

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
BACHARELADO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**ALINE GABRIELA ALMEIDA  
PABLO CAGNINI**

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE IMPELIDORES NA TAXA  
DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E TEMPO DE MISTURA EM UM  
BIORREATOR DE BANCADA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PONTA GROSSA  
2021**

**ALINE GABRIELA ALMEIDA**

**PABLO CAGNINI**

**AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE IMPELIDORES NA TAXA  
DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E TEMPO DE MISTURA EM UM  
BIORREATOR DE BANCADA**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado como requisito parcial à  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Química, do Departamento de  
Engenharia Química, da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Bittencourt  
Sydney

Co-orientador: Ingrid Fernanda Silvano  
Pacheco Correia Furtado

**PONTA GROSSA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

### AVALIAÇÃO DE DIFERENTES TIPOS DE IMPELIDORES NA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR E TEMPO DE MISTURA EM UM BIORREATOR DE BANCADA

por

Aline Gabriela Almeida

Pablo Cagnini

Monografia apresentada no dia 20 de agosto de 2021 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. Os candidatos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dra. Erica Roberta Lovo Da Rocha Watanabe  
(UTFPR)

---

Prof. Ms. Jose Mauro Giroto  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Eduardo Bittencourt Sydney  
(UTFPR)  
Orientador

---

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins  
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar a Deus, por nossas vidas, e por permitir que nossos objetivos fossem alcançados.

Agradecemos ao nosso orientador Prof. Dr. Eduardo Bittencourt Sydney por ter desempenhado tal função com sabedoria e amizade.

Agradecemos aos familiares e amigos por todo o apoio e pela ajuda, que muito contribuiu para a realização deste trabalho.

Agradecemos a nossa coorientadora Ingrid Fernanda Silvano Pacheco Corrêa furtado pela atenção, tempo e dedicação ao nosso trabalho.

Aos professores, os quais guiaram nosso aprendizado.

Enfim, a todos aqueles que contribuíram, de alguma forma, para a realização deste trabalho.

ALMEIDA, Aline Gabriela; CAGNINI, Pablo. **Avaliação de Diferentes Tipos de Impelidores na Taxa de Transferência de Calor e Tempo de Mistura em um Biorreator de Bancada**. 2021. 28 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2021.

## **RESUMO**

O biorreator tipo tanque agitado é o mais utilizado industrialmente em processos fermentativos catalisados por enzimas ou células vivas. Com o objetivo de determinar a taxa de transferência de calor e o tempo de mistura de diferentes tipos de impelidores de um reator de bancada foi realizado um estudo sobre tanques de agitação mecânica, para posterior apresentação dos cálculos de transferência de calor e tempo de mistura. O qual possibilitou o conhecimento de dados técnicos, promovendo melhorias na eficiência do projeto, diminuição de gastos, otimização do tempo (mistura, estabilização de temperatura e pH) e redução no custo do processo. Em termos globais, os dados obtidos definiram qual o modelo de impelidor é o mais adequado para o bioprocessamento, justificado pelos parâmetros de taxas de transferência de calor e tempo de mistura.

**Palavras-chave:** Biorreator. Impelidor. Transferência de Calor. Tempo de Mistura.

ALMEIDA, Aline Gabriela; CAGNINI, Pablo. **Evaluation of Different Types of Impellers in the Heat Transfer Rate and Mixing Time in a Bench Bioreactor**. 2021. 28 f. Work of Conclusion Course (Graduation in Chemical Engineering) – Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2021.

### **ABSTRACT**

The stirred tank bioreactor is the most used industrially in fermentation processes catalyzed by enzymes or living cells. To determine the heat transfer rate and the mixing time of different types of impellers in a bench reactor, a study was carried out on mechanical agitation tanks, for the later presentation of the heat transfer and mixing time calculations. This knowledge of technical data, promoted improvements in the efficiency of the project, reduction of expenses, optimization of time (mixing, stabilization of temperature and pH), and reduction in the cost of the process. In global terms, the data obtained suggested which impeller model is the most suitable for the bioprocess, justified by the parameters of heat transfer rates and mixing time.

