



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

JOSÉ CAVALCANTE DE QUEIROZ NETO

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA ENTRE ÁGUA DESTILADA E
DIÓXIDO DE CARBONO EM UM SISTEMA DE MICRO CANAIS**

JOÃO PESSOA

2019

JOSÉ CAVALCANTE DE QUEIROZ NETO

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA ENTRE ÁGUA DESTILADA E
DIÓXIDO DE CARBONO EM UM SISTEMA DE MICRO CANAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas

JOÃO PESSOA

2019

N469e Neto, José Cavalcante de Queiroz.

Estudo da Transferência de Massa entre Água Destilada e
Dióxido de Carbono em um Sistema de Micro Canais / José
Cavalcante de Queiroz Neto. - João Pessoa, 2019.

45 f. : il.

Orientação: Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas.
TCC (Especialização) - UFPB/CT.

1. Micro canal. 2. Coeficiente de transferência de
massa volumétrico. 3. Absorção de CO₂. I. Rojas,
Leopoldo Oswaldo Alcázar. II. Título.

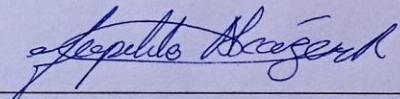
JOSÉ CAVALCANTE DE QUEIROZ NETO

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE MASSA ENTRE ÁGUA DESTILADA E
DIÓXIDO DE CARBONO EM UM SISTEMA DE MICRO CANAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação apresentado ao Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Aprovado em 29 de abril de 2019

BANCA EXAMINADORA

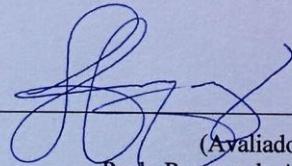


(Orientador)

Prof. Dr. Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas
Universidade Federal da Paraíba

(Avaliador)

Prof. Dr. Arioston Araújo de Moraes Júnior
Universidade Federal da Paraíba



(Avaliador)

Paulo Romero de Araújo Mariz
Universidade Federal da Paraíba

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Harriman Comberlang de Queiroz Barbosa e Rebeca Gomes Queiroz Barbosa, sem os quais eu não teria chegado até aqui.

Agradeço ao meu irmão, Krystian Comberlang de Queiroz Barbosa, pelo apoio e incentivo em continuar nessa jornada.

Agradeço ao professor Leopoldo Oswaldo Alcázar Rojas, a oportunidade de tê-lo como orientador de Iniciação Científica e Trabalho Final de Curso. Agradeço pela confiança, pela amizade, conselhos e paciência.

Agradeço ao professor Arioston Araújo de Moraes Júnior, por partilhar de seus conhecimentos, por todos os conselhos e pela amizade.

Agradeço aos técnicos Alexsandro Fernandes Marinho e Marcelo Felipe, por partilhar experiências, conselhos, auxílio no processo acadêmico e pela amizade.

Agradeço aos familiares que estiveram ao meu lado incentivando e acreditando em meus sonhos.

Agradeço aos meus amigos Michael Rinaldo, Iago Barros, Luiz Antônio e Danilo Brito pela amizade.

Agradeço aos meus amigos de intercâmbio Fernanda, Lucas, Guilherme, Roberto, Igor e Bruno, por serem a minha segunda família, pelo apoio, conselhos e amizade.

Agradeço aos colegas que a vida acadêmica me proporcionou, Lucas Albuquerque, Priscila Araújo, Thiago Marinho, Victor Felipe, Clara Nóbrega, Clara Soares, Maria Eduarda, Brunno Carvalho, Daniele Cunha, Edvan Santos, e em especial aos colegas do Laboratório de Modelagem Computacional e Controle de Processos – LABMC.

RESUMO

O estudo do fenômeno de transferência de massa entre fases realizado em micro canais vem sendo desenvolvido com a finalidade de intensificar os processos. O aumento do contato entre as fases promove maiores coeficientes de transferência de massa. Neste trabalho, o contato gás-líquido promovido foi entre água destilada e dióxido de carbono e teve como característica principal o escoamento paralelo estratificado e ondular. No estudo, foram quantificados os números de Reynolds, que corresponderam ao intervalo 212-563, variando a velocidade superficial do gás no intervalo de 0,46-1,84 m/s e a velocidade superficial do líquido no intervalo de 0,034-0,071 m/s. Foi realizada ainda a quantificação da transferência de massa através do cálculo do coeficiente de transferência de massa volumétrico para diferentes condições de operação. Os resultados permitiram analisar os efeitos da temperatura e das características do escoamento entre as fases líquida e gasosa na eficiência da transferência de massa em micro canais. Ainda, os coeficientes de transferência de massa volumétrico foram calculados, atingindo valores de até $3,80 \text{ s}^{-1}$. Esse valor mostra que o equipamento de transferência de massa utilizado é tem melhor eficiência do que alguns equipamentos convencionais de transferência de massa utilizados na indústria, como colunas recheadas e misturadores estáticos.

Palavras-chave: Micro canal. Coeficiente de transferência de massa volumétrico. Absorção de CO₂.

ABSTRACT

The study of the mass transfer phenomena between phases carried out in microchannels has been developed seeking to intensify the processes. Increased contact between the phases promotes higher mass transfer coefficients. In this work, the promoted gas-liquid contact was between distilled water and carbon dioxide and had as main characteristic the stratified and corrugated parallel flow. In this study, the Reynolds numbers, which corresponded to the interval of 212-563, were quantified by varying the gas surface velocity in the range of 0.46-1.84 m/s and the liquid surface velocity in the range of 0.034-0.071 m/s. The mass transfer quantification was also performed by calculating the volumetric mass transfer coefficient for different operating conditions. The results allowed to analyze the effects of temperature and flow characteristics between the liquid and gaseous phases on the mass transfer efficiency in microchannels. Furthermore, the volumetric mass transfer coefficients were calculated, reaching values up to 3.80 s^{-1} . This value shows that the mass transfer equipment used has higher efficiency than conventional mass transfer equipment used in industry, such as packed columns and static mixers.

Key words: Microchannel; Volumetric mass transfer coefficient; CO₂ absorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tipos de fluxo desenvolvidos em canais com escoamento de fluido gasoso e líquido.....	17
Figura 2 - Constantes de Henry para o dióxido de carbono em água.....	20
Figura 3 - Sistema de transferência de massa utilizado no projeto	21
Figura 4 - Sistema completo montado	23
Figura 5 - Esquema de ligação do sensor de fluxo de água e a placa Arduino	24
Figura 6 - Manômetro para dióxido de carbono com fluxômetro acoplado	24
Figura 7 - Curva de titulação de carbonatos pelo método de titulação de Warder.....	26
Figura 8 - Válvula utilizada para controle do fluxo de água.	29
Figura 9 - Comportamento do número de Reynolds com relação às mudanças de temperatura do sistema gás-líquido com velocidade de dióxido de carbono fixada em 1,381 m/s	32
Figura 10 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa na temperatura de 10 °C, variando-se as velocidades das fases líquida e gasosa.	34
Figura 11 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa na temperatura de 10 °C, variando-se as velocidades das fases líquida e gasosa.	34
Figura 12 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa na temperatura de 10 °C, variando-se as velocidades das fases líquida e gasosa.	35
Figura 13 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa volumétrico com relação à fixação da velocidade da água para 0,035 m/s e variação da velocidade do gás.....	36
Figura 14 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa volumétrico com relação à fixação da velocidade da água para 0,071 m/s e variação da velocidade do gás.....	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Solubilidade do dióxido de carbono em água como uma função da temperatura	19
Tabela 2 - Concentrações das soluções de HCl e NaOH.....	27
Tabela 3 - Números de Reynolds correspondentes aos fluxos desenvolvidos no canal em estudo em função da temperatura.....	31
Tabela 4 - Coeficientes de transferência de massa com relação às velocidades das fases do sistema e da temperatura.	33
Tabela 5 - Quantidade de dióxido de carbono transferidos no processo de absorção em função das velocidades das fases e da temperatura.	38
Tabela 6 - Equipamentos de transferência de massa e seus respectivos coeficientes volumétricos de massa.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	FENÔMENOS DE TRANSPORTE	10
1.2	MICRO CANAIS	11
1.3	MOTIVAÇÃO E APLICABILIDADE.....	11
1.4	OBJETIVOS.....	12
1.4.1	Objetivo Geral.....	12
1.4.2	Objetivos Específicos	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1	TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA	13
2.2	CARACTERÍSTICAS DE ESCOAMENTO.....	16
2.3	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO	18
2.4	REAÇÕES.....	19
3	METODOLOGIA	21
3.1	SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA	21
3.2	ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO.....	25
4	RESULTADOS.....	30
5	CONCLUSÕES	40
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
	ANEXO A – CÓDIGO ARDUÍNO	44

1 INTRODUÇÃO

1.1 FENÔMENOS DE TRANSPORTE

Os fenômenos de transporte são a base para qualquer processo químico e físico. Esta área da engenharia engloba as transferências de quantidade de movimento, calor e massa. Esses três fenômenos descrevem qualquer operação que envolva espécies químicas. O transporte de massa é o foco deste trabalho, sendo muito importante em operações que envolvam reações químicas e processos de separação (CREMASCO, 2008).

