



## TRANSFERÊNCIA DE MASSA POR DIFUSÃO EM VOLUME EXPANSIVO: UM ESTUDO COM O COMSOL MULTIPHYSICS

Victor Wojdylo Machado<sup>1</sup>

Maria Julia Valle Silva<sup>2</sup>

Érickson de Lima<sup>3</sup>

Marco Antonio Cardoso de Souza<sup>4</sup>

**Resumo:** Este trabalho apresenta um estudo computacional sobre a transferência de massa por difusão em volume expansivo, utilizando o software COMSOL Multiphysics. A partir da construção de um modelo bidimensional acoplado entre escoamento laminar e transporte de espécies diluídas, investigou-se a interação entre os mecanismos de convecção e difusão na dispersão de uma substância química em um fluido em movimento. A simulação permitiu visualizar o comportamento do rastro de concentração, evidenciando o papel dominante da convecção na direção do escoamento e da difusão no alargamento transversal do perfil. Os resultados corroboram a importância da modelagem numérica como ferramenta didática e técnica para análise de fenômenos complexos de transporte, oferecendo subsídios para o entendimento e otimização de sistemas de engenharia.

**Palavras-chave:** Transferência de massa; Convecção; Difusão; Modelagem computacional.

**Abstract:** This work presents a computational study on mass transfer by diffusion in an expansive volume, using COMSOL Multiphysics software. Based on a two dimensional model coupling laminar flow and transport of diluted species, the interaction between convection and diffusion mechanisms in the dispersion of a chemical substance in a moving fluid was investigated. The simulation enabled the visualization of the concentration plume behavior, highlighting the dominant role of convection along the flow direction and diffusion in the transversal broadening of the profile. The results reinforce the importance of numerical modeling as an educational and technical tool for analyzing complex transport phenomena, providing support for the understanding and optimization of engineering systems.

**Key-words:** Mass transfer; Convection; Diffusion; Computational modeling.

### 1. INTRODUÇÃO

A transferência de massa é um dos pilares da engenharia química, essencial para o entendimento e o projeto de sistemas de separação, reatores, processos

---

<sup>1</sup> Graduanda do curso de Engenharia Química da UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <victorwojdylo@outlook.com>.

<sup>2</sup> Graduanda do curso de Engenharia Química da UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <mariajuliavallesilva@outlook.com>.

<sup>3</sup> Professor do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <ericksson.lima@unifateb.edu.br>

<sup>4</sup> Professor do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <marco.souza@unifateb.edu.br>



ambientais e diversas operações unitárias. Entre os mecanismos de transporte, destacam-se a difusão e a convecção, presentes em grande parte dos processos industriais e responsáveis por definir a taxa e a eficiência do movimento de espécies químicas (GEANKOPLIS, 2003; INCROPERA et al., 2017).

Diante da complexidade que surge quando ambos os fenômenos ocorrem simultaneamente, a modelagem computacional se apresenta como uma ferramenta valiosa, permitindo a análise detalhada do transporte de massa em condições realistas. Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo desenvolver e analisar um modelo bidimensional para estudar a difusão em um sistema com escoamento laminar, visando compreender de forma visual e quantitativa a dinâmica do transporte em aplicações de engenharia.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. OBJETIVOS

#### 2.1.1. Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver uma modelagem computacional, por meio do software COMSOL Multiphysics, para analisar os fenômenos de transferência de massa por difusão e convecção em um volume expansivo com escoamento laminar, visando compreender a dispersão de uma espécie química diluída em um fluido em movimento.

#### 2.1.2. Objetivos Específicos

- Simular o comportamento da difusão e da convecção de uma substância química utilizando os módulos Laminar Flow e Transport of Diluted Species do COMSOL Multiphysics®;
- Aplicar condições de contorno realistas e propriedades físico-químicas obtidas na literatura técnica;
- Analisar o perfil de concentração da espécie diluída ao longo do domínio, identificando os efeitos da interação entre convecção e difusão;
- Visualizar a evolução espacial da dispersão da substância química, avaliando a



# EPIC 2025

XII ENCONTRO DE PESQUISA, XVI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E  
II ENCONTRO DE ENSINO E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA



influência da geometria e do campo de velocidades;

- Validar qualitativamente os resultados com base nos princípios teóricos da transferência de massa presentes na literatura científica.

