecimento do sistema, valor determinado no enunciado do item (a).

Com isso já é possível achar a temperatura que se pede no item (a), deve-se somente olhar a corrente de saída 6, os valores obtidos nessa corrente são:

Figura 21: Corrente de saída item (a) do exercício 3.18

Configurações do pacote de propriedades

Pacote de propriedades: Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

Dados de entrada | Resultados | Anotações | Dinâmica | Tabelas flutuantes

Condições do fluxo | Quantidades Compostas

Especificações do Flash: Pressure and Enthalpy (PH)

Temperatura: 115,868 C

Pressão: 6 bar

Fluxo de Massa: 1 kg/s

Fluxo Molar: 55,5084 mol/s

Fluxo Volumétrico: 0,0010564 m3/s

Entalpia específica: 486,539 kJ/kg

Entropia Específica: 1,48263 kJ/[kg.K]

Fração Mole de Fase de Vapor: 0

Fase de fluxo de força: Global Definition

Não altere essa configuração a menos que você saiba o que está fazendo.

Fonte: Autor (2025)

A temperatura final no simulador ficou sendo 115,868 °C, ficando praticamente igual a temperatura calcula na parte escrita, que foi de $\approx 115,85$ °C.

Já na parte de realização do cálculo de trabalho PV, o simulador ajuda somente como se fosse uma calculadora para ajudar nos cálculos necessários. Podemos pegar os dados de entalpia presentes no simulador e achar o volume por meio das tabelas de vapor, assim realizando os cálculos com o mesmo passo a passo que a resolução escrita.

Figura 22: Tabela de propriedades do DWSIM

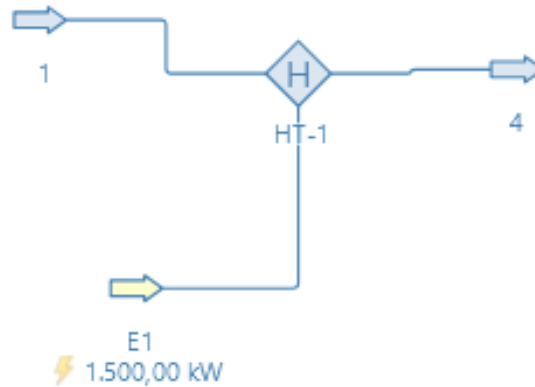
PROPERTIES TABLE			
2	Entalpia Específica (Mistura)	1986,54	kJ/kg
2	Entalpia Específica (Vapor)	2756,14	kJ/kg
2	Entalpia Específica (Líquido Geral)	670,501	kJ/kg
6	Entalpia Específica (Mistura)	486,539	kJ/kg
6	Entalpia Específica (Líquido Geral)	486,539	kJ/kg

Fonte: Autor (2025)

A imagem da tabela do DWSIM demonstra uma tabela de propriedades que é possível obter no simulador, e com a utilização desses dados obtemos o mesmo valor de trabalho encontrado na resolução escrita, pois os valores de entalpia são iguais.

5.3.2.3 Resolução do item (b) adicionando um resfriador ao sistema

Figura 23: Fluxograma Exercício 3.18. item (b)



Fonte: Autor (2025)

A imagem demonstra como ficou a representação final do sistema com a adição do resfriador na simulação, as configurações alteradas no aquecedor foram:

Figura 24: Corrente de saída item (b) do exercício 3.18

Conexões	
Fluxo de entrada	1
Fluxo de Outlet	4
Energy Stream (Primary)	E1
Energy Stream (Secondary)	
Parâmetros de cálculo	
Tipo de cálculo	Heat Added/Removed
Pressure Drop	0 bar
Efficiency (0-100%)	100
Temperatura de saída	501,49 C
Mudança de temperatura	342,658 C
Outlet Vapor Fraction	1
Aquecimento/Arrefecimento	1500 kW
Configurações do pacote de propriedades	
Pacote de propriedades	Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

Fonte: Autor (2025)

O tipo de cálculo que foi utilizado foi o de “Heat Added/Removed”, utilizando esse parâmetro foi adicionado o valor de 1500 kW na parte de Aquecimento do sistema, valor determinado no enunciado do item (b).