Os processos de separação, como adsorção, absorção, secagem e destilação, e os processos de reação utilizam equipamentos específicos para realizar as transferências de massa. Um importante parâmetro para esses equipamentos é a capacidade de se alterar características físicas dos equipamentos com a finalidade de promover a transferência de massa. Equipamentos como colunas de absorção, colunas de destilação, fornos de secagem, reatores químicos são alguns dos equipamentos que promovem as transferências de massa (WELTY et al., 2015).

Neste trabalho, se detalha o estudo de absorção ao pôr em contato uma corrente de dióxido de carbono gasoso com uma outra corrente líquida de água.

Especificamente, o processo de absorção gasosa ocorre em colunas de absorção, onde o contato entre as fases é promovido em grande escala. Nesses equipamentos, o desempenho da transferência de massa é medido pelo coeficiente de transferência de massa convectivo, o qual é o mecanismo predominante durante a convecção, e pela quantidade de dióxido de carbono absorvido, em partes por milhão (ppm). Esse coeficiente, representativamente, indica o quanto eficiente é a transferência de massa em determinado equipamento.

1.2 MICRO CANAIS

A tecnologia da microescala vem sendo aplicada em diversas áreas da engenharia e da ciência em geral. Experimentos realizados em pequena escala auxiliam no entendimento dos fenômenos envolvidos nos processos estudados, devido ao maior controle sobre as variáveis que influenciam nessas operações. A utilização de micro canais para criação de reatores químicos, sistemas de extração e absorção, análise de fluxo, são exemplos bastante importantes dessa nova tecnologia (ONG et al., 2008).

As transferências de massa e de calor são muito eficientes em micro canais (KANDLIKAR e GRANDE, 2003). Diversas reações químicas podem ser efetuadas nesses canais com o objetivo de se estudar propriedades térmicas, cinéticas e de mistura de reagentes, já que se consegue controlar diversas variáveis que influenciam nesse processo com grande precisão. Alguns microdispositivos vêm sendo criados com o objetivo de facilitar esse estudo. Existem estudos que se propõem a analisar o custo-benefício da substituição de reatores químicos de grande escala por diversos micro reatores, baseando-se nas conversões, controle de temperatura e pressão, volume, custo e segurança industrial. Embora os micro canais tragam todos esses benefícios em contraste às operações e equipamentos convencionais, o seu custo de produção cresce à medida que a sua escala decresce (KREUTZER et al., 2003).

1.3 MOTIVAÇÃO E APLICABILIDADE

Um dos motivos de se estudar essa relação de absorção água-CO₂ em micro canais é que a absorção tende a ser mais eficiente em micro canais, se comparado aos métodos de absorção convencionais (TAN et al., 2012). Assim, pode-se utilizar os parâmetros obtidos para criação de novos equipamentos que utilizem menos solvente para captura de CO₂, compensando o seu preço de fabricação.

Outro fator importante neste trabalho é que essa tecnologia vem sendo desenvolvida ao longo dos anos devido às suas premissas de melhorar as eficiências dos processos de transporte. Diversos equipamentos vêm sendo criados e testados para tal finalidade, como micro reatores, por exemplo. Com esses dados, ainda, podemos modelar computacionalmente e

desenvolvendo esse modelo, podemos aplicá-lo para outras configurações e aplicações, como envolvendo reações químicas. Prevendo os resultados computacionalmente, podemos validar o modelo em laboratório e assim avançar nessa tecnologia para escalas maiores.

A questão ambiental é um fator determinante para pesquisa, uma vez que a captura de dióxido de carbono é executada pela indústria em grande escala para evitar emissões, bem como para o uso industrial. Pesquisas realizadas com esse âmbito são importantes para o desenvolvimento de novas tecnologias que aumentem a eficiência desse processo, assim como a sua frequência e diminuição dos custos de realização.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo estudar o desempenho da transferência de massa gás-líquido entre duas correntes em um micro canal.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Construir o sistema de transferência de massa completo, que compõe os sistemas de medição de vazão, medição de concentração e montagem com o dispositivo de transferência de massa;
- Promover sistema de medição de fluxo e concentração de baixo custo;
- Obter resultados que caracterizem a transferência de massa;
- Avaliar o comportamento dos equipamentos utilizados;
- Calcular principais parâmetros para caracterizar o sistema e comparar com sistemas convencionais.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA

A transferência de massa tem como força motriz o gradiente de concentração de uma ou mais espécies existentes em um sistema. Essas espécies são denominadas solutos, que podem estar no estado sólido, líquido ou gasoso. Os mecanismos pelos quais o transporte de massa ocorre são dois: a difusão e a convecção. Esses dois mecanismos podem ocorrer isolada ou simultaneamente (WELTY et al., 2015).

A difusão, também conhecida como difusão molecular, tem como principal característica o movimento das partículas inerentes às condições termodinâmicas, ou seja, movimentação aleatória das moléculas de acordo com as leis da termodinâmica. A transferência de massa convectiva tem como principal fator as características dinâmicas do fluido que está em movimento no momento da transferência (CREMASCO, 2008).

A transferência de massa por convecção também pode ser subdividida em dois tópicos: a convecção natural, onde os fluidos se movimentam devido a uma diferença de densidade entre os fluidos e a convecção forçada, onde os fluidos entram em movimento com o estímulo de uma força externa, como uma bomba ou compressor, por exemplo (CREMASCO, 2008).

A transferência de massa convectiva, como já foi mencionado, ocorre devido a diferença de concentrações até que esse gradiente seja zero, ou seja, o equilíbrio seja alcançado. Em sistemas com fases líquida ou gasosa consideradas ideais, temos as leis de Raoult e Dalton para descrever o sistema. Para sistemas que envolvem soluções diluídas, é utilizada a lei de Henry para descrever o equilíbrio

$$p_s = H * C_{s,l} \quad (1)$$

em que p_s é a pressão parcial no equilíbrio do soluto s , H é o coeficiente da lei de Henry e $C_{s,l}$ é a concentração de s no seio da fase líquida (WELTY et al., 2015).

O fluxo de transferência de massa através da interface formada pelo contato gás-líquido pode ser representado por (WELTY et al., 2015):

$$N_s = k_G * (p_s - p_{s,i}) \quad (2)$$

$$N_s = k_L * (C_{s,i,l} - C_{s,l}) \quad (3)$$

onde k_G é o coeficiente de transferência de massa na fase gasosa, p_s é a pressão parcial de s na fase gasosa, $p_{s,i}$ é a pressão parcial de s na interface gás-líquido, k_L é o coeficiente de transferência de massa na fase líquida, $C_{s,i,l}$ é a concentração de s na interface gás-líquido, e $C_{s,l}$ é a concentração de s no seio da fase líquida.

Em casos onde a solubilidade do gás no líquido é muito baixa, como é o caso do dióxido de carbono na água, a resistência da fase gasosa é muito baixa e assim a resistência da fase líquida é predominante quando a resistência global é analisada. Desta forma, podemos dizer que a fase líquida controla a transferência de massa (HASLAM et al., 1924).

Assim, a Eq. (3) é a nossa equação de transferência de massa do sistema.

Realizando um balanço de massa na fase líquida, podemos descrever o fluxo de soluto que vai ser transferido da fase gasosa para a fase líquida:

$$\begin{aligned} & (\text{sólido que entra}) - (\text{sólido que sai}) + (\text{sólido gerado}) \\ & = (\text{acúmulo de sólido}) \end{aligned} \quad (4)$$

onde o fluxo que sai da fase líquida para a fase gasosa é zero, já que a fase de maior concentração de soluto é a fase gasosa, e o termo de geração é nulo, já que não se gera soluto na fase líquida, para o caso de absorção de dióxido de carbono. Com isso, temos que:

$$(\text{sólido que entra}) = (\text{acúmulo de sólido}) \quad (5)$$

$$N_s * A = \frac{d(V * C_{CO_2})}{dt} \quad (6)$$

Tomando o volume e a área como características intrínsecas do sistema de transferência, definindo $\frac{A}{V} = a$, com a sendo a área interfacial com unidades de $[m^{-1}]$, temos:

$$N_s * a = \frac{d(C_{CO_2})}{dt} \quad (7)$$

Substituindo a Eq. (7) na Eq. (3), temos:

$$\frac{d(C_{CO_2})}{dt} = (k_L * a) * (C_{s,i,l} - C_{s,l}) \quad (8)$$

em que $C_{s,i,l}$ pode ser substituído por $C_{CO_2}^*$, como sendo a concentração de dióxido de carbono no ponto de saturação, e $C_{s,l}$ por C_{CO_2} , como sendo a concentração de dióxido de carbono medido no momento da quantificação.

Por fim, podemos integrar essa equação do tempo zero, quando a concentração de CO₂ na fase líquida é inicial ($C_{CO_2}^i$), até o tempo t, onde a concentração de CO₂ na fase líquida é C_{CO_2} . Assim:

$$\int_{C_{CO_2}}^{C_{CO_2}^i} \frac{d(C_{CO_2})}{(C_{CO_2}^* - C_{CO_2})} = (k_L * a) * \int_t^0 dt \quad (9)$$

$$\ln\left(\frac{C_{CO_2}^* - C_{CO_2}^i}{C_{CO_2}^* - C_{CO_2}}\right) = -k_L * a * t \quad (10)$$

Podemos substituir o tempo por:

$$t = \frac{L}{v_L} \quad (11)$$

Finalmente, a equação final do coeficiente convectivo de transferência de massa volumétrico é dada por (TORTOPIDIS e BONTOZOGLOU, 1997):

$$k_L * a = \frac{v_L}{L} * \ln\left(\frac{C_{CO_2}^* - C_{CO_2}^i}{C_{CO_2}^* - C_{CO_2}}\right) \quad (12)$$

2.2 CARACTERÍSTICAS DE ESCOAMENTO

Na análise de transferência de massa, estudos com relação a diversos parâmetros relacionados ao escoamento são feitos. Esses parâmetros incluem números adimensionais que ajudam a descrever o regime de fluxo dos fluidos envolvidos no escoamento, como os números de Reynolds, Sherwood e Schmidt, a configuração geométrica do micro canal e o próprio coeficiente de transferência de massa (KREUTZER et al., 2003).

