UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO-GROSSO DO SUL

ENGENHARIA QUÍMICA

Desenvolvimento e implementação de um roteiro experimental para determinação do k_La em reatores tipo STR e coluna de bolhas.

Laura Vitória Cairan Werner

Campo Grande – MS

2025

Laura Vitória Cairan Werner

Desenvolvimento e implementação de um roteiro experimental para determinação do k_La em reatores tipo STR e coluna de bolhas

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Instituto de Química como requisito básico para a conclusão do Curso de Bacharelado em Engenharia Química

Orientador (a): Profa. Dra. Janaína dos Santos Ferreira

Campo Grande - MS

2025

LAURA VITÓRIA CAIRAN WERNER

DESENVOLVIMENTO E IMPLEMENTAÇÃO DE UM ROTEIRO EXPERIMENTAL PARA DETERMINAÇÃO DO k_La EM REATORES TIPO STR E COLUNA DE BOLHAS

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado pela Banca Examinadora para obtenção do Grau de bacharelado, no Curso de Engenharia Química da Universidade da Federal de Mato Grosso do Sul.

Campo Grande, 10 de Junho de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
gov.br
JANAINA DOS SANTOS FERREIRA
Data: 01/07/2025 19:44:08-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof ª. Dr ª. Janaína dos Santos Ferreira

Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – Orientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br
DANIELI CRISTINE ANVERSA
Data: 01/07/2025 15:08:15-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof ª. Dr ª.Danieli Cristine Anversa

Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

Documento assinado digitalmente
gov.br
THAISA CARVALHO VOLPE BALBINOTI
Data: 01/07/2025 19:33:37-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof ª. Dr ª Thaisa Carvalho Volpe Balbinoti

Universidade Federal do Mato Grosso do Sul

Aos meus pais, Sandra e Elton, e
ao meu irmão Luan.

“*Não é o que o mundo reserva pra você, mas o que você traz para o mundo.*”

Anne with an e

AGRADECIMENTOS

Gostaria de iniciar agradecendo à minha família: ao meu pai, Elton, que não mediu esforços para que eu tivesse todo o conforto necessário durante a graduação e demonstrou preocupação diária pelo meu bem-estar; à minha mãe, Sandra, que impediu meu pai de enlouquecer comigo a 1.200 km de distância e sempre esteve presente por meio de ligações e conselhos; e ao meu irmão, Luan, que, mesmo pequeno e sem entender toda essa dinâmica, me ligava todos os dias para "fofocar". Agradeço do fundo do coração e amo cada um de vocês.

Aos amigos que fiz durante a graduação, que estiveram comigo nos almoços no RU, nas provas e nos projetos ao longo dos semestres — José Wilson, Yasmin, Camila, Kátia, Heloysa, Vinicius, Getúlio e Fernando —, meu muito obrigada pela parceria. E às amizades que carrego comigo e que se fizeram presentes durante esses anos: à Nicole, que foi meu porto seguro em inúmeros momentos e me ajudou a atravessar toda a graduação, e à Letícia, que, mesmo distante, nunca deixou de ser presente.

Agradeço imensamente às pessoas que estiveram ao meu lado durante o desenvolvimento deste TCC. À minha orientadora Janaína, pela orientação, apoio e por todo o aprendizado ao longo desse processo e ao longo da graduação. À Adrielly e ao José Wilson, que foram fundamentais na realização dos experimentos — sem vocês, eu não teria chegado até aqui.

Em especial, agradeço a Alexandre Nicoletti, do Living Lab Sebrae, e a Geraldo Norberto Rojas, da Casa de Ciência e Cultura de Campo Grande (UFMS/INFI), pelas importantes contribuições na elaboração do reator. Agradeço ao Professor Adilson por disponibilizar o nitrogênio e o compressor e ao professor Sérgio pelo agitador, equipamentos fundamentais para esta pesquisa, assim como ao técnico Rafael, cujo apoio constante foi indispensável. Também registro meus agradecimentos ao Professor Marcel Cerri, da Engenharia de Bioprocessos da UNESP Araraquara, pelas valiosas discussões e orientações.

Aos professores que marcaram minha trajetória: à Danieli, pela orientação e amizade; ao professor Celso, pela dedicação ao nosso aprendizado; à professora Patrícia, por acreditar no meu potencial e me incentivar a ir além. Aos professores Jorge e João Renato, pelo apoio e atenção mesmo nos breves encontros.

Ao Instituto de Química da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, pela formação acadêmica e pelas oportunidades que me foram oferecidas.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação e para a realização deste trabalho, meu muito obrigada!

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e implementar um roteiro experimental para a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_La) em reatores do tipo Tanque Agitado (STR) e coluna de bolhas, visando sua aplicação no Laboratório de Fenômenos de Transporte. O estudo partiu da problemática da escassez de experimentos práticos na área de transferência de massa, utilizando equipamentos disponíveis no laboratório para otimizar recursos. A metodologia baseou-se no método dinâmico (Dynamic Gassing-out), que consiste na remoção do oxigênio dissolvido com nitrogênio seguida da reoxigenação com ar, monitorando a concentração de oxigênio ao longo do tempo. Foram testadas diferentes condições operacionais, como variações na rotação do agitador (500, 750 e 1000 rpm) e na vazão de ar (2,0 a 10 L/min). Os resultados demonstraram que o aumento da rotação e da vazão elevou significativamente o (k_La), com valores variando de 0,0063 a 0,368 s^{-1} no STR e de 0,20 a 0,24 s^{-1} na coluna de bolhas, evidenciando a maior eficiência do STR devido à agitação mecânica. Concluiu-se que o método dinâmico é eficaz para a determinação do k_La, e o roteiro desenvolvido pode ser aplicado como ferramenta didática e para otimização de processos industriais. O trabalho contribuiu para a diversificação das práticas laboratoriais e destacou a importância do controle de parâmetros operacionais na transferência de massa.

Palavras-chave: Transferência de oxigênio, k_La, reator STR, coluna de bolhas (CB), método dinâmico.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Biorreator modelo STR 13

Figura 2 – Biorreator coluna de bolhas 15

Figura 3 - Biorreatores *air-lift* de a.) Circulação interna e b.) Circulação externa 15

Figura 4 - Diagrama da transferência de oxigênio Gás-Líquido-Célula 17

Figura 5 - Relação entre OTR, coeficiente de transferência de massa volumétrica e parâmetros hidrodinâmicos em biorreatores em vários níveis. 18

Figura 6 – Métodos para determinação do kLa 21

Figura 7 - Técnica dinâmica de dessorção-absorção de oxigênio 22

Figura 8 - Comparação dos valores de $k_L a$ obtidos por diferentes métodos de medição em função da velocidade do agitador em soluções não newtonianas; 1: método químico, 2: método dinâmico, 3: medição de Kr 26

Figura 9 - Detalhes construtivos do reator - Visto por cima 27

Figura 10 - Detalhes construtivos do reator – Visto pela lateral 28

Figura 11 - Instalação do sensor de oxigênio dissolvido 29

Figura 12 – Detalhes construtivos do agitador 30

Figura 13 – Montagem do Reator STR 31

Figura 14 – Montagem do Reator CB 31

Figura 15 - Eliminação da concentração de oxigênio por meio da adição de nitrogênio 33

Figura 16 - Registro do Tempo para Análise da Dissolução de Oxigênio 33

Figura 17 - Compressor de ar 34

Figura 18 - Sistema de medição de vazão e oxigênio dissolvido 34

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Principais exemplos de biorreatores 12

Tabela 2 - Diferentes métodos para avaliação do coeficiente de transferência de massa volumétrica 24

Tabela 3 – Diferentes combinações de agitações e vazões para os biorreatores STR e CB 32

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Eliminação de oxigênio por meio da inserção de nitrogênio no sistema na temperatura 25°C 36

Gráfico 2- Perfil da concentração de oxigênio dissolvido em água a 25°C durante a análise de kLa pelo método dinâmico. 36

Gráfico 3- Valores de KLa para diferentes rotações: (1) 500 rpm, (2) 750 rpm, (3) 1000 rpm e (4) comparações das rotações para uma mesma vazão de 2 L/min. 37

Gráfico 4 - Relação do KLa com a rotação em um reator STR 38

Gráfico 5 - Valores de KLa para diferentes vazões: (1) 7,5 L/min, (2) 8,0 L/min, (3) 10,0 L/min e (4) comparações das rotações para uma mesma rotação de 500 rpm. 38

Gráfico 6 - Valores de KLa para diferentes vazões: (1) 8,0 L/min, (2) 10 L/min, (3) comparações das rotações para uma mesma rotação de 1000 rpm. 39

Gráfico 7 - Comportamento do kLa em diferentes frequências de agitação e vazão de alimentação 40

Gráfico 8 - Valores de KLa para diferentes vazões: (1) 5,0 L/min, (2) 10 L/min, (3) comparações das vazões para um reator de coluna de bolhas 41

LISTAS DE ANEXOS

ANEXO A - ESPECIFICAÇÕES DO COMPRESSOR 47

ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES DO COMPRESSOR 47

ANEXO C - ESPECIFICAÇÕES DO ANALISADOR DE OXIGENIO DISSOLVIDO 48

ANEXO D - ESPECIFIÇÃO DA CORTINA DE AR 49

ANEXO E – RÔTAMETRO 49

ANEXO F– ROTEIRO EXPERIMENTAL 51

Sumário

1. INTRODUÇÃO – TEMA E PROBLEMATIZAÇÃO 10
1.1 JUSTIFICATIVA 10
1.2 OBJETIVOS 11
1.2.1 Objetivo geral 11
1.2.2 Objetivos específicos 11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 11
2.1 Biorreatores 11
2.1.1 Reator tipo Tanque Agitado (Stirred Tank Reactor, STR) 12
2.1.2 Biorreatores pneumáticos 14
2.2 Transferência de oxigênio 16
2.3 Métodos para a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (kLa) 20
2.3.1 Método dinâmico (Dynamic Gassing-out method) 21
2.3.2 Método de oxidação do sulfito de sódio 23
2.3.3 Outros métodos 24
2.3.4 Comparação quantitativa do kLa em diferentes métodos em função da rotação no agitador 26
3. METODOLOGIA DA PESQUISA 26
3.1 Montagem do aparato experimental 27
3.2 Materiais 31
3.3 Condições Operacionais 32
3.4 Procedimento experimental 32
3.5 Análise dos dados obtidos 35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 35
4.1 Determinação e Eliminação das concentrações de Oxigênio 35
4.2 Reator tipo STR 36
4.2.1 Avaliação da rotação 36
4.2.2 Variação da vazão 38
4.3 Reator tipo coluna de bolhas 41
5. CONCLUSÕES 42
6. REFERÊNCIAS 43

1. INTRODUÇÃO – TEMA E PROBLEMATIZAÇÃO

A transferência de oxigênio em sistemas líquidos representa um dos fenômenos mais críticos na engenharia de bioprocessos, sendo o coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_La) o parâmetro fundamental para quantificar essa eficiência. Em processos industriais que vão desde fermentações farmacêuticas até tratamento de efluentes, a capacidade de um reator em manter níveis adequados de oxigênio dissolvido pode significar a diferença entre o sucesso e o fracasso de uma operação (CERRI, 2009).

Dois sistemas destacam-se na prática industrial: os reatores tanque agitado (STR), que dominam cerca de 90% das aplicações biotecnológicas por sua versatilidade (ESPERANÇA, 2014), e os reatores colunas de bolhas (CB), preferidos em processos sensíveis ao cisalhamento mecânico. Enquanto no STR a transferência de massa é turbulenta e controlada por múltiplos parâmetros operacionais, nas colunas de bolhas o fenômeno ocorre de forma mais suave, porém menos eficiente (CHISTI, 1998).

Diversas abordagens metodológicas são empregadas para determinação do coeficiente de transferência de oxigênio (k_La), cada uma com particularidades operacionais. Dentre essas técnicas, o método dinâmico de *gassing-out* destaca-se por sua simplicidade e versatilidade operacional, consistindo em: (i) remoção do oxigênio dissolvido por introdução com gás inerte (N_2); (ii) reintrodução controlada de ar/oxigênio; e (iii) monitoramento contínuo da concentração de O_2; dissolvido ao longo do tempo. Esta técnica preserva as características originais do meio, demanda equipamentos acessíveis e permite avaliações em condições reais de operação, características que a tornam particularmente adequada para estudos comparativos entre diferentes configurações de reatores, justificando sua adoção no presente trabalho.

Dada a importância do k_La para o desempenho dos biorreatores, o presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento e implementação de um roteiro experimental para a determinação desse parâmetro, fornecendo uma abordagem didática e aplicada ao ensino e pesquisa em bioquímica e/ou fenômenos de transporte.

1.1 JUSTIFICATIVA

Este trabalho propõe a criação de um novo experimento para o Laboratório de Fenômenos de Transporte, do curso de Engenharia Química da UFMS, tendo como foco o conteúdo de transferência de massa. Atualmente, existe apenas um experimento que aborda esse conteúdo, o que limita o aprendizado e a análise dos fenômenos envolvidos. Com a implementação do novo ensaio, pretende-se ampliar os experimentos disponíveis para o estudo da transferência de massa, especificamente de oxigênio.

Para desenvolver este experimento, foram utilizados materiais, reagentes e equipamentos, na sua maioria disponíveis no laboratório, o que possibilita a economia de recursos e por hora amplia o conteúdo abordado na disciplina sem a necessidade de adquirir equipamentos caros exclusivamente para esse propósito. Dessa forma, o laboratório se enriquece com uma base experimental mais diversificada e inovadora, estimulando o aprendizado e a aplicação prática dos conhecimentos.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é implementar uma metodologia para a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_La), com a finalidade de elaborar um roteiro prático para os experimentos do laboratório de Fenômenos de Transporte. Esse roteiro também poderá ser utilizado como suporte didático na disciplina de Engenharia Bioquímica, contribuindo para a compreensão de conceitos fundamentais da disciplina.

1.2.2 Objetivos específicos

- Analisar as variações das vazões e agitação no sistema experimental e avaliar como essas alterações impactam a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_La) em dois reatores diferentes, STR e coluna de bolhas.
- Realizar um experimento prático para determinar o k_La
- Confeccionar um relatório e elaborar um roteiro experimental para implementação da prática na disciplina de laboratório de Fenômenos de Transporte.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Biorreatores

Os biorreatores são sistemas fundamentais para a realização de processos biotecnológicos, permitindo o cultivo controlado de microrganismos, células vivas (animais ou vegetais) ou enzimas em condições controlados (LIU,2020). A história do biorreator começou no século XIX, quando foi idealizado para aprimorar a fermentação industrial. Com avanços tecnológicos, seu desenvolvimento passou a incluir melhorias na geometria, métodos de produção e automação, expandindo suas aplicações para setores como biofarmacêutica, engenharia química e biomédica (CHEN, 2025).

O controle preciso de parâmetros operacionais como temperatura, pH, níveis de oxigênio dissolvido e concentração de substratos é fundamental para garantir a máxima eficiência dos processos biotecnológicos. Segundo Schügerl (1987), a manutenção dessas variáveis em condições ótimas cria um ambiente favorável para o crescimento celular e a produção de metabólitos.

A escolha do tipo de biorreator depende principalmente de dois fatores: o biocatalisador utilizado (sejam microrganismos, células ou enzimas) e o modo de operação do processo (contínuo, em batelada ou batelada alimentada). Os tanques agitados e aerados são os mais tradicionais, oferecendo uma mistura eficiente e uma boa transferência de oxigênio, o que os torna ideais para uma variedade de aplicações. Por outro lado, os reatores pneumáticos, como o airlift, são preferidos em processos que exigem menor cisalhamento e uma distribuição mais homogênea de gases sem a necessidade de agitadores mecânicos (CERRI, 2005).

Essa diversidade de modelos permite que os biorreatores sejam adaptados às necessidades específicas de cada bioprocesso, desde a produção de compostos farmacêuticos até a fabricação de biocombustíveis e enzimas industriais. A seleção do biorreator adequado é crucial para otimizar o rendimento e a eficiência do processo, garantindo resultados consistentes e de alta qualidade. Os principais exemplos de biorreatores estão representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais exemplos de biorreatores

Reatores em fase aquosa	**Reatores em fase não-aquosa (fermentação semi-sólida)**
STR: "stirred tank reactor".	Reatores estáticos (reatores com bandejas).
Coluna de bolhas ("bubble column").	Reatores com agitação (tambor rotativo).
Reatores "Air-lift".	Reatores com leito fixo.
Reatores de fluxo pistonado ("plug-flow").	Reatores com leito fluidizado gás-sólido.
Reatores com leito fixo.	Reatores estáticos (reatores com bandejas).
Reatores com leito fluidizado.	Reatores com agitação (tambor rotativo).
Outras concepções.	Reatores com leito fixo.
Reatores com membranas planas.	Reatores com leito fluidizado gás-sólido.
Reatores de fibra oca ("hollow-fiber").	Reatores estáticos (reatores com bandejas).

Fonte: PICÃO, 2021

2.1.1 Reator tipo Tanque Agitado (Stirred Tank Reactor, STR)

Os reatores mecanicamente agitados (STR - Stirred Tank Reactors) constituem a tecnologia predominante em processos biotecnológicos industriais, representando aproximadamente 90% dos biorreatores utilizados em escala produtiva (ESPERANÇA, 2014). Essa preferência industrial decorre principalmente de sua eficiência na transferência de massa, característica crítica para sistemas trifásicos complexos (gás-líquido-sólido) que envolvem cultivos celulares ou microbianos (LIU, 2020).

