



Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Saúde e Nutrição
Engenharia de Alimentos
Trabalho de Conclusão de Curso



LUANA HNG VASCONCELOS DE OLIVEIRA

**CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA DE ARNOLD PARA DETERMINAÇÃO DA
DIFUSIVIDADE MÁSSICA EM REGIME PSEUDOESTACIONÁRIO**

Campo Grande - MS

2026

LUANA HNG VASCONCELOS DE OLIVEIRA

**CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA DE ARNOLD PARA DETERMINAÇÃO DA
DIFUSIVIDADE MÁSSICA EM REGIME PSEUDOESTACIONÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia de Alimentos da
Universidade Federal do Mato Grosso do Sul
como parte das exigências para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof^{fa} Dr^a Thaisa Carvalho Volpe
Balbinoti

Campo Grande
2026

SUMÁRIO

RESUMO.....	5
1. INTRODUÇÃO.....	7
2. OBJETIVOS.....	9
2.1. OBJETIVOS GERAIS.....	9
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	9
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	10
3.1. CONSTRUÇÃO DA CÉLULA DE ARNOLD.....	10
3.2. EXPERIMENTO DA CÉLULA DE ARNOLD.....	12
3.3. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO.....	13
3.3.1. Obtenção da Equação da Continuidade.....	13
3.3.2. Definição do Fluxo Global.....	16
3.3.3. Determinação do Fluxo em Regime Permanente.....	18
3.3.4. Determinação do Coeficiente de Difusão para Regime Pseudoestacionário.....	22
3.4. APLICAÇÃO DO MÓDULO DA CÉLULA DE ARNOLD.....	24
3.5. DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.....	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1. CÉLULA DE ARNOLD PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO.....	26
4.2. DESAFIOS E POTENCIALIDADES DA CÉLULA DE ARNOLD CONSTRUÍDA.....	32
5. CONCLUSÃO.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	38

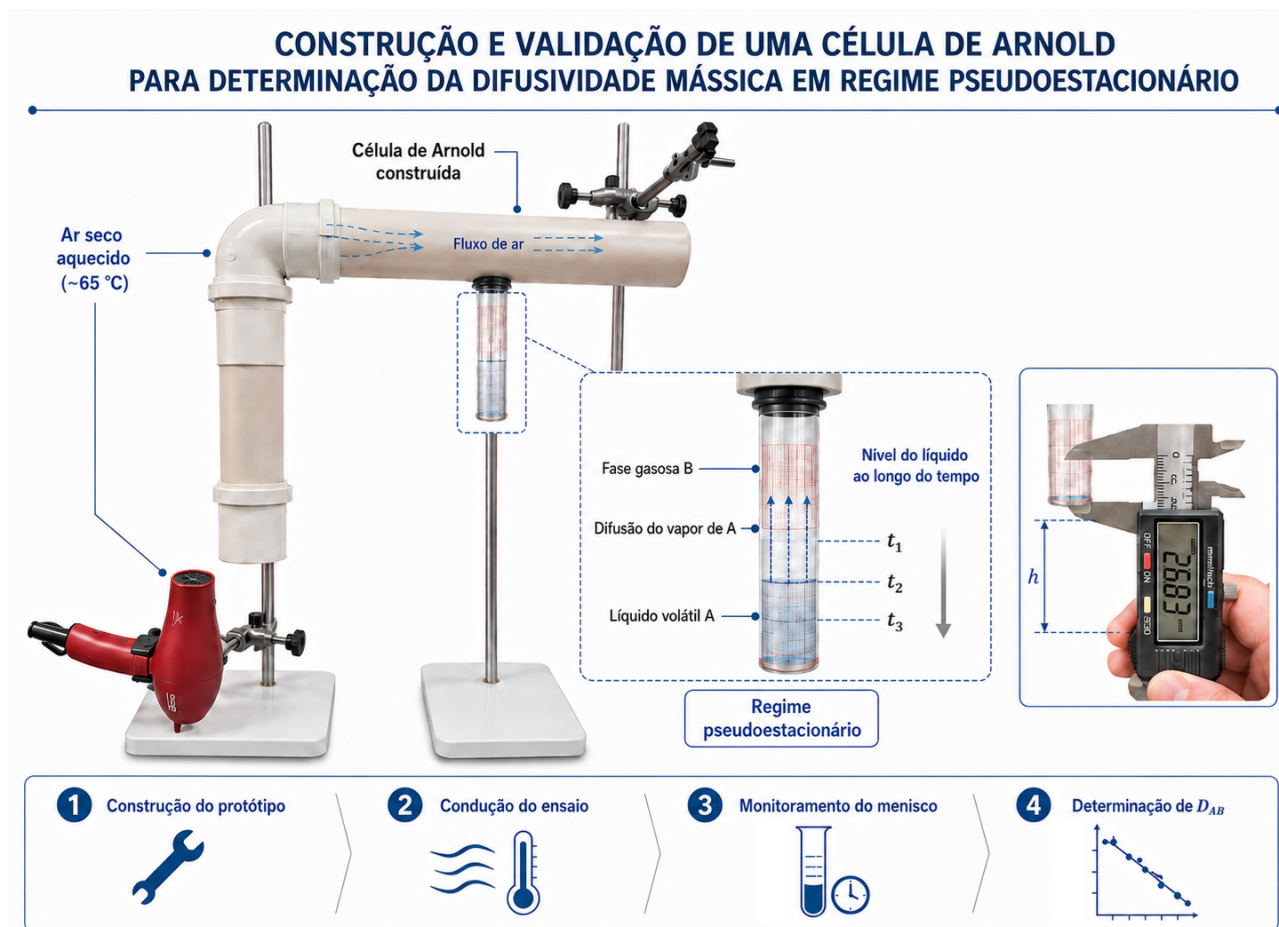
CONSTRUÇÃO DE UMA CÉLULA DE ARNOLD PARA DETERMINAÇÃO DA DIFUSIVIDADE MÁSSICA EM REGIME PSEUDOESTACIONÁRIO

Luana Hng Vasconcelos De Oliveira¹; Thaisa Carvalho Volpe Balbinoti ^{1*}

¹ Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição (FACFAN), Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Av. Costa e Silva, s/n, Bairro Universitário, CEP 79070-900, Campo Grande, MS, Brazil. mariana.r@ufms.br; thaisa.balbinoti@ufms.br; raquel.campos@ufms.br.

*Autor correspondente: thaisa.balbinoti@ufms.br (T.C.V. Balbinoti)

RESUMO-ARTE



RESUMO

A transferência de massa por difusão molecular é fundamental em diversas operações unitárias da Engenharia de Alimentos, sendo o coeficiente de difusão D_{AB} o parâmetro que quantifica a intensidade desse transporte. Este trabalho teve como objetivo construir uma Célula de Arnold de baixo custo, utilizando materiais acessíveis, como tubos e conexões de PVC, tubo de ensaio e secador de cabelo, para a determinação experimental da difusividade mássica do sistema etanol-ar em regime pseudoestacionário, visando sua aplicação como ferramenta didático-experimental no ensino de Fenômenos de Transporte. Os ensaios foram conduzidos a 40 ± 1 °C, durante 60 minutos, com registros da variação da altura da coluna líquida em intervalos de 10 minutos, utilizando paquímetro digital. A modelagem matemática foi desenvolvida a partir

da Equação da Continuidade e da Lei de Fick, considerando as hipóteses de regime permanente na fase gasosa, meio inerte, transporte unidimensional e gás estagnado. Os dados experimentais foram tratados por regressão linear, resultando em $D_{AB} = 0,1783 \frac{cm^2}{s}$, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9883$. O valor obtido apresentou desvios de 16,51% e 8,96% em relação a dois valores de referência reportados na literatura. Os resultados obtidos indicam que o protótipo construído é adequado para fins didáticos, permitindo a integração entre fundamentos teóricos, experimentação e análise quantitativa no estudo da transferência de massa.

PALAVRAS-CHAVE: Coeficiente de Difusão; Transferência de Massa; Difusão Gasosa; Gás Estagnado; Célula de Arnold.