Com relação aos números adimensionais, o número de Reynolds é a razão das forças viscosas e das forças iniciais:

$$Re = \frac{\rho * v * d}{\mu} \quad (13)$$

onde ρ é a massa específica, v é a velocidade do fluido, d é o diâmetro do canal e μ é a viscosidade dinâmica. Em micro canais, o número de Reynolds é muito pequeno, porque o diâmetro da tubulação é bastante reduzido. Com isso, dizemos que as forças viscosas exercem certa dominância sobre as forças iniciais.

O número de Sherwood representa a razão entre a transferência de massa convectiva e a transferência de massa por difusão molecular. Este número é muito importante, já que ele valida o mecanismo de transferência de massa a ser estudado. Com relação ao número de Schmidt, este relaciona a difusão viscosa com a difusão molecular (KASHID et al., 2011).

$$Sh = \frac{k_L * d}{D_m} \quad (14)$$

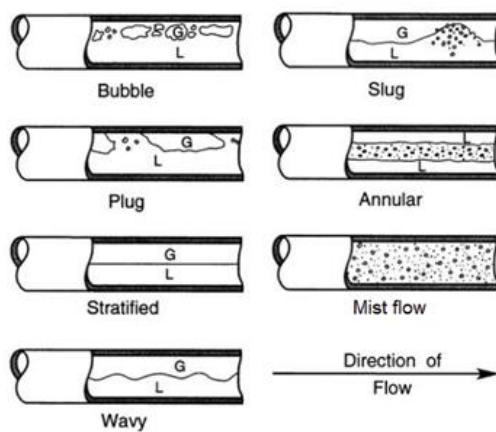
$$Sc = \frac{\mu_L}{\rho * D_m} \quad (15)$$

Podemos ver a aplicabilidade desses números e desses fatores que são utilizados para caracterizar a transferência de massa quando analisamos o significado do coeficiente de transferência de massa volumétrico ($k_L * a$). O termo k_L , que representa o coeficiente de transferência na fase líquida, é relacionado com a difusividade do soluto e com a hidrodinâmica da área interfacial. O termo a , que é a área interfacial, é relacionado com os números de Reynolds, com a geometria de contato entre os fluidos e com a seção transversal do micro canal.

Já quando falamos dos mecanismos de transferência de massa, o número de Sherwood, o número de Schmidt e o coeficiente de transferência de massa volumétrico são os fatores usados para descrever esse fenômeno.

Vários pesquisadores analisaram as relações hidrodinâmicas entre os fluxos de gás e de líquido dentro dos micro canais e definiram uma classificação específica, como é mostrado na Fig. 1:

Figura 1 - Tipos de fluxo desenvolvidos em canais com escoamento de fluido gasoso e líquido.



Fonte: CHEREMISINOFF e GUPTA (1983).

Esses padrões de fluxo, também conhecidos como regimes de fluxo, são de grande importância para a determinação das características da transferência de massa. Esses tipos de perfis de fluxo caracterizam a eficiência da transferência de massa, porque, como já foi dito anteriormente, essa depende diretamente da geometria do canal e das condições de operação. O conhecimento dessas informações é muito relevante para essas situações, porque na escala micro as correlações de transferência de massa utilizadas para a escala macro não são aplicáveis, já que nesta as forças interfaciais são as dominantes (KASHID et al., 2011).

Os fatores que são determinantes para o desenvolvimento de um tipo de fluxo ou o outro são as velocidades das fases relativas que compõem o sistema, o ângulo de mistura na entrada do sistema, as dimensões do micro canal, e as características físico-químicas dos fluidos.

2.3 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO

O perfil do escoamento a ser estudado foi o fluxo paralelo. Este tipo de fluxo não tem a formação de bolhas. Esse fator é bastante importante neste projeto, porque a formação de bolhas é uma problemática em sistemas de micro canais muito pequenos, onde uma bolha pode se alojar em uma curva do canal e impossibilitar que os fluidos continuem a fluir. Esse fato faz com que as bolhas interfiram diretamente na funcionalidade desses sistemas. Logo, o primeiro objetivo é o estudo desse tipo de fluxo em micro canais, já que a maioria dos estudos são de fluxos que envolvem a formação de bolhas.

O escoamento paralelo laminar consiste na formação de dois filmes de fluidos, um gasoso e outro líquido, em paralelo dentro do canal. Esse tipo de escoamento é mais comum entre duas fases líquidas, porém pode ser aplicado em sistemas gás-líquido em condições de operações específicas. Essas condições dependem das velocidades individuais das fases. Para a formação desse regime, a velocidade do líquido deve ser baixa e a velocidade da fase gasosa alta, superando as características de compressibilidade e tensão superficial dos fluidos (GUILLOT e COLIN, 2005)

O sistema gás-líquido, que será composto do CO₂ e da água destilada, é muito importante pelo impacto dos seus componentes na área industrial e científica. O dióxido de carbono tem grande impacto quando se trata da preservação do meio-ambiente e a otimização industrial na captura desse gás poluente é uma meta dos estudos que envolvem esse gás. Também, em alguns processos industriais, a absorção de CO₂ é necessária para purificação de uma corrente de alimentação. Um outro objetivo é estudar a transferência de massa entre esses dois componentes.

Esse processo de captura de CO₂ pode ser feito utilizando colunas de absorção e pode ser feito utilizando-se vários tipos de solvente. A utilização de água, em determinadas condições, pode ser uma alternativa, devido ao seu baixo custo. O principal problema é que o dióxido de carbono é pouco solúvel em água, dificultando o processo. Desta forma, para capturar uma quantidade maior de CO₂ utilizando água, o processo deve ser feito a baixas temperaturas e altas pressões.

2.4 REAÇÕES

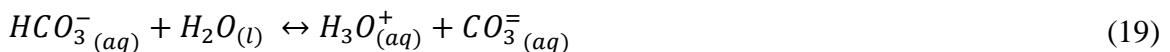
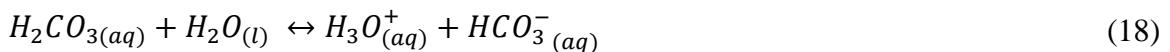
Para estudar esse sistema, precisamos entender o que acontece quando o CO₂ é absorvido pela água. Temos a seguinte reação de equilíbrio



O equilíbrio então é estabelecido, formando o ácido carbônico



A cinética dessa reação mostra que grande parte do dióxido de carbono permanece solvatado em solução. O ácido carbônico dissocia-se em solução



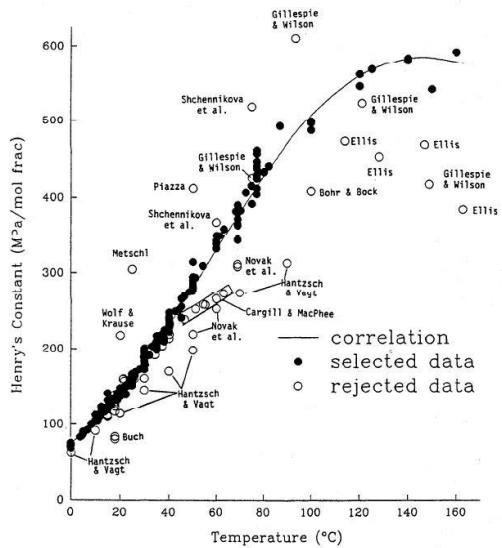
A solubilidade é uma função da temperatura, onde quanto maior a temperatura, menor a solubilidade. Essa análise já foi provada matematicamente e experimentalmente, como podemos ver o exemplo para o dióxido de carbono (CARROLL e MATHER, 2015; CARROLL, 1991):

Tabela 1 - Solubilidade do dióxido de carbono em água como uma função da temperatura.

Temperatura (Celsius)	10	15	20
Solubilidade de CO₂ em Água (g/L)	0.963	0.825	0.713
Solubilidade de CO₂ em Água (mg/L)	963	825	713

FONTE: IUPAC-NIST, Standard Reference Database 106.

Figura 2 - Constantes de Henry para o dióxido de carbono em água.



FONTE: CARROLL (1991).