Com isso já é possível achar a temperatura que se pede no item (b):

Figura 25 Configurações de saída aquecedor item (b) do exercício 3.18

Property Package Settings

Pacote de propriedades: Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

Dados de entrada | Resultados | Anotações | Dinâmica | Tabelas flutuantes

Condições do fluxo | Quantidades Compostas

Especificações do Flash: Pressure and Enthalpy (PH)

Temperatura: 501,49 C

Pressão: 6 bar

Fluxo de Massa: 1 kg/s

Fluxo Molar: 55,5084 mol/s

Fluxo Volumétrico: 0,593164 m³/s

Entalpia específica: 3486,54 kJ/kg

Entropia Específica: 8,00806 kJ/[kg.K]

Fração Mole de Fase de Vapor: 1

Fase de fluxo de força: Global Definition

Não altere essa configuração a menos que você saiba o que está fazendo.

Fonte: Autor (2025)

A temperatura final no simulador ficou sendo 501,49 °C, ficando praticamente igual à temperatura calculada na parte escrita, que foi de $\approx 501,7$ °C.

Novamente para a parte de realização do cálculo de trabalho PV, o simulador nos ajuda somente como se fosse uma calculadora para ajudar nos cálculos necessários. Podemos pegar os dados de entalpia presentes no simulador e achar o volume por meio das tabelas de vapor, assim realizando os cálculos com o mesmo passo a passo que a resolução escrita.

Figura 26: Tabela de propriedades do DWSIM

PROPERTIES TABLE			
1	Entalpia Específica (Mistura)	1986,54	kJ/kg
1	Entalpia Específica (Vapor)	2756,14	kJ/kg
1	Entalpia Específica (Líquido Geral)	670,501	kJ/kg
4	Entalpia Específica (Vapor)	3486,54	kJ/kg

Fonte: Autor (2025)

Como na parte do item (a), a imagem acima mostra as propriedades que são utilizadas para cálculo do valor de trabalho de PV. O valor de trabalho dá o resultado igual ao obtido na resolução escrita.

5.3.3 Comparação de resultados

O exercício havia proposto a determinação da temperatura e trabalho PV para duas condições distintas, a primeira condição era para um arrefecimento de 1500 kW de calor e a segunda condição era para um aquecimento de 1500 kW, a resolução escrita acaba sendo um meio mais trabalhoso e complicado que a resolução por meio do DWSIM, porém ambas as resoluções chegaram praticamente na mesma resposta para o exercício, algo que o exercício demonstra é que para resolução por meio do DWSIM ainda é necessário o conhecimento em termodinâmica, pois para resolução para sistema fechados ainda é preciso realizar alguns cálculos de forma “manual” e não automatizado como demonstrado no simulador.

Os valores de entalpia deram aproximadamente iguais, portanto o trabalho para ambos os meios acaba sendo o mesmo resultado, já a parte da temperatura demonstra ainda mais que o simulador e a resolução escrita estão totalmente em acordo, como pode ser visto abaixo:

Quadro 1: Tabela de propriedades do DWSIM

T° na resolução escrita	T° no Simulador
501,7	501,49
115,85	115,868

Fonte: Brunetti (2008)

O que demonstra uma ótima recomendação para uso do DWSIM para resolução desse tipo de problemas relacionados à termodinâmica para engenharia química.

5.4 EXERCICIO 3.35 - FUNDAMENTALS OF CHEMICAL ENGINEERING THERMODYNAMICS - THEMIS MATSOUKAS

Este exercício tem como foco um sistema fechado, com pressão constante, que possui um aquecimento em seu fluido, que no exercício é a água, e com os dados presentes no enunciado ele busca achar informações como quantidade de calor necessária para uma qualidade de valor determinada e também temperatura final de acordo com uma quantidade de calor colocada no sistema. O enunciado do exercício é mostrado abaixo:

Água a 20 °C e 30 bar é aquecida em um sistema fechado sob pressão constante. a) Se a qualidade no estado final for de 75%, qual é a quantidade de calor? b) Se a quantidade de calor

for de 2000 kJ/kg, qual é a temperatura final? c) Se a quantidade de calor for de 3000 kJ/kg, qual é a temperatura final?