1. INTRODUÇÃO

A transferência de massa corresponde ao transporte de uma ou mais espécies químicas em um sistema, podendo ocorrer entre regiões de uma mesma fase ou entre fases distintas, sendo impulsionada por diferenças de concentração, potencial químico ou pressão parcial (CANEDO, 2010; WELTY; RORRER; FOSTER, 2017). Em sistemas multicomponentes, esse transporte pode ocorrer por difusão molecular, associada ao movimento relativo das espécies em função de gradientes de composição, e por convecção, relacionada ao movimento global do fluido (CANEDO, 2010; WELTY; RORRER; FOSTER, 2017). A difusão molecular é descrita pela Lei de Fick, na qual o fluxo de matéria é proporcional ao gradiente de concentração, sendo a difusividade ou coeficiente de difusão o parâmetro que expressa a facilidade com que uma espécie se desloca em determinado meio (ARNOLD, 1930; CREMASCO, 2026). A equação clássica da difusão é amplamente empregada em sistemas gasosos e líquidos, e a determinação da difusividade constitui uma etapa importante para a análise quantitativa de processos de transferência de massa (ARNOLD, 1930; WELTY; RORRER; FOSTER, 2017).

Na Engenharia de Alimentos, os fenômenos de transferência de massa estão presentes em diversas operações unitárias, como secagem, extração, concentração, separação por membranas, adsorção e absorção (AL-NAJJAR et al., 2023; AZEREDO; OTONI; MATTOSO, 2022). O estudo desses fenômenos permite compreender a migração de água, solutos e compostos voláteis em matrizes alimentares, contribuindo para o desenvolvimento, o controle e a otimização de processos industriais (AL-NAJJAR et al., 2023; GONZÁLEZ-PÉREZ et al., 2022). Em matrizes alimentares, a modelagem da transferência de massa pode ser desafiadora devido à heterogeneidade estrutural dos alimentos, às variações de composição e à geometria dos materiais, o que reforça a

importância de associar fundamentos teóricos, experimentação e análise de dados (GONZÁLEZ-PÉREZ et al., 2022; FADIJI et al., 2021).

Entre os parâmetros utilizados na análise de processos difusivos, destaca-se o coeficiente de difusão binário, usualmente representado por D_{AB} , que depende das propriedades das espécies envolvidas, da temperatura, da pressão e da composição do sistema (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017; CREMASCO, 2026). A determinação experimental desse coeficiente permite relacionar dados obtidos em laboratório com modelos matemáticos de transferência de massa, favorecendo a interpretação física do fenômeno e a comparação com valores reportados na literatura (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017; COSTA et al., 2016). Nesse contexto, a célula de Arnold é um dispositivo utilizado para determinar a difusividade mássica de líquidos voláteis em gases estagnados, a partir do acompanhamento da evaporação do líquido e da variação da altura da coluna líquida ao longo do tempo (COSTA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2024).

A célula de Arnold é composta por um tubo ou capilar parcialmente preenchido com um líquido volátil, sobre o qual se estabelece uma coluna gasosa, permitindo que o vapor do líquido se difunda através do gás que encontra-se estagnado (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017; COSTA et al., 2016). A partir da hipótese de difusão unidimensional, sem reação química e em regime pseudoestacionário, é possível relacionar a variação da altura do líquido com o tempo e estimar o coeficiente de difusão do vapor no ar (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017; ROSSA, 2019). Esse procedimento já foi aplicado na determinação da difusividade mássica de diferentes líquidos em ar estagnado, incluindo água, etanol, éter etílico, benzeno e amônia, evidenciando a aplicabilidade do método em sistemas de interesse acadêmico e experimental (COSTA et al., 2016; ROSSA, 2019).

Além da aplicação técnica, a célula de Arnold apresenta potencial didático por permitir que conceitos abstratos de transferência de massa, como gradiente de

concentração, fluxo molar, difusividade e regime pseudoestacionário, sejam associados a medições experimentais simples e ao tratamento quantitativo dos dados (COSTA et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2024). Em estudo realizado com a construção de uma célula de Arnold para fins de ensino, Costa et al. (2016) relataram que a atividade possibilitou a aplicação prática de conceitos abordados em sala de aula e favoreceu a compreensão da difusividade mássica. De forma semelhante, Oliveira et al. (2024) descreveram a célula de Arnold como um dispositivo simples e eficiente para a determinação experimental do coeficiente de difusão mássica de um soluto em um meio estagnado.

Diante disso, o presente trabalho propõe a construção de uma Célula de Arnold como estratégia didático-experimental para o ensino de transferência de massa no curso de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). A proposta busca aprofundar a compreensão dos conceitos envolvidos nesse fenômeno, articulando os fundamentos teóricos com a prática laboratorial, por meio da determinação do coeficiente de difusão de vapores do soluto em fase gasosa estagnada.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVOS GERAIS

Construir uma Célula de Arnold como ferramenta didático-experimental para a determinação do coeficiente de difusão do sistema etanol-ar, visando sua aplicação no ensino de Fenômenos de Transporte na Engenharia de Alimentos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Projetar e construir um protótipo experimental da Célula de Arnold para a realização de ensaios de difusão molecular.
- Desenvolver a modelagem matemática necessária para a determinação do coeficiente de difusão a partir dos fundamentos da transferência de massa.
- Determinar experimentalmente o coeficiente de difusão do sistema etanol-ar (DAB) utilizando a Célula de Arnold.

- Comparar os valores experimentais obtidos com dados disponíveis na literatura técnica, analisando as possíveis diferenças observadas.
- Avaliar o potencial da Célula de Arnold como ferramenta didático-experimental para o ensino de Fenômenos de Transporte na Engenharia de Alimentos.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. CONSTRUÇÃO DA CÉLULA DE ARNOLD

Para a montagem da Célula de Arnold, foi adotado o seguinte procedimento:

Primeiramente, um tubo de PVC com 1 metro de comprimento e 50 mm de diâmetro foi cortado para obtenção de duas partes, uma com comprimento de 15 cm e outra de 30 cm. Na parte maior, foi feito um furo de 3 cm utilizando uma broca serra-copo. Nesta perfuração, a tampa de um tubo de ensaio de 50 ml, sem o centro, apenas com a estrutura externa foi fixada ao PVC (Figura 1), permitindo que o tubo de ensaio fosse rosqueado para remoção e inserção na estrutura do experimento de forma fácil, rápida e confiável. Para a realização do experimento, o tubo de ensaio foi envolvido com papel milimetrado, com o objetivo de permitir o acompanhamento e o controle da variação do nível do líquido ao longo do tempo.

Em seguida, as duas partes foram unidas por um joelho de 90 graus e na base foi instalada uma luva de 50 mm (Figura 1). O conjunto foi fixado em um suporte universal utilizando garras metálicas, o que permitiu que a altura do sistema fosse ajustada.



Figura 1 – Montagem da estrutura para os ensaios na Célula de Arnold.

Para a realização do experimento, um secador de cabelo modelo Titanium Travel Philco, bivolt, foi fixado ao suporte universal, no lado esquerdo do protótipo (Figura 2). Ao ser acionado, o equipamento promove a passagem de um fluxo contínuo de ar sobre a extremidade superior do tubo de ensaio. Essa condição é essencial para o funcionamento da Célula de Arnold, pois o fluxo de ar na parte superior do sistema remove continuamente o vapor do soluto (A) que chega a essa região. Dessa forma, considera-se que a fração mássica de (A) nesse ponto é nula, caracterizando uma das condições de contorno do experimento. Além disso, para favorecer a passagem de ar seco pelo sistema, o secador foi operado no modo de aquecimento, gerando um fluxo de ar de aproximadamente 65 ± 1 °C.



Figura 2 – Experimento da Célula de Arnold.

3.2. EXPERIMENTO DA CÉLULA DE ARNOLD

Após a montagem da Célula de Arnold, foram realizados testes iniciais com o objetivo de verificar o funcionamento do sistema e definir as condições experimentais mais adequadas para a condução dos ensaios. Com base nos resultados observados nos testes preliminares, foram estabelecidos os parâmetros operacionais utilizados nos experimentos.

Os ensaios foram conduzidos em tubo de ensaio com 10,5 cm de altura, contendo 10 mL do líquido em estudo, mantido a 40 ± 1 °C durante todo o experimento. Cada ensaio teve duração total de 1 hora, com registros da altura da coluna líquida realizados em intervalos de 10 minutos.

As medições quantitativas da altura da coluna líquida foram realizadas com auxílio de paquímetro digital, a fim de garantir maior precisão nas leituras, Figura 3. Os

dados obtidos foram posteriormente empregados nos cálculos para determinação do coeficiente de difusão do sistema avaliado.

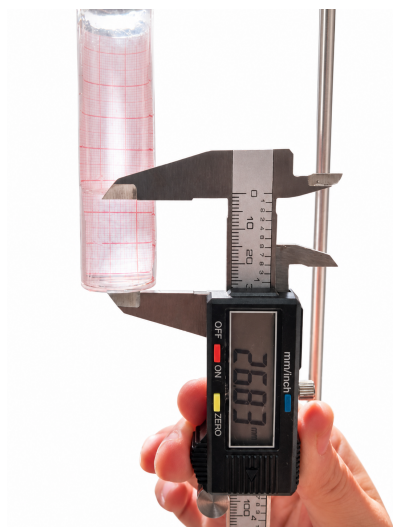


Figura 3 – Medição da altura da coluna líquida com auxílio de paquímetro digital.