3 METODOLOGIA

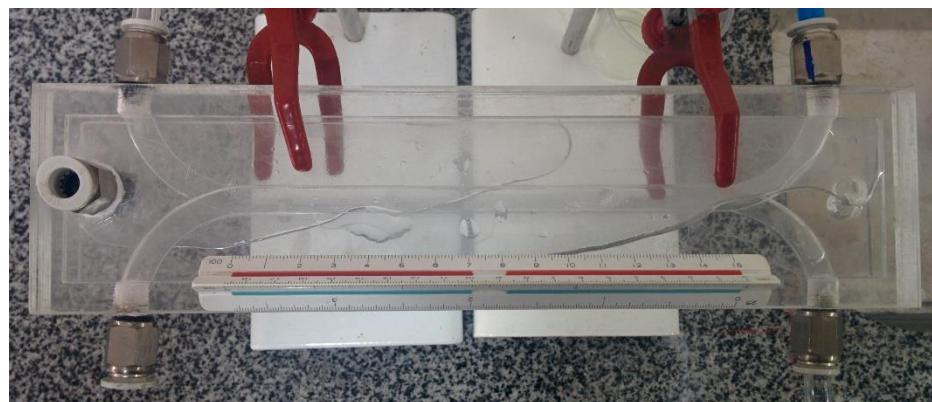
3.1 SISTEMAS DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA

O sistema de transferência de massa consiste em um aparelho que promove a transferência de massa, bem como os sistemas de armazenamento dos reagentes, sistemas de medição e controle de temperatura, fluxo e concentração.

O aparelho de transferência de massa construído é constituído de 8 placas de acrílico transparente que foram usinadas e coladas sequencialmente com a finalidade de formar um canal com geometria retangular e com junção no formato de ‘Y’. Os canais formados no interior desse sistema foram medidos e têm as seguintes dimensões:

- Ângulo da junção: 50 graus;
- Comprimento da seção reta: 17,3 mm;
- Altura do canal da seção reta: 0,8 mm;
- Largura do canal: 0,8 mm.

Figura 3 - Sistema de transferência de massa utilizado no projeto



FONTE: Autor, 2019.

Como o canal tem geometria retangular, precisamos calcular um parâmetro que seria equivalente ao diâmetro do canal para que possamos realizar os cálculos necessários dos

números adimensionais e das equações apresentadas na seção anterior. Assim, temos que o diâmetro hidráulico é representado pela fórmula (ONG et al., 2008):

$$D_h = \frac{4 * A}{P_{wet}} \quad (20)$$

em que D_h é o diâmetro hidráulico, A é a área da seção transversal do canal e P_{wet} representa o perímetro em que a fase líquida está em contato com a superfície interna do canal. Assim, temos que o diâmetro hidráulico desse canal é representado por

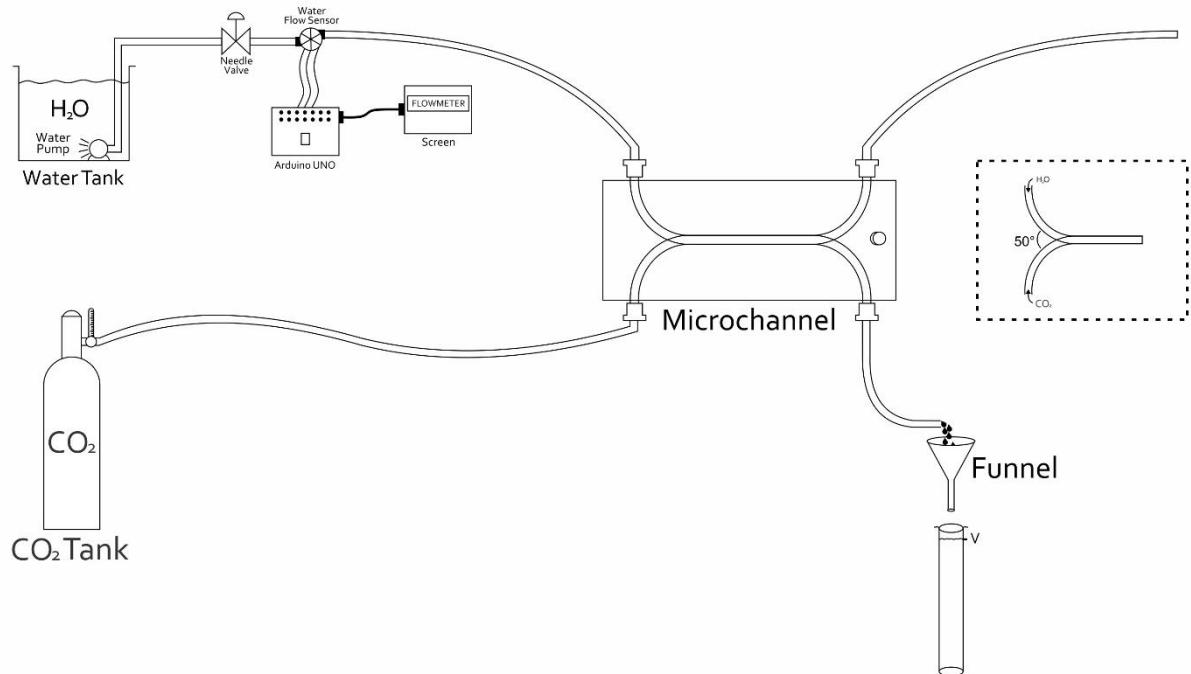
$$D_h = \frac{4 * A}{P_{wet}} = \frac{4 * \left(\frac{6,4 * 10^{-5} m^2}{2} \right)}{(0,016 m)} = 0,008 m$$

O canal utilizado no sistema é classificado como um canal convencional (KANDLIKAR e GRANDE, 2003). Quanto menor esse diâmetro, maior a área interfacial e maior o coeficiente de transferência de massa. Porém, a cada diminuição do canal por um fator de 10, o custo de sua fabricação aumenta consideravelmente (SATTARI-NAJAFABADI et al., 2018). Além disso, os equipamentos necessários para medição de fluxo e análise de concentração também se tornam mais caros.

A geometria da junção é de fundamental importância para a eficiência da troca de massa e para a formação do regime de fluxo desejado, sendo o ângulo de 90° o que apresenta maior coeficiente de transferência de massa (TAN et al., 2012). A junção dos canais utilizados nesse projeto tem um ângulo de 50°, por ser um dispositivo já construído no laboratório.

O sistema de transferência de calor construído no aparelho acima tem como finalidade o controle da temperatura do sistema. Esse sistema consiste na criação de um encapsulamento das placas que formam os canais de transferência de massa e que não entram em contato com o interior do canal, assim permitindo que se possa circular água ou qualquer outro fluido na parede externa do canal, bem semelhante ao funcionamento de um condensador de laboratório. Para esse fluxo, foi utilizado um recirculador de água comum.

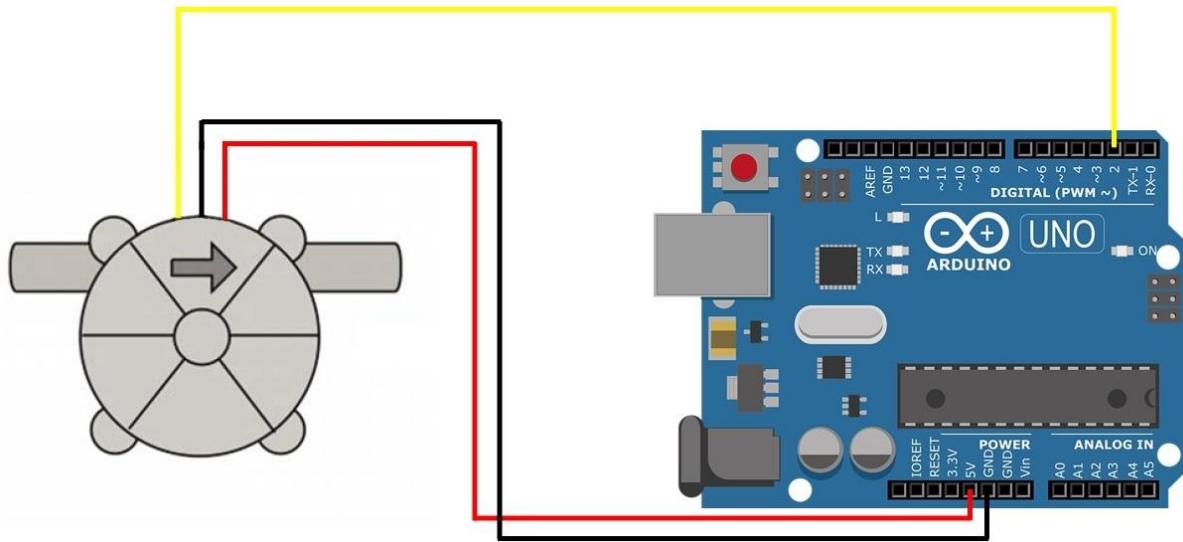
Figura 4 - Sistema completo montado.



FONTE: Autor, 2019.

Os sistemas de medição de fluxo da água e do gás são baseados nas tecnologias de sensores para Arduino e em fluxômetro acoplado, respectivamente. O sensor de fluxo de água para Arduino é do modelo YF-S401 com fluxos de operação de 300 ml/min até 6 L/min. O código utilizado para leituras está em ANEXO. O aparelho de medição da vazão do gás é um fluxômetro acoplado ao manômetro utilizado para a utilização do cilindro de CO₂ presente no laboratório. Esse manômetro é da marca Harris e modelo 351 para solda, que é um dos melhores manômetros do mercado atualmente para escala laboratorial e uso não industrial.

Figura 5 - Esquema de ligação do sensor de fluxo de água e a placa Arduino.



FONTE: Autor, 2019.

Figura 6 - Manômetro para dióxido de carbono com fluxômetro acoplado.



FONTE: Autor, 2019.