## 2.2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A transferência de massa é um fenômeno físico que descreve o transporte de espécies químicas em função de gradientes de concentração e/ou movimento do fluido. Entre os mecanismos fundamentais, destacam-se a difusão molecular, explicada pela Primeira Lei de Fick, e a convecção mássica, resultante do movimento de um fluido em regime natural ou forçado (GEANKOPLIS, 2003; INCROPERA et al., 2017). Na difusão, as moléculas se deslocam espontaneamente de regiões de maior concentração para menor concentração, enquanto na convecção o transporte ocorre devido ao escoamento, o que torna esse processo dominante em sistemas contínuos.

Quando esses mecanismos atuam de forma simultânea, a análise do transporte de massa torna-se mais complexa, pois o arraste do fluido e o espalhamento radial interagem continuamente (WELTY et al., 2008). Para descrever essa interação em geometrias reais e sob diferentes condições de contorno, métodos analíticos muitas vezes são insuficientes. Nesse cenário, a modelagem computacional baseada em métodos numéricos, como o de elementos finitos, tem se consolidado como uma ferramenta essencial (CHAURASIA, 2021). Estudos recentes mostram a relevância desse recurso na análise de fenômenos acoplados: Silva e Pereira (2021) evidenciaram como a combinação de convecção e difusão influencia a distribuição de concentrações em escoamentos internos, enquanto Li et al. (2020) analisaram o transporte de poluentes em meios porosos com fluxo convectivo predominante.

Assim, a fundamentação teórica estabelece que a dispersão de espécies químicas em sistemas fluidodinâmicos resulta da interação entre convecção e difusão, fenômeno que pode ser representado com maior precisão por meio da simulação computacional. Essa base conceitual é diretamente aplicada neste trabalho, que utiliza modelagem numérica para compreender a dinâmica do



transporte em um sistema bidimensional com escoamento laminar, em linha com as condições avaliadas na seção de resultados e discussões.

### 2.3. MÉTODOS E MATERIAIS

Para a realização da simulação, utilizaram-se as propriedades físicas reais do fluido e da espécie química envolvida, conforme dados disponíveis na literatura e no banco de dados do software (WELTY, 2008). O fluido principal, água, foi caracterizado por uma densidade de  $998 \text{ kg/m}^3$  e viscosidade dinâmica de  $1,0 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ . A espécie química diluída, por sua vez, apresentou um coeficiente de difusão de  $2,0 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ . Com base nessas propriedades, foi construído um modelo bidimensional no software COMSOL Multiphysics, utilizando os módulos acoplados Laminar Flow (spf) e Transport of Diluted Species (tds) (COMSOL, 2024).

As condições de contorno aplicadas consistiram em uma velocidade de entrada uniforme em toda a face de entrada do tubo, garantindo o escoamento do fluido. A injeção da espécie química foi imposta em uma área circular centralizada nesta mesma face, representando a fonte de contaminação. As paredes do duto foram consideradas impermeáveis e com condição de não-escorregamento, enquanto a saída foi definida para permitir o livre escoamento do fluido e da espécie transportada.

Os parâmetros geométricos e de transporte utilizados na modelagem foram definidos conforme apresentado no Quadro 1.



Quadro 1 - Parâmetros geométricos e de transporte utilizados na simulação

Parameters			
Name	Expression	Value	Description
L1	0.3[m]	0.3 m	Comprimento Tubo Principal
D1	0.005[m]	0.005 m	Diametro Tubo Principal
L2	0.05[m]	0.05 m	Comprimento Tubo de injeção
D2	0.01[m]	0.01 m	Diametro Tubo de Injeção
v	1[m/s]	1 m/s	Velocidade de entrada
c1	0.1[mol/m <sup>3</sup> ]	0.1 mol/m <sup>3</sup>	Concentração 1
c2	0.6[mol/m <sup>3</sup> ]	0.6 mol/m <sup>3</sup>	Concentração 2
t	3600[s]	3600 s	Tempo

(Fonte: Elaborado pelos autores, 2025)