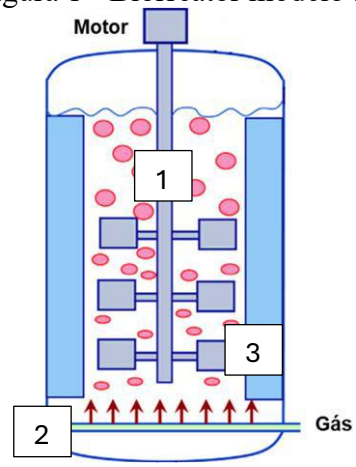
O princípio operacional dos STR baseia-se em um sistema de agitação mecânica composto por impelidores (turbinas ou hélices) acoplados a um eixo rotativo central. Segundo Cerri (2005), esse mecanismo desempenha funções essenciais:

- Transferência de quantidade de movimento, calor e massa
- Homogeneização eficiente do meio de cultura
- Dispersão ótima de gases no meio líquido

O sistema de aeração é implementado na região inferior do reator através de dispersores, sendo frequentemente complementado por defletores verticais que previnem a formação de vórtices e garantem padrões de fluxo adequados (DORAN, 2013). A combinação desses elementos resulta em um ambiente altamente controlado, ideal para processos que demandam reprodutibilidade e escalabilidade.

A Figura 1 apresenta um reator agitado por tanque (STR) convencional, destacando seus principais componentes: (1) sistema de agitação mecânica, composto por impelidor e eixo; (2) dispositivos de aeração localizados na parte inferior; e (3) defletores laterais

Figura 1 - Biorreator modelo STR



Fonte: Adaptado LUI ,2020

Nos biorreatores do tipo STR, a agitação mecânica exerce papel fundamental na dispersão do gás, geralmente oxigênio, no meio líquido. A transferência de massa entre as fases gasosa e líquida é um dos fatores críticos para o desempenho de processos biotecnológicos aeróbios, sendo frequentemente quantificada por meio do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_La). Este parâmetro é diretamente influenciado pela geometria do agitador, pela sua velocidade de rotação e pela configuração interna do reator. Embora existam diversas correlações empíricas que buscam estimar o k_La com base em parâmetros operacionais e geométricos, ainda há divergência na literatura quanto à forma mais adequada de representar a influência da geometria do sistema de agitação nesses modelos.

O k_La depende de diversas variáveis operacionais e geométricas, tais como a taxa de aeração, a potência específica dissipada e as características do sistema de agitação. Uma das correlações mais utilizadas na literatura foi proposta por Van't Riet (1979), que relaciona k_La com a potência dissipada por volume (P/V) e a taxa de aeração (Q/V), desconsiderando, contudo, a influência da geometria do agitador e do número de impelidores. Segundo o autor, desde que a energia fornecida ao sistema seja constante, o desempenho da transferência de massa permaneceria semelhante, o que é aplicável principalmente a fluidos Newtonianos de baixa viscosidade.

Com o avanço dos estudos experimentais, essa visão passou a ser questionada. Zhu et al. (2001) investigaram a influência do tipo de impulsor na eficiência da transferência de oxigênio e observaram que a substituição do impelidor resultou em um aumento de 17% nos valores de k_La, mesmo sob condições semelhantes de aeração e potência. O estudo evidenciou que diferentes impelidores geram distintos padrões de fluxo e promovem diferentes graus de cisalhamento, o que afeta diretamente a dispersão das bolhas de ar, o tamanho médio dessas bolhas e, consequentemente, a área interfacial disponível para a transferência de massa.

Nesse mesmo contexto, Puthli et al. (2005) ampliaram a discussão ao analisarem como a configuração dos impelidores – incluindo seu número, tipo, posicionamento e distância entre eles – influencia significativamente os valores de k_La. Os autores concluíram que determinadas configurações favorecem a sobreposição de zonas de alta turbulência e aumentam o volume efetivamente aerado no interior do reator. Essa melhoria na homogeneidade do escoamento reduz a formação de zonas mortas e aumenta a eficiência da transferência de oxigênio, mesmo em fluidos mais viscosos ou não newtonianos.

Dessa forma, torna-se evidente que, embora a correlação de Van't Riet ainda seja amplamente utilizada como uma primeira estimativa, fatores como a geometria do sistema de agitação e a configuração dos impelidores possuem influência direta e mensurável sobre o desempenho do biorreator. Isso destaca a importância do dimensionamento adequado desses elementos, especialmente em processos que envolvem meios complexos e culturas sensíveis a gradientes de oxigênio ou de cisalhamento.

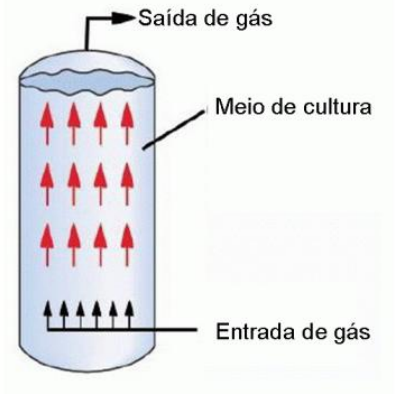
2.1.2 Biorreatores pneumáticos

Os biorreatores pneumáticos constituem uma categoria de sistemas não convencionais que utilizam exclusivamente a injeção de gases para promover a homogeneização do meio e a aeração, dispensando completamente o uso de agitadores mecânicos. Esses reatores vêm ganhando espaço na indústria biotecnológica devido às suas vantagens operacionais, que incluem maior eficiência na

transferência de oxigênio com um menor consumo energético e facilidade de escalonamento quando comparados aos tradicionais tanques agitados (ONKEN, et al 1983).

Entre os modelos pneumáticos mais utilizados, destacam-se a coluna de bolhas e o reator airlift. A coluna de bolhas apresenta uma configuração extremamente simples, consistindo basicamente em um vaso cilíndrico vertical onde a aeração é realizada por meio de borbulhamento de ar na base do reator, como mostrado da Figura 2 (CHISTI, 1998). Embora ofereça homogeneização limitada, esse sistema é adequado para diversos processos biotecnológicos menos sensíveis.

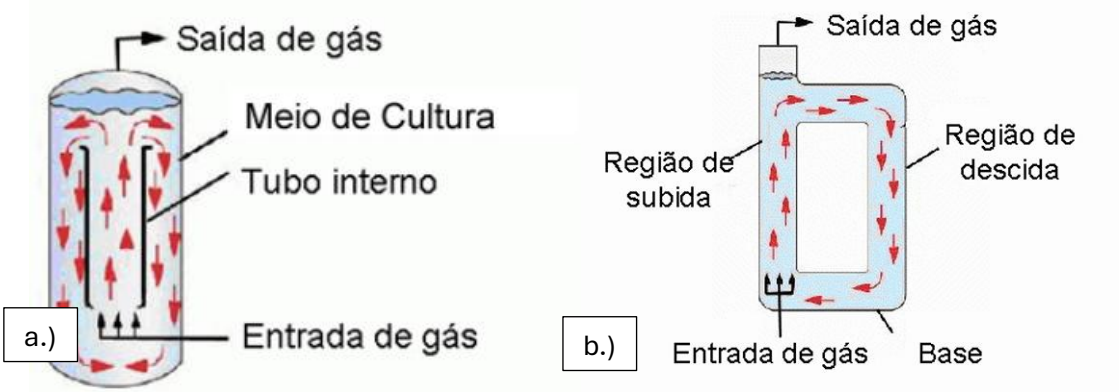
Figura 2 – Biorreator coluna de bolhas



Fonte: CERRI, 2005

Já os reatores airlift, mostrados na Figura 3, possuem um projeto mais sofisticado, que segundo Chisti (1989) podem ser divididos em airlift com circulação interna (a.), com divisão interna em zonas de subida (riser) e descida (downcomer), que promovem uma circulação controlada do meio de cultura através de diferenças de densidade, ou em arlift com circulação externa (b.) que utiliza um circuito separado (um tubo ou duto externo) para promover a circulação do meio de cultura, resultando em uma melhor transferência de oxigênio e menor estresse mecânico sobre as células (PARK,et al 1989).

Figura 3 - Biorreatores *air-lift* de a.) Circulação interna e b.) Circulação externa



Fonte: CERRI, 2005.

Diferentemente dos reatores mecanicamente agitados, nos quais a energia se concentra nas regiões próximas ao agitador, gerando zonas de alta tensão de cisalhamento, os reatores pneumáticos

minimizam os danos celulares causados por forças mecânicas excessivas, favorecendo o cultivo de células sensíveis. No entanto, a eficiência desses reatores em relação à transferência de oxigênio é frequentemente limitada pelas características hidrodinâmicas do sistema (MERCHUK, 1990).

Essas características têm impulsionado sua aplicação em diversos processos biotecnológicos, desde a produção de biomassa microbiana até processos avançados de cultivo celular para a indústria farmacêutica.

2.2 Transferência de oxigênio

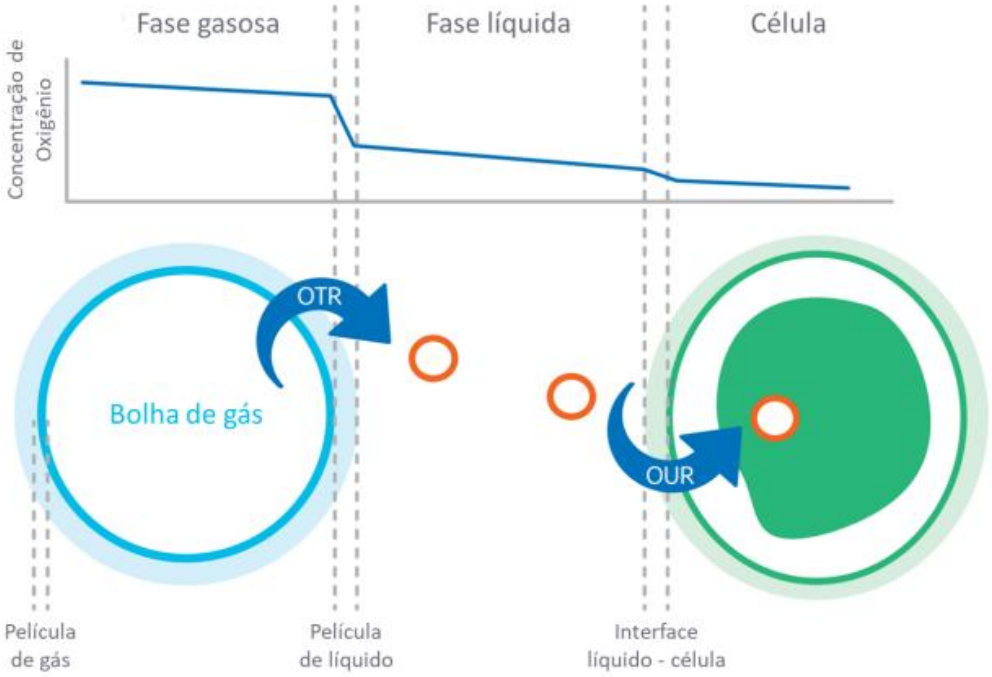
Nos bioprocessos aeróbicos, a concentração de oxigênio dissolvido é um parâmetro crítico, pois sua limitação pode inibir o crescimento microbiano e comprometer a produção e a manutenção de metabólitos essenciais (LIU et al., 2006). Devido à baixa solubilidade do oxigênio em soluções aquosas, torna-se necessário um suprimento contínuo desse gás para atender à demanda celular (BAILEY; OLLIS, 1986). Dessa forma, a taxa de transferência de oxigênio (Oxygen Transfer Rate – OTR) deve ser devidamente monitorada e controlada para garantir um desempenho eficiente do biorreator (MESTRE, 2018).

A concentração de oxigênio dissolvido em um meio de cultivo microbiano é determinada por três fatores principais: (i) a taxa de transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase líquida; (ii) a taxa de consumo de oxigênio pelas células (Oxygen Uptake Rate – OUR); e (iii) a taxa de transporte de oxigênio para o interior das células, onde será efetivamente utilizado no metabolismo microbiano (GARCIA-OCHOA; GOMEZ, 2009). Portanto, para assegurar um crescimento adequado e uma produção eficiente, é essencial otimizar a aeração e a agitação do sistema, garantindo um fluxo de gás eficaz e a manutenção dos níveis ideais de oxigênio no meio de cultura.

O transporte de oxigênio da fase gasosa para o interior de uma célula ocorre em etapas sequenciais mostrada na Figura 4.

I. Difusão na bolha: O O_2 atravessa a película gasosa estagnada ao redor da bolha até a interface gás-líquido.
II. Difusão no líquido: O oxigênio (O_2) se difunde para o líquido conforme os princípios estabelecidos pela Lei de Henry, que rege sua solubilidade.
III. Transporte no meio líquido: O O_2 dissolvido difunde-se através da película líquida estagnada e é transportado pelo líquido até a célula.
IV. Absorção celular: O O_2 atravessa a camada limite líquida ao redor da célula, penetra na membrana celular e é consumido no metabolismo.

Figura 4 - Diagrama da transferência de oxigênio Gás-Líquido-Célula



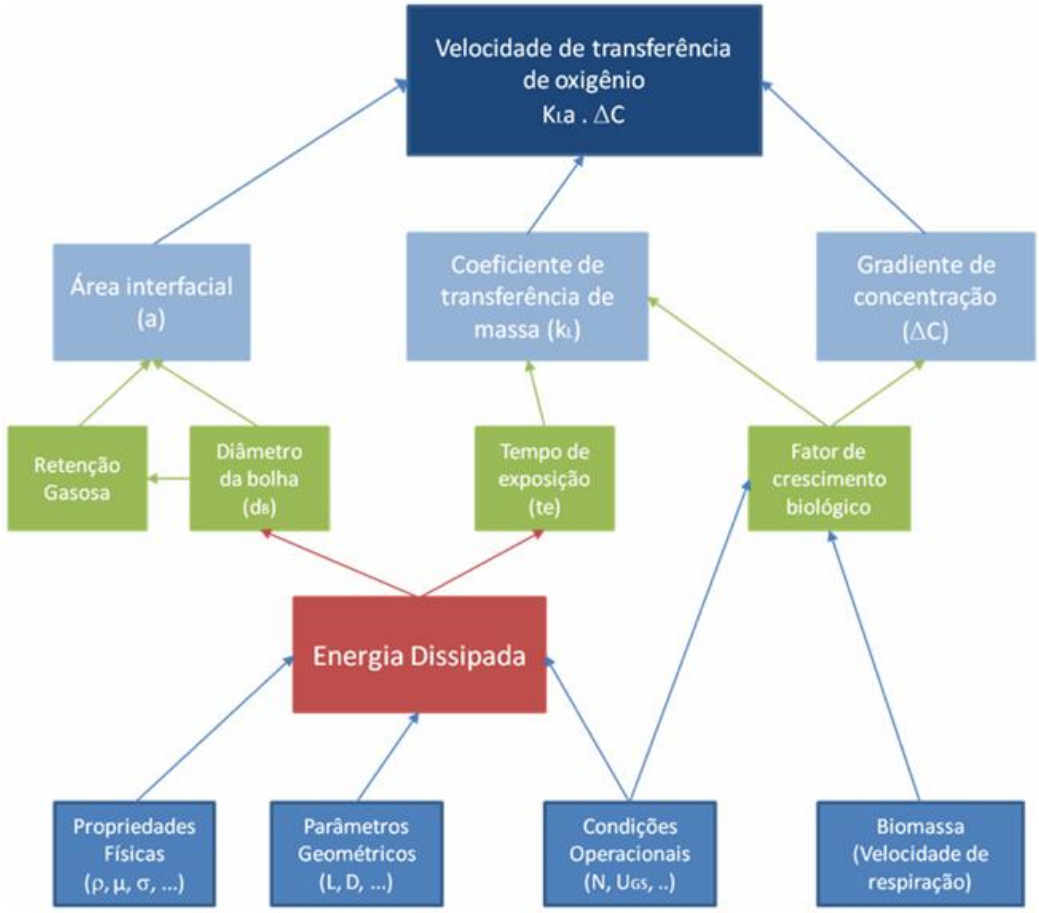
Fonte: PICÃO, 2021

A transferência de oxigênio em biorreatores aeróbicos é caracterizada pelo coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_La), um parâmetro fundamental que influencia diretamente a eficiência do processo, ele é responsável por quantificar a taxa em que o oxigênio é transferido da fase gasosa para a líquida. Esse coeficiente é afetado por diversos fatores, incluindo a vazão de ar, velocidade de agitação, propriedades do fluido (como viscosidade e tensão superficial) e, principalmente, pela geometria do biorreator (GARCIA-OCHOA; GOMEZ, 2009).

A OTR é expressa pela equação $k_La * \Delta C$, onde ΔC é o gradiente de concentração entre a fase gasosa e líquida. Para otimizar a transferência de oxigênio em um biorreator, é necessário compreender os fatores que influenciam cada um desses componentes.

Como mostrado na Figura 5 a área interfacial (a), que afeta diretamente a OTR está relacionada ao hold-up (retenção gasosa) de gás (Φ), que representa a fração volumétrica de gás disperso no líquido. Além disso, o tamanho das bolhas de gás (d_B) influencia essa área, pois bolhas menores aumentam a superfície de contato disponível para a transferência de oxigênio. O diâmetro das bolhas, por sua vez, é determinado pela energia dissipada (ε), que resulta da interação entre a agitação do sistema e a viscosidade do meio. Dessa forma, um controle preciso da aeração e da agitação é fundamental para otimizar a dispersão das bolhas e maximizar a transferência de oxigênio.

Figura 5 - Relação entre OTR, coeficiente de transferência de massa volumétrica e parâmetros hidrodinâmicos em biorreatores em vários níveis.