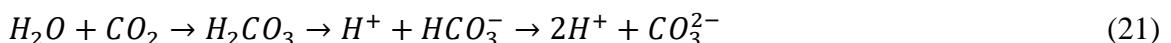
Com os dados de fluxo em volume por unidade de tempo e as dimensões do canal, esses dados foram convertidos através de cálculos para unidade de velocidade de escoamento, em metros por segundo. Alguns testes foram executados para observar como o escoamento das duas fases se comportavam perante diferentes combinações de velocidades das fases. Assim, observou-se que, para que o escoamento se apresentasse como paralelo ou estratificado ondular,

o intervalo de velocidade do líquido deve ser de 0 até 1,5 m/s e o intervalo de velocidade do gás deve ser de 0 a 9,1 m/s.

3.2 ANÁLISE DE CONCENTRAÇÃO

A técnica utilizada para a análise da quantidade de dióxido de carbono dissolvido em água é a titulação de Warder (BENEDETTI-PICHLER e CEFOLA, 1939). Esse método foi escolhido devido às condições de vidraria e equipamentos disponíveis no laboratório. Outras técnicas mais sofisticadas podem ser vistas no ASTM 16, em que utilizam como base de análise a Coulometria (ASTM D513-16, 2016).

Quando induzimos a transferência de massa convectiva entre água líquida e dióxido de carbono gasoso, parte do gás é absorvido na água. Uma parte dos íons absorvidos formam o ácido carbônico, mas, quase instantaneamente, se dissociam.



Essa formação e dissociação do ácido carbônico ocorre continuamente dentro da solução, a qual é bastante instável. Com isso, o gás dióxido de carbono é liberado na atmosfera e parte do gás absorvido é perdido, gerando grandes erros nas análises.

Como a análise proposta é uma titulação, existe a necessidade de agitação para que o titulante esteja em contato com o máximo volume de solução possível. Esse movimento faz com que o equilíbrio se desloque para a dissociação do ácido carbônico e formação do gás carbônico, que é liberado da solução. Esse fato demonstra o quanto difícil seria a análise precisa.

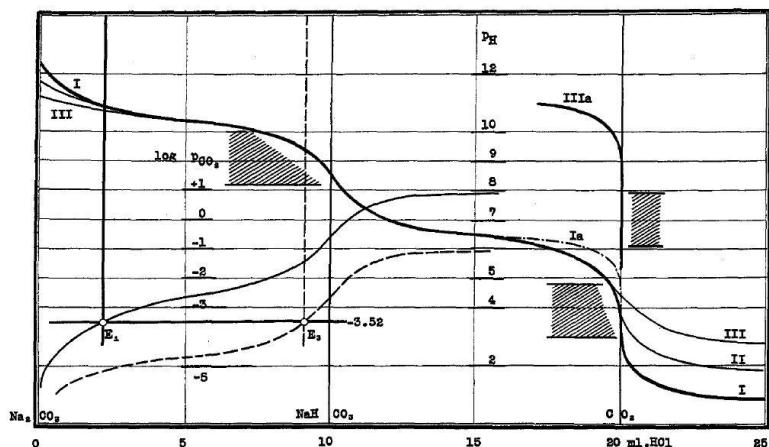
A análise de Warden, porém, sugere que seja adicionado à solução recém coletada uma certa quantidade de hidróxido de sódio. Isso permitirá com que possamos ter uma solução estável e quantificável analiticamente por titulação.



A quantificação do carbonato de sódio e do bicarbonato de sódio, o qual será formado posteriormente, nos permite saber a quantidade de dióxido de carbono presente na solução previamente e, consequentemente, saber a quantidade de CO₂ absorvida. Para isso, a solução

contendo as espécies químicas acima são reagidas com ácido clorídrico e a visualização das espécies consumidas se dá por meio de dois indicadores, o alaranjado de metila e fenolftaleína (BENEDETTI-PICHLER e CEFOLA, 1939).

Figura 7 - Curva de titulação de carbonatos pelo método de titulação de Warder.



FONTE: BENEDETTI-PICHLER e CEFOLA, 1939.

A preparação da titulação consiste, primeiramente, na preparação das soluções de HCl e $NaOH$, bem como as suas padronizações.

Os nossos experimentos consistiram nas trocas de massa e comparação dos valores com variações das velocidades dos fluxos de gás e líquido, bem como nas mudanças de temperatura do meio e dos reagentes. Assim, observando dados da literatura, vemos que essas variações são pequenas, na escala das dezenas ou centenas de partes por milhões. Assim, para que nossas análises sejam precisas, precisamos que as concentrações de hidróxido de sódio e ácido clorídrico sejam baixas. Isso é necessário como as diferenças de uma solução para outra são pequenas, desejamos que uma gota do titulante seja bem menor do que a menor diferença das concentrações e assim possamos diferenciá-las.

Com isso, as concentrações das soluções acima citadas foram:

Tabela 2 - Concentrações das soluções de HCl e NaOH

Solução Padronizada	Concentração [mol/L]
HCl	0,08100
NaOH	0,09512

FONTE: Autor, 2019.

O procedimento consiste na coleta rápida das soluções e imediatamente adição de uma quantidade conhecida de hidróxido de sódio em excesso. Esse excesso estará presente na solução sem reagir.

Assim, ao adicionar o ácido clorídrico na minha solução, temos a primeira reação:



Essa reação ocorre primeiro porque o hidróxido é a base mais forte presente em solução. Em seguida, em torno de um pH de 11,34, temos que o consumo de NaOH foi completo. Continuando a adição de ácido, quando a coloração da fenolftaleína sumir, isso indica que o ponto de viragem da fenolftaleína foi atingido, ou seja, pH em torno de 8,31 e que todo o carbonato de sódio ou íons carbonato foram consumidos, onde parte destes são convertidos em íons bicarbonato.



Assim, anotamos o primeiro volume, ou seja, V_1 .

Para determinar o restante do CO₂ e solução, precisa-se titular os íons de bicarbonato, que são os antigos íons carbonato protonados pelo ácido. Assim, adicionamos um outro indicador, o alaranjado de metila, que neste ponto assume coloração amarelada. Esse indicador tem o ponto de viragem em torno do pH 4,03 e coloração laranja. Com isso, temos a reação

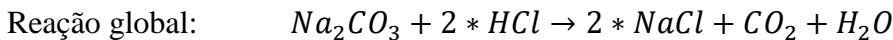
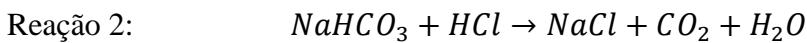
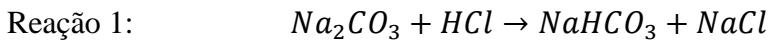


Assim, anotamos o segundo volume, ou seja, V_2 , o qual corresponde ao volume total utilizado subtraído do volume utilizado na primeira titulação, V_1 .

O ponto de viragem do indicador é o ponto em que todo o bicarbonato é consumido e temos assim a liberação de CO₂ para a atmosfera através da formação de bolhas em solução.

Desta forma, temos um volume V_1 utilizado na primeira parte da titulação, que consiste no consumo de NaOH e de íons CO₃²⁻. Na segunda parte, que consiste no consumo de íons bicarbonato, ou HCO₃⁻, temos o volume V_2 , que é o volume utilizado na segunda titulação.

Temos como reação global:



Assim, temos as seguintes fórmulas que seguem a estequiometria das reações:

$$[\text{NaOH}] = \frac{(V_1 - V_2) * f_{c,a}}{V_{alíquota}} \quad (26)$$

$$[\text{NaHCO}_3] = \frac{V_2 * f_{c,a}}{V_{alíquota}} \quad (27)$$

$$[\text{Na}_2\text{CO}_3] = \frac{(2 * V_2) * f_{c,a}}{V_{alíquota}} \quad (28)$$

onde o termo $f_{c,a}$ é o fator de correção do ácido e $V_{alíquota}$ é o volume utilizado da solução.

A titulação deve ser realizada antes do sistema e depois, para quantificar o dióxido de carbono que já estaria dissolvido em água destilada antes do experimento. Assim, evitando erros na nossa análise.

Os cálculos realizados consistem na determinação das concentrações acima e proporcionar a concentração de dióxido de carbono a partir das proporções estequiométricas das reações. Assim, sabendo as concentrações da água destilada e da solução após a transferência de massa, podemos subtrair esses valores e saber, pela diferença, a quantidade de CO₂ absorvido pela água. Sabendo disso, utilizamos a equação (12) para calcular o coeficiente de transferência de massa.

Um recirculador de água deve ser acionado no sistema previamente aos experimentos até que a temperatura seja estabilizada, assim podendo ser controlada para as análises de solubilidade em função da temperatura. O fluxo de água destilada no sistema deve ser acionado

até que as mangueiras atinjam o equilíbrio térmico com a água. A coleta deve ocorrer após um período de estabilização do fluxo controlado pelas válvulas e até que a estabilização da transferência de massa ao longo do canal seja estabelecida. Em geral, pode-se esperar cerca de 1 minuto para coletar as amostras.

A bomba utilizada para realizar o bombeamento da água é da marca ALEAS e modelo AH-1. As válvulas utilizadas para regular o fluxo de ar e o fluxo de água são válvulas do tipo agulha, com pressão máxima de operação é de 10 bar.

Figura 8 - Válvula utilizada para controle do fluxo de água.



FONTE: Autor, 2019.