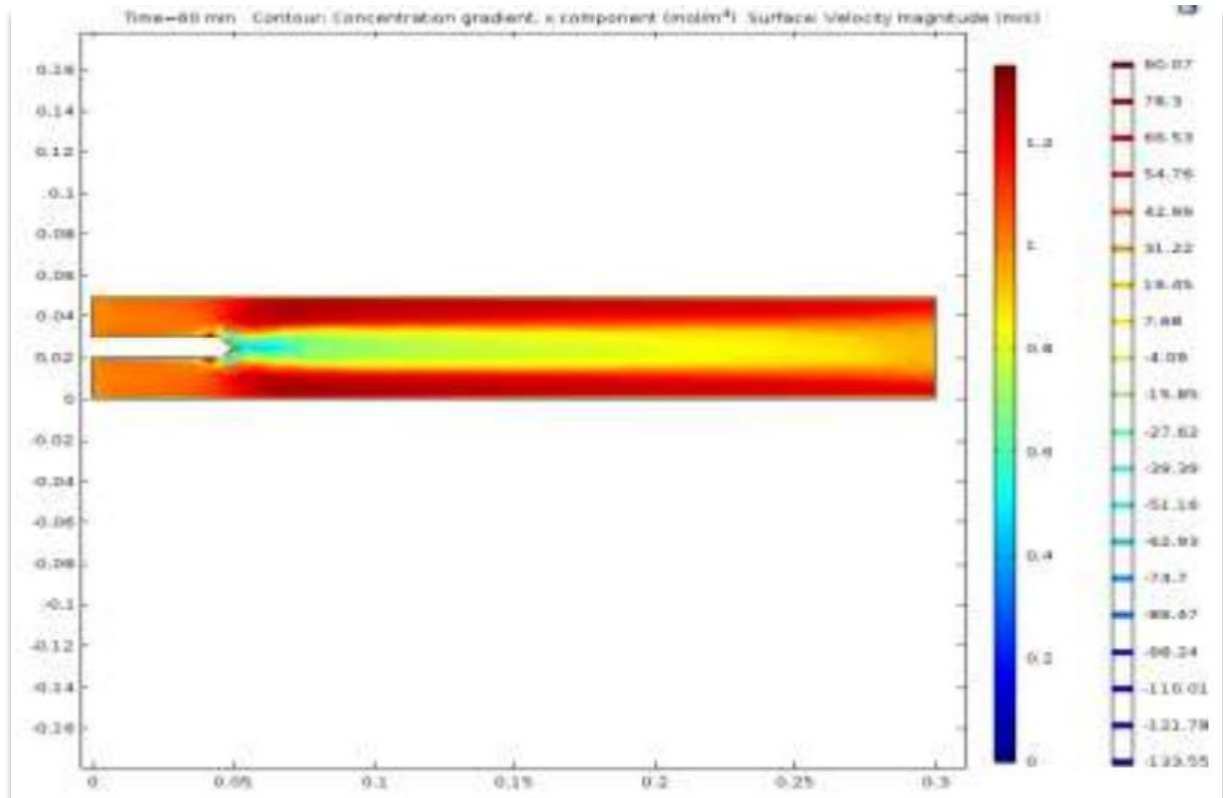
Com a modelagem devidamente estruturada e processada, foram realizadas análises sobre o comportamento da dispersão da espécie química no sistema. A partir dos resultados, foi possível compreender os mecanismos que favoreceram o transporte convectivo, responsável pelo arraste do rastro de concentração, e os que governaram a difusão, responsável pelo seu espalhamento radial. A simulação permitiu identificar o desenvolvimento do perfil de concentração ao longo do duto e a atenuação da concentração máxima em função da distância da fonte de injeção

## 2.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos resultados obtidos na simulação, apresentados na Figura 1, permite uma discussão aprofundada sobre os mecanismos de transferência de massa que governam a dispersão da solução injetada no escoamento. A imagem mostra a formação de um nítido rastro de concentração originado no ponto de injeção, com deslocamento predominantemente na direção axial, seguindo o fluxo da água, além de um alargamento contínuo na direção transversal. Essa configuração evidencia os dois principais mecanismos de transporte presentes no sistema: a convecção e a difusão molecular.



Figura 01 – Velocidade do fluido e gradiente de concentração



(Fonte: Elaborado pelos autores, 2025)

A convecção mássica forçada é o mecanismo dominante no transporte ao longo do tubo, sendo responsável pela condução da espécie química no sentido do escoamento, direção x. A forma alongada do rastro e sua continuidade do ponto de injeção até a saída do domínio confirmam o papel desse mecanismo, em que o soluto é arrastado pelo campo de velocidades do fluido.

Simultaneamente, a difusão atua transversalmente, promovendo o espalhamento da espécie do centro do rastro em direção às regiões adjacentes de menor concentração. Esse alargamento gradual, bem como a suavização da intensidade de concentração, são indicativos diretos da ação difusiva. Na entrada do sistema, observa-se um intenso gradiente de concentração, configurando a máxima "força motriz" para a difusão e impulsionando a mistura inicial entre a solução injetada e o fluido circundante.