3.3. DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO

Para determinar o coeficiente de difusão por meio do experimento da Célula de Arnold, foi necessário utilizar um modelo matemático capaz de relacionar as variáveis do processo ao fenômeno de transferência de massa envolvido. Para isso, o desenvolvimento partiu da Equação da Continuidade, seguida da definição do Fluxo Molar Global. Em seguida, foram aplicadas as simplificações correspondentes ao regime permanente, considerando as condições características do sistema. Por fim, o modelo é ajustado para a condição pseudoestacionária, uma vez que, embora a difusão ocorra em regime permanente na fase gasosa em cada instante, a posição da interface líquido-gás varia lentamente ao longo do tempo.

3.3.1. Obtenção da Equação da Continuidade

A equação da continuidade foi aplicada para descrever o fenômeno da transferência de massa, uma vez que permite determinar a distribuição de concentração do soluto no tempo e no espaço. Para obtenção desta equação, partiu-se do balanço geral da taxa (Equação 1), em base molar da espécie A (soluto), utilizando um volume de controle para coordenadas retangulares (cartesianas), Figura 4.

$$\begin{array}{lclcl}
 \text{(Taxa de massa que entra no volume de controle)} & - & \text{(Taxa de massa que sai do volume de controle)} & + & \text{(Taxa de produção de massa no volume de controle)} & = & \text{(Taxa de acúmulo de massa no volume de controle)} & \text{(Equação 1)}
 \end{array}$$

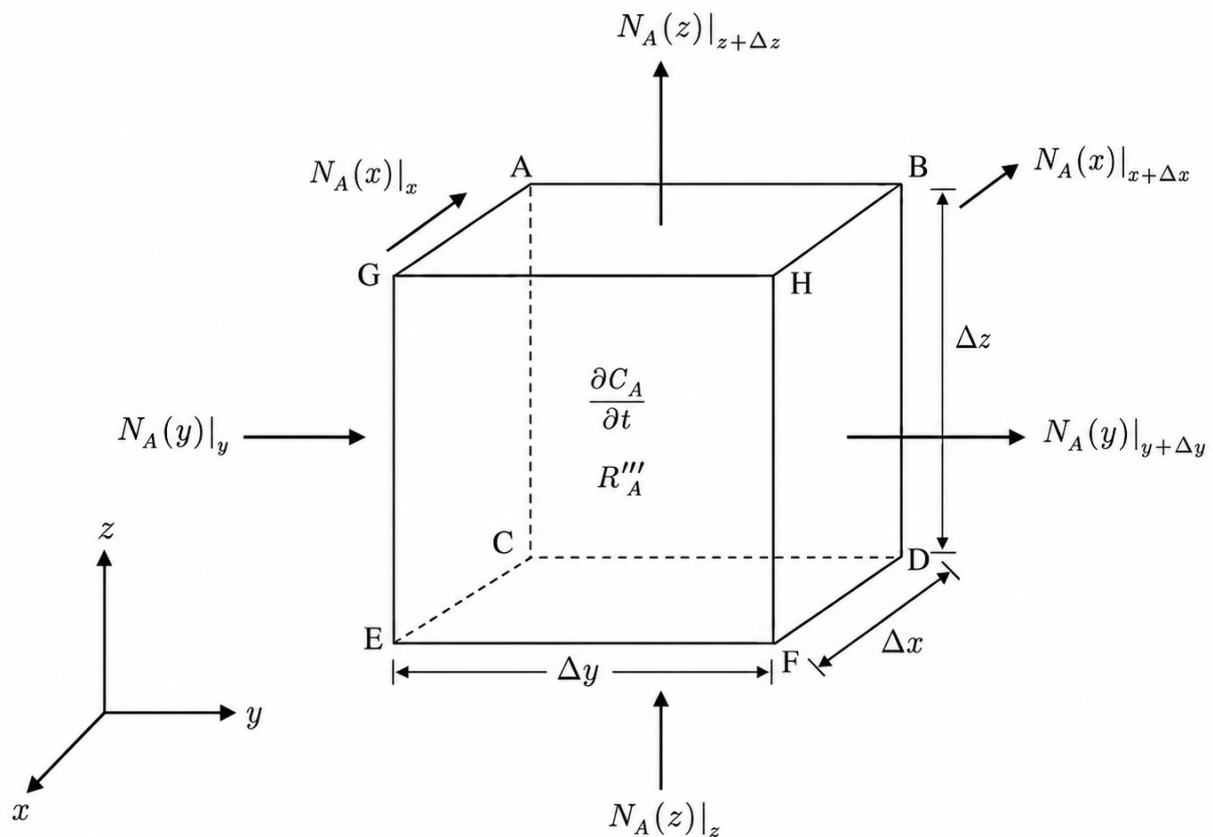


Figura 4 - Representação do balanço geral no volume de controle

- Taxa molar que entra no volume de controle:

$$N_A(x)|_x \Delta y \Delta z \quad (\text{Equação 2})$$

$$N_A(y)|_y \Delta x \Delta z \quad (\text{Equação 3})$$

$$N_A(z)|_z \Delta x \Delta y \quad (\text{Equação 4})$$

- Taxa molar que sai do volume de controle:

$$N_A(x)|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z \quad (\text{Equação 5})$$

$$N_A(y)|_{y+\Delta y} \Delta x \Delta z \quad (\text{Equação 6})$$

$$N_A(z)|_{z+\Delta z} \Delta x \Delta y \quad (\text{Equação 7})$$

- Taxa de produção/consumo de mols no volume de controle, devido a substância A estar submetida à uma reação química:

$$R_A''' \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{Equação 8})$$

- Taxa de acúmulo de mols no volume de controle:

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{Equação 9})$$

Ao substituir as Equações 2 a 9 na Equação 1, obtém-se a Equação 10, a qual representa o balanço geral da espécie A no volume de controle.

$$(N_A(x)|_x \Delta y \Delta z) + (N_A(y)|_y \Delta x \Delta z) + (N_A(z)|_z \Delta x \Delta y) - (N_A(x)|_{x+\Delta x} \Delta y \Delta z) - (N_A(y)|_{y+\Delta y} \Delta x \Delta z) - (N_A(z)|_{z+\Delta z} \Delta x \Delta y) + (R_A''' \Delta x \Delta y \Delta z) = \frac{\partial C_A}{\partial t} \Delta x \Delta y \Delta z \quad (\text{Equação 10})$$

A Equação 10 foi reajustada, o que possibilitou obter a Equação 11.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \left(\frac{\partial N_{A,x}}{\partial x} + \frac{\partial N_{A,y}}{\partial y} + \frac{\partial N_{A,z}}{\partial z} \right) = R_A''' \quad (\text{Equação 11})$$

Aplicando o operador divergente (Equação 12), a equação da continuidade resultante é apresentada na Equação 13.

$$\nabla \cdot \vec{N}_A = \left[\frac{\partial N_{A,x}}{\partial x} + \frac{\partial N_{A,y}}{\partial y} + \frac{\partial N_{A,z}}{\partial z} \right] \quad (\text{Equação 12})$$

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{N}_A = R'''_A \quad (\text{Equação 13})$$

Tal que,

$\frac{\partial C_A}{\partial t}$: acúmulo da espécie A ao longo tempo dentro do volume de controle;

$\nabla \cdot \vec{N}_A$: fluxo molar global da espécie A nas direções x, y e z;

R'''_A : reação química de consumo ou geração dentro do volume de controle.