4 RESULTADOS

As características de escoamento do gás dióxido de carbono e da água destilada no aparelho de transferência de massa foi determinado por meio de observação. As velocidades de ambos os fluidos foram reguladas afim de se obter um fluxo paralelo entre essas duas correntes. Ao final dessa análise foi possível desenvolver o escoamento paralelo estratificado com suaves ondulações, as quais não se distanciavam consideravelmente de uma linha reta. As direções de escoamento dos fluxos foram concorrentes.

Esse tipo de fluxo se encaixa nas previsões realizadas no início dos experimentos, visto que o diâmetro hidráulico do canal é relativamente grande, se comparado com os diversos sistemas de transferência de massa utilizados nesse tipo de pesquisa. Isso implica dizer que como essa dimensão do canal é relativamente grande, o número de Reynolds tende a ser elevado, se compararmos com sistemas de micro canais, por exemplo, que possuem Reynolds dentro das dezenas e até menores do que um.

A Tabela 3 demonstra as velocidades das fases fixadas nos experimentos e os números de Reynolds calculados a partir da equação (13) (ORTIZ-VIDAL, 2014).

Tabela 3 - Números de Reynolds correspondentes aos fluxos desenvolvidos no canal em estudo em função da temperatura.

Temperaturas (°C)	J_L (m/s)	J_G (m/s)	ReL
10,0	0,035	0,460	
		0,920	
		1,381	212,8920
	0,071	1,841	
		0,460	
		0,920	432,5424
15,0	0,035	1,381	
		1,841	
		0,460	
	0,071	0,920	244,1465
		1,381	
		1,841	
20,0	0,035	0,460	
		0,920	
		1,381	496,0436
	0,071	1,841	
		0,460	
		0,920	277,2790
	0,035	1,381	
		1,841	
		0,460	
	0,071	0,920	563,3605
		1,381	
		1,841	

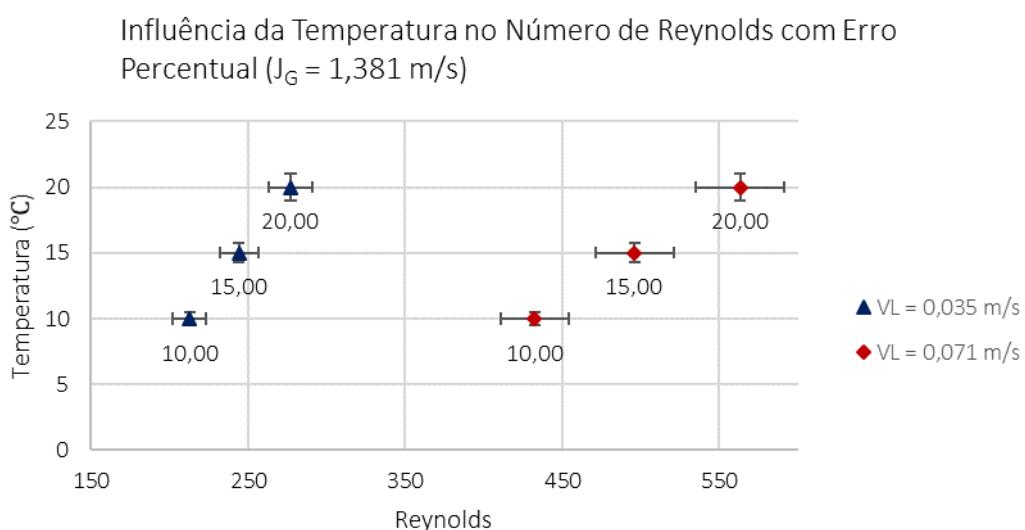
FONTE: Autor, 2019.

Os resultados apresentados acima nos permitem realizar algumas observações acerca do efeito das velocidades de cada fase e da temperatura no número de Reynolds. Primeiramente, vemos que a velocidade do gás não modifica tão significantemente o número de Reynolds se comparado quando a velocidade do líquido muda. Isso acontece devido as características físicas dos fluidos. A água é mais densa e mais viscosa do que o dióxido de carbono, fazendo com que a mudança da sua velocidade no canal modifique significantemente as características inerentes ao número de Reynolds, que é a relação entre forças iniciais e forças viscósas.

Também podemos analisar que a medida que a temperatura aumenta, o número de Reynolds também aumenta, visto que a viscosidade diminui e esta é inversamente proporcional a este número adimensional. Outro ponto de vista seria que com o aumento da temperatura, o

fluído se torna menos denso, já que o seu volume aumenta e sua massa permanece a mesma. Esses perfis podem ser observados tomando-se a velocidade de dióxido de carbono fixada em 1,381 m/s e variando a velocidade da fase líquida e a temperatura, como nota-se na Fig. 9:

Figura 9 - Comportamento do número de Reynolds com relação às mudanças de temperatura do sistema gás-líquido com velocidade de dióxido de carbono fixada em 1,381 m/s.



FONTE: Autor, 2019.

Por fim, analisando os números de forma quantitativa e qualitativa, vemos que quando a velocidade da água é de 0,035 m/s, o regime de escoamento é laminar com Reynolds na faixa entre 200 e 300, mas quando a velocidade dobra, o número de Reynolds aumenta em média 103,5%, fazendo com que o escoamento se encontre na faixa entre 430 e 570 do escoamento laminar. Isso confirma as observações feitas acerca do perfil de fluxo encontrado, ou seja, as ondulações observadas são uma característica visual da faixa em que o fluxo estabiliza no escoamento laminar e à medida que o Reynolds aumenta, essa faixa aumenta e se torna mais evidente.

Com relação à transferência de massa, foram calculados os coeficientes de transferência de massa volumétricos para o sistema em diversas condições. A tabela a seguir contém os resultados obtidos:

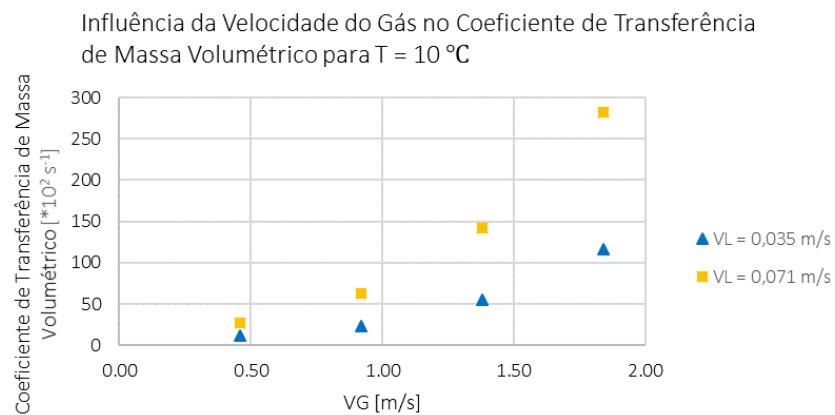
Tabela 4 - Coeficientes de transferência de massa com relação às velocidades das fases do sistema e da temperatura.

Temperaturas (°C)	J_L (m/s)	J_G (m/s)	k_{L·a} (s⁻¹) [×10²]
10	0,035	0,460	11,49
		0,920	23,07
		1,381	55,00
		1,841	116,01
	0,071	0,460	27,57
		0,920	62,55
		1,381	142,22
		1,841	282,72
	0,035	0,460	6,29
		0,920	28,53
		1,381	66,50
		1,841	202,17
15	0,035	0,460	30,50
		0,920	66,68
		1,381	195,58
		1,841	317,87
	0,071	0,460	5,87
		0,920	33,06
		1,381	86,27
		1,841	226,61
	0,035	0,460	26,13
		0,920	83,38
		1,381	226,11
		1,841	380,13
20	0,071		

FONTE: Autor, 2019.

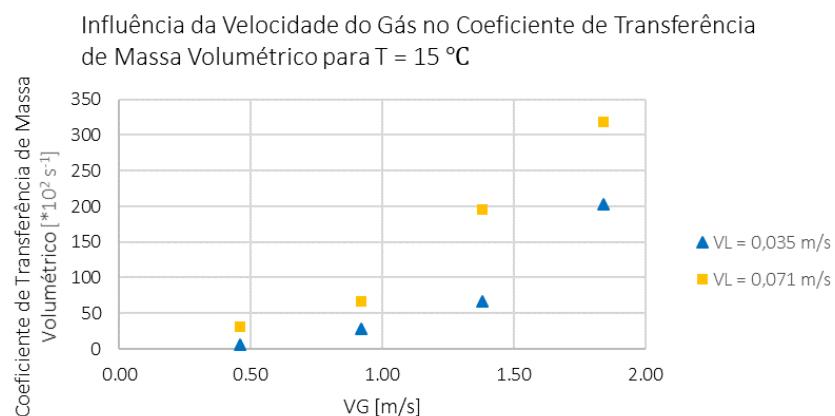
Com base nos dados experimentais mostrados na Tabela 4, podemos notar que quando fixamos a velocidade da água e aumentamos a velocidade do dióxido de carbono, o coeficiente de transferência de massa cresce. Semelhantemente, quando realizamos a operação oposta, ou seja, fixamos a velocidade do gás e aumentamos a velocidade do líquido, o coeficiente de transporte de massa também cresce. Podemos observar isso através dos gráficos a seguir:

Figura 10 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa na temperatura de 10 °C, variando-se as velocidades das fases líquida e gasosa.