**Keywords:** Bioreactor. Impeller. Heat Transfer. Mixing Time.

## NOMENCLATURAS

$\alpha$  – Alfa

$c_p$  – Calor específico a pressão constante

$d$  – Diâmetro do impulsor

$D$  – Diâmetro do vaso/tanque

$d_o$  – Diâmetro externo do tubo

$d_i$  – Diâmetro interno do tubo

$G_m$  – Velocidade da massa do fluido na direção transversal

$Gz$  – Número de Graetz

$h$  - Coeficiente de transferência de calor

$\kappa$  – Condutividade térmica do fluido

$L$  – Comprimento do tubo

$\mu$  – Viscosidade do líquido

$N$  – Número de revoluções/rotações

$Nu$  – Número de Nusselt

$\rho$  – Densidade do líquido

$Pr$  – Número de Prandtl

$Re$  – Número de Reynolds

$t$  – Temperatura média da água

$v$  – Velocidade média do fluido

$\mathcal{W}$  – Taxa de fluxo de massa do fluido

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reator tipo STR.....	12
Figura 2 – Impelidor tipo Rushtom.....	13
Figura 3 – Impelidor tipo Elefante.....	13
Figura 4 – Impelidor tipo Pá Inclinada.....	14
Figura 5 – Escoamento radial provocado por diferentes impelidores.....	14
Figura 6 – Escoamento axial provocado por diferentes impelidores.....	15
Figura 7 – Correlações para tempo de mistura.....	16
Figura 8 – Tempo de Mistura experimental e teórico para Rotações de 200 rpm.....	22
Figura 9 – Tempo de Mistura experimental e teórico para Rotações de 400 rpm.....	23
Figura 10 – Tempo de Mistura experimental e teórico para Rotações de 600 rpm.....	23
Figura 11 – Velocidade de Agitação x Tempo de Troca Fria (s).....	26
Figura 12 – Velocidade de Agitação x Tempo de Troca Fria (s).....	27
Figura 13 – Troca Térmica.....	30
Figura 14 – Tempo de Mistura para Rotações de 200 rpm.....	38
Figura 15 – Tempo de Mistura para Rotações de 400 rpm.....	40
Figura 16 - Tempo de Mistura para Rotações de 600 rpm.....	41



## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	7
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	9
2.1. OBJETIVO GERAL .....	9
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	9
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	10
3.1 INDÚSTRIA DE BIOTECNOLOGIA .....	10
3.2 BIORREACTORES .....	11
3.3 EFEITO DOS IMPELIDORES NA AGITAÇÃO E TEMPO DE MISTURA .....	15
3.4 EFEITO DOS IMPELIDORES NA TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA .....	16
3.4.1 Determinação de Coeficiente para Fluxo Forçado Através de Tubos (Conduítes) .....	17
3.4.2 Determinação de Coeficiente h para Fluxo Forçado Através de Múltiplos Tubos .....	18
3.4.3 Determinação de Coeficiente h para Troca Térmica Através de Jaquetas e Serpentinhas .....	18
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	20
4.1. MODULO DE CONTROLE BIORREATOR .....	20
4.2. SENSOR pH .....	20
4.3. TERMOSTATO .....	21
4.4. REAGENTES .....	21
4.5. TEMPO DE MISTURA .....	21
4.6. TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR .....	22
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	23
<b>8.REFERÊNCIAS</b> .....	32

## 1. INTRODUÇÃO

Biorreatores são tanques onde há a ocorrência e a transformação de um substrato em produto através de um conjunto de reações de fermentação, esses tanques possuem aplicações em laboratório, plantas pilotos e indústrias, e devem proporcionar ao catalisador biológico as condições apropriadas para seu correto funcionamento. De acordo com Cerri (2009), citado por Ribeiro (2017, p. 13), “A homogeneização e mistura num biorreator é fundamental para o sucesso da fermentação, pois a falta de dissolução de um nutriente pode ser crucial para o crescimento do microrganismo”.

Dentre as várias classes de biorreatores, o agitado mecanicamente, é o mais amplamente utilizado por favorecer a correta distribuição de nutrientes. Os tanques agitados com impelidores são projetos acessíveis e possuem consideráveis coeficientes de transferência de calor e massa, elevada capacidade de mistura e grande variedade de velocidade de agitação (Buffo, 2018).