5.4.1 Resolução escrita

Como é um sistema fechado deve ser feita para esse exercício a mesma consideração que no primeiro exercício sobre termodinâmica, que o calor transferido é igual a variação de entalpia:

$$q = \Delta h = h_2 - h_1 \quad (48)$$

Primeiro passo deve-se determinar qual é a entalpia inicial do sistema para essa temperatura e pressão, analisando as tabelas de vapor observa-se que a temperatura de saturação da água na pressão de 30 bar é de aproximadamente 233,85 °C, portanto com a temperatura dada no enunciado de 20°C pode se afirmar que o sistema está na região de líquido subresfriado, isso implica que o $h_{\text{líquido saturado}} \approx h_{\text{inicial}}$.

Utilizando essa relação é encontrado o valor de $h_{\text{inicial}} = 83,91 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$.

Para resolução do exercício também precisa ser utilizada uma tabela de propriedade da água (Tabelas de Vapor IAPWS-IF97).

Quadro 2: Tabela de propriedades do DWSIM

Dados Iniciais (Tabelas de Vapor a P = 30 bar)	
Pressão	30 bar
Temperatura de Saturação	233,85 °C
Entalpia específica (Líquido)	1008,3 KJ/Kg
Entalpia específica (Vapor)	2803,0 KJ/Kg
Entalpia de Vaporização	1794,7 KJ/Kg

Fonte: Brunetti (2008)

Com todos os dados obtidos, fica possível dar continuidade na resolução dos exercícios propostos pelo enunciado:

(a) Nessa parte do exercício o enunciado nos dá o valor da qualidade do vapor que é igual

a 75%. Com isso podemos utilizar a regra da alavanca para determinar a entalpia específica final do nosso sistema.

$$\begin{aligned}
 h_{final} &= h_l * (1 - x) + h_v * x \\
 h_{final} &= 1008,3 \frac{KJ}{Kg} * (1 - 0,75) + 2803 \frac{KJ}{Kg} * 0,75 \\
 h_{final} &= 2354,33 \frac{KJ}{Kg}
 \end{aligned} \tag{49}$$

Agora utilizando a condição apresentada para sistemas fechado, temos:

$$\begin{aligned}
 q &= h_2 - h_1 \\
 q &= 2354,33 \frac{KJ}{Kg} - 83,91 \frac{KJ}{Kg} \\
 q &= 2270,42 \frac{KJ}{Kg}
 \end{aligned} \tag{50}$$

(b) Na segunda parte do exercício é dada uma certa quantidade de calor e é medida a temperatura final em que o sistema vai se encontrar após receber essa quantidade de calor.

Para calcular a temperatura do sistema primeiro deve-se calcular o novo valor da entalpia final. Para isso temos que:

$$\begin{aligned}
 h_2 &= h_1 + q \\
 h_2 &= 83,91 \frac{KJ}{Kg} + 2000 \frac{KJ}{Kg} \\
 h_2 &= 2083,91 \frac{KJ}{Kg}
 \end{aligned} \tag{51}$$

O valor encontrado está entre os valores das entalpias de saturação líquido e vapor, respectivamente, $h_{l\ sat} = 1008,3 \frac{KJ}{Kg}$ e $h_{v\ sat} = 2803,0 \frac{KJ}{Kg}$.

Portanto o sistema está composto por duas fases, entrando na fase de equilíbrio líquido-vapor. Com isso é determinado que a temperatura do sistema é igual a temperatura de saturação, logo o valor correspondente fica sendo como:

$$T_{sat} = T_2 = 233,85^\circ C$$

(c) Para finalizar o exercício 3.35, o enunciado fornece uma outra quantidade de calor para

o sistema e novamente nos pede para calcular a temperatura final em que se encontra o meio.

O método de resolução fica exatamente igual ao passo (b):

$$\begin{aligned}
 h_3 &= h_1 + q \\
 h_3 &= 83,91 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 3000 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\
 h_3 &= 3083,91 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}
 \end{aligned} \tag{52}$$

Desta vez, percebe-se que o valor obtido de entalpia acaba superando o valor da entalpia de vapor saturado, o que nós leva a determinar que o processo está no estado de vapor superaquecido, logo usaremos dados da tabela de vapor superaquecido.