Fonte: OCHOA et al, 2008

O coeficiente de transferência de massa (k_L) também depende do tempo de exposição das bolhas no meio líquido (t_e), o que está diretamente relacionado à energia dissipada no sistema. Tempos de exposição mais longos permitem uma maior dissolução do oxigênio, mas devem ser equilibrados com outros fatores operacionais para evitar problemas como a coalescência de bolhas ou a formação de gradientes de concentração.

Outro fator determinante da OTR é o gradiente de concentração (ΔC), que representa a diferença entre a concentração de oxigênio na fase gasosa e líquida. Esse gradiente é influenciado pela taxa de consumo de oxigênio pelas células (OUR) e pelo fator de crescimento biológico, que pode ser associado a processos enzimáticos, variações na viscosidade do meio ou modificações estruturais da biomassa. Dessa forma, o controle da demanda celular e das propriedades do meio de cultivo é essencial para evitar limitações de oxigênio.

Por fim, a base do sistema é a hidrodinâmica do biorreator, que influencia diretamente a dissipação de energia e, consequentemente, todos os parâmetros mencionados anteriormente. As principais variáveis hidrodinâmicas incluem as propriedades físicas do meio (como viscosidade,

densidade e tensão superficial), os parâmetros geométricos do biorreator (como altura e diâmetro) e as condições operacionais (como velocidade de agitação e taxa de aeração). O controle desses fatores permite otimizar a transferência de oxigênio e garantir um desempenho eficiente do bioprocesso.

Portanto, a otimização da OTR exige um equilíbrio entre parâmetros hidrodinâmicos, operacionais e biológicos. A compreensão detalhada desses fatores é fundamental para projetar e operar biorreatores aeróbicos de maneira eficiente, garantindo a máxima produtividade e o crescimento celular adequado.

Como descrito na literatura o balanço de massa do oxigênio dissolvido na fase líquida bem misturada pode ser estabelecido como:

$$\frac{dC}{dt} = OTR - OUR \quad [1]$$

Onde $\frac{dC}{dt}$ é a taxa de acumulação de oxigênio na fase líquida, OTR representa a taxa de transferência de oxigênio do gás para o líquido, e OUR é a taxa de captação de oxigênio pelos microrganismos.

Em condições em que não existe atividade biológica - seja pela ausência de microrganismos ou por células metabolicamente inativas - a demanda de oxigênio (OUR) é igual a zero, já que não há reações consumindo O_2. Nesse caso, o cálculo da velocidade de transferência de oxigênio do ar para o meio é pode ser dada pela equação [2].

$$n_{o_2} * a = N_{o_2} = k_L a * (C_s - C) \quad [2]$$

Onde:

- n_{o_2}: fluxo de oxigênio ($mol.m^{-2}.s^{-1}$);
- a: área interfacial de troca de massa (m^{-1});
- N_{o_2}: velocidade volumétrica de transferência de oxigênio ($mol.\,m^{-3}.s^{-1}$)
- $k_L a$: coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (s^{-1});
- C_s: concentração do oxigênio dissolvido na fase líquida em equilíbrio com a pressão parcial de oxigênio da fase gasosa ($mol.\,m^{-3}$);
- C: concentração do oxigênio na fase líquida ($mol.\,m^{-3}$).

Assim:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a * (C_s - C) \quad [3]$$

Separando as variáveis:

$$\frac{dC}{C_s - C} = k_L a * dt \quad [4]$$

O $k_L a$ pode se estimado tomando a integral da equação acima.

$$\int \frac{1}{C_s - C} = \int k_L a * dt \quad [5]$$

$$-\ln(C_s - C) = k_L a * (t - t_0) \quad [6]$$

Isolando a concentração de oxigênio, para isso aplica-se exponencial:

$$C_s - C = e^{-k_L a * (t - t_0)} \quad [7]$$

Aplicando as seguintes condições de contorno $t = t_0$ em $C_0 = C$, temos:

$$C_s - C_0 = e^{-k_L a * (t - t_0)} \quad [8]$$

$$C_s - C_0 = 1 \quad [9]$$

Logo temos:

$$C_s - C = (C_s - C_0) * e^{-k_L a * (t - t_0)}$$

Sendo o C_s a concentração de saturação de oxigênio no meio líquido, t_0 o tempo inicial da aeração e C_0 a concentração inicial da aeração, a equação final pode ser escrita da seguinte maneira:

$$\ln\left(1 - \frac{C}{C_s}\right) = -k_L a * t \quad [10]$$

Onde o coeficiente angular é o $k_L a$.

2.3 Métodos para a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio ($k_L a$)

Os métodos para a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio ($k_L a$) podem ser classificados em dois grupos: métodos sem consumo biológico de oxigênio, realizados na ausência de microrganismos, e métodos biológicos, aplicados em sistemas nos quais há consumo de oxigênio por células vivas (LORENZINE, 2012). Os métodos sem consumo biológico, por sua vez, subdividem-se em físicos e químicos. Os métodos físicos estimam a transferência de oxigênio com base na variação da concentração de oxigênio dissolvido durante os processos de absorção ou dessorção. Já os métodos químicos, embora tenham sido amplamente aceitos inicialmente, não são recomendados para a determinação do $k_L a$, pois a adição de reagentes pode alterar as propriedades do líquido e superestimar os resultados devido a reações químicas rápidas na fase líquida (GARCIA-OCHOA; GOMEZ, 2009).

Figura 6 – Métodos para determinação do k_La

Fonte: LORENZINE, 2012

Diversas abordagens têm sido descritas na literatura para estimar esse parâmetro essencial na engenharia bioquímica. Entre os métodos mais utilizados destacam-se o método dinâmico, baseado na variação da concentração de oxigênio dissolvido ao longo do tempo; o método da absorção de CO_2, que utiliza o dióxido de carbono como gás traçador para monitorar sua dissolução no líquido e, a partir disso, estimar indiretamente o k_La, considerando as semelhanças na transferência de massa entre os dois gases; e o método da sulfitação, no qual o oxigênio dissolvido é rapidamente consumido por reações químicas com sulfito, permitindo a determinação também indireta do k_La (VAN'T RIET, 1979; SUNDARAMURTHY et al., 2009; GARCIA-OCHOA; GOMEZ, 2009).

Na seleção do método para medir a transferência de oxigênio em biorreatores, é crucial considerar: (i) os sistemas de aeração e homogeneização, que afetam diretamente a eficiência da transferência de massa; (ii) o tipo de biorreator e seu projeto mecânico, pois reatores como *air-lift* ou tanques agitados apresentam dinâmicas distintas de oxigênio dissolvido; (iii) a composição do meio de fermentação, já que viscosidade e sólidos podem interferir nas medições; e (iv) o efeito dos microrganismos, pois seu consumo de O_2 e metabólitos podem alterar as condições do meio (NOVAK; KLEKNER, 1988).

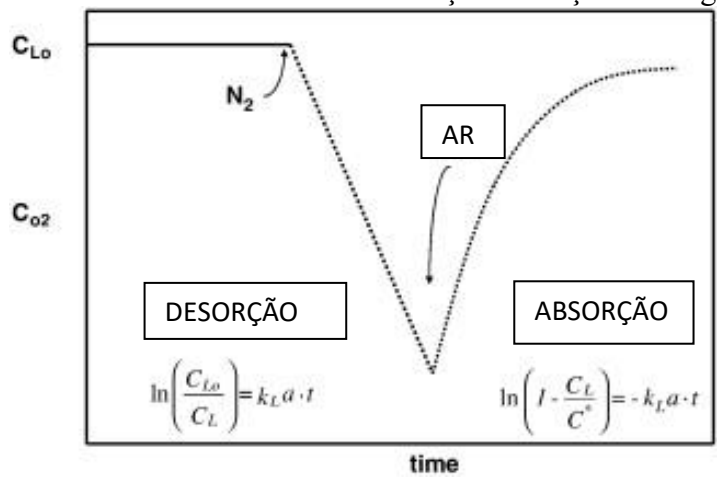
2.3.1 Método dinâmico (Dynamic Gassing-out method)

O método dinâmico é uma técnica amplamente utilizada para determinar o coeficiente de transferência de massa de oxigênio (k_La) em sistemas líquidos, proposto em 1966 por Taguchi e Humphery. Ele se baseia na medição das variações de concentração de oxigênio dissolvido durante processos de absorção ou dessorção.

Um meio líquido inicialmente saturado com oxigênio é submetido à purga com nitrogênio, promovendo a remoção controlada do oxigênio dissolvido ao longo do tempo. Após alcançar uma

concentração próxima de zero, o sistema é reoxigenado por meio da introdução de ar em vazão controlada. Durante esse processo, a concentração de oxigênio dissolvido é monitorada continuamente até que se atinja a saturação do líquido. A análise da curva de reoxigenação obtida permite a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de massa (k_La) para o oxigênio.

Figura 7 - Técnica dinâmica de dessorção-absorção de oxigênio



Fonte: GARCIA-OCHOA; GOMEZ, 2009

A Figura 7 ilustra o perfil típico de variação da concentração de oxigênio dissolvido (C_L) em um sistema líquido durante os processos de dessorção e absorção, utilizados para a determinação do k_La. Inicialmente, o líquido encontra-se saturado com oxigênio (C_{L0}). Em seguida, é introduzido gás nitrogênio (N_2), que promove a remoção do oxigênio dissolvido por dessorção, causando uma queda na concentração ao longo do tempo. Após atingir uma concentração mínima de oxigênio ($C_L \cong 0$) inicia-se a fase de reoxigenação do meio. A concentração de oxigênio dissolvido começa a aumentar até atingir novamente a saturação.

Um aspecto crítico do método dinâmico é o tempo de resposta do eletrodo de oxigênio. Como os sensores não respondem instantaneamente às mudanças de concentração, é essencial que seu tempo de resposta seja significativamente menor que o tempo característico do processo de transferência de massa (VAN'T RIET, 1979). Quando essa condição não é atendida, os dados podem ser distorcidos, exigindo correções matemáticas ou ajustes na metodologia, Cerri (2016) realizaram um estudo sobre a determinação do k_La em biorreatores aerados e agitados, propondo uma abordagem que independe da sensibilidade do eletrodo, visando minimizar esse tipo de interferência nos resultados.

Apesar de sua ampla aplicação em biorreatores e sistemas de tratamento de efluentes, o método dinâmico apresenta algumas limitações. A posição do sensor no reator e as condições hidrodinâmicas locais podem influenciar significativamente os resultados. Em sistemas complexos, como colunas de bolhas, onde os tempos característicos de transferência de massa são comparáveis

ao tempo de resposta dos sensores convencionais, recomenda-se o uso de técnicas complementares ou a aplicação de correções específicas para minimizar os erros de medição (GOURICH et al, 2008). Estudos indicam que, nestes casos, a exclusão cuidadosa de parte dos dados iniciais pode melhorar a precisão dos resultados (MERCHUK, 1990).

2.3.2 Método de oxidação do sulfito de sódio

Um dos métodos clássicos utilizados para a determinação do k_La é o método químico baseado na oxidação do sulfito de sódio, proposto por Cooper, Fernstrom e Miller (1944). Esse método se destaca pela simplicidade experimental e pela eliminação de interferências biológicas, sendo amplamente empregado na caracterização do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio em diferentes configurações de reatores.

O princípio do método baseia-se na rápida reação do sulfito de sódio (Na_2SO_3) com o oxigênio dissolvido no meio, resultando na formação de sulfato de sódio (Na_2SO_4). Essa reação de oxidação ocorre de forma espontânea na presença de um catalisador metálico, geralmente íons de cobre (Cu^{2+}) ou cobalto (Co^{2+}), que aceleram significativamente o processo. A equação química que representa essa reação é dada por:

$$O_2 + 2Na_2SO_3 \rightarrow 2Na_2SO_4 \quad [11]$$

Como o sulfito reage rapidamente com o oxigênio, o sistema permanece praticamente livre de oxigênio dissolvido, garantindo que a absorção ocorra sob condições de regime de primeira ordem. De acordo com Cerri (2005), sendo a transferência de oxigênio da fase gasosa para a fase liquida a etapa limitante do processo, a velocidade volumétrica de transferência de oxigênio N_{O_2} pode ser calculada pela estequiometria da reação, a quantidade de Na_2SO_4 e o tempo. A taxa de consumo de oxigênio pode ser descrita pela seguinte equação:

$$N_{O_2} = \frac{0{,}5.n}{V.\Delta t} \quad [12]$$

Sendo n o número de mols de Na_2SO_4, V o volume da reação (L) e Δt o tempo decorrido (s).

O coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio pode ser calculado pela seguinte equação:

$$k_La = \frac{N_{O_2}}{C_S} \quad [13]$$

Sendo o N_{O_2} a velocidade de transferência de oxigênio e C_S a concentração de saturação de oxigênio na água.

De acordo com Ruchti (1985), diversas fontes de erro podem ser identificadas na aplicação do método de oxidação de sulfito para a determinação do k_La. Dentre as principais estão: a indução

do catalisador (Co^{2+}), que pode levar a variações na taxa de oxidação nos primeiros 20 a 40 minutos do experimento; a escolha inadequada da concentração de catalisador, que pode resultar na superestimação do k_La devido à intensificação da reação na zona de difusão líquida; e a influência da força iônica sobre a solubilidade do oxigênio, que, se não for devidamente corrigida, compromete a acurácia dos resultados. Além disso, erros relacionados à má homogeneização do gás, como a ocorrência de regime de plug flow, também podem causar desvios significativos nos valores medidos.

Ruchti (1985) recomenda operar em baixos níveis de absorção para minimizar esses efeitos e destaca que a escolha empírica da concentração ideal de catalisador, por meio de curvas logarítmicas de taxa de transferência versus concentração de Co^{2+}, é fundamental para garantir resultados confiáveis.

2.3.3 Outros métodos

Os métodos para determinação da capacidade do meio líquido de absorver oxigênio a partir da fase gasosa, conhecido como coeficiente de transferência de massa volumétrico (k_La), surgiram na primeira metade do século XX. A Tabela 2 apresenta os principais métodos empregados para a determinação do k_La, juntamente com seus respectivos autores, que foram responsáveis pelo desenvolvimento ou popularização das técnicas. Esses pesquisadores estabeleceram as bases metodológicas para cada abordagem utilizada atualmente.

Tabela 2 - Diferentes métodos para avaliação do coeficiente de transferência de massa volumétrica

Referências	Método
Cooper et al. (1944)	Sulfito de sódio
Danckwerts e Gillham (1966)	Absorção de dióxido de carbono
Wang e outros (1979)	Análise de fase gasosa
Taguchi e Humphrey (1966)	Dinâmico: Dessorção ou absorção de oxigênio
Duetz e outros (2000)	Crescimento de microrganismos aeróbicos estritos
Onken e outros (1985)	Oxidação de hidrazina
Ortiz-Ochoa e outros (2005)	Bio-oxidação de catecol
Pedersen e outros (1994)	Método Kr
Colina (2006)	Medição de pH para soluções de CO_2

Fonte: Adaptado de Garcia-Ochoa e Gomez, 2009

Além dos métodos já detalhados anteriormente, que são os mais conhecidos e usados, existem outros, como o método da absorção de dióxido de carbono, estudado por Danckwerts e Gillham

(1966). Esse método mede k_La com base na absorção de CO_2, que tem características diferentes do oxigênio, e devido a essas propriedades físico-químicas, o método pode não representar com precisão a transferência de oxigênio nos sistemas biológicos.

Para medições diretas, técnicas como a análise de fase gasosa, proposta por Wang et al. (1979), e o método dinâmico, descrito por Taguchi e Humphrey (1966), são bastante utilizadas. Ambos requerem sondas invasivas e alta precisão nos analisadores de oxigênio. No método criado por Wang e colaboradores, essa técnica mede a concentração de oxigênio na entrada e na saída do reator.

Entre os métodos biológicos, a avaliação do crescimento de microrganismos aeróbicos, conforme descrito por Duetz et al. (2000), se destaca por fornecer um valor realista em cultivos celulares. Esse método é baseado no consumo biológico de oxigênio para estimar k_La e, para isso, depende de suposições sobre a cinética microbiana, o que acaba sendo um problema.

Métodos como a oxidação de hidrazina (ONKEN ET AL., 1985) e a bio-oxidação de catecol (ORTIZ-OCHOA ET AL., 2005) também são aplicáveis, mas apresentam limitações devido à complexidade dos processos bioquímicos envolvidos. No método criado por ortiz-ochoa, a técnica se baseia na atividade enzimática para o cálculo do k_La, e sua aplicação é limitada a pequenos volumes e requer a presença de enzimas específicas. Já no método de Onken et al., foi utilizada a oxidação química da hidrazina para medir k_La em sistemas semi-industriais. No entanto, esse método não pode ser aplicado diretamente a processos biológicos.

O método KR fundamenta-se na utilização de isótopos radioativos e no monitoramento de sua atividade radioativa no fluxo gasoso efluente. No entanto, sua aplicação em escala industrial enfrenta limitações significativas devido as normas regulatórias e questões de segurança associadas ao manuseio de materiais radioativos (PEDERSEN et al., 1994). Por fim, a medição de pH para soluções de CO_2, proposta por Colina (2006), é uma alternativa eficiente, mas não aplicável a bioprocessos microbianos. Esse método se baseia na variação de pH causada pela dissolução de CO_2 no meio, possibilitando o cálculo indireto do k_La.

Esses diferentes métodos possuem vantagens e desvantagens que devem ser consideradas conforme a escala e as condições do sistema em estudo. A escolha da técnica mais adequada dependerá dos objetivos do processo, da disponibilidade de equipamentos e da necessidade de precisão nos dados obtidos.