Diversos tipos de impelidores são utilizados para agitação de misturas de fluídos. A energia cedida ao sistema, ou a potência são características que ligado a alguns fatores como a geometria do vaso, posição e o design dos componentes de agitação são fundamentais para caracterizar o comportamento de um impelidor. Portanto condições de operação envolvidas com a particularidade da mistura são os principais fatores para uma boa eficiência do processo (Battaglini, 1998).

Determinar a taxa de transferência de calor e o tempo de mistura de diferentes tipos de impelidores em um tipo de biorreator resulta em informações essenciais para a otimização de Bioprocessos. Este estudo teve como objetivo comparar o comportamento de diferentes tipos de impelidores de um biorreator de bancada do Laboratório de Fermentações (D003) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa em relação à taxa de transferência de calor e ao tempo de mistura. Para isso foi realizado um estudo detalhado sobre o referido biorreator de agitação mecânica, impelidores, a potência consumida e as propriedades físicas, geométricas e operacionais. A partir disso foram demonstrados os cálculos de transferência de calor e tempo de mistura.

Esta pesquisa visou contribuir para o aumento do conhecimento técnico-científico acerca do efeito de diferentes tipos de impelidores disponíveis para a agitação mecânica de um biorreator de bancada da marca Tecnal (Campinas/Brasil). Desta maneira possibilitará o conhecimento de dados técnicos, promovendo assim melhorias na eficiência do projeto, diminuição de gastos, otimização do tempo (mistura, estabilização de temperatura e pH) e redução no custo do processo.

Os resultados deste trabalho contribuirão não somente às atividades científicas realizadas na UTFPR, mas por usuários desse tipo de reator em todo o país, por serem informações relevantes para outros usuários deste mesmo equipamento. Destaca-se que este trabalho foi desenvolvido em parceria com a referida empresa, que doou os impelidores para realização dos testes.

## 2. OBJETIVOS

### 2.1. OBJETIVO GERAL

Comparar a performance de impelidores com diferentes geometrias em relação à suas capacidades de transferência de calor e o tempo de mistura em um biorreator de bancada.

### 2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estabelecer metodologias para determinar o coeficiente de transferência de calor e tempo de mistura;
- Realizar experimentos utilizando diferentes tipos de impelidores e suas associações em série;
- Realizar os cálculos relacionados à transferência de calor e tempo de mistura;
- Relacionar a geometria dos impelidores com seus possíveis efeitos na agitação e transferência de energia;

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 INDÚSTRIA DE BIOTECNOLOGIA

A biotecnologia vem sendo estudada há muitos anos e a partir da metade do século XX o entendimento sobre os processos biológicos teve um rápido aprofundamento. Desde a antiguidade, a biotecnologia já fazia parte do dia a dia do ser humano, pode-se citar como exemplo a preparação e conservação de alimentos e bebidas por fermentação, cultivo de plantas, domesticação de animais, tratamento de infecções. Outros eventos fundamentais, datados historicamente, da biotecnologia podem ser citados, como em 1951 teve o desenvolvimento da tecnologia de inseminação artificial de gado utilizando sêmen congelado, em 1953 com a proposta do modelo de estrutura do DNA por J.D Watson e F. Crick e em 2006 o grupo de pesquisadores liderados por S. Yamanaka induziram a pluripotencialidade celular em células somáticas (MALAJOVICH, 2011), em 2013 a tecnologia de edição de genes CRISPR (Clusters of Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats) foi criada, e em 2020 com a pandemia de 2019 o desenvolvimento de vacinas em tempo recorde.

Com a migração do homem do campo para a cidade, acarretou na deterioração das condições sanitárias. Com as doenças e a fome assolando a sociedade, o desenvolvimento na indústria teve rápido desenvolvimento, iniciando vários processos para a melhoria e aumento na qualidade de vida. A produção de produtos químicos, enzimas, antibióticos, vitaminas, ácidos orgânicos, solventes e tratamento de resíduos começaram a ser produzidos em processo utilizando biorreatores. As reações, dentro desses equipamentos acontecem na presença de células vivas desde meados de 40 e vem se tornando cada vez mais importante e usado. “Espera-se que, no futuro, vários produtos orgânicos que atualmente são derivados de petróleo passem a ser produzidos por células vivas” (FOGLER, 2009).