3.3.2. Definição do Fluxo Global

O fluxo molar da espécie química A representa a quantidade dessa espécie, em unidades molares, que atravessa determinada área por unidade de tempo (CREMASCO, 2026). O fluxo global (Equação 14), considera simultaneamente as contribuições difusiva (Equação 15) e convectiva (Equação 16) envolvidas no transporte da espécie A.

$$(\text{Fluxo global da espécie A}) = (\text{Contribuição difusiva}) + (\text{Contribuição convectiva}) \quad (\text{Equação 14})$$

$$J_{A,z} = C_A (v_{A,z} - V_z) \quad (\text{Equação 15})$$

sendo,

$v_{A,z}$: velocidade da espécie A na direção z;

V_z : velocidade do fluido (meio) na direção z

C_A : Concentração molar de A

$$J_{A,z}^C = C_A V_z \quad (\text{Equação 16})$$

Substituindo as equações 15 e 16 na Equação 14, obtém-se o fluxo molar global da espécie química A ($\vec{N}_A$, Equação 17), referenciada a eixos estacionários (x, y e z).

$$\vec{N}_A = C_A (\vec{v} - \vec{V}) + C_A \vec{V} \quad (\text{Equação 17})$$

Na contribuição difusiva, o fluxo da espécie química A é proporcional ao seu gradiente de concentração, relação descrita pela Primeira Lei de Fick (Equação 18).

$$\vec{J}_A = - C D_{AB} \vec{\nabla} y_A \quad (\text{Equação 18})$$

em que $\vec{J}_A$ é o fluxo molar difusivo da espécie A nas direções x,y e z (mols/m² s), D_{AB} é o coeficiente de difusão binário da espécie A no meio B (m²/s) e $\vec{\nabla} y_A$ é o gradiente da fração molar da espécie A nas direções x,y e z.

O sinal negativo indica que o transporte ocorre no sentido da redução da concentração (CREMASCO, 2026; WELTY; RORRER; FOSTER, 2017).

Por sua vez, a contribuição convectiva é definida pela Equação 19.

$$C_A \vec{V} = y_A (\vec{N}_A + \vec{N}_B) \quad (\text{Equação 19})$$

Substituindo as correlações matemáticas da contribuição difusiva (Equação 18) e convectiva (Equação 19) na Equação 17, tem-se a definição matemática do fluxo global da espécie química A (Equação 20).

$$\vec{N}_A = -CD_{AB}\vec{\nabla}y_A + y_A(\vec{N}_A + \vec{N}_B) \quad (\text{Equação 20})$$

A dedução do fluxo global incorporou em seu equacionamento o Coeficiente de Difusão (D_{AB}), que é a grandeza que melhor traduz a interação soluto–meio, pois está intimamente relacionada com o mecanismo que rege a difusão, ou seja, a velocidade com que transferência de massa acontece (CREMASCO, 2026; WELTY; RORRER; FOSTER, 2017).

3.3.3. Determinação do Fluxo em Regime Permanente

A equação matemática empregada para determinar o fluxo das espécies químicas (soluto A) avaliadas na Célula de Arnold construída foi desenvolvida a partir da Equação da Continuidade (Equação 13), considerando a expressão do fluxo molar global (Equação 20), o que resultou na Equação 21.

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} + \vec{\nabla}[-CD_{AB}\vec{\nabla}y_A + y_A(\vec{N}_A + \vec{N}_B)] = R'''_A \quad (\text{Equação 21})$$

A Equação 21 permite descrever a transferência de massa (concentração da espécie química A) em função do tempo e da posição, considerando os diferentes agentes que influenciam o transporte do soluto, como acúmulo e reação química, bem como as contribuições de difusão e convecção. Assim sendo, essa equação apresenta caráter geral e resolução relativamente complexa para o contexto pedagógico. Portanto, com o objetivo de simplificar e tornar possível sua aplicação no contexto do ensino da

transferência de massa, foram assumidas hipóteses compatíveis com o sistema experimental construído para realizar a prática em uma Célula de Arnold.

As hipóteses adotadas foram:

- a) Regime estacionário: considera-se que, na região de transporte, a concentração da espécie química A não varia com o tempo em uma posição fixa, dependendo apenas da sua distribuição espacial. Assim, o termo de acúmulo da equação da continuidade torna-se nulo (Equação 22).

$$\frac{\partial C_A}{\partial t} = 0 \quad (\text{Equação 22})$$

- b) Meio inerte: considera-se que não ocorre geração nem consumo da espécie A na região de transporte. Assim, o termo reacional da equação é nulo (Equação 23).

$$R'''_A = 0 \quad (\text{Equação 23})$$

- c) Sistema unidimensional em z: devido à geometria do tubo, considera-se que o transporte de massa ocorre predominantemente na direção z, sendo desprezados os gradientes nas direções x e y.

Aplicando essas hipóteses na Equação da Continuidade geral (Equação 13), obtemos a Equação da Continuidade específica para o sistema proposto (Equação 24), na qual o fluxo molar de A, referenciado ao eixo estacionário Z, é constante em qualquer lugar na região de transporte, inclusive na fronteira ou interface considerada.

$$\frac{d}{dz} N_{A,z} = 0 \quad (\text{Equação 24})$$

Para resolver a Equação 24 é necessário a definição de $N_{A,z}$ (fluxo molar de A na direção z). Determinar o fluxo é importante, uma vez que este parâmetro avalia a quantidade de soluto (por unidade de tempo e de área) removida ou adicionada em operações unitárias fundamentadas em transferência de massa, como secagem, destilação, extração líquido-líquido, extração sólido-líquido e adsorção (CREMASCO, 2026).

O fluxo na Célula de Arnold foi considerado unidirecional em z, logo a Equação 20 foi adaptada para a Equação 25.

$$N_{A,z} = -CD_{AB} \frac{dy_A}{dz} + y_A(N_{A,z} + N_{B,z}) \quad (\text{Equação 25})$$

A Equação 25 leva em consideração as duas contribuições para o transporte da matéria (difusão e convecção). Porém, na Célula de Arnold o ar permanece estagnado ao longo do processo, o que significa que não há movimento do meio para auxiliar o transporte do soluto; ou seja, o transporte da espécie química A acontece predominantemente por difusão molecular através do meio gasoso (ar estagnado no interior do capilar). Diante desta consideração, assume-se outra hipótese importante:

- d) Fase gasosa estagnada: considera-se que a espécie B (ar) permanece estagnada na região de difusão, Equação 26.

$$N_{B,z} = 0 \quad (\text{Equação 26})$$

Substituindo a Equação 26 na Equação 25 e isolando $N_{A,z}$, obtém-se a Equação 27.

$$N_{A,z} = -\frac{CD_{AB}}{1-y_A} \frac{dy_A}{dz} \quad (\text{Equação 27})$$

Como se trata de mistura binária ($y_A + y_B = 1$), logo $1 - y_A = y_B$. Além disso,

$$dy_B = - dy_A.$$

Adaptando a Equação 27 em termos da fração molar de B, obtém-se a Equação 28.

$$N_{A,z} = \frac{CD_{AB}}{y_B} \frac{dy_B}{dz} \quad (\text{Equação 28})$$

Ao separar as variáveis e aplicar a integral, temos a configuração da Equação 29.

$$N_{A,z} \int_{z_1}^{z_2} dz = CD_{AB} \int_{y_{B1}}^{y_{B2}} \frac{dy_B}{y_B} \quad (\text{Equação 29})$$

O termo $N_{A,z}$ foi retirado da integral por ser considerado constante ao longo da região de transporte, conforme estabelecido na Equação 24. Hipótese semelhante foi assumida para C e D_{AB} :

- e) Temperatura (T), pressão (P), coeficiente de difusão (D_{AB}) e concentração molar da mistura (C) são parâmetros constantes: durante o experimento da Célula de Arnold a temperatura e a pressão permanecem constantes. Sob essas circunstâncias, D_{AB} e C mantêm-se igualmente inalterados ao longo do processo.

Ao integrar a Equação 29, temos a definição do $N_{A,z}$ para o sistema (Equação 30).

$$N_{A,z} = \left(\frac{CD_{AB}}{z} \right) \ln \left(\frac{y_{B,2}}{y_{B,1}} \right) \quad (\text{Equação 30})$$

A Equação 30 apresenta o fluxo molar de (A) em função da razão entre as frações molares do componente (B). Como $y_B = 1 - y_A$, essa relação pode ser reescrita em termos da fração molar do soluto A, Equação 31. Além disso, utilizando a definição da

média logarítmica da fração molar de B (Equação 32), a Equação 30 também pode ser expressa na forma da Equação 33.

$$N_{A,z} = \left(\frac{CD_{AB}}{z} \right) \ln \left(\frac{1-y_{A,2}}{1-y_{A,1}} \right) \quad (\text{Equação 31})$$

$$y_{B,\text{médio}} = \frac{y_{B,2} - y_{B,1}}{\ln \left(\frac{y_{B,2}}{y_{B,1}} \right)} \quad (\text{Equação 32})$$

$$N_{A,z} = \left(\frac{CD_{AB}}{z} \right) \left(\frac{y_{A,1} - y_{A,2}}{y_{B,\text{médio}}} \right) \quad (\text{Equação 33})$$

$$\text{tal que, } \ln \left(\frac{y_{B,2}}{y_{B,1}} \right) = \frac{y_{B,2} - y_{B,1}}{y_{B,\text{médio}}} \text{ e } y_{B,2} - y_{B,1} = y_{A,1} - y_{A,2}$$

Dessa forma, as equações 30, 31 e 33 representam formas equivalentes para a determinação do fluxo molar do soluto A no processo de difusão em regime permanente através de um gás estagnado.