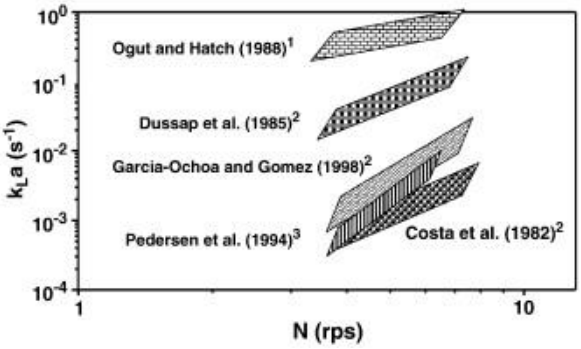
2.3.4 Comparação quantitativa do k_La em diferentes métodos em função da rotação no agitador

A Figura 8 mostra a variação do coeficiente de transferência de oxigênio volumétrica (k_La) em função da velocidade do agitador (N, em rotações por segundo - rps), conforme obtido por diferentes autores.

Os valores de k_La aumentam com a velocidade do agitador, como esperado, pois, uma maior agitação favorece a dispersão das bolhas e melhora a transferência de massa. Os diferentes métodos produzem faixas distintas de valores para k_La, o que evidencia que cada abordagem experimental pode gerar resultados diferentes para um mesmo sistema. Ogut e Hatch (1988) apresentam os valores mais altos de k_La, enquanto os métodos de Pedersen et al. (1994) e Costa et al. (1982) mostram valores significativamente menores.

Essa discrepância é consistente me que o Ogut e Hatch (1988) utilizaram o método do sulfito de sódio, que superestima o k_La devido à remoção química do oxigênio. Os outros autores utilizaram métodos diferentes (método dinâmico e medição de Kr) mais próximos das condições reais de bioprocessos.

Figura 8 - Comparação dos valores de k_La obtidos por diferentes métodos de medição em função da velocidade do agitador em soluções não newtonianas; 1: método químico, 2: método dinâmico, 3: medição de Kr



Fonte: GARCIA-OCHOA; GOMEZ, 2009

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

A presente metodologia descreve o processo de montagem e condução dos experimentos para a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_La). Para isso, dois reatores distintos foram montados: um reator de tanque agitado (STR) e uma coluna de bolhas (CB). O desenvolvimento desses sistemas exigiu a implementação de um conjunto de componentes essenciais, incluindo um sistema de entrada de gases (ar e nitrogênio) controlado, sensor para monitoramento das principais variáveis experimentais, medidor de oxigênio dissolvido (OD) ou também conhecido

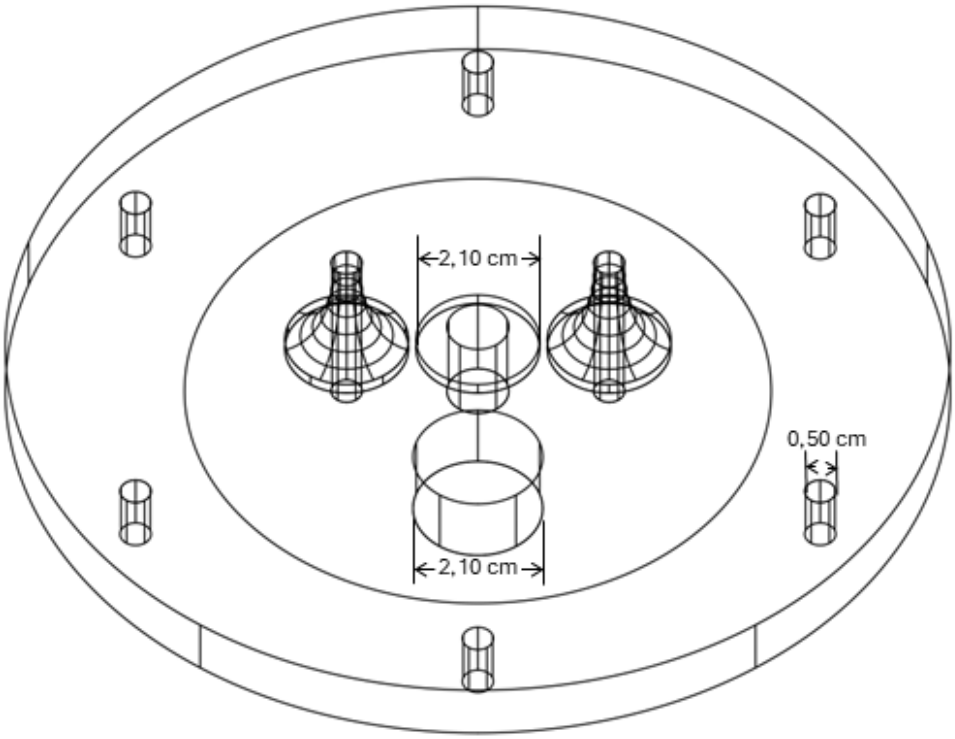
como oxímetro, e um mecanismo de agitação (agitador mecânico) para avaliação dos efeitos hidrodinâmicos no reator STR.

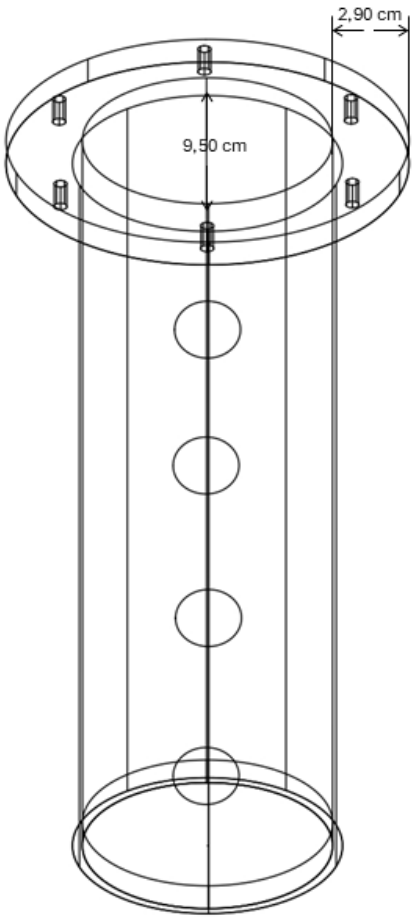
O sistema foi projetado para garantir condições controladas de operação, permitindo a análise da influência de diferentes vazões de entrada de gás e intensidades de agitação sobre o $k_L a$.

3.1 Montagem do aparato experimental

Foram montados dois tipos de reatores para o estudo da transferência de oxigênio: um reator STR (Stirred Tank Reactor) e uma coluna de bolhas. Para a realização dos experimentos, foi reutilizado e aperfeiçoado um biodigestor de produção de biogás que se encontrava em desuso no Laboratório de Engenharia Química. O reator passou por adaptações para garantir um funcionamento adequado ao estudo da transferência de oxigênio, mantendo um ambiente controlado e vedado para a obtenção de resultados de maneira precisa. As dimensões do reator em questão estão representadas pela Figura 9 e Figura 10, sendo a vista superior e lateral, respectivamente.

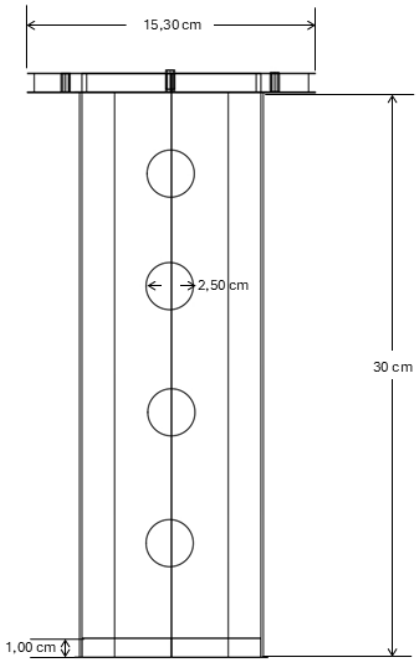
Figura 9 - Detalhes construtivos do reator - Visto por cima

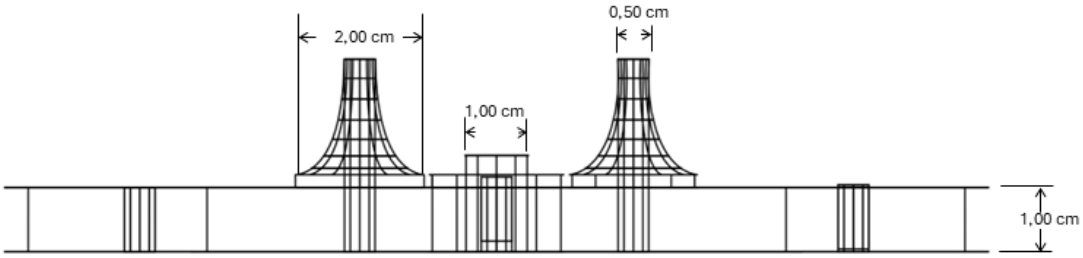




Fonte: AUTOR, 2025

Figura 10 - Detalhes construtivos do reator – Visto pela lateral





Fonte: AUTOR, 2025

Uma das principais modificações realizadas foi a ampliação de um dos orifícios para permitir a instalação do sensor de oxigênio dissolvido (OD). Esse ajuste foi feito de modo que o sensor ficasse totalmente submerso no sistema, evitando qualquer contato com o meio externo. Para garantir a vedação completa e evitar interferências, utilizou-se veda rosca para o fechamento do orifício, como mostra a Figura 11. Cabe destacar que a sensibilidade do sensor é alta, o que exige condições estáveis de operação para garantir leituras confiáveis. Oscilações de pressão, formação de bolhas ou vibrações no sistema podem gerar flutuações nos valores medidos, comprometendo a precisão dos resultados.

Figura 11 - Instalação do sensor de oxigênio dissolvido

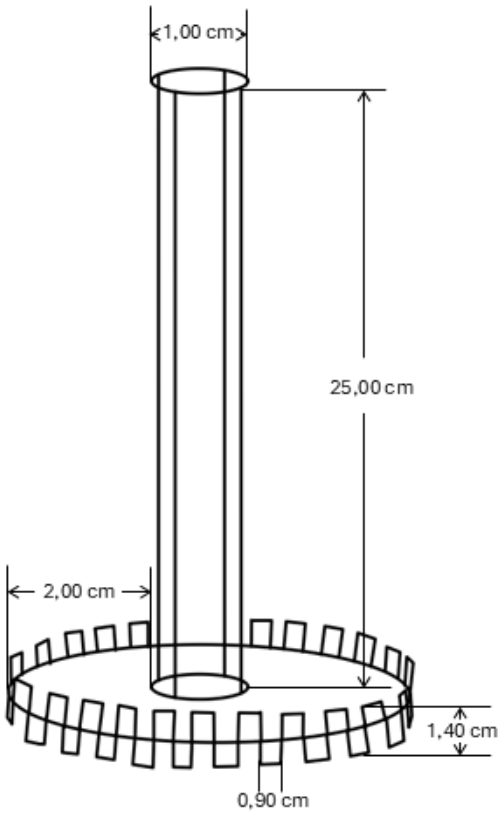
Fonte: AUTOR, 2025

O sistema de aeração foi realizado por meio da instalação de uma cortina de ar com microfuros, comumente utilizada em aquários, posicionada no fundo do reator para garantir uma melhor dispersão das bolhas de gás. Além disso, um rotâmetro foi utilizado para o controle preciso da vazão do ar, permitindo ajustes conforme a necessidade do experimento.

Por fim, foi implementado um sistema de agitação mecânica com controle de velocidade, possibilitando a variação da intensidade da mistura dentro do reator STR, as medidas desse agitador são representadas pela Figura 12. Dessa forma, o experimento pôde ser conduzido sob diferentes

condições operacionais, variando a vazão do gás (ar) e a agitação, proporcionando uma análise detalhada sobre a eficiência da transferência de oxigênio no sistema.

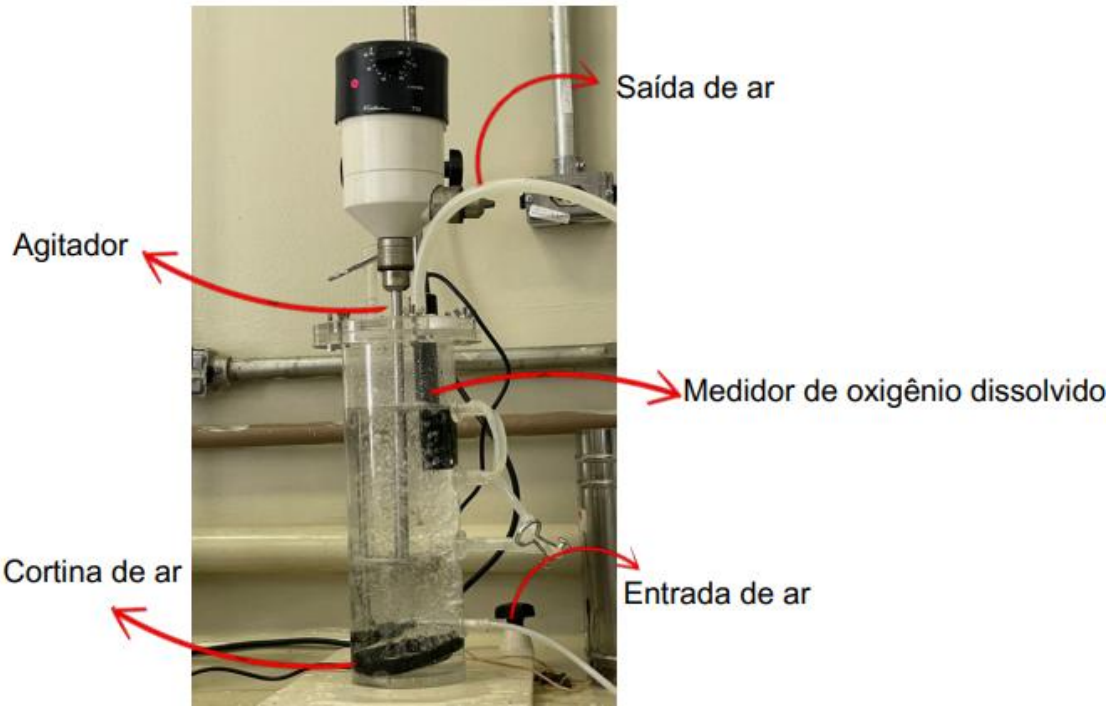
Figura 12 – Detalhes construtivos do agitador



Fonte: AUTOR, 2025

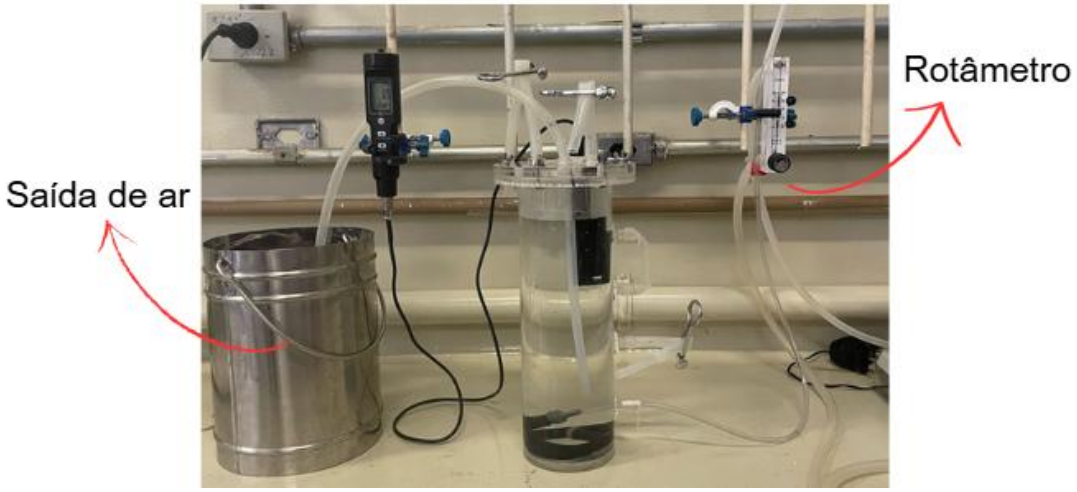
Assim, realizou-se a montagem do reator STR e CB como mostrado na Figura 13 e 14, respectivamente, com entrada de ar por uma cortina de microfuros na base e agitação mecânica para homogeneização (e melhor transferência de massa). O medidor de oxigênio dissolvido foi fixado sem contato com o meio externo. A saída de ar foi posicionada estrategicamente para evitar acúmulo de pressão, garantindo o funcionamento eficiente do sistema.

Figura 13 – Montagem do Reator STR



Fonte: AUTOR, 2025

Figura 14 – Montagem do Reator CB



Fonte: AUTOR, 2025

3.2 Materiais

Os materiais utilizados para a montagem do experimento incluem (especificações encontradas nos anexos):

- Reator cilíndrico transparente (acrílico)
- Agitador mecânico com controle de rotação/agitação
- Sensor de oxigênio dissolvido, com aferição da temperatura (ANEXO C)
- Entrada de gás com controle de vazão (compressor) (ANEXO A)

- Rotâmetro para medição da vazão de ar (ANEXO E)
- Cortina de ar com microfuros para aquário (ANEXO D)
- Cilindro de nitrogênio comprimido

3.3 Condições Operacionais

Durante os experimentos, a vazão de entrada de ar (com auxílio do compressor) foi variada para avaliar sua influência na transferência de oxigênio. Além disso, no reator STR, a velocidade de agitação foi ajustada para verificar sua relação com o coeficiente k_La. Diferentes combinações de vazão e agitação foram testadas para entender melhor o comportamento do k_La em função dessas variáveis de processos, essas combinações estão representadas na tabela 3. Ressalta-se que a escolha dos parâmetros foi condicionada pelas limitações operacionais do equipamento utilizado. Dessa forma, foram selecionadas três rotações que não provocassem transbordamento do reator, assegurando a estabilidade do sistema durante os ensaios experimentais.