Como não temos os dados exatos teremos que realizar uma interpolação para chegar na temperatura que está sendo buscada:

Valores Interpolados:

$$\begin{aligned}
 &\text{a } 30 \text{ bar}; T = 300 \text{ }^\circ\text{C}; h_v = 2994,3 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\
 &\text{a } 30 \text{ bar}; T = 350 \text{ }^\circ\text{C}; h_v = 3116,1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} \\
 T_{\text{interpolado}} &= 300 + 50 * \frac{3083,91 - 2994,3}{3116,1 - 2994,3} \\
 T_{\text{interpolado}} &\approx 336,79^\circ\text{C}
 \end{aligned} \tag{53}$$

5.4.2 Resolução DWSIM

Para a resolver o problema proposto utilizando o simulador DWSIM, novamente foi necessária a criação de uma simulação de processo químico conforme a realizada na resolução do Exemplo 3.18. Para esse exercício termodinâmico também foi utilizado o pacote de propriedade Steam Tables e também foram utilizadas as unidades no sistema SI Engenharia.

5.4.2.1 Início da simulação e configuração da corrente de entrada

Figura 27: Configuração de Entrada exercício 3.35

Configurações do pacote de propriedades

Pacote de propriedades: Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

Dados de entrada | Resultados | Anotações | Dinâmica | Tabelas flutuantes

Condições do fluxo | Quantidades Compostas

Especificações do Flash: Temperature and Pressure (TP)

Temperatura: 20 C

Pressão: 30 bar

Fluxo de Massa: 1 kg/s

Fluxo Molar: 55,5084 mol/s

Fluxo Volumétrico: 0,00100047 m³/s

Entalpia específica: 86,7374 kJ/kg

Entropia Específica: 0,295877 kJ/(kg.K)

Fração Mole de Fase de Vapor: 0

Fase de fluxo de força: Global Definition

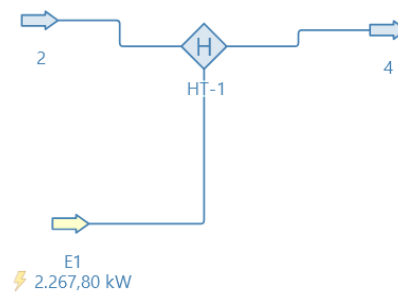
Não altere essa configuração a menos que você saiba o que está fazendo.

Fonte: Autor (2025)

Para configuração da corrente de entrada na parte de especificação do Flash foi determinada a entrada de dados de “Temperature and Pressure (TP)”. Na configuração foi colocado o valor de pressão a 30 bar e temperatura a 20°C.

Com isso a corrente de entrada está totalmente configurada como proposto no exercício.

5.4.2.2 Resolução do item (a) adicionando um aquecedor no sistema para ter 75% de qualidade de vapor

Figura 28: Fluxograma Exercício 3.35. item (a)

Fonte: Autor (2025)

A imagem demonstra como ficou a representação final do sistema com a adição do aquecedor na simulação, as configurações alteradas no aquecedor foram:

Figura 29: Corrente de entrada do aquecedor do exercício 3.35 - item (a)

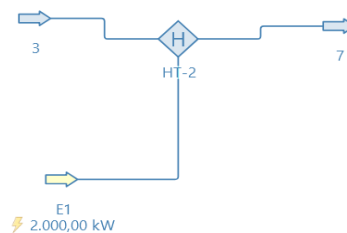
Connections	
Fluxo de entrada	2
Fluxo de Outlet	4
Energy Stream (Primary)	E1
Energy Stream (Secondary)	
Calculation Parameters	
Tipo de cálculo	Outlet Vapor Mole Fraction
Pressure Drop	0 bar
Efficiency (0-100%)	100
Temperatura de saída	233,858 C
Mudança de temperatura	213,858 C
Outlet Vapor Fraction	0,75
Aquecimento/Arrefecimento	2267,8 kW
Property Package Settings	
Pacote de propriedades	Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

Fonte: Autor (2025)

Para o tipo de cálculo do aquecedor foi adotado a escolha de “Outlet Vapor Mole Fraction”, foi inserido para que o valor de qualidade de vapor na saída fosse igual a 75%, de acordo com o que foi passado no enunciado do exercício.

Logo abaixo do valor de fração de vapor podemos ver a quantidade de calor que foi necessária para que tivéssemos essa qualidade, o valor encontrado foi de 2267,8 KW.