3.3.4. Determinação do Coeficiente de Difusão para Regime Pseudoestacionário

Na Célula de Arnold, um capilar é parcialmente preenchido com um líquido puro e volátil, representado por (A). Acima da superfície desse líquido existe uma região ocupada por um gás estagnado (ar), representado por (B). Quando o líquido (A) evapora, o vapor se difunde através dessa película gasosa até a extremidade superior do capilar.

O objetivo do uso da Célula de Arnold neste trabalho é determinar o coeficiente de difusão do vapor de (A) no gás (B). Para isso, o balanço material é realizado na fase gasosa, pois é nessa região que ocorre o transporte de massa por difusão.

Porém, à medida que o tempo passa, parte do líquido evapora e o nível do líquido dentro do capilar diminui lentamente. Essa superfície líquida representa uma fronteira do

sistema, pois é a partir dela que o vapor de (A) entra na fase gasosa. Nessa interface, a concentração de (A) está relacionada à pressão de vapor do líquido.

Embora o nível do líquido varie com o tempo, essa variação ocorre de forma lenta. Assim, para cada pequeno intervalo de tempo, considera-se que o processo de difusão na fase gasosa ocorre em regime permanente. Por esse motivo, o sistema é tratado como pseudoestacionário; ou seja, a difusão é considerada permanente em cada instante, mas a posição da interface líquido-gás muda lentamente ao longo do tempo (CREMASCO, 2026; WELTY; RORRER; FOSTER, 2017).

Portanto, em condição pseudoestacionária iguala-se o fluxo do soluto (A) no processo de difusão em regime permanente, considerando sua transferência através de meio estagnado (Equação 33) com o fluxo do soluto (A) em virtude da variação temporal da fronteira inferior da região difusiva (Equação 34). Ao igualar as equações, obtém-se a Equação 35.

$$N_{A,z} = \left(\frac{\rho_A}{M_A} \right) \left(\frac{dz}{dt} \right) \quad (\text{Equação 34})$$

$$\left(\frac{CD_{AB}}{z} \right) \left(\frac{y_{A,1} - y_{A,2}}{y_{B,médio}} \right) = \left(\frac{\rho_A}{M_A} \right) \left(\frac{dz}{dt} \right) \quad (\text{Equação 35})$$

Ao separar as variáveis e aplicar a integral, temos a configuração da Equação 36.

$$\int_0^t dt = \left(\frac{\rho_A}{M_A} \right) \frac{y_{B,médio}}{CD_{AB}(y_{A,1} - y_{A,2})} \int_{z_{t,0}}^{z_t} z dz \quad (\text{Equação 36})$$

Ao integrar a Equação 36 e isolar o coeficiente de difusão, chegamos à equação final que permite determinar o D_{AB} por meio do experimento da Célula de Arnold (Equação 37).

$$D_{AB} = \left(\frac{\rho_A}{M_A} \right) \frac{y_{B,médio}}{C(y_{A,1} - y_{A,2})t} \left(\frac{z_t^2 - z_{t,0}^2}{2} \right) \quad (\text{Equação 37})$$

3.4. APLICAÇÃO DO MÓDULO DA CÉLULA DE ARNOLD

A aplicação do módulo da Célula de Arnold foi realizada a partir da aplicação da Equação 37 aos dados experimentais obtidos para o sistema etanol(A)-ar(B), permitindo a determinação do coeficiente de difusão e a avaliação do desempenho do protótipo construído.

Conforme as condições experimentais definidas no tópico 2.2, para aplicação do módulo foi adotado as seguintes características para o ensaio:

- a) Tubo de ensaio com 10,5 cm de altura;
- b) 10 mL de etanol (altura inicial de 2,9 cm);
- c) Temperatura do etanol ao longo do experimento de 40 ± 1 °C;
- d) Temperatura do fluxo de ar seco ao longo do experimento de 65 ± 1 °C;
- e) Duração de 1 hora de processo;
- f) Monitoramento da altura da coluna líquida nos intervalos de 10, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos.

Os dados experimentais coletados foram empregados na determinação da difusividade mássica do vapor de etanol em ar seco estagnado.

Para resolver a Equação 37, foram adotadas as seguintes considerações:

- a) As propriedades físico-químicas do etanol utilizadas nos cálculos, como massa molar (M_A) e massa específica (ρ_A), foram obtidas na literatura de Perry's Chemical Engineers' Handbook (GREEN; SOUTHARD, 2019): M_A de $46,068 \frac{g}{mol}$ e ρ_A de $0,7724 \frac{g}{cm^3}$
- b) O vapor de etanol foi totalmente arrastado no topo do capilar pela corrente de ar criado pelo secador. Dessa forma, a fração molar do vapor de etanol na extremidade superior da região difusiva foi considerada nula: $y_{A_2} = 0$

- c) Embora a pressão atmosférica padrão ao nível do mar seja 1 atm, para as condições locais o valor aproximado é de 0,94 atm, equivalente a 714,4 mmHg.
- d) A fração molar do vapor de etanol na interface líquido-gás foi determinada pela razão entre a pressão de vapor do fluido e a pressão total do sistema:

$$y_{A_1} = \frac{P_A^{vap}}{P}$$

- e) Para encontrar a pressão de vapor do líquido estudado, utilizou-se a equação de Antoine (GREEN; SOUTHARD, 2019): $\log P_A^{vap} = A - \frac{B}{C+T}$
- f) O meio gasoso (ar estagnado) foi considerado como uma mistura gasosa ideal. Logo, a concentração molar da mistura pode ser calculada por $C = \frac{P}{RT}$
- g) Os valores de (z) correspondem à altura da coluna gasosa, determinada tanto na condição inicial quanto ao longo do tempo experimental. Essa altura foi obtida a partir do monitoramento da variação do nível do etanol no interior do tubo de ensaio.

Os resultados experimentais obtidos com a Célula de Arnold construída (exp) foram comparados com valores reportados na literatura (lit) - Equação 38, a fim de avaliar a coerência dos dados e a aplicabilidade do protótipo desenvolvido para a determinação da difusividade mássica do sistema estudado (CREMASCO, 2026; LAPUERTA et al., 2014).

$$Desvio = \left(\frac{exp-lit}{lit} \right) \cdot 100\% \quad \text{(Equação 38)}$$

3.5. DECLARAÇÃO DE USO DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Em conformidade com a Portaria CNPq nº 2.664/2026, foi utilizada a ferramenta de Inteligência Artificial ChatGPT (OpenAI) como apoio auxiliar na organização textual,

correção da escrita acadêmica, auxílio na conferência das referências bibliográficas, padronização das imagens (fundo e tamanho) e apoio no desenvolvimento do resumo arte. O uso da ferramenta ocorreu de forma ética, responsável e supervisionada, sem comprometer a originalidade, a autoria intelectual, a análise crítica e os resultados apresentados no estudo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CÉLULA DE ARNOLD PARA DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE DIFUSÃO

A aplicação da Célula de Arnold permitiu determinar experimentalmente o coeficiente de difusão a partir do deslocamento da interface líquido-gás ao longo do tempo. Esse procedimento fundamenta-se no modelo de difusão de uma espécie volátil A através de um gás B estagnado, conforme descrito pela Lei de Fick e pelos balanços molares aplicados ao sistema (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017; CREMASCO, 2026).

Com o decorrer do experimento, notou-se a diminuição da altura do líquido na coluna, relacionada à passagem do etanol da fase líquida para a fase gasosa e à subsequente difusão de seu vapor pelo ar existente no interior do capilar. Assim, houve um aumento na altura da coluna gasosa, refletido pela mudança de z_t ao longo do tempo. Esse movimento da interface entre líquido e gás foi empregado como critério experimental para determinar o coeficiente de difusão.

Durante a realização do experimento, os dados obtidos apresentaram comportamento consistente ao longo do tempo, porém os valores calculados para o coeficiente de difusão foram superiores aos reportados na literatura, com valores acima de 100%. Essa diferença foi atribuída, principalmente, às limitações experimentais do

módulo construído, tais como a possível interferência convectiva no interior do tubo de ensaio, a ocorrência de fluxo nas direções (x) e (y), as incertezas associadas à leitura da altura da coluna líquida e as limitações no monitoramento da temperatura do líquido. Diante disso, recomendava-se a repetição dos ensaios com a minimização dessas interferências, por meio de ajustes como a substituição do tubo de ensaio por outro de menor diâmetro, a redução do fluxo de ar, a utilização de paquímetro calibrado e com maior acurácia, além do monitoramento contínuo da temperatura do meio líquido.