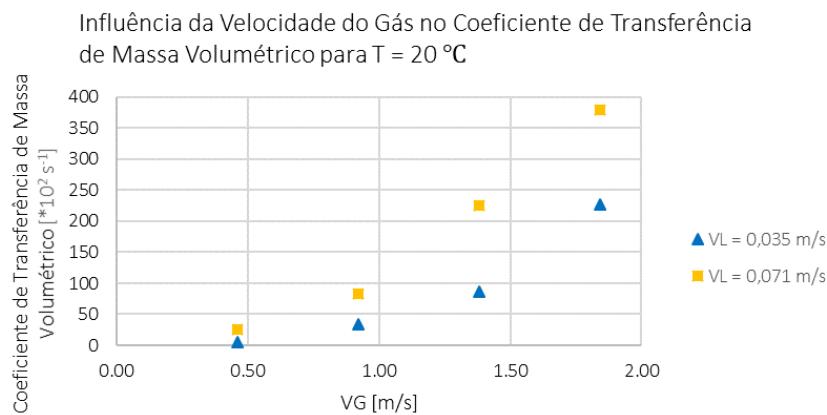
FONTE: Autor, 2019.

Figura 11 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa na temperatura de 10 °C, variando-se as velocidades das fases líquida e gasosa.



FONTE: Autor, 2019.

Figura 12 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa na temperatura de 10 °C, variando-se as velocidades das fases líquida e gasosa.

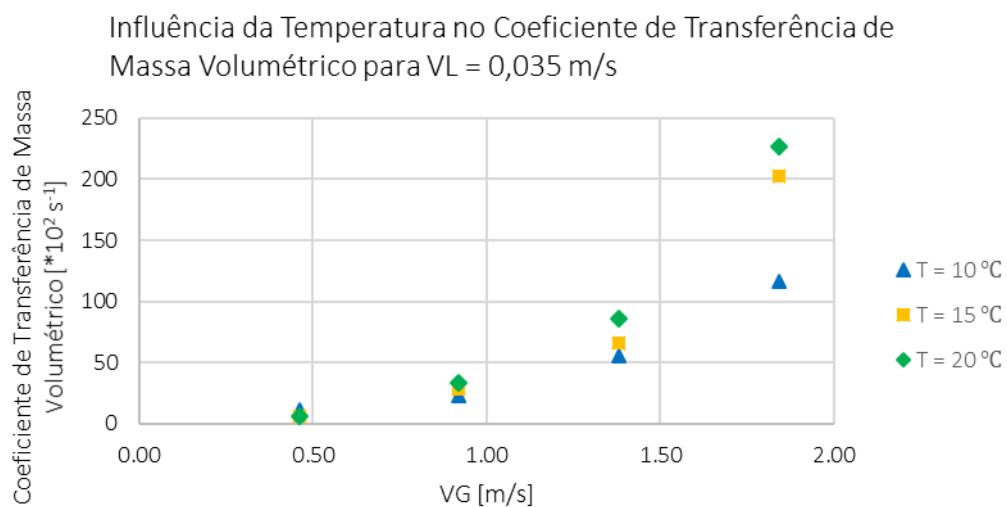


FONTE: Autor, 2019.

O aumento do coeficiente de transferência de massa volumétrico com o aumento da velocidade do líquido está de acordo com a discussão redigida no início dessa seção. O aumento do número de Reynolds, em consequência ao aumento da velocidade da fase líquida, para valores em que o regime de escoamento passa a estar na faixa de transição entre o laminar e o turbulento se traduz em uma maior eficiência na transferência de massa na fase líquida do nosso sistema gás-líquido. Isso acontece por causa do aumento da turbulência, que promove uma maior taxa de transferência de massa. Além disso, quanto mais aumenta a velocidade do líquido, maior é a área superficial, assim maior será a espessura formada do filme entre as fases, promovendo uma maior transferência de massa.

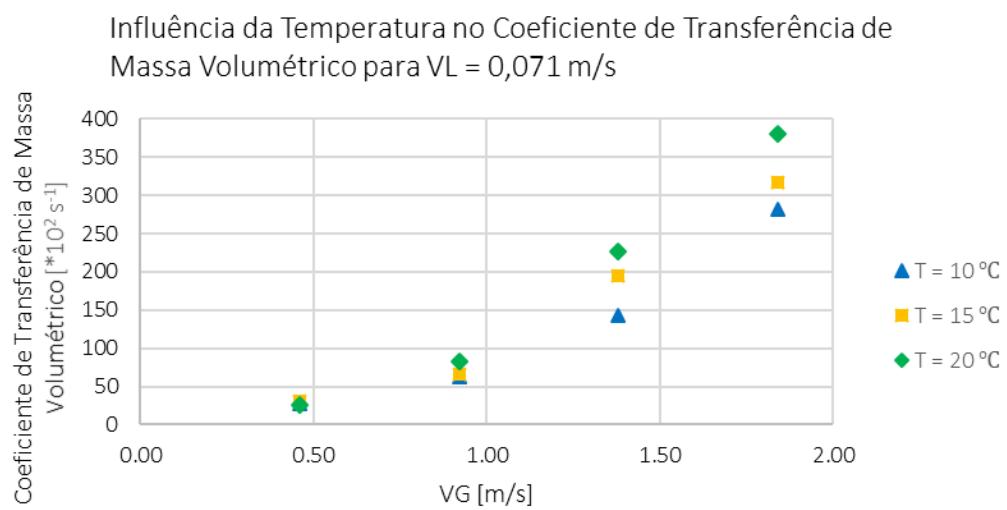
Por fim, foi analisado o coeficiente de transferência de massa com relação às mudanças no valor da temperatura do sistema. A Tabela 3 nos fornece dados suficientes para perceber que quando o sistema está em condições de velocidade de fluxo fixas, o aumento da temperatura causa um aumento no coeficiente de transferência de massa. Visualmente, podemos perceber isso nos gráficos a seguir:

Figura 13 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa volumétrico com relação à fixação da velocidade da água para 0,035 m/s e variação da velocidade do gás.



FONTE: Autor, 2019.

Figura 14 - Comportamento do coeficiente de transferência de massa volumétrico com relação à fixação da velocidade da água para 0,071 m/s e variação da velocidade do gás.



FONTE: Autor, 2019.

Em baixas velocidades, a influência da temperatura não se mostra significativa. Porém, a medida que essas condições promovem o aumento do valor do Reynolds, os valores do

coeficiente de transferência de massa se distanciam comparativamente às suas temperaturas de operação.

Se analisarmos a solubilidade do dióxido de carbono em água, a solubilidade do gás aumenta à medida que a temperatura do sistema diminui. Era esperado que esse coeficiente aumentasse a medida que a temperatura do sistema diminuisse, já que a disponibilidade da água para absorver o gás aumenta. Porém, é necessário observar outras variáveis que possam influenciar esse parâmetro de transferência de massa.

O aumento da temperatura faz com que as viscosidades dos fluidos diminuam, o que ocasiona um aumento da difusividade molecular do soluto, que é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica. Além disso, temos o aumento do Reynolds, que promove a absorção. Por fim, o aumento da temperatura diminui a densidade, como já foi discutido antes, diminuindo também a tensão superficial do líquido e isso diminui a resistência à transferência de massa.

Com base nisso, vemos que essas propriedades físicas influenciam mais no coeficiente de transferência de massa do que a solubilidade do gás em função da temperatura. Isso é comum em muitos sistemas de transferência de massa e ocorre nesse sistema por causa das características geométricas do canal utilizado. É importante ressaltar também que nem sempre um maior valor no coeficiente de transferência de massa (k_{LA}) significa uma transferência de massa maior, já que este é função da área interfacial.

De fato, quando analisamos a quantidade, em ppm, de CO₂ que foi absorvida pela água, temos que quanto menor a temperatura, maior a quantidade do gás transferido, como podemos ver na Tabela 5:

Tabela 5 - Quantidade de dióxido de carbono transferidos no processo de absorção em função das velocidades das fases e da temperatura.

Temperaturas (°C)	J _L (m/s)	J _G (m/s)	k _{L·a} (s ⁻¹) [×10 ²]	ppm transferidos
10	0,035	0,460	11,49	344,47
		0,920	23,07	458,36
		1,381	55,00	675,04
		1,841	116,01	863,94
	0,071	0,460	27,57	366,69
		0,920	62,55	522,25
		1,381	142,22	741,71
		1,841	282,72	897,28
	0,035	0,460	6,29	258,35
		0,920	28,53	441,69
		1,381	66,50	627,82
		1,841	202,17	805,60
15	0,035	0,460	30,50	338,91
		0,920	66,68	469,47
		1,381	195,58	708,38
		1,841	317,87	866,72
	0,071	0,460	5,87	230,57
		0,920	33,06	413,91
		1,381	86,27	591,70
		1,841	226,61	783,38
	0,035	0,460	26,13	286,13
		0,920	83,38	452,81
		1,381	226,11	636,15
		1,841	380,13	733,38

FONTE: Autor, 2019.

Também pode-se perceber que o efeito do aumento das velocidades e do número de Reynolds influencia a quantidade de gás absorvida de maneira similar ao que ocorria no coeficiente de transferência de massa. Porém, com relação a esse parâmetro, a temperatura do sistema influencia mais do que as características físicas dos fluidos em função da temperatura.

Contudo, conseguimos atingir valores de coeficiente volumétrico de transferência de massa que estão no intervalo de $0,059\text{ s}^{-1}$ até $3,80\text{ s}^{-1}$. Podemos ainda comparar com outros sistemas de transferência de massa como pode ser observado na tabela abaixo:

Tabela 6 - Equipamentos de transferência de massa e seus respectivos coeficientes volumétricos de massa.