5.4.2.3 Resolução do item (b) mantendo um aquecedor no sistema com 2000 kw para determinar a temperatura

Figura 30: Fluxograma Exercício 3.35 - item (b)

Fonte: Autor (2025)

A imagem demonstra como ficou a representação final do sistema com o aquecedor adicionando o calor exigido pelo item (b), a configuração do aquecedor ficou como:

Figura 31: Corrente de entrada do aquecedor do exercício 3.35 - item (b)

Connections	
Fluxo de entrada	3
Fluxo de Outlet	7
Energy Stream (Primary)	E1
Energy Stream (Secondary)	

Calculation Parameters	
Tipo de cálculo	Heat Added/Removed
Pressure Drop	0 bar
Efficiency (0-100%)	100
Temperatura de saída	233,858 C
Mudança de temperatura	213,858 C
Outlet Vapor Fraction	0,600797
Aquecimento/Arrefecimento	2000 kW

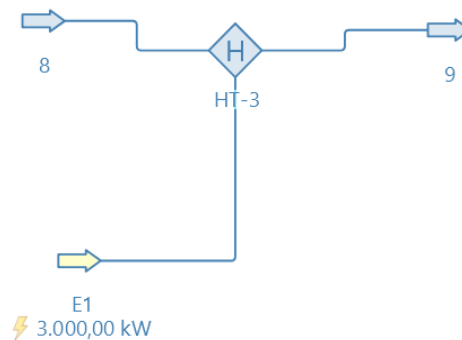
Property Package Settings	
Pacote de propriedades	Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

Fonte: Autor (2025)

Para o tipo de cálculo do aquecedor foi adotado a escolha de “Heat Added/Removed”, foi inserido para que o aquecimento do sistema fosse igual a 2000 KW, de acordo com o que foi passado no enunciado do exercício.

A temperatura de saída do aquecedor obtida foi de 233,858°C com essa entrada de calor no sistema.

5.4.2.4 Resolução do item (c) adicionando um aquecedor no sistema de 3000 kw para determinar a temperatura

Figura 32: Fluxograma Exercício 3.35 - item (c)

Fonte: Autor (2025)

A imagem demonstra como ficou a representação final do sistema com o aquecedor adicionando o calor exigido pelo item (c), a configuração do aquecedor ficou como:

Figura 33: Corrente de entrada do aquecedor do exercício 3.35 - item (c)

Conexões	
Fluxo de entrada	8
Fluxo de Outlet	9
Energy Stream (Primary)	E1
Energy Stream (Secondary)	
Parâmetros de cálculo	
Tipo de cálculo	Heat Added/Removed
Pressure Drop	0 bar
Efficiency (0-100%)	100
Temperatura de saída	337,624 C
Mudança de temperatura	317,624 C
Outlet Vapor Fraction	1
Aquecimento/Arrefecimento	3000 kW
Configurações do pacote de propriedades	
Pacote de propriedades	Steam Tables (IAPWS-IF97) (1)

Fonte: Autor (2025)

Para o tipo de cálculo do aquecedor foi adotado a escolha de “Heat Added/Removed”, foi inserido para que o aquecimento do sistema fosse igual a 3000 KW, de acordo com o que foi passado no enunciado do exercício.

A temperatura de saída do aquecedor obtida foi de 337,624°C com essa entrada de calor no sistema.

5.4.3 Comparação de resultados

O exercício tinha como objetivo três pontos importantes, o primeiro deles era determinar uma certa entrada de calor com base na quantidade de qualidade de vapor que nos era dado, segundo e terceiro ponto era a determinação da temperatura final do sistema com base na entrada de calor por parte do aquecedor para o sistema.

O exercício foi facilmente realizado pelo aplicativo DWSIM em questão de minutos com apenas a adição de um aquecedor e algumas mudanças de características do aquecedor em si.

Outro ponto importante foi a precisão em que os resultados, que a resolução escrita e a resolução por meio do DWSIM obtiveram, praticamente tiveram os mesmo resultados, o que resulta no resultado esperado pelo grupo na parte de exercícios termodinâmicos para engenharia

química.

Quadro 3: Tabela de propriedades do DWSIM

Alternativa	T° na resolução escrita	T° no Simulador
Item (b)	233,85	233,858
Item (c)	336,79	337,624

Fonte: Brunetti (2008)

6 TRABALHOS FUTUROS

Por ter se mostrado um software promissor na resolução de exercícios e montagem da esquematização de processos industriais, o DWSIM merece maior atenção em um trabalho futuro mais robusto, explorando suas funcionalidades em problemas mais complexos que envolvam termodinâmica e processos químicos.