Contudo, em razão da interdição dos laboratórios da UNICAL, decorrente de problemas na rede elétrica, não foi possível realizar os ajustes necessários no módulo experimental nem repetir os ensaios para a conclusão deste trabalho. Dessa forma, considerando as interferências experimentais identificadas durante a operação do equipamento e a impossibilidade de validar novas modificações, foi incorporado à equação do coeficiente de difusão um fator de ajuste empírico de 0,09. Esse fator foi adotado como uma correção específica para o aparato experimental desenvolvido neste estudo, correspondendo a um ajuste de aproximadamente 10% no resultado obtido, com o objetivo de compensar os erros sistemáticos associados às limitações construtivas e operacionais observadas, como variações de temperatura, dificuldades de vedação, influência do fluxo de ar e incertezas de medição. A adoção desse fator está fundamentada no princípio de que resultados experimentais estão sujeitos a incertezas inerentes ao processo de medição, podendo ser aplicadas correções quando identificadas fontes sistemáticas de erro e quando estas são devidamente justificadas no modelo experimental.

A inclusão desse tipo de correção encontra respaldo na literatura. Parker e Babas (2014), ao analisarem a evaporação com base no tubo de Stefan, destacaram que a determinação adequada dos parâmetros de transferência de massa depende da

consideração dos efeitos do ar ambiente, da vazão de ar e das correções de extremidade. De forma semelhante, Pommersheim e Ranck (1973), ao estudarem a determinação de coeficientes de difusão gasosa em célula de Stefan, também discutiram modificações no tratamento experimental para reduzir desvios associados ao caminho difusional. Fatores de correção são válidos em estudos de fenômenos de transporte quando há desvios em relação ao comportamento teórico (SUJINDA; VARITH, 2025).

Dessa forma, o fator de ajuste utilizado neste trabalho deve ser interpretado como uma correção empírica aplicada às condições específicas do módulo experimental construído, sendo recomendada, em estudos futuros, a readequação do módulo e repetição dos ensaios.

Após a aplicação do fator de ajuste, o coeficiente de difusão foi recalculado para cada ponto experimental. Os resultados obtidos ao longo do tempo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Coeficiente de difusão do vapor de etanol (A) em meio gasoso (B) ao longo do tempo, determinado em Célula de Arnold sob regime pseudoestacionário.

<i>Tempo (s)</i>	$D_{AB}(\frac{cm^2}{s})$
600	0,1942
1200	0,1989
1800	0,1746
2400	0,1951
3000	0,1749
3600	0,1906

A partir dos valores apresentados na Tabela 1, obteve-se

$D_{AB, médio} = 0,1880802937 \pm 0,01064134104 \frac{cm^2}{s}$. Os valores obtidos ao longo do tempo permaneceram próximos entre si, indicando comportamento experimental coerente

durante o ensaio. Esse resultado também contribui para sustentar a hipótese adotada no desenvolvimento matemático, na qual se considerou temperatura e pressão constantes ao longo do experimento. Como o coeficiente de difusão é dependente dessas variáveis, a baixa variação observada nos valores calculados sugere que as condições de temperatura e pressão se mantiveram relativamente estáveis durante o período experimental.

O coeficiente de difusão médio obtido experimentalmente teve desvio de 22,93% em relação ao valor calculado a partir de Cremasco (2026) e de 14,96% em relação a Lapuerta et al. (2014). Embora os valores obtidos tenham apresentado desvio em relação aos valores de referência, observou-se conformidades entre os resultados experimentais, indicando que as diferenças observadas estão associadas principalmente às limitações operacionais do sistema experimental.

Como toda determinação experimental está sujeita a incertezas associadas à leitura do menisco, à precisão do paquímetro, às variações de temperatura e às possíveis instabilidades do escoamento de ar, a utilização de múltiplos pontos experimentais e o ajuste por linearização constituem uma estratégia mais robusta para a obtenção do coeficiente de difusão (COSTA et al., 2016).

Dessa forma, realizou-se a linearização da equação utilizada para determinação do coeficiente de difusão, permitindo ajustar os dados experimentais por regressão linear, obter o coeficiente angular da reta e avaliar a qualidade do ajuste por meio do coeficiente de determinação (R^2). Procedimento semelhante é amplamente empregado em estudos de transferência de massa, nos quais equações derivadas da Lei de Fick são linearizadas para estimar coeficientes de difusão a partir da inclinação da reta ajustada aos dados experimentais (COSTA et al., 2016; CHIGBO et al., 2024).

A seguir, apresenta-se o desenvolvimento da linearização da equação e a obtenção da expressão linear utilizada neste trabalho.

A Equação 37, utilizada para determinação do coeficiente de difusão, foi reorganizada para uma representação linear (Equação 39).

$$D_{AB} = \left(\frac{\rho_A}{M_A} \right) \left(\frac{y_{B, médio}}{C(y_{A,1} - y_{A,2})} \right) \left(\frac{z^2 - z_0^2}{2t} \right) \quad (\text{Equação 39})$$

A parte experimental dependente do tempo é $\frac{z^2 - z_0^2}{2}$. Definindo $Y = \frac{z^2 - z_0^2}{2}$ e $X = t$, é possível empregar o modelo linear da equação da reta ($Y = mX$), Equação 40.

$$\frac{z^2 - z_0^2}{2} = mt \quad (\text{Equação 40})$$

Em que (m) representa o coeficiente angular da reta, $m = \frac{D_{AB} C(y_{A,1} - y_{A,2})}{\left(\frac{\rho_A}{M_A} \right) y_{B, médio}}$.

Isolando D_{AB} , obtém-se a Equação 41, que permite determinar a difusividade mássica por meio da linearização do dados experimentais (Figura 6).

$$D_{AB} = \frac{m \left(\frac{\rho_A}{M_A} \right) y_{B, médio}}{C(y_{A,1} - y_{A,2})} \quad (\text{Equação 41})$$

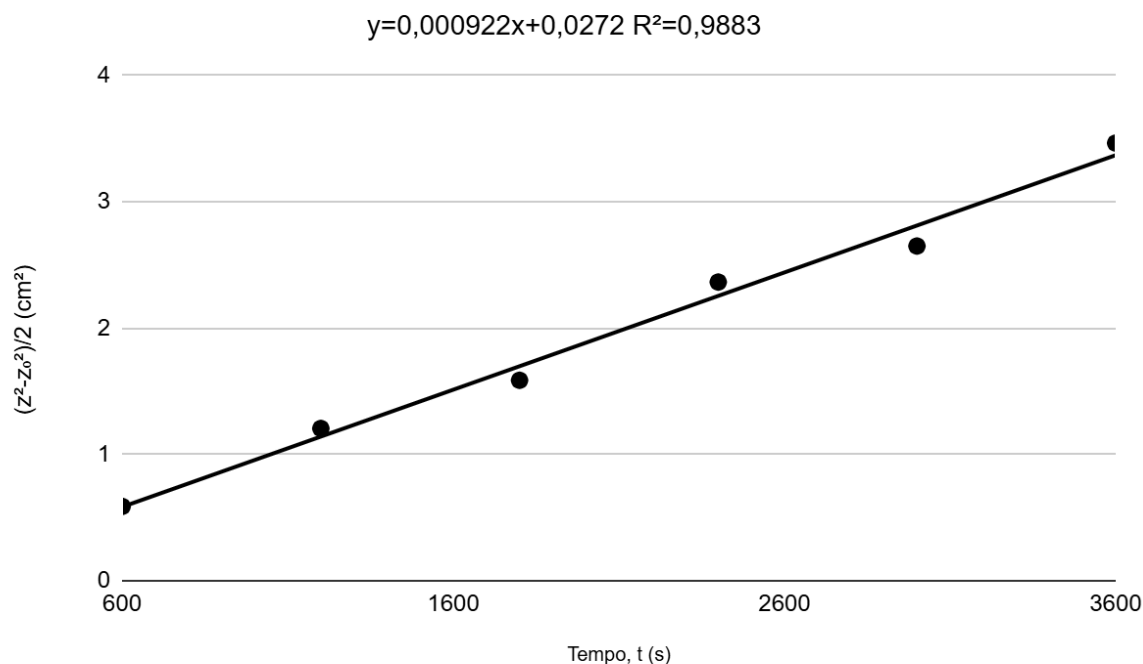


Figura 6 – Linearização dos dados experimentais para determinação do coeficiente de difusão do sistema etanol-ar

A linearização resultou na equação da reta ($y = 0,000922x + 0,0272$), com coeficiente de determinação ($R^2 = 0,9883$). O elevado coeficiente de determinação R^2 indica excelente ajuste dos dados experimentais ao modelo linear, evidenciando que a linearização representa adequadamente o comportamento do sistema estudado.