Tabela 3 – Diferentes combinações de agitações e vazões para os biorreatores STR e CB

STR							
2,0 L/min			500 rpm			1000 rpm	
500 rpm	750 rpm	1000 rpm	7,5 L/min	8,0 L/min	10 L/min	8,0 L/min	10 L/min
CB							
5,0 L/min			10 L/min				

Fonte: AUTOR, 2025

Os dados foram coletados por meio de um analisador de oxigênio dissolvido, que permitiu medir a variação da concentração de O_2 ao longo do tempo. Além disso, foram registradas variáveis operacionais, como temperatura e vazão de ar injetado, sendo essa temperatura constante, próxima a 25°C, durante toda a coleta de dados. Os experimentos seguiram o procedimento operacional previamente estabelecido, garantindo a reprodutibilidade dos resultados.

3.4 Procedimento experimental

O procedimento experimental foi dividido em etapas: I – Remoção do oxigênio; II – Análise da agitação no STR; III – Análise da vazão no STR e no CB.

Na etapa I, foi utilizado o gás nitrogênio para zerar a concentração de oxigênio no meio. O gás foi injetado no sistema por meio da cortina de ar para garantir uma distribuição homogênea e acelerar a remoção do oxigênio. O cilindro presente na Figura 6 contém nitrogênio gasoso (N_2), que foi usado neste primeiro momento para eliminação da concentração de O_2. Esse processo foi mantido

até que a concentração de oxigênio dissolvido atingisse valores próximos de zero ou o mínimo alcançado no sistema, como mostrado na Figura 15.

Figura 15 - Eliminação da concentração de oxigênio por meio da adição de nitrogênio

Fonte: AUTOR, 2025

Após a etapa de remoção do oxigênio (I), deu-se início a etapa II no reator STR. O agitador mecânico foi acionado em rotações de 500 rpm, 750 rpm e 1000 rpm, enquanto um compressor de ar com vazão fixa de 2,0 L/min injetava oxigênio no sistema. As especificações técnicas do compressor utilizado estão detalhadas no Anexo A. Durante essa etapa, a concentração de oxigênio dissolvido foi monitorada por meio do sensor de oxigênio dissolvido, cujos valores eram registrados em vídeo. O visor do analisador de oxigênio dissolvido indicava a concentração em tempo real, enquanto um cronômetro exibia a evolução temporal do processo, como mostrado na Figura 16.

Figura 16 - Registro do Tempo para Análise da Dissolução de Oxigênio

Fonte: AUTOR, 2025

Essas medições possibilitaram a obtenção de um gráfico de concentração de oxigênio dissolvido em função do tempo, permitindo a determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (k_La).

Realizou-se a medição da remoção do oxigênio dissolvido de forma análoga à metodologia acima. Os dados coletados foram utilizados para gerar um gráfico decrescente de concentração de oxigênio dissolvido, possibilitando uma análise complementar da cinética da transferência de massa no sistema.

Na etapa III, foram realizadas variações de vazão de gás, ajustadas para atingir 7,5, 8,0 e 10,0 L/min, em experimentos conduzidos a rotações fixas do agitador de 500 rpm e 1000 rpm. Para atingir as vazões desejadas, utilizou-se um compressor com controle de vazão, aliado a um rotâmetro que possibilitou a medição precisa do fluxo de ar, representados, respectivamente, na Figura 17 e Figura 18. Essas condições operacionais de vazões (5,0 e 10L/min) também foram aplicadas no reator de CB, permitindo a avaliação da influência do fluxo gasoso na taxa de dissolução do oxigênio e possibilitando uma comparação quantitativa dos valores obtidos em cada sistema.

Figura 17 - Compressor de ar

Fonte: AUTOR, 2025

Figura 18 - Sistema de medição de vazão e oxigênio dissolvido

Fonte: AUTOR, 2025

Durante cada nova configuração experimental – seja por alteração da vazão ou da rotação do agitador – o sistema era reiniciado. Após a alteração dos parâmetros operacionais, o fornecimento de oxigênio era interrompido e nitrogênio comprimido era injetado novamente para remover o oxigênio

dissolvido, restabelecendo as condições iniciais. Essa etapa de “reset” permitia que os dados referentes à dissolução e remoção de oxigênio fossem coletados de forma independente para cada conjunto de condições, possibilitando a geração de gráficos específicos que evidenciam a influência de cada parâmetro na cinética da transferência de massa.

3.5 Análise dos dados obtidos

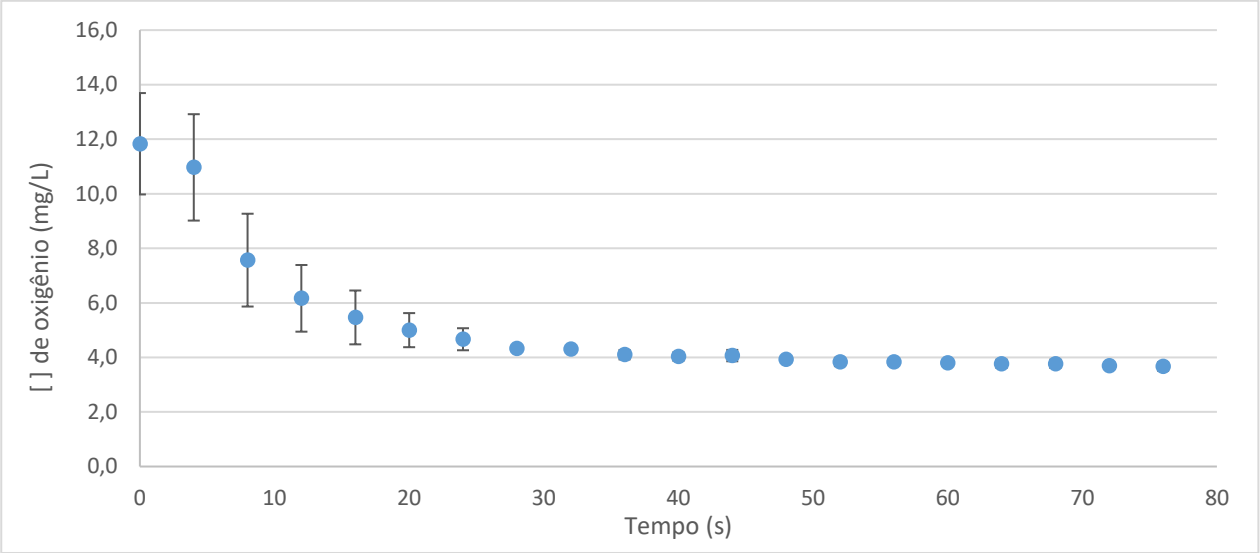
Os dados experimentais foram analisados com base no modelo de transferência de oxigênio em sistemas gás-líquido, utilizando o método dinâmico para determinação do coeficiente volumétrico de transferência de massa ($k_L a$). A partir das curvas de oxigênio dissolvido em função do tempo, foi aplicada a equação $\ln\left(1 - \frac{C}{C_s}\right) = -k_L a * t$, permitindo a obtenção de $k_L a$ por meio do coeficiente angular da reta ajustada. Para garantir a confiabilidade dos resultados, os experimentos foram realizados em triplicata, e os dados foram tratados estatisticamente, com a avaliação do coeficiente de determinação (R^2) para verificar a qualidade do ajuste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Determinação e Eliminação das concentrações de Oxigênio

Os resultados obtidos durante o experimento demonstram que a injeção de nitrogênio foi eficaz na remoção do oxigênio dissolvido, reduzindo sua concentração até valores próximos de zero (abaixo de 2 mg/L). Conforme verificado no gráfico da Gráfico 1, durante o período inicial de injeção de nitrogênio, observou-se uma queda rápida na concentração de oxigênio, indicando uma remoção eficiente por meio da inserção do gás. À medida que o sistema se aproximava do equilíbrio, a taxa de diminuição tornou-se menos acentuada, confirmando que a concentração atingiu o limite mínimo permitido pelo sistema experimental. Esses resultados validam o procedimento adotado para “zerar” o oxigênio dissolvido e estabelecem as condições ideais para a etapa subsequente de injeção controlada de oxigênio.

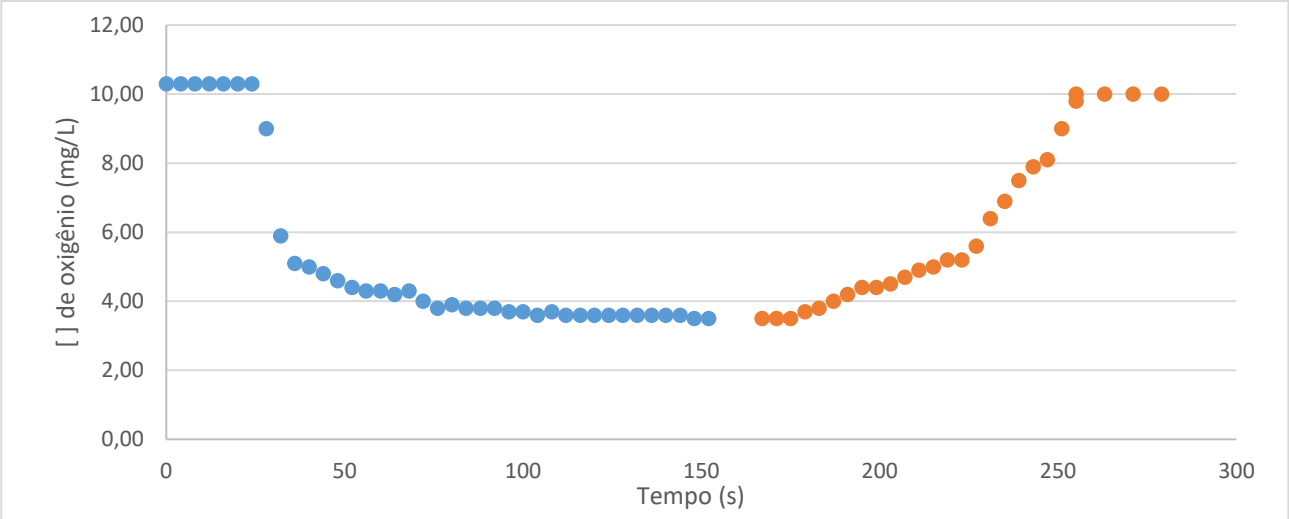
Gráfico 1 - Eliminação de oxigênio por meio da inserção de nitrogênio no sistema na temperatura 25°C



Fonte: AUTOR, 2025

O Gráfico 2 apresenta o perfil da variação da concentração de oxigênio dissolvido ao longo do tempo para uma vazão de 2,5 L/min. Nos primeiros 150 s, ocorreu a dessorção do oxigênio, caracterizada por uma queda abrupta na concentração, indicando a remoção do gás pelo nitrogênio. A partir dos 160 s, a alimentação de ar foi iniciada, resultando em um aumento gradual da concentração de oxigênio dissolvido.

Gráfico 2- Perfil da concentração de oxigênio dissolvido em água a 25°C durante a análise de k_La pelo método dinâmico.



Fonte: AUTOR, 2025

4.2 Reator tipo STR

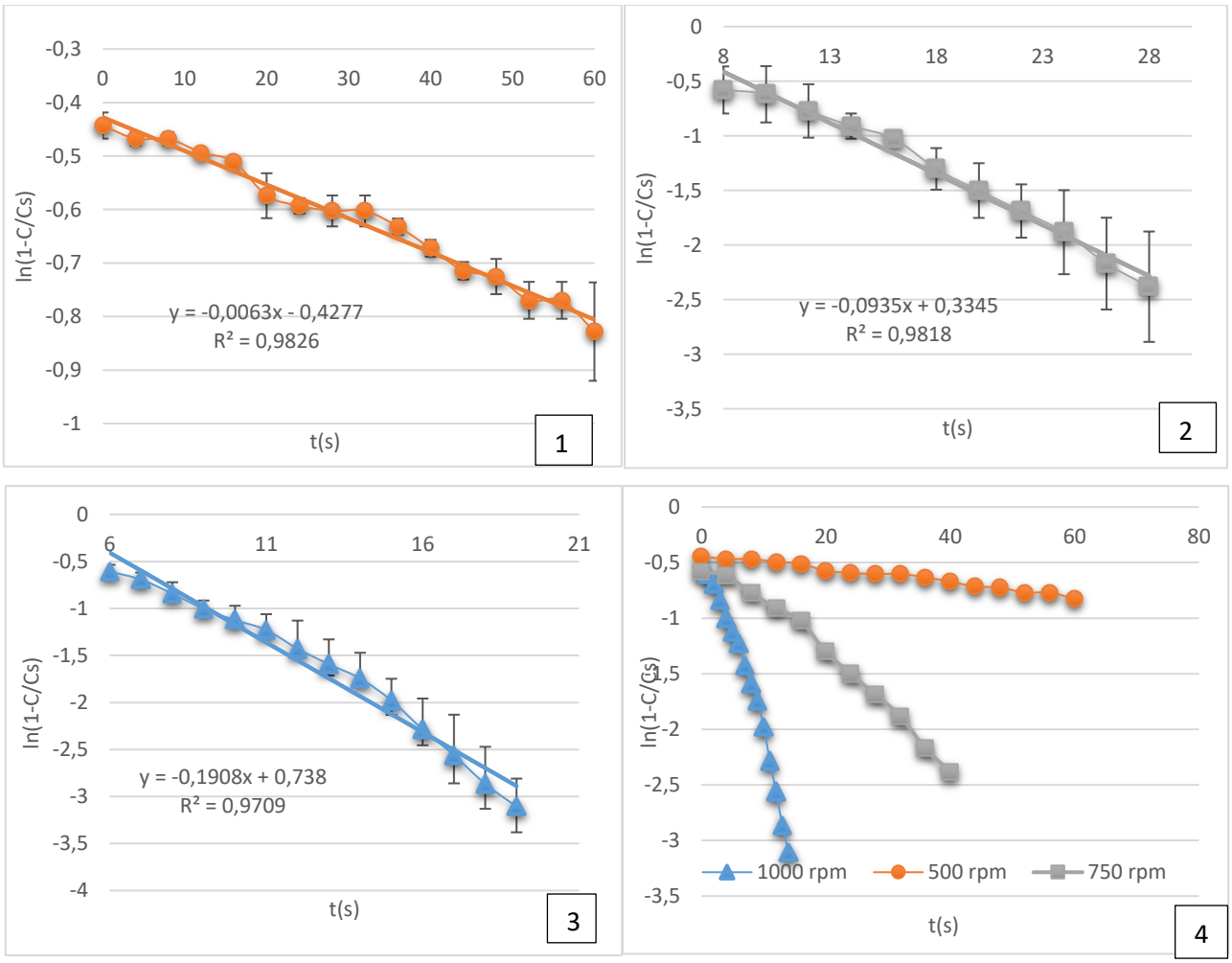
4.2.1 Avaliação da rotação

Os experimentos realizados com vazão fixa de 2,5 L/min no reator STR demonstraram uma relação direta e significativa entre a rotação do agitador e o coeficiente de transferência de oxigênio

(k_La). Como mostra o Gráfico 3, observou-se um aumento expressivo de 2928,57% do k_La conforme se elevou a velocidade de agitação: partindo de 0,0063 s^{-1} a 500 rpm, atingindo 0,0935 s^{-1} a 750 rpm e alcançando 0,1908 s^{-1} a 1000 rpm.

Este comportamento esperado pode ser atribuído a dois fatores principais decorrentes do aumento da rotação: (1) a maior turbulência gerada no meio líquido promove uma dispersão mais eficiente das bolhas de ar, aumentando a área interfacial para transferência de massa; e (2) a intensificação do movimento do fluido resulta em uma renovação mais rápida da interface gás-líquido, reduzindo a resistência à transferência de oxigênio.

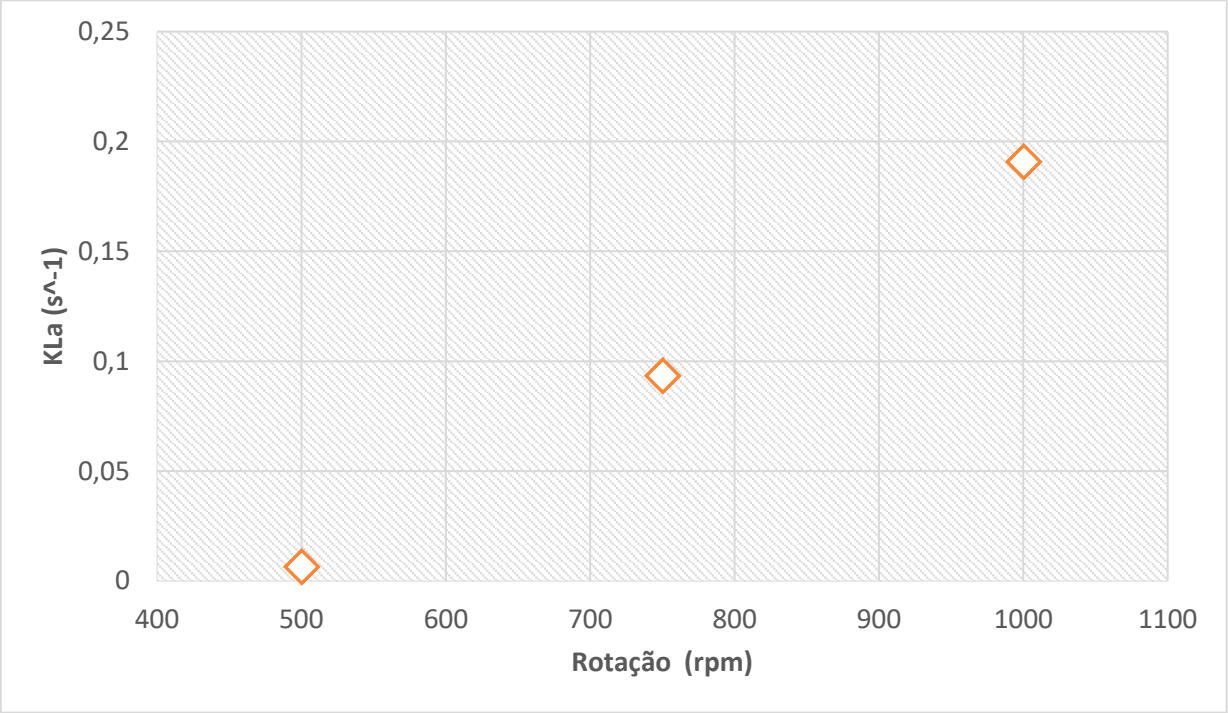
Gráfico 3- Valores de K_La para diferentes rotações: (1) 500 rpm, (2) 750 rpm, (3) 1000 rpm e (4) comparações das rotações para uma mesma vazão de 2 L/min.