Tipo do Reator	$k_L \cdot a (\text{s}^{-1}) [\times 10^2]$
Bubble tower	0.5 a 24
Packed tower, countercurrent	0.04 a 7
Packed column, stream	0.04 a 102
Spray tower	1.5 a 2.2
Couette Taylor stream reactor	3 a 21
Stirred tank	3 a 40
Spray absorber	2.5 a 122
Tubular reactor, vertical	2 a 100
Tubular reactors, horizontal and hovering	0.5 a 70
Static mixer	10 a 250
Micro canal deste trabalho	5.9 a 380
Gas-liquid microchannel contactor	30 a 2100
Microchannel [2015, Dan Li] Experiment	40 a 3400

FONTE: LI, modificado (2015).

5 CONCLUSÕES

O sistema de transferência de massa se mostrou eficiente em cumprir a sua função de promover o transporte de massa entre o dióxido de carbono e a água destilada. O ângulo de encontro das fases se mostrou eficiente, embora não seja o ângulo ideal para este tipo de equipamento, como já citado no trabalho. Embora o sistema tenha sido suficientemente eficiente, o design de separação das fases no final do canal não foi ideal.

O tipo de fluxo desenvolvido no canal foi o fluxo paralelo, o qual obteve uma performance esperada sem a formação de bolhas nas faixas de velocidade da água destilada de 0 a 0,035 m/s e do dióxido de carbono de 0 a 1,841 m/s. As faixas escolhidas anteriormente de 0 a 1,5 m/s para a água destilada e 0 a 9,1 m/s para o dióxido de carbono não foram usadas em sua totalidade, porque já nas velocidades de fluidos mais baixas os resultados foram satisfatórios e a medida que a velocidade aumenta, os fluidos dentro do canal aumentam a perturbação da estratificação, o que pode resultar em formação de bolhas.

Nessas velocidades, o número de Reynolds dentro do canal caracterizou um fluxo laminar, ficando na faixa de 212 a 278 para a velocidade de água destilada de 0,035 m/s e na faixa de 432 a 564 para a velocidade de água destilada de 0,071 m/s. O aumento do número de Reynolds em função do aumento da temperatura evidenciou o efeito da viscosidade e densidade dos fluidos com a turbulência na fase líquida, a qual aumentou devido a essas mudanças de temperatura.

A técnica escolhida para análise de transferência de massa pela análise volumétrica de titulação de Warder se mostrou bastante eficiente, embora não tenha a precisão de equipamentos mais sofisticados.

A partir da utilização dessa técnica foi possível determinar os coeficientes de transferência de massa volumétrico, os quais variaram entre $11,49 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ até $282,72 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ para a temperatura de 10 °C, entre $6,29 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ até $317,87 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ para a temperatura de 15 °C e $5,87 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ até $380,13 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$ para a temperatura de 20 °C. Os dados do coeficiente de transferência de massa volumétrico evidenciaram que em baixas velocidades da fase gasosa, quando o sistema tem um nível de turbulência baixo, evidenciado pelos números de Reynolds, o seu valor diminui com o aumento da temperatura. Portanto, os efeitos da solubilidade do dióxido de carbono na água destilada influenciam mais no transporte de massa do que os efeitos

da viscosidade e densidade. Também é importante notar que nessas velocidades baixas, a área de contato entre as fases é menor.

Assim, é possível observar que a melhor condição de operação para o equipamento de transferência de massa utilizado é com temperatura de 20 °C velocidades superficiais da fase líquida de 0,035 m/s e da fase gasosa de 1,380 m/s.

Quando aumentamos a velocidade da fase gasosa ou da fase líquida, passamos para uma faixa onde os efeitos da temperatura sobre o coeficiente de transferência de massa volumétrico passa a evidenciar o aumento desse parâmetro com o aumento da temperatura, caracterizando os efeitos da viscosidade e densidade. Além disso, a área de contato entre as fases é maior nesses casos. Portanto, foi possível observar o efeito desses parâmetros para com o coeficiente de transferência de massa, o qual mostra a eficácia do nosso sistema, nos permitindo trabalhar em faixas de velocidades adequadas para que a nossa transferência de massa aumente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM D513-16, **Standard Test Methods for Total and Dissolved Carbon Dioxide in Water.** ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016.
- BENEDETTI-PICHLER, A. A., e MICHAEL CEFOLA. **Warders Method for the Titration of Carbonates.** Industrial & Engineering Chemistry Analytical Edition, 1939. v. 11, n. 6, p. 327–332.
- CARROLL, J. J.; MATHER, A. E. NIST. **Chemistry WebBook**, 2015. Disponível em: <https://srdata.nist.gov/solubility/sol_detail.aspx?goBack=Y&sysID=62_1>. Acesso em: 25 jun. 2018.
- CARROLL, JOHN J., et al. **The Solubility of Carbon Dioxide in Water at Low Pressure.** Journal of Physical and Chemical Reference Data, 1991. v. 20, n. 6, p. 1201–1209.
- CHEREMISINOFF, N. P.; GUPTA, R. **Handbook of fluids in motion.** Editora: Ann Arbor, Ann Arbor Science, 1983.
- CREMASCO, MARCO A. “11 - Transferência De Massa Entre Fases.” **Fundamentos De Transferencia De Massa**, 2^a edição, UNICAMP, 2008, p. 625–696.
- LI, Dan. **Study on Mass Transfer within the Microchannel Reactor.** Proceedings of the 4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering. Xi'an Shiyou University, 2015, p. 222–227.
- GUILLOT, PIERRE, and ANNIE COLIN. **Stability of Parallel Flows in a Microchannel after a T Junction.**” Physical Review E, v. 72, n. 6, 2005.
- HASLAM, R. T., et al. **Effect of Gas Velocity and Temperature on Rate of Absorption.** Industrial & Engineering Chemistry, 1924. v. 16, n. 12, p. 1224–1230.
- KANDLIKAR, SATISH G., and WILLIAM J. GRANDE. **Evolution of Microchannel Flow Passages - Thermohydraulic Performance and Fabrication Technology.** Heat Transfer Engineering, 2003. v. 24, n. 1, p. 3–17.

- KASHID, MADHVANAND N., et al. **Gas–Liquid and Liquid–Liquid Mass Transfer in Microstructured Reactors.** Chemical Engineering Science, 2011. v. 66, n. 17, p. 3876–3897.
- KREUTZER, MICHAEL T., et al. **Pressure Drop of Taylor Flow in Capillaries: Impact of Slug Length.** 1st International Conference on Microchannels and Minichannels, 2003.
- ONG, SOON-ENG, et al. **Fundamental Principles and Applications of Microfluidic Systems.** Frontiers in Bioscience, 2008. v. 13, p. 2757–2773.
- L. E. ORTIZ-VIDAL; N. MUREITHI and O. M. H. RODRIGUEZ. **Two-phase Friction Factor in Gas-liquid Pipe Flow.** Engenharia Térmica (Thermal Engineering), 2014. v. 13.
- SATTARI-NAJAFABADI, MEHDI, et al. **Mass Transfer between Phases in Microchannels: A Review.** Chemical Engineering and Processing - Process Intensification, 2018. v. 127, p. 213–237.
- TAN, J., et al. **Mass Transfer Characteristic in the Formation Stage of Gas–Liquid Segmented Flow in Microchannel.** Chemical Engineering Journal, 2012. v. 185-186, p. 314–320.
- TORTOPIDIS, P., and V. BONTOZOGLOU. **Mass Transfer in Gas-Liquid Flow in Small-Diameter Tubes.** Chemical Engineering Science, 1997. v. 52, n. 14, p. 2231–2237.
- WELTY, JAMES R., et al. “25 - Differential Equations of Mass Transfer.” **Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer**, Editora: Wiley, 6^a Edição, 2015, p. 467–488.

ANEXO A – Código Arduíno

```
//Código para utilização de sensor de fluxo de efeito Hall
float volume; //Armazena o valor em ml instantâneo
float vazao; //Armazena o valor em l/min in
int contapulso_in; //Quantidade de pulsos - Entrada
int i=0; //Variável para contagem
int t=0; //Variável para contagem acumulada
//-----
void setup()
{
    Serial.begin(9600); //Inicia a serial com um baud rate de 9600
    pinMode(2, INPUT);
    attachInterrupt(0, incpulse, RISING); //Configura o pino 2(Interrupção 0) para trabalhar
    como interrupção
    Serial.println("\n\nInicio\n\n"); //Imprime Inicio na serial
}
//-----
void loop ()
{
    contapulso_in = 0; //Zera a variável para contar os giros por segundo
    sei(); //Habilita interrupção
    delay (1000); //Aguarda 1 segundo
    cli(); //Desabilita interrupção

    // Volume in

    // volume = contapulso_in*0.016666;
    vazao = contapulso_in*10.2; //converte para ml/min
    i++;
    t++;

    Serial.print(contapulso_in);
    Serial.print(" pulsos - ");
    Serial.print(vazao); //Imprime na serial o valor da vazao de in
    Serial.print(" ml/min - "); //Imprime L/min
    Serial.print(i); //Imprime a contagem i (segundos)
    Serial.println("s"); //Imprime s indicando que esta em segundos
}
//-----
void incpulse ()
{
    contapulso_in++; //Incrementa a variável de contagem dos pulsos
}
//-----
```