A partir do coeficiente angular da reta, o coeficiente de difusão foi novamente determinado, obtendo-se $D_{AB} = 0,1783 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$.

Após a linearização dos dados experimentais, o coeficiente de difusão obtido apresentou desvio de 16,51% e 8,96%, respectivamente para de Cremasco (2026) e o artigo de Lapuerta et al. (2024). Esses resultados indicam que a regressão linear proporcionou uma estimativa mais representativa do coeficiente de difusão em relação aos resultados obtidos ponto a ponto, reduzindo a influência de variações pontuais nas leituras experimentais.

A Tabela 2 apresenta um compilado dos resultados obtidos neste estudo em comparação aos reportados na literatura.

Tabela 2 – Comparação entre os coeficientes de difusão do sistema etanol-ar obtidos pelo cálculo direto da equação e pela regressão linear dos dados experimentais, em relação aos valores relatados na literatura para o mesmo sistema.

Método de determinação	D_{AB} experimental (cm²/s)	D_{AB} de Cremasco (2026) (cm²/s)	Desvio em relação a Cremasco (%)	D_{AB} Lapuerta et al. (2024) (cm²/s)	Desvio em relação a Lapuerta et al. (%)
Cálculo ponto a ponto	0,1881	0,153	22,93	0,1636	14,96
Regressão linear	0,1783	0,153	16,51	0,1636	8,96

A comparação entre os métodos mostra que a linearização da equação oferece melhor aproximação dos valores da literatura, reduzindo a influência dos erros experimentais. Isso acontece porque, ao linearizar a equação, se usa a regressão linear em todos os dados, não em pontos isolados, tornando o coeficiente angular mais representativo. Essa combinação melhora a estimativa do coeficiente de difusão e está alinhada com estudos sobre transferência de massa em alimentos, que também utilizam linearização e regressão (KIAN-POUR, 2023).

4.2. DESAFIOS E POTENCIALIDADES DA CÉLULA DE ARNOLD CONSTRUÍDA

A Célula de Arnold é um aparato utilizado para a determinação do coeficiente de difusão mássica de líquidos voláteis em gases, por meio do acompanhamento da redução da altura da coluna líquida na direção (z) ao longo do tempo, decorrente da evaporação da espécie A e de sua difusão através da fase gasosa B (MEIRELLES et al., 2011; OLIVEIRA et al., 2024).

A elaboração da Célula de Arnold foi feita com itens de fácil acesso, adquiridos na cidade Campo Grande - MS, enquanto as ferramentas para cortar, ajustar e adaptar o módulo foram fornecidas pela Unidade de Ciência de Alimentos (UNICAL) da Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Alimentos e Nutrição (FACFAN) da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). A ideia de empregar materiais acessíveis estava ligada à finalidade educacional do dispositivo, com o objetivo de permitir sua reprodução em atividades práticas para a disciplina de Fenômenos de Transporte II do curso de Engenharia de Alimentos da UFMS.

Com base nas fontes analisadas, não existe uma norma estrita sobre as medidas do tubo de PVC a ser utilizado na Célula de Arnold. Contudo, algumas condições experimentais precisam ser observadas para assegurar a precisão do teste, como a manutenção de uma coluna de gás estável, para que o transporte ocorra predominantemente por difusão molecular, reduzindo efeitos convectivos indesejados (WELTY; RORRER; FOSTER, 2017).

Dessa forma, na montagem do módulo, os principais obstáculos envolveram a vedação entre o tubo de ensaio e o tubo de PVC, a regulagem da altura do sistema e o posicionamento correto do secador, de maneira que o fluxo de ar promovesse apenas o transporte do vapor na parte superior, sem entrar no tubo de ensaio.

Nos primeiros modelos, como ilustrado na Figura 5, foi empregada sílica entre os tubos para remover a umidade do fluxo de ar. No entanto, o calor gerado no secador mostrou-se suficiente para remover a umidade presente no meio gasoso, dispensando o uso desse material. Essa adequação contribuiu para a redução dos custos operacionais e da necessidade de manutenção/reposição da sílica.



Figura 5 - Montagem inicial do equipamento.

Durante um dos testes, ocorreu a perda de um protótipo construído devido à deformação do tubo de PVC, causada pelo excesso de calor acima do limite máximo recomendado para uso contínuo desse material. De acordo com a ficha técnica da Linha PVC-U Industrial da Tigre, os tubos e conexões de PVC-U apresentam temperatura máxima de serviço de 60 °C. Esse incidente evidenciou a importância de um controle mais rigoroso da temperatura de operação, especialmente em sistemas construídos com materiais poliméricos sensíveis ao aquecimento.

Com o objetivo de evitar a entrada de ar externo entre o tubo de ensaio e o tubo de PVC, foi adaptada uma tampa rosqueável, encaixada no furo realizado no tubo. Essa modificação contribuiu para melhorar a vedação do sistema e reduzir possíveis interferências externas durante os ensaios. A vedação adequada é fundamental para que o processo observado esteja mais próximo das condições previstas pelo modelo teórico, no qual a espécie A se difunde através da espécie B estagnada.

Durante a obtenção de informações, um dos desafios mais significativos foi a apresentação correta do gradiente de altura da coluna de líquido com o passar do tempo. Nos testes iniciais, as medições foram feitas somente com a ajuda de papel milimetrado preso do lado de fora do tubo, o que não garantiu dados confiáveis o suficiente para o cálculo do coeficiente de difusão. Para aumentar a exatidão das medições e conseguir valores com mais casas decimais, em experimentos posteriores foi empregado um paquímetro digital.

Também foi observada, em alguns testes, uma redução rápida do volume de líquido, indicando possível interferência do fluxo de ar do secador no interior do tubo de ensaio. Essa condição pode ter intensificado efeitos convectivos e térmicos, comprometendo a hipótese de difusão em meio gasoso estagnado. Para minimizar esse problema, foi necessário ajustar a altura e o posicionamento do secador, de modo a evitar que o fluxo de ar interferisse diretamente na superfície do líquido.

Outro ponto identificado durante os ensaios foi um equívoco relacionado à medição da temperatura. A temperatura que deveria ser acompanhada era a do fluido líquido A, uma vez que ela influencia diretamente as propriedades físico-químicas envolvidas no processo, incluindo a pressão de vapor e o coeficiente de difusão. No entanto, inicialmente foi monitorada apenas a temperatura do fluxo de ar gerado pelo secador, a qual permaneceu constante.

Para ensaios futuros, recomenda-se o acompanhamento da temperatura do líquido, preferencialmente com o auxílio de um termômetro infravermelho ou outro instrumento adequado, a fim de obter dados mais representativos das condições reais do sistema.

Após cada experimento, foram necessários ajustes no equipamento, evidenciando o caráter experimental e evolutivo da construção do protótipo. Apesar de a Célula de Arnold construída demonstrar estabilidade experimental comprovada, ainda são

necessários aprimoramentos para reduzir a diferença entre os valores obtidos experimentalmente e aqueles disponíveis na literatura. Entre os principais ajustes recomendados, destaca-se a substituição do tubo de ensaio utilizado. O tubo empregado no equipamento apresenta diâmetro aproximado de 3 cm, dimensão relativamente elevada para esse tipo de análise. Esse diâmetro pode facilitar a interferência do fluxo de ar e favorecer efeitos convectivos, resultando em valores de coeficiente de difusão superiores aos reportados na literatura. Welty et al. (2017) citam o uso de capilares para esse tipo de experimento, o que indica que tubos de menor diâmetro são mais adequados para a análise da variação da altura da coluna líquida ao longo do tempo. Além de reduzir interferências externas, a utilização de um tubo mais estreito pode facilitar a leitura do deslocamento da interface líquido-gás.

A explicação da dedução matemática até chegar à equação final do coeficiente de difusão é fundamental, pois facilita a compreensão da base da expressão utilizada nos cálculos, prevenindo a aplicação apenas mecânica. Com base na Lei de Fick, no balanço molar e nas condições de contorno do sistema, é possível relacionar o fenômeno observado experimentalmente com o modelo teórico adotado, uma vez que a análise de fenômenos de transporte exige a formulação matemática dos fluxos, dos balanços e das hipóteses do sistema (BIRD; STEWART; LIGHTFOOT, 2004).