Fonte: AUTOR (2025)

Esse comportamento é melhor observado no Gráfico 4, que evidencia a relação direta entre o coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio e a rotação do agitador em um reator STR.

Gráfico 4 - Relação do $K_L a$ com a rotação em um reator STR

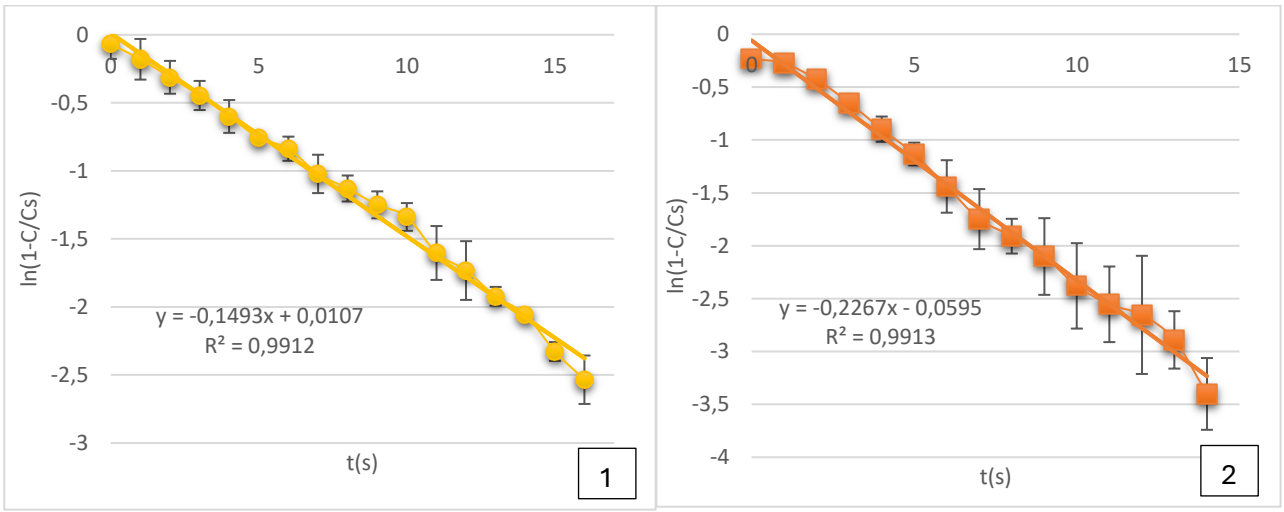


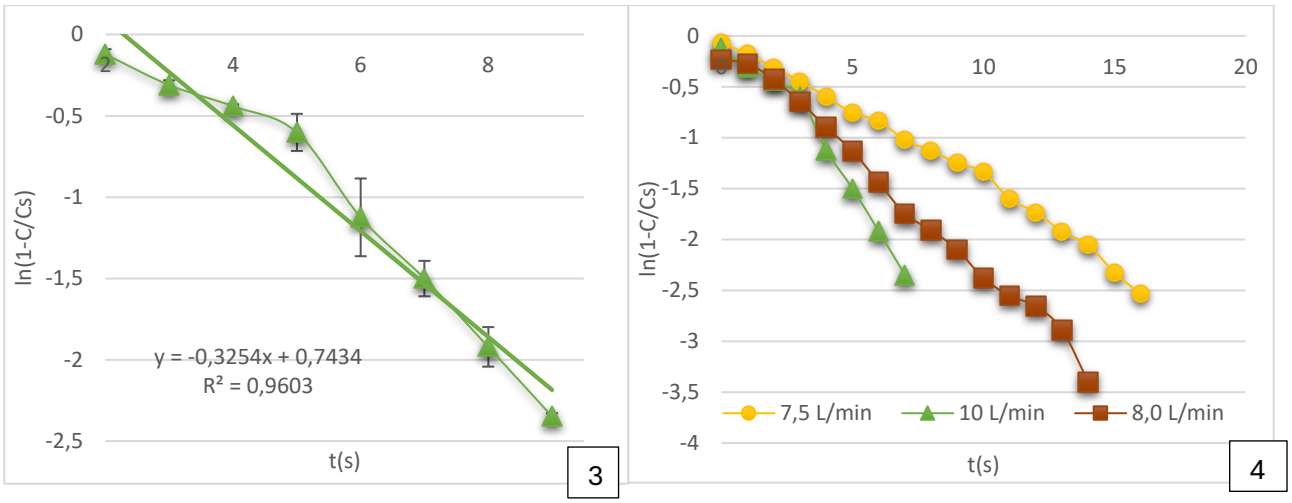
Fonte: AUTOR (2025)

4.2.2 Variação da vazão

O mesmo estudo da variação do $k_L a$ foi realizado mantendo uma rotação de 500 rpm e variando a vazão de oxigênio de 7,5, 8,0 e 10L/min, os resultados obtidos estão representados no gráfico 5.

Gráfico 5 - Valores de $K_L a$ para diferentes vazões: (1) 7,5 L/min, (2) 8,0 L/min, (3) 10,0 L/min e (4) comparações das rotações para uma mesma rotação de 500 rpm.



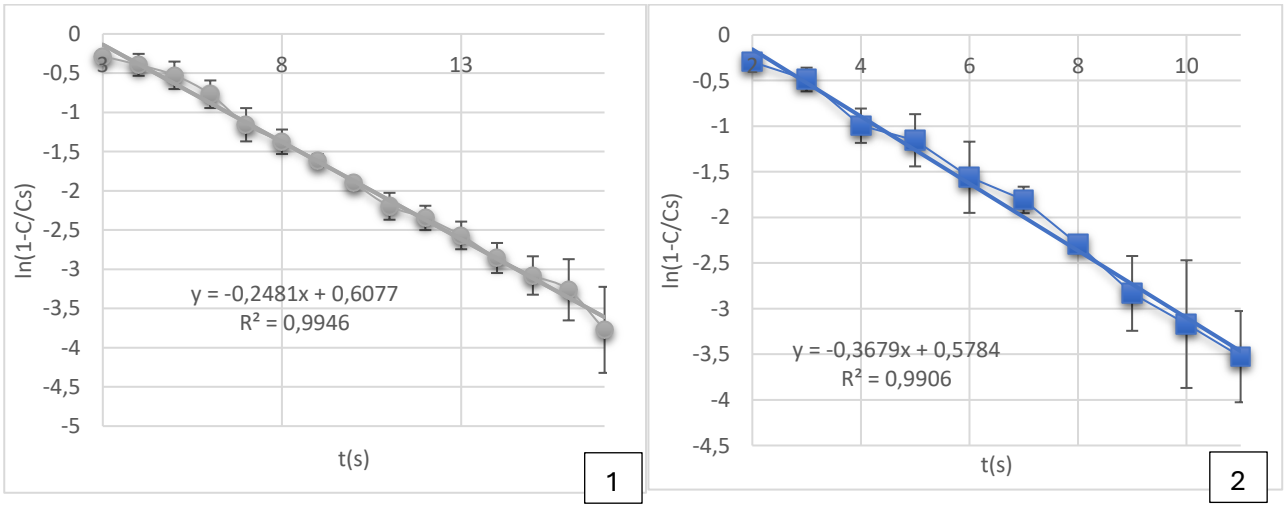


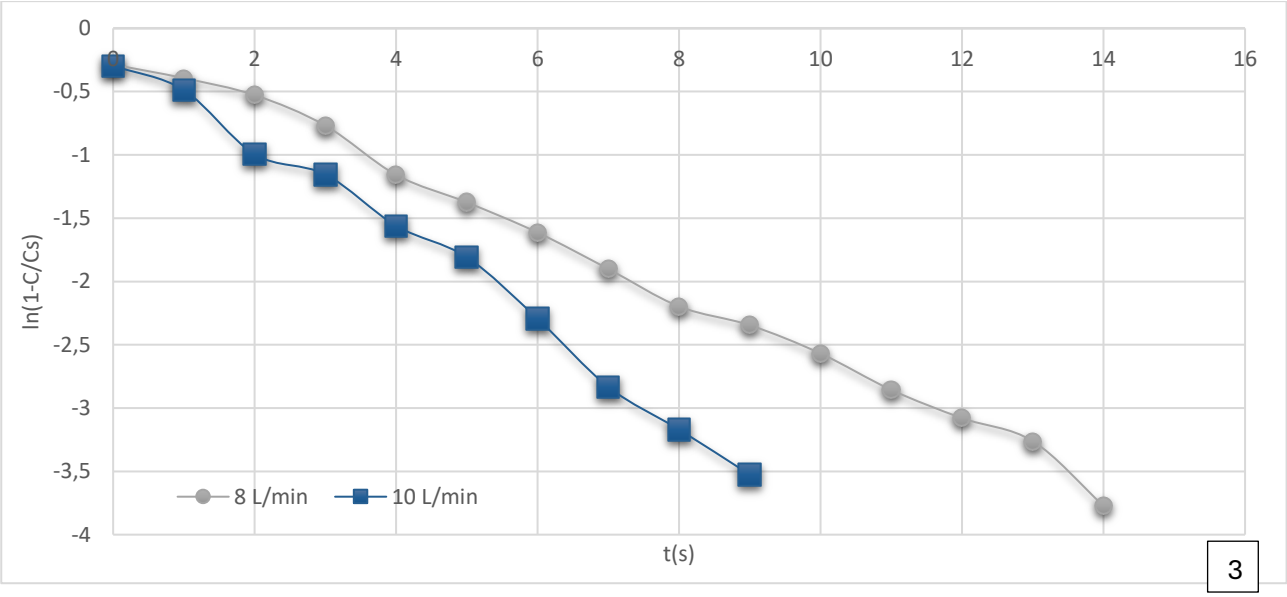
Fonte: AUTOR (2025)

Nota-se que para uma menor vazão de 7,5 L/min o k_La é 0,15 s^{-1}, de modo análogo, as vazões de 8 e 10L/min forneceram valores de k_La de 0,2267 e 0,35 respectivamente. O gráfico 5-(4) demonstra visualmente a relação fundamental entre a inclinação da reta e o valor do coeficiente de transferência de oxigênio (k_La), conforme estabelecido pela equação dinâmica [10]. Retas mais inclinadas representam maiores valores de k_La, indicando uma maior taxa de transferência de oxigênio. Isso corresponde a sistemas com maior turbulência, melhor dispersão de bolhas e uma renovação mais eficiente da interface gás-líquido. Esses fatores contribuem para o aumento da área de contato entre as fases e para a intensificação do transporte de oxigênio do gás para o líquido

Foi realizado o mesmo para a rotação de 1000 rpm como mostra o Gráfico 6, dando um k_La de 0,2481s^{-1} para uma vazão de 8 L/min e 0,368 s^{-1} para uma vazão de 10L/min. Esses resultados representam aumentos de aproximadamente 9,4% e 5,1%, respectivamente, em relação aos valores obtidos a 500 rpm, indicando um incremento discreto, porém consistente, na taxa de transferência de oxigênio com o aumento da agitação.

Gráfico 6 - Valores de K_La para diferentes vazões: (1) 8,0 L/min, (2) 10 L/min, (3) comparações das rotações para uma mesma rotação de 1000 rpm.

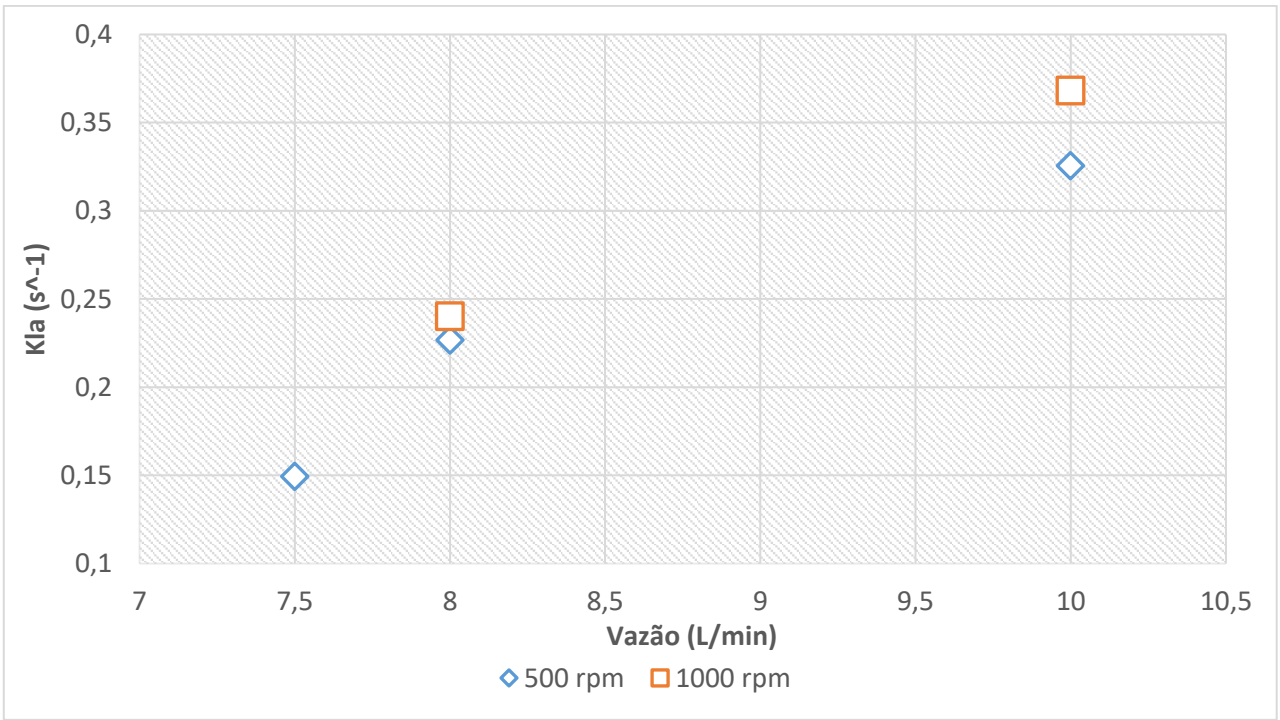




Fonte: AUTOR (2025)

Corroborando o fato de que maiores frequências de agitação e de vazões levam a maiores valores de k_La. Essa tendência fica evidente no Gráfico 7, onde observa-se um aumento expressivo do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio conforme a vazão e a rotação do agitador se elevam. Esse comportamento pode ser atribuído ao aumento da área de contato entre as fases gasosa e líquida, um fator amplamente reconhecido na literatura como crucial para a melhoria da transferência de massa em sistemas aeróbios, em especial para otimização de bioprocessos e projetos de biorreatores.