Dessa forma, a dispersão observada não é resultado de um único fenômeno, mas sim da interação entre a convecção, que conduz a substância injetada ao longo do sistema, e a difusão, que governa sua diluição e mistura em escala molecular, conforme descrito nos modelos fundamentais de transporte de massa (Incropera, 2017). O modelo computacional, baseado no método de elementos finitos, válida essa representação física do fenômeno, permitindo visualizar com clareza como uma fonte concentrada se dispersa em um fluido em movimento. De acordo com Silva e Pereira (2021), a análise da sinergia entre esses mecanismos é um campo de contínua investigação na literatura recente, sendo fundamental para a compreensão e otimização de sistemas de engenharia. Portanto, o entendimento dessa interação atende aos objetivos propostos na metodologia deste trabalho e fornece subsídios para futuras análises em condições semelhantes.

### **3. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A modelagem computacional realizada neste trabalho permitiu compreender, de forma clara e detalhada, a dinâmica da transferência de massa em um sistema multifísico envolvendo escoamento laminar e transporte de espécies diluídas. A simulação evidenciou como os mecanismos de convecção e difusão atuam de maneira conjunta na dispersão de uma substância química em um fluido em movimento, confirmando os princípios teóricos estudados na literatura.

Verificou-se que a convecção é o mecanismo predominante na direção do escoamento, promovendo o arraste da espécie química ao longo do domínio, enquanto a difusão se manifesta de forma mais significativa na direção transversal, contribuindo para o alargamento do rastro de concentração. A interação entre esses dois fenômenos resulta em um perfil de concentração com características bem definidas, que pôde ser analisado qualitativamente com apoio da visualização gráfica dos resultados.

A proposta de utilizar o COMSOL Multiphysics como ferramenta de análise demonstrou ser eficaz, tanto do ponto de vista pedagógico quanto técnico. A plataforma permitiu a construção de um modelo robusto, com parâmetros realistas e condições representativas de sistemas aplicados em engenharia química. Além



disso, a visualização dos campos de velocidade e concentração proporcionou um aprendizado intuitivo sobre os conceitos envolvidos.

Como limitação do estudo, destaca-se a ausência de uma validação experimental dos resultados simulados. Futuras investigações podem considerar a comparação com dados experimentais ou a ampliação do modelo para condições tridimensionais, além da consideração de efeitos térmicos ou reações químicas acopladas.

Conclui-se, portanto, que os objetivos propostos foram atingidos, e que o trabalho contribui para o aprofundamento do entendimento sobre os fenômenos de transporte de massa em sistemas contínuos, além de estimular o uso de ferramentas computacionais como aliadas no processo de ensino e pesquisa em engenharia.



## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, R. G. de; VIEIRA, M. C. S. Estudo da deposição de parafinas em dutos de petróleo com simulação numérica. *Engenharia Térmica*, Curitiba, v. 14, n. 2, p. 63–71, 2015. Disponível em: <https://www.engtherm.org/ojs/index.php/Revista/article/view/309>. Acesso em: 11 jun. 2025.

BASTOS, Daniel Barbosa. SIMULAÇÃO DE ENSAIOS DE CORRENTES PARASITAS PULSADAS UTILIZANDO COMSOL MULTIPHYSICS. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Oeste da Bahia. 2023. Disponível em: TCC - DANIEL BARBOSA BASTOS.pdf (1.94 MB). Acesso em: 08/06/2025.

BYJU'S. Heat Transfer – Radiation, Convection And Conduction. 2023. Disponível em: <<https://byjus.com/physics/heat-transfer-conduction-convection-and-radiation/>>. Acesso em: 18/09/2025.

BRASILEIRO, Ada Magaly M. Como produzir textos acadêmicos e científicos. São Paulo: Editora Contexto, 2021. E-book. p.71. ISBN 9786555414400. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786555414400/>. Acesso em: 05 jun. 2025.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Adib M. Transferência de calor e massa. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2017. Acesso em: 11/06/2025.

FERNANDES, Diana et al. EFICIÊNCIA ACÚSTICA: LÃ DE VIDRO E DE LÃ DE ROCHA COMO ISOLANTES PARA O SISTEMA DRYWALL. *Anais de Engenharia Civil / 2595-1823*, [S.l.], v. 1, n. 1, p. 115 - 129, apr. 2018. Disponível em: <<https://uceff.edu.br/anais/index.php/ENGCIVIL/article/view/154>>. Acesso em: 08 /06/2025.