Na Engenharia de Alimentos, essa compreensão é essencial, pois diversos processos industriais envolvem transferência de massa, como secagem, evaporação, extração, absorção, destilação, cristalização e operações com membranas. Assim, a dedução matemática contribui para interpretar corretamente as variáveis envolvidas, reconhecer as limitações do modelo e identificar possíveis fontes de erro experimental (CREMASCO, 2026).

Dessa forma, incluir a dedução fortalece a fundamentação teórica do trabalho e reforça o caráter didático da Célula de Arnold, aproximando os conceitos de Fenômenos de Transporte da prática experimental.

Além disso, o desenvolvimento do protótipo possibilitou a visualização prática de conceitos frequentemente abordados de forma abstrata em sala de aula, como gradiente de concentração, difusão molecular, resistência à transferência de massa, condição de gás estagnado e regime pseudoestacionário. A experiência também favoreceu a compreensão da importância do controle das variáveis experimentais, como temperatura, geometria do sistema, vedação e precisão das medições, uma vez que práticas laboratoriais baseadas em projetos contribuem para aproximar fundamentos teóricos de situações experimentais aplicadas, favorecendo o desenvolvimento de competências técnicas na formação em engenharia (ALMEIDA; SANTOS, 2020).

5. CONCLUSÃO

A elaboração e posterior verificação do aparato de Arnold comprovaram que sua aplicação como recurso pedagógico e prático é plenamente viável no âmbito da disciplina de Fenômenos de Transporte para a graduação em Engenharia de Alimentos, promovendo a união direta entre os conceitos teóricos da difusão molecular e a respectiva experimentação laboratorial. A estruturação deste protótipo viabilizou a investigação de tópicos fundamentais, englobando a transferência de matéria, formulações matemáticas, manipulação de dados em laboratório e avaliação detalhada dos resultados obtidos, o que impulsiona um aprendizado substancial e consolida a qualificação acadêmica dos estudantes da área. Haja vista que tais fenômenos físicos fundamentam o projeto, o controle e a maximização da eficiência de múltiplas operações unitárias na indústria, o emprego de metodologias práticas baseadas nesse tipo de célula solidifica a absorção

dos conteúdos, estimulando tanto o pensamento científico quanto a aptidão para decodificar dinâmicas físicas complexas. Desse modo, o presente estudo expande os horizontes das atividades laboratoriais no ensino superior, servindo de alicerce para desdobramentos em pesquisa, extensão e docência, além de impulsionar futuras otimizações no design do equipamento para avaliação de variados sistemas difusivos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, Natalia Pazin; SANTOS, Kassia Graciele dos. Chemical Engineering Laboratory teaching using Project-based learning approach: gas adsorption using banana peel. *Research, Society and Development*, [s. l.], v. 9, n. 3, p. e184932716, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i3.2716.

AL-NAJJAR, S. Z. et al. Advances in mass transfer and fluid flows in non-thermal food processing industry: a review. *Food Production, Processing and Nutrition*, [s. l.], v. 5, n. 50, p. 1–18, 2023.

ARNOLD, J. H. Studies in diffusion. I: estimation of diffusivities in gaseous systems. *Industrial & Engineering Chemistry*, [s. l.], v. 22, n. 10, p. 1091–1096, 1930a.

ARNOLD, J. H. Studies in diffusion. II: a kinetic theory of diffusion in liquid systems. *Journal of the American Chemical Society*, [s. l.], v. 52, n. 10, p. 3937–3955, 1930b.

AZEREDO, H. M. C.; OTONI, C. G.; MATTOSO, L. H. C. Edible films and coatings: not just packaging materials. *Current Research in Food Science*, [s. l.], v. 5, p. 245–252, 2022.

BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E.; LIGHTFOOT, Edwin N. Fenômenos de transporte. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2004. 838 p. ISBN 9788521613930.

CANEDO, E. L. Fenômenos de transporte. Rio de Janeiro: LTC, 2010. E-book. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/978-85-216-2441-7/>. Acesso em: 28 abr. 2026.

CHIGBO, K. S. et al. Mathematical modeling of the effects of thickness and temperature on thin-layer drying kinetics and effective diffusivity of unripe cooked banana slices. *Journal of Umm Al-Qura University for Applied Sciences*, 2024.

COSTA, C. da; SILVA, E. S.; NUNES, I.; BUENO, J. F.; LEIDENS, N.; ANIBELE, T. P. Montagem de uma célula de Arnold para determinação da difusividade mássica de líquidos em ar estagnado. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 21.; ENCONTRO BRASILEIRO SOBRE O ENSINO DE ENGENHARIA QUÍMICA, 15., 2016, Fortaleza. Anais [...]. Fortaleza: ABEQ, 2016. p. 1–8.

CREMASCO, Marco Aurélio. Transferência de massa, v. 3: equações de transporte e operações unitárias. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2026. 1 recurso online (553 p.). ISBN 9788521225416.

FADIJI, T. et al. Finite element method for freezing and thawing industrial food processes. *Foods*, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 869, 2021.

GREEN, Don W.; SOUTHARD, Marylee Z. (ed.). *Perry's chemical engineers' handbook*. 9. ed. New York, NY: McGraw Hill Education, 2019. xvi, [2243] p. ISBN 9780071834087.

GONZÁLEZ-PÉREZ, J. E. et al. Modeling mass transfer during osmodehydration of apple cubes with sucrose or apple juice concentrate solutions: equilibrium estimation, diffusion model, and state observer-based approach. *Journal of Food Process Engineering*, [s. l.], v. 45, n. 9, e14125, 2022.

KIAN-POUR, N. Effect of biopolymer dip-coating pretreatments as a non-thermal green technology on physicochemical characteristics, drying, and rehydration kinetics of Santa Maria pears. *Foods*, v. 12, n. 13, p. 2466, 2023. DOI: 10.3390/foods12132466.

LAPUERTA, Magín; HERNÁNDEZ, Juan Pablo; AGUDELO, John R. An equation for the estimation of alcohol-air diffusion coefficients for modelling evaporation losses in fuel systems. *Applied Thermal Engineering*, v. 73, n. 1, p. 537-546, 2014. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.08.009.

MEIRELLES, Polyana Otto de et al. Montagem de uma célula de Arnold para determinação da difusividade mássica de clorofórmio em ar estagnado. *Unoesc & Ciência*, Joaçaba, 2011.

OLIVEIRA, Alicia Gross; SCHMITT, Amanda da Silva; VARGAS, Guilherme da Rosa; CAMPESTRINI, Gustavo Machado. Determinação experimental do coeficiente de difusão: Célula de Arnold. [S. l.: s. n.], [s. d.]. *Boletim acadêmico*.

OLIVEIRA, Samara Lopes Pereira de; SOUSA, Sabrina Lune Silva Nascimento; CARVALHO JÚNIOR, Robson de Oliveira; RODRIGUES, Sthefany Rebouças; SANTANA, Thiago Paim; AZEVEDO, Lenise Cerqueira. Determinação da difusividade mássica de líquidos em ar estagnado através da construção de uma Célula de Arnold. *Revista Foco*, [s. l.], v. 17, n. 11, e6922, p. 1–4, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n11-165.

PARKER, A.; BABAS, R. Thermogravimetric measurement of evaporation: data analysis based on the Stefan tube. *Thermochimica Acta*, v. 595, p. 67-73, 2014. DOI: 10.1016/j.tca.2014.09.011.

POMMERSHEIM, J. M.; RANCK, B. A. Measurement of gaseous diffusion coefficients using the Stefan cell. *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, v. 12, n. 2, p. 246-250, 1973. DOI: 10.1021/i160046a019.

ROSSA, Guilherme Evaldt. Extração e fracionamento de óleo essencial de *Piper hispidinervum* e produção de nanoemulsão e nanocápsulas: experimentos e modelagem. 2019. Tese (Doutorado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019.

SUJINDA, Narathip; VARITH, Jaturapatr. Simulation of transport phenomena for microwave freeze-drying of potato slices using finite element analysis. *Food Frontiers*, v. 6, p. 532-548, 2025. DOI: 10.1002/fft2.508.

TIGRE. Linha PVC-U Industrial: ficha técnica. [S. l.]: Tigre, [s. d.]. Disponível em: https://tigrecombr-prod.s3.amazonaws.com/default/files/produtos/ficha-tecnica/Linha_PVC-U%20%283%29.pdf. Acesso em: 6 jun. 2026.

WELTY, J. R.; RORRER, G. L.; FOSTER, D. G. Fundamentos de transferência de momento, de calor e de massa. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017. E-book. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521634201/>. Acesso em: 22 ago. 2025.