Um possível trabalho que pode ser desenvolvido a partir deste apresentado, é a elaboração de um processo químico industrial que envolve diferentes componentes do simulador, como reatores, misturadores, aquecedores, etc, bem como a resolução de exercícios de Mecânica dos fluídos que abordem situações onde o regime de escoamento é turbulento.

7 CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos em duas diferentes simulações de Mecânica dos Flúidos, o DWSIM, por ser um simulador de processos químicos, apresentou resultados divergentes da resolução fornecida pelo autor do livro, uma vez que as correlações disponíveis para os cálculos são somente para correntes multifásicas e, em ambos os exercícios tratados bem como na maior parte dos exercícios vistos nos livros dessa disciplina, os problemas são baseados em um único fluido.

Apesar dos resultados divergentes nos dois casos, os mesmos ainda são satisfatórios por demonstrarem uma aplicabilidade do simulador para resoluções de queda de pressão e cálculo simples para a potência útil de bombas. Com relação ao problema proposto de inclinação dos tubos, é mostrado a limitação do software para cálculo da vazão ao utilizar somente um segmento de tubo para a resolução do processo.

Já no campo de Termodinâmica, o DWSIM demonstrou resultados satisfatórios, sendo coerente e preciso com os resultados obtidos na resolução escrita, por abranger de forma mais otimizada processos mais complexos. Em ambos os exemplos apresentados neste trabalho, o DWSIM atingiu as expectativas que eram esperadas, além de se demonstrar preciso, o simulador mostrou que possui diversas informações úteis para os alunos do ramo de engenharia química, além de ser um aplicativo que poupa tempo e nos possibilidade realizar vários testes em nossos respectivos exercícios.

O aplicativo possui diversas funcionalidades além das quais foram apresentadas nesse trabalho de conclusão de curso, nas quais ainda muitas podem ser exploradas pelos alunos, portanto ela acaba se demonstrando de excelente uso acadêmico e com altíssima importância para nosso escopo industrial e profissional.

REFERÊNCIAS

- BASTOS, Julia Zanetti de Oliveira. **Estudo da interface entre simulação no dwsim e experimento de perda de carga em tubulações**. 2021. 99 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2021.
- BEGGS, H. D.; BRILL, J.P. **A Study of Two-Phase Flow in Inclined Pipes**. Journal Of Petroleum Technology., p. 607-617. 30 abr. 1973. doi: <https://doi.org/10.2118/4007-PA>
- BRUNETTI, Franco. **Mecânica dos Fluidos**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos fluidos: fundamentos e aplicações**. Tradução da 3. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- FOX, Robert W. et al. **Introdução à mecânica dos fluidos**. Tradução da 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.
- GUEDES, THAMIRES A. L. **Modelagem Do Escoamento Em Linhas De Produção Offshore Com Garantia De Escoamento**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Química. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
- IHS ENERGY. **Beggs and Brill Correlation**. In: Pressure Loss Calculations - Upstream Oil & Gas, 2020. Disponível em: https://www.ihsenergy.ca/support/documentation_ca/Harmony/content/html_files/reference_material/calculations_and_correlations/pressure_loss_calculations.htm#Beggs_and_Brill_Correlation. Acesso em: 10 nov. 2025.
- KORETSKY, Milo D. **Termodinâmica para engenharia química**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- MARCUCCI, N. P. **Desenvolvimento do Modelo de Misturador para o Simulador de Processos DWSIM Utilizando a Linguagem Python**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Alimentos e Industrial Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2020.
- MATSOUKAS, Themis. **Fundamentals of chemical engineering Thermodynamics**. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2012.
- MEDEIROS, D. W. O. de. **DWSIM- Open Source Chemical Process Simulator User Guide**. 2022. Disponível em: https://github.com/DanWBR/dwsim/blob/windows/PlatformFiles/Common/docs/User_Guide.pdf. Acesso em: 10 nov. 2025.
- SEIDER, Warren D. et al. **Product and process design principles: synthesis, analysis and design**. 3. ed. Hoboken: Wiley, 2010.
- SHOHAM, O. et al. **Multiphase Flow in Pipelines**. Tulsa: PennWell Books, 2006.
- WHITE, Frank M. **Mecânica dos fluidos**. Tradução da 8. ed. Porto Alegre: McGraw-Hill Education, 2018.