JUNIOR, Claudio Antunes; MONTEGUTTI, Marilise Cristine; HAUS, Tiago Luis. Análise comparativa da eficiência de isolantes térmicos. *Caderno PAIC*, Curitiba, v. 17, n. 1, p. 211–235, 2016. Disponível em:



<https://cadernopaic.fae.emnuvens.com.br/cadernopaic/article/view/213>. Acesso em: 09 jun. 2025.

MACHINEDESIGN. What's the Difference Between Conduction, Convection, and Radiation. 2018. Disponível em: <<https://www.machinedesign.com/learning-resources/whats-the-difference-between/conduction-convection-and-radiation/>>

Acesso em: 20 set. 2025.

MONTEIRO, Luana; TORMES, Jiane Ribeiro; MOURA, Luiza Cristina Simplício Gomes de Azevedo. ESTUDO DE CASO: UMA METODOLOGIA PARA PESQUISAS EDUCACIONAIS. *Ensaios Pedagógicos*, [S. l.], v. 2, n. 1, p. p.18–25, 2018. DOI: 10.14244/enp.v2i1.57. Disponível em: <https://ensaiospedagogicos.ufscar.br/index.php/ENP/article/view/57>. Acesso em: 6 jun. 2025.

NOAA. The Transfer of Heat Energy. 2023. Disponível em: <<https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/transfer-of-heat-energy>> Acesso em: 20 set. 2025

OLIVEIRA, Juliana de C.; FERNANDES, João P. Avaliação da eficiência energética em tubulações térmicas com diferentes isolantes. *Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental*, v. 24, n. 1, p. 85–96, 2020. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/41135>. Acesso em: 11 jun. 2025.

PRESSBOOKS. Heat Transfer Methods – Conduction, Convection and Radiation. 2021. Disponível em: <<https://pressbooks.bccampus.ca/introductorygeneralphysics2phys1207/chapter/14-4-heat-transfer-methods/>> Acesso em: 20 set. 2025.

ROCHA, Paulo Alexandre Costa; SILVEIRA, João Victor Pinto da. Estudo e aplicação de simulação computacional em problemas simples de mecânica dos fluidos e transferência de calor. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, [S. l.], v. 34, n. 4, dez. 2012. Disponível em:



<<https://www.scielo.br/j/rbef/a/5ZyZhzhkj87Lhkr4z64vYCw/>> Acesso em: 20 set. 2025.

SANTOS, W. de S.; MELO, G. da S. V. de; NETO, G. A. N. B.; QUIXABA, G. S. Estudo do uso de tecnologias alternativas para controle de ruído de impacto em edificações/Study on the use of alternative technologies to control impact noise in buildings. Brazilian Applied Science Review, [S. l.], v. 4, n. 4, p. 2649–2664, 2020. DOI: 10.34115/basrv4n4-038. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BASR/article/view/15144>. Acesso em: 8 jun. 2025.

SFALSIN, Fabrício Nascimento. Modelagem Numérica Multifísica de um Regenerador de Energia Eletromagnético Utilizando o Software COMSOL Multiphysics. 2023. 66 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Aeronáutica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2024. Disponível em: Modelo\_de\_Teses\_e\_Dissertações\_ICMC\_USP (1).pdf. Acesso em: 08/06/2025.

**Nome completo:** Todos os integrantes.

Item de colaboração	Igual aos demais	Menor que os demais	Maior que os demais	Não participou deste item
Contextualização do trabalho	x			
Organização dos dados	x			
Análise formal dos dados	x			
Análise formal do texto	x			
Financiamento para desenvolvimento do trabalho	Não se aplica			
Investigação e estudo	x			
Metodologia	x			
Administração de cronograma	Não se aplica			
Administração de recursos	Não se aplica			
Gestão do projeto	Não se aplica			
Validação do projeto	Não se aplica			
Marketing	Não se aplica			



# EPIC 2025

XII ENCONTRO DE PESQUISA, XVI ENCONTRO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E  
II ENCONTRO DE ENSINO E EXTENSÃO UNIVERSITÁRIA



Escrita do trabalho	x			
Participação em reuniões	Não se aplica			
Revisão do trabalho	x			
Participação na construção do protótipo	x			