Gráfico 7 - Comportamento do k_La em diferentes frequências de agitação e vazão de alimentação



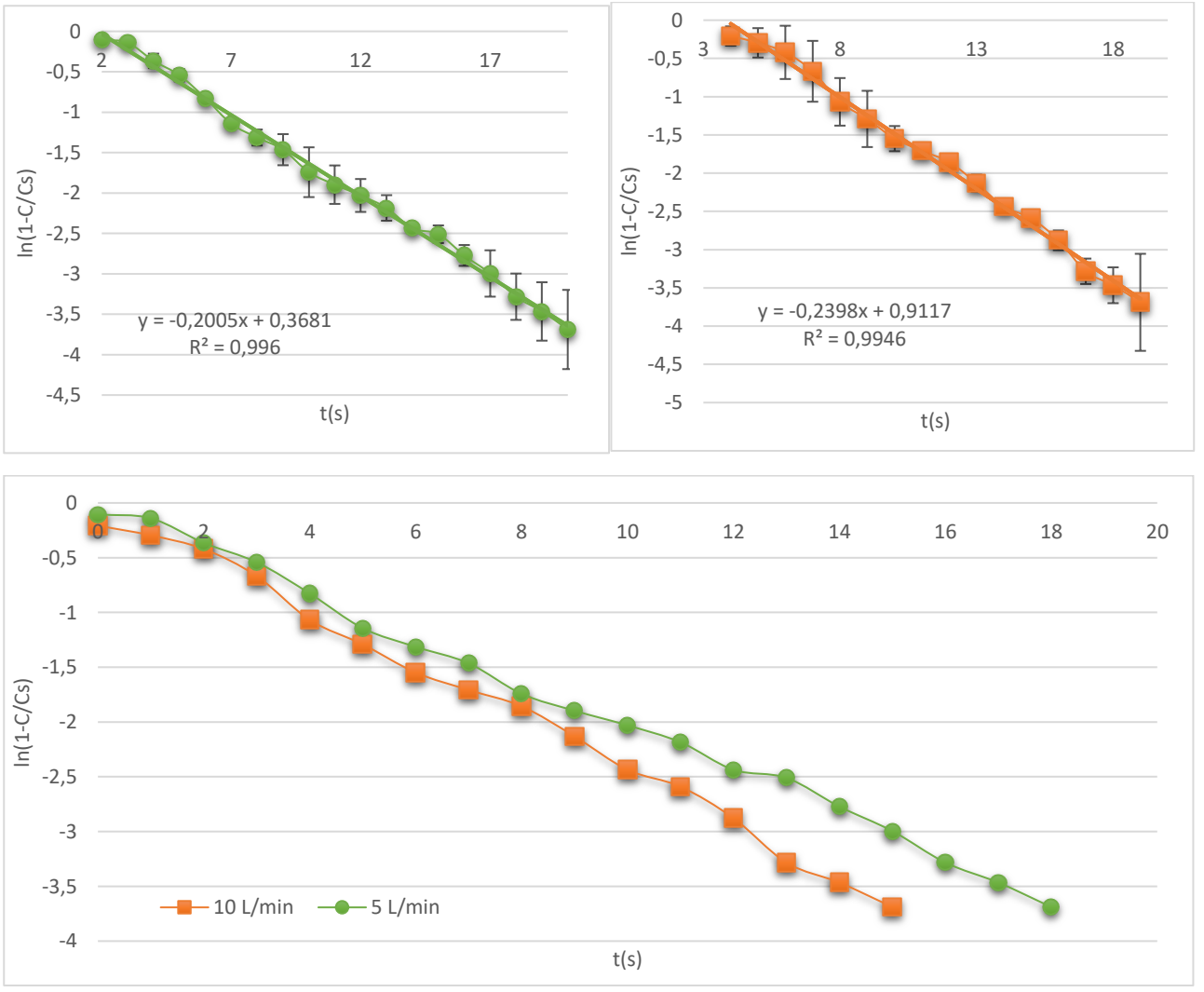
Fonte: AUTOR (2025)

4.3 Reator tipo coluna de bolhas

Após a análise do reator STR, os experimentos foram conduzidos em um reator de coluna de bolhas para avaliar a transferência de oxigênio em um sistema sem agitação mecânica. Neste arranjo, a aeração ocorre exclusivamente pela injeção de ar comprimido na base da coluna, formando bolhas que ascendem pelo meio líquido, promovendo a transferência de massa.

Os resultados confirmaram a dependência direta do coeficiente K_La em relação à vazão de aeração, conforme era esperado teoricamente. Observou-se que o aumento da vazão de alimentação de ar de 8 L/min para 10 L/min resultou em uma elevação do K_La, com valores passando de 0,20 s^{-1} para 0,24 s^{-1}, respectivamente. Este comportamento está relacionado ao maior fluxo de bolhas no sistema, que proporciona maior área interfacial para a transferência de oxigênio e melhor renovação da fase líquida na interface gás-líquido.

Gráfico 8 - Valores de K_La para diferentes vazões: (1) 5,0 L/min, (2) 10 L/min, (3) comparações das vazões para um reator de coluna de bolhas



Fonte: AUTOR (2025)

Os resultados demonstraram que, para uma mesma vazão de ar (ex.: 10L/min), o reator STR apresentou valores de K_La 53,3% maior que o da coluna de bolhas. Essa diferença – como observado nos valores de K_La de 0,368 s^{-1} (STR a 1000 rpm) contra 0,24 s^{-1} (coluna de bolhas) – evidencia o papel crítico da agitação mecânica na transferência de oxigênio. Enquanto na coluna de bolhas a transferência de massa ocorre principalmente pelo movimento ascendente das bolhas, no STR, o agitador promove:

- Maior turbulência, quebrando bolhas em menores diâmetros e aumentando a área interfacial (a).
- Melhor renovação da interface gás-líquido, reduzindo a resistência à transferência de massa.
- Homogeneização do meio, evitando gradientes de concentração.

Esses fatores explicam a maior eficiência do STR em processos que demandam altas taxas de oxigenação, como processos aeróbicos em geral. Contudo, a coluna de bolhas ainda é vantajosa para sistemas com baixa demanda energética ou fluidos sensíveis ao cisalhamento mecânico.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho desenvolveu uma metodologia experimental para determinação do coeficiente de transferência de oxigênio (K_La) em dois tipos de reator: STR e CB. Através do método dinâmico, foi possível estabelecer uma metodologia confiável e reprodutível para avaliação da transferência de massa oxigênio-líquido em sistemas aerados. Selecionou- se o STR como sistema principal para o roteiro experimental a ser implementado na disciplina de laboratório de fenômenos de transporte do curso de Engenharia Química da UFMS pelo fato de possuir uma operação mais acessível e resultados com maior eficácia.

O STR apresentou uma sensibilidade significativamente maior dos resultados quando comparado à coluna de bolhas. Enquanto no tanque agitado obteve-se valores de K_La variando de 0,0063 a 0,368 s^{-1}, a coluna de bolhas mostrou uma faixa muito mais restrita, entre 0,20 e 0,24 s^{-1}. Esta maior variação no STR permite um estudo mais abrangente dos fenômenos de transferência de massa.

As conclusões deste trabalho possuem relevância tanto acadêmica quanto para setor industrial, em especial para área de bioprocessos. O roteiro desenvolvido pode ser aplicado como ferramenta didática tanto, em disciplinas da Engenharia em geral quanto em disciplinas específicas da área de bioprocessos, além de servir como base para escalonamento em sistemas de aeração. Os resultados obtidos fornecem dados (parâmetros) importantes para o dimensionamento e operação de reatores aeróbios.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se a investigação de outros tipos de impelidores e reatores, o estudo de fluidos com diferentes viscosidades e a avaliação de sistemas em maior escala. A comparação direta com outros métodos de determinação de K_La também seria interessante para ampliar a confiabilidade dos resultados.

6. REFERÊNCIAS

BAILEY, J. E.; OLLIS, D. F. *Biochemical engineering fundamentals*. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.

CERRI, M. O. *Avaliação de transferência de calor e massa em biorreator Airlift de bancada para a produção de ácido clavulânico*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4165. Acesso em: 13 fev. 2025.

CERRI, M. O. *Hidrodinâmica e transferência de oxigênio em três biorreatores airlift de circulação interna geometricamente semelhantes*. 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2009.

CERRI, M. O.; RIBEIRO, R. M. M. G. P.; RIBEIRO, M. P. A.; ESPERANÇA, M.; BADINO JUNIOR, A. C. Determinação do coeficiente volumétrico de oxigênio em biorreatores aerados e agitados com independência da sensibilidade do eletrodo. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"; Universidade Federal de São Carlos, 2016. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/309311346. Acesso em: 13 maio 2025.

CHISTI, M. Y. *Air-lift bioreactors*. New York: Elsevier, 1989.

COOPER, C. M.; FERNSTROM, G. A.; MILLER, S. A. Performance of agitated gas-liquid contactors. *Industrial & Engineering Chemistry*, v. 36, n. 6, p. 504-509, 1944.

DANCKWERTS, P. V.; GILLHAM, A. J. The absorption of carbon dioxide into buffered solutions of carbonic anhydrase. *Transactions of the Faraday Society*, v. 62, p. 569-578, 1966.

DORAN, P. M. *Bioprocess engineering principles*. 2. ed. London: Academic Press, 2013.

DUETZ, W. A.; VAN BEILEN, J. B.; WITHOLT, B. Oxygen transfer by orbital shaking of square-shaped and conventional round shake flasks. *Applied and Environmental Microbiology*, v. 66, n. 6, p. 2641-2642, 2000.

ESPERANÇA, M. N. *Influência de aspectos geométricos na hidrodinâmica e transferência de oxigênio de biorreatores Airlift de circulação interna*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014.

GARCIA-OCHOA, F.; GOMEZ, E. Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*, v. 27, n. 2, p. 153-176, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006. Acesso em: 15 abr. 2025.

GOURICH, B. et al. Influence of hydrodynamics and probe response on oxygen mass transfer measurements in a high aspect ratio bubble column reactor. *Biochemical Engineering Journal*, v. 39, n. 1, p. 1-14, 2008. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.bej.2007.08.011. Acesso em: 15 abr. 2025.

HANXU, C. et al. Emerging microfluidics for bioreactor. *Materials Today*, abr. 2025. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mattod.2025.03.009. Acesso em: 15 abr. 2025.

LIU, S. Bioreactor design and operation. In: LIU, S. *Bioprocess engineering: kinetics, sustainability, and reactor design*. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2020. cap. 18, p. 819-856.

LIU, Y. S.; WU, J. Y.; HO, K. P. Characterization of oxygen transfer conditions and their effects on *Phaffia rhodozyma* growth and carotenoid production in shake-flask cultures. *Biochemical Engineering Journal*, v. 27, n. 3, p. 331-335, 2006. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.bej.2005.08.031. Acesso em: 15 abr. 2025.

LORENZINI, G. C. *Estudo da transferência de oxigênio em cultivo de Bacillus megaterium*. 2012. Trabalho de Diplomação (Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

MESTRE, J. C. et al. Determinação do coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio em biorreator pneumático durante cultivos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA QUÍMICA, XXII, 2018, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: Blucher, 2018. Disponível em: https://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/29305. Acesso em: 11 fev. 2025.

MERCHUK, J. C. Why use air-lift bioreactors?. *Trends in Biotechnology*, v. 8, p. 66-71, 1990. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0167-7799(90)90138-N. Acesso em: 28 abr. 2025.

MERCHUK, J. C.; YONA, S.; SIEGEL, M. H.; ZVI, A. B. On the first-order approximation to the response of dissolved oxygen electrodes for dynamic KLa estimation. *Biotechnology and*

Bioengineering, v. 35, n. 11, p. 1161–1163, 1990. Disponível em: https://doi.org/10.1002/bit.260351113. Acesso em: 22 maio 2025.

ONKEN, U.; SICK, R.; WEILAND, P. Determination of gas–liquid mass transfer by oxidation of hydrazine. *Chemical Engineering Science*, v. 40, p. 1990-1993, 1985.

ONKEN, U.; WEILAND, P. Airlift fermenters: construction, behavior, and uses. *Advances in Biotechnological Processes*, p. 67-95, 1983.

ORTIZ-OCHOA, K. C.; GARCIA-OCHOA, F.; GOMEZ, E. Oxygen mass transfer in bioreactors using catechol as a model system. *Chemical Engineering Journal*, v. 112, p. 113-121, 2005.

PEDERSEN, A. G.; NIELSEN, J.; HANSEN, K. Oxygen transfer in fermentation systems using radioactive isotopes. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 43, p. 145-153, 1994.

PUTHLI, M. S.; RATHOD, V. K.; PANDIT, A. B. Estudos de transferência de massa gás-líquido com sistema de impulsor triplo em biorreator em escala laboratorial. *Biochemical Engineering Journal*, v. 23, 2005.

RUCHTI, G.; DUNN, I. J.; BOURNE, J. R.; VON STOCKAR, U. Practical guidelines for the determination of oxygen transfer coefficients (KLa) with the sulfite oxidation method. *The Chemical Engineering Journal*, v. 30, n. 1, p. 29-38, 1985. Disponível em: https://doi.org/10.1016/0300-9467(85)80004-6. Acesso em: 15 abr. 2025.

SCHÜGERL, K. *Bioreaction engineering: characteristic features of bioreactors*. v. 2. Chichester: John Wiley & Sons, 1987.

SUNDARAMURTHY, S.; SRIVASTAVA, V. C.; MISHRA, I. Techniques for oxygen transfer measurement in bioreactors: a review. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 84, n. 8, p. 1091-1103, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1002/jctb.2154. Acesso em: 15 abr. 2025.

TAGUCHI, H.; HUMPHREY, A. E. Dynamic measurement of oxygen transfer coefficients in fermentation systems. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 8, n. 2, p. 127-143, 1966.

VAN'T RIET, K. Review of measuring methods and results in nonviscous gas-liquid mass transfer in stirred vessels. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*, v. 18, n. 3, p. 357-364, 1979. Disponível em: https://doi.org/10.1021/i260071a001. Acesso em: 15 abr. 2025.

WANG, N. S.; SMITH, J. M.; BONEM, M. Gas-liquid mass transfer in agitated vessels. *AIChE Journal*, v. 25, n. 2, p. 252-260, 1979.

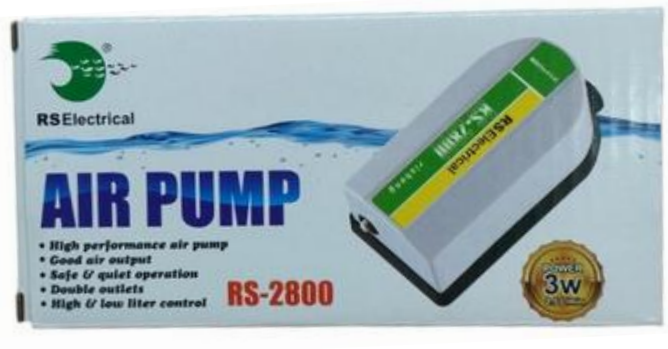
ZHU, Y.; BANDOPADHAYAY, P. C.; WU, J. Medição da transferência de massa gás-líquido em um recipiente agitado — uma comparação entre diferentes impulsores. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v. 34, 2001.

ANEXO A - ESPECIFICAÇÕES DO COMPRESSOR

- Equipamento: compressor de ar para aquário
- Marca: BOYU
- Modelo: FPX-5
- Tensão: 220V
- Potência: 3W
- Vazão: 2,0 L/min

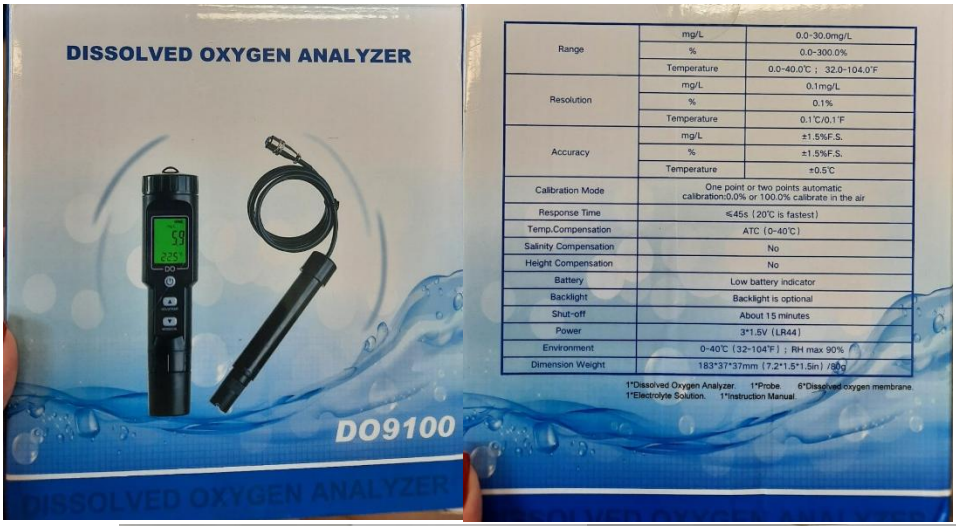
ANEXO B - ESPECIFICAÇÕES DO COMPRESSOR

- Equipamento: bomba de ar elétrica (air pump)
- Marca: RS Electrical
- Modelo: RS-2800
- Potência: 3W



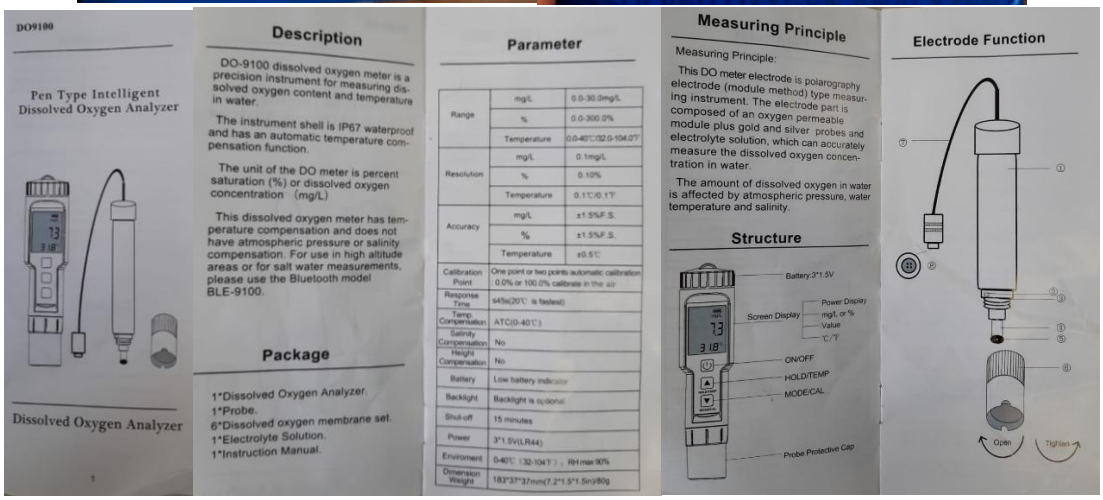
ANEXO C - ESPECIFICAÇÕES DO ANALISADOR DE OXIGENIO DISSOLVIDO

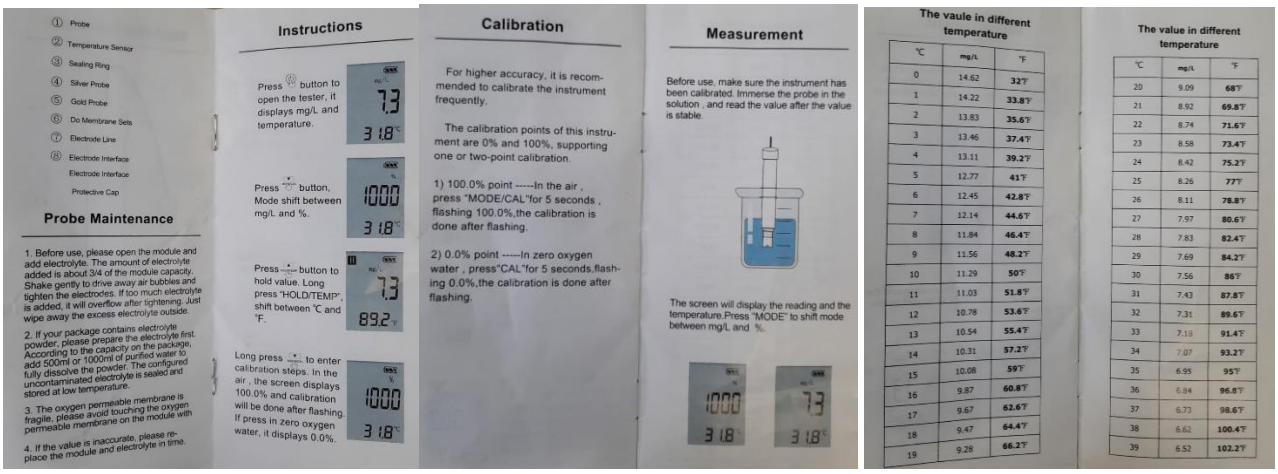
- Equipamento: medidor de oxigênio dissolvido portátil
- Marca: YIERYI (ou genérico)
- Modelo: DO9100
- Faixa de medição: 0,00 a 20,00 mg/L
- Display: LCD digital



Range	mg/L	0.0-30.0mg/L
	%	0.0-300.0%
	Temperature	0.0-40.0℃ ; 32.0-104.0℉
Resolution	mg/L	0.1mg/L
	%	0.1%
	Temperature	0.1℃/0.1℉
Accuracy	mg/L	±1.5%F.S.
	%	±1.5%F.S.
	Temperature	±0.5℃
Calibration Mode	One point or two points automatic calibration:0.0% or 100.0% calibrate in the air	
Response Time	≤45s (20℃ is fastest)	
Temp.Compensation	ATC (0-40℃)	
Salinity Compensation	No	
Height Compensation	No	
Battery	Low battery indicator	
Backlight	Backlight is optional	
Shut-off	About 15 minutes	
Power	3*1.5V (LR44)	
Environment	0-40℃ (32-104℉) ; RH max 90%	
Dimension Weight	183*37*37mm (7.2*1.5*1.5in) /80g	

1*Dissolved Oxygen Analyzer. 1*Probe. 6*Dissolved oxygen membrane.
1*Electrolyte Solution. 1*Instruction Manual.





℃	mg/L	℉
0	14.62	32℉
1	14.22	33.8℉
2	13.83	35.6℉
3	13.46	37.4℉
4	13.11	39.2℉
5	12.77	41℉
6	12.45	42.8℉
7	12.14	44.6℉
8	11.84	46.4℉
9	11.56	48.2℉
10	11.29	50℉
11	11.03	51.8℉
12	10.78	53.6℉
13	10.54	55.4℉
14	10.31	57.2℉
15	10.08	59℉
16	9.87	60.8℉
17	9.67	62.6℉
18	9.47	64.4℉
19	9.28	66.2℉

℃	mg/L	℉
20	9.09	68℉
21	8.92	69.8℉
22	8.74	71.6℉
23	8.58	73.4℉
24	8.42	75.2℉
25	8.26	77℉
26	8.11	78.8℉
27	7.97	80.6℉
28	7.83	82.4℉
29	7.69	84.2℉
30	7.56	86℉
31	7.43	87.8℉
32	7.31	89.6℉
33	7.18	91.4℉
34	7.07	93.2℉
35	6.95	95℉
36	6.84	96.8℉
37	6.73	98.6℉
38	6.62	100.4℉
39	6.52	102.2℉

ANEXO D - ESPECIFIÇÃO DA CORTINA DE AR

- Equipamento: cortina de ar com microfuros
- Marca: BOYU
- Modelo ou código: 45 cm – cód. 068258
- Material: borracha porosa com conector plástico

CORTINA DE AR COM MICRO FUROS
PARA AQUÁRIOS BOYU - 45CM

COD: 058258

Características Gerais: Cortina de ar com micro furos para aquários. **Contém:** 01 Cortina de Ar.; **Composição:** Plástico e borracha. **Uso:** Não se destina à utilização por pessoas (inclusive crianças) com capacidades físicas, sensoriais ou mentais reduzidas, ou por pessoas com falta de experiência e conhecimento, a menos que tenham recebido instruções referentes à sua utilização ou estejam sob a supervisão de uma pessoa responsável pela sua segurança. Recomenda-se que as crianças sejam vigiadas para assegurar que elas não estejam brincando com o aparelho. Instruções de uso no interior da embalagem. Avisos: Perigo de asfixia. Peças pequenas. Não indicado para crianças menores que 3 anos. Não utilizar o equipamento avariado

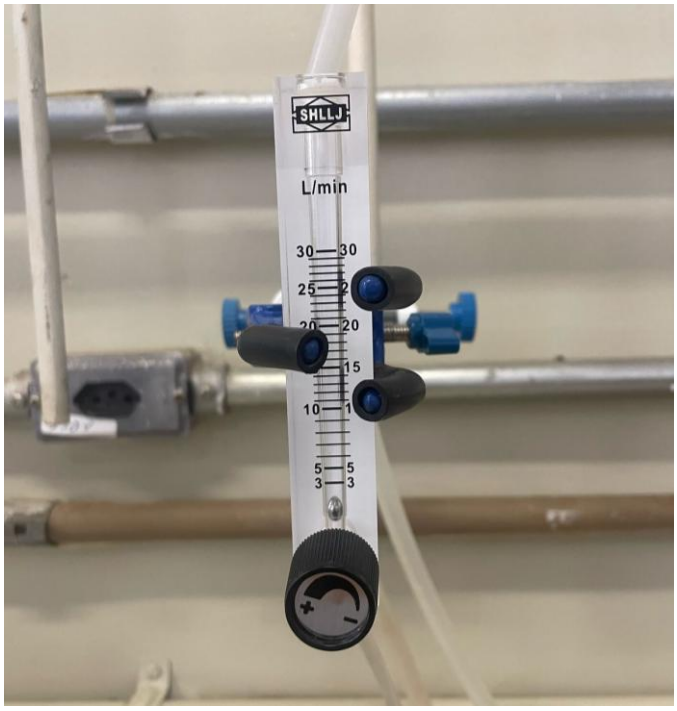
7 899011074 36

Importador: Onda Imp. Exp. Ltda - 00.014.015/0001-09
Garantia limitada contra defeitos de fabricação: 3 meses
Origem: China **Validade** indeterminada
SAC sac@grupoonda.com.br | www.grupoonda.com.br

ANEXO E – RÔTAMETRO

- Equipamento: medidor de vazão tipo rotâmetro
- Marca: ASHATA
- Modelo: ASHATAnabv9wyo2k

- Faixa de vazão: 3–30 L/min
- Material: corpo em acrílico transparente com válvula de controle



ANEXO F– ROTEIRO EXPERIMENTAL

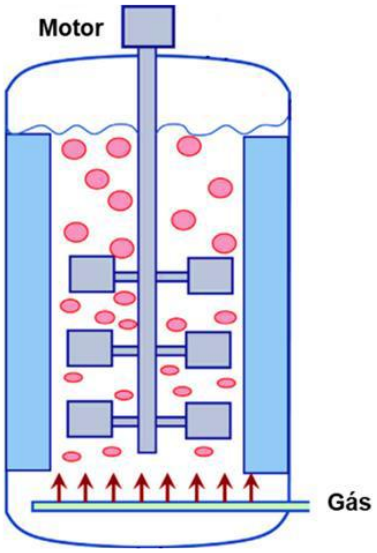
UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO-GROSSO DO SUL
ENGENHARIA QUÍMICA
LABORATÓRIA DE FENOMENOS DE TRANSPORTE I
ROTEIRO DE AULA EXPERIMENTAL

DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO k_La

1. INTRODUÇÃO

O Reator Tanque Agitado (STR – Stirred Tank Reactor), representado pela figura abaixo, é um dos sistemas mais utilizados em processos químicos e biotecnológicos devido à sua versatilidade e eficiência na homogeneização de fases. Neste tipo de reator, um agitador mecânico promove a mistura do conteúdo, enquanto a aeração é fornecida por meio de injetores de gás, como cortinas de ar ou spargers. O STR é amplamente empregado em fermentações, produção de biofármacos e tratamento de efluentes, onde a transferência de oxigênio entre as fases gasosa e líquida é crítica para o sucesso do processo.

Figura 1 – Reator STR



Fonte: adaptado LUI ,2020

O coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio **(k_La)** é o parâmetro que quantifica a eficiência da transferência de massa entre as fases gasosa e líquida. Ele combina dois fatores essenciais: o coeficiente de transferência de massa individual (k_L), que depende das propriedades

físico-químicas do sistema, e a área interfacial específica de transferência (a), diretamente influenciada pelo projeto do reator e pelas condições operacionais como agitação e aeração.

No contexto do STR, onde a mistura mecânica e a injeção de ar são fundamentais, o $k_L a$ se torna um indicador crítico da capacidade do sistema em promover a oxigenação do meio, sendo decisivo para o desempenho de processos biotecnológicos aeróbios. Sua determinação experimental permite avaliar como variações na operação do reator afetam a transferência de oxigênio, fornecendo bases para otimização de processos.

A transferência de massa de oxigênio do ar para o meio líquido é descrita pela equação:

$$\frac{dC}{dt} = k_L a * (C_s - C) \quad [1]$$

Onde:

- a: área interfacial de troca de massa (m^{-1});
- k_L: coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio (s^{-1});
- C_s: concentração do oxigênio dissolvido na fase líquida em equilíbrio com a pressão parcial de oxigênio da fase gasosa ($mol.\, m^{-3}$);
- C: concentração do oxigênio na fase líquida ($mol.\, m^{-3}$).

O método dinâmico (Dynamic Gassing-out) é uma técnica amplamente utilizada para determinar o coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio ($k_L a$) em sistemas aerados. O procedimento consiste em duas etapas principais: dessorção (remoção do oxigênio dissolvido por meio da injeção de nitrogênio) e ressorção (reoxigenação do líquido com ar comprimido). Durante a fase de aeração, a concentração de oxigênio dissolvido é monitorada em função do tempo, permitindo calcular o $k_L a$ por meio de uma linearização dos dados, conforme a equação

$$\ln\left(1 - \frac{C}{C_s}\right) = -k_L a * t \quad [1]$$

Onde o coeficiente angular é o $k_L a$

Este método é vantajoso por sua simplicidade experimental e por fornecer resultados confiáveis em condições operacionais variadas, sendo ideal para estudos em reatores STR e colunas de bolhas.

2. OBJETIVOS

Determinar o coeficiente volumétrico de transferência de oxigênio ($k_L a$) em um reator do tipo Tanque Agitado (STR – Stirred Tank Reactor), avaliando a influência da agitação e da vazão de ar na eficiência da transferência de massa.

3. PARTE EXPEMENTAL

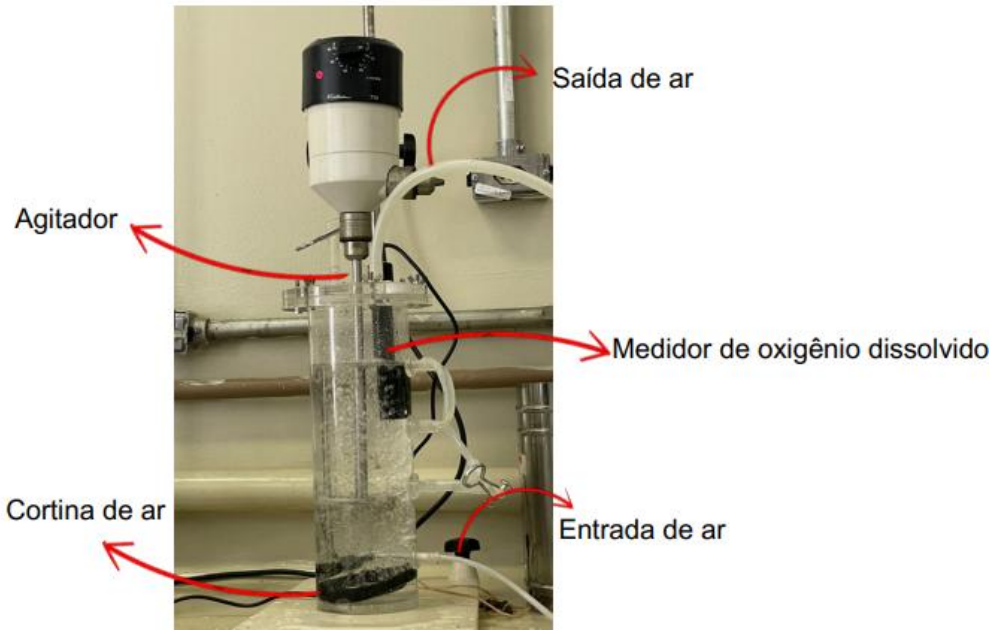
3.1 MATERIAS E REAGENTES

Os materiais utilizados para a montagem do experimento incluem:

- Reator cilíndrico transparente
- Agitador mecânico com controle de rotação
- Sensor de oxigênio dissolvido, que também mede a temperatura.
- Entrada de gás com controle de vazão
- Rotâmetro para medição da vazão de ar
- Cortina de ar com microfuros para aquário, utilizada para a entrada de ar
- Nitrogênio comprimido
- Compressor de ar

3.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Após a montagem do sistema, este deve ser semelhante a Figura 2.



Fonte: AUTOR ,2025

Etapa 1: Remoção do Oxigênio Dissolvido

1. **Preparação do sistema**:
    - Certifique-se de que o reator STR esteja limpo e vedado e que o sensor de oxigênio dissolvido esteja devidamente encaixado no reator, garantindo que não haja contato com o ambiente externo (vede com fita isolante novamente, se necessário).
2. **Injeção de nitrogênio**:
    - Conecte o cilindro de nitrogênio comprimido à cortina de ar no fundo do reator.

- Abra o fluxo de nitrogênio e monitore a concentração de oxigênio dissolvido no sensor.
- Mantenha a injeção até que a concentração de O_2 atinja ≈ 0 mg/L (cerca de 150 segundos).

Etapa 2: Aeração e Agitação

1. **Configuração da agitação**:
   - Ajuste o agitador mecânico para a rotação desejada (ex.: 500 rpm).
2. **Injeção de ar**:
   - Desligue o nitrogênio e conecte o compressor de ar ao rotâmetro.
   - Regule a vazão de ar (ex.: 2,0 L/min) e inicie a injeção.
3. **Monitoramento**:
   - Registre a concentração de oxigênio dissolvido e o tempo a cada intervalo (ex.: 1 segundos) até atingir a saturação.
   - Utilize um cronômetro e anote os valores diretamente do sensor ou grave em vídeo para análise posterior.

Etapa 3: Variação de Parâmetros

1. **Para diferentes rotações**:
   - Repita o procedimento (Etapas 1 e 2) para rotações de 750 rpm e 1000 rpm, mantendo a vazão de ar constante (ex.: 2,0 L/min).
2. **Para diferentes vazões**:
   - Fixe a rotação (ex.: 500 rpm) e varie a vazão de ar (5,0 L/min, 7,5 L/min, 10,0 L/min), repetindo o monitoramento.

Etapa 4: Análise dos Dados

1. **Gráficos**:
   - Plote a concentração de oxigênio dissolvido (C) em função do tempo (t) para cada condição.
   - Determine o coeficiente k_La a partir da inclinação da curva na fase de aeração (método dinâmico), conforme a equação 2
2. **Comparação**:

- Relacione os valores de k_La com as rotações e vazões testadas.

---

3. Observações

- **Controle de variáveis**: Mantenha a temperatura constante durante os experimentos.
- **Reprodutibilidade**: Execute cada condição em triplicata para garantir precisão.
- **Segurança**: Utilize equipamentos de proteção individual (EPIs) ao manusear gases comprimidos.

---

4. Resultados Esperados

- Maiores rotações e vazões devem resultar em valores mais elevados de k_La, indicando maior eficiência na transferência de oxigênio.

4. REFERÊNCIA

GARCIA-OCHOA, F.; GOMEZ, E. Bioreactor scale-up and oxygen transfer rate in microbial processes: An overview. *Biotechnology Advances*, v. 27, n. 2, p. 153-176, 2009. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2008.10.006. Acesso em: 15 abr. 2025.

CERRI, M. O. *Avaliação de transferência de calor e massa em biorreator Airlift de bancada para a produção de ácido clavulânico*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Disponível em: https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/4165. Acesso em: 13 fev. 2025.

LIU, S. Bioreactor design and operation. In: LIU, S. *Bioprocess engineering: kinetics, sustainability, and reactor design*. 3. ed. Amsterdam: Elsevier, 2020. cap. 18, p. 819-856.