Com o aumento da propagação de doenças (como por exemplo a hepatite B e a COVID-19) dentre outros fatores como a deficiência da água, ataques de insetos e acessibilidade restrita de terras agrárias, houve um crescimento na área da biotecnologia, pois essas condições levam os cientistas a participarem de uma ampla gama de pesquisa e levando assim ao rápido desenvolvimento.

## 3.2 BIORREATORES

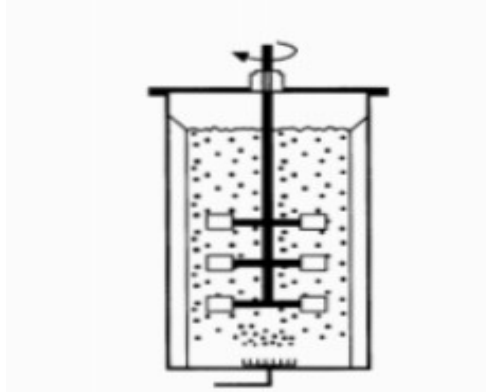
Por definição, os biorreatores são reatores bioquímicos e/ou biológicos que tem por classificação e denominação a ocorrência de uma variedade de reações químicas que são catalisadas por biocatalisadores, podendo esses ser enzimas ou células vivas de microrganismos animais ou vegetais (SCHMIDELL et al., 2001). Industrialmente a maioria dos processos ocorre em fase líquida, em que a agitação é fundamental para o bom funcionamento do processo.

Segundo Schmidell et al. (2001) existem muitos tipos de biorreatores e eles podem pertencer aos seguintes grupos principais:

- Tanques mecanicamente agitados;
- Colunas de bolhas;
- Reatores de loop com bombas ou jatos para circulação forçada de líquido;
- Reatores de leito empacotado;
- Reatores de membrana;
- Microrreatores;

Os tanques de agitação mecânica interna, também chamados de reatores STR e/ou reatores de mistura, são equipamentos empregados em processos de fermentação submersa. Este equipamento, é composto por um tanque cilíndrico ao qual é implementado com chicanas (aletas) conforme indicado na (Figura 1). “O agitador é montado num eixo central ao do fermentador, possuindo ao longo de sua altura, uma série de impelidores, aos quais podem ser de diferentes tipos, sendo a mais utilizada a turbina de pás planas” (SCHMIDELL et al., 2001).

Figura 1: Modelo de reator tipo STR



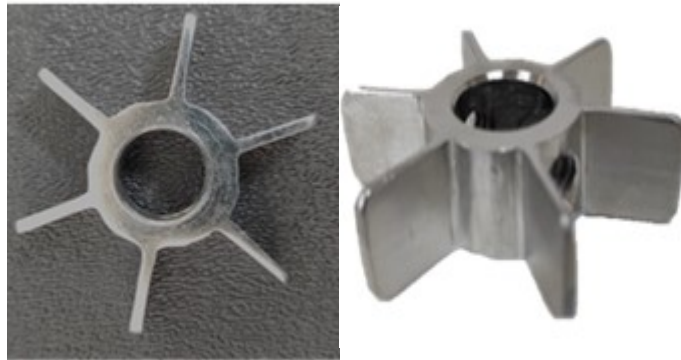
Fonte: SCHMIDELL et al., 2001

O objetivo dos agitadores dentro do tanque é realizar a agitação da mistura mantendo a homogeneização do meio de cultivo, os sólidos em suspensão (biocatalizador), melhorando a transferência de massa entre gás e líquido (transferência de oxigênio), e a adequada transferência de calor para controle de temperatura do cultivo.

A escolha de um impelidor adequado ao processo requer informações precisas sobre as propriedades do fluido, condições do processo e características específicas do mesmo (GHOTLI et al., 2013), uma vez que sua geometria influencia a hidrodinâmica da mistura, o consumo de potência, a transferência de oxigênio, a taxa de transferência de massa e energia, entre outros (TANG et al., 2015).

O meio a ser agitado determinará o tipo de impelidor a ser utilizado. O impelidor mais utilizado em biorreatores convencionais é do tipo turbina composto de 6 a 8 pás planas, conhecido como turbina de Rushton (RT), (Figura 2). Este tipo de impelidor é montado radialmente sobre um disco disposto verticalmente ao longo do eixo de agitação, proporcionando um escoamento radial unidirecional. De acordo com Bustamante (2013), o impelidor turbina Rushton apresenta um diâmetro  $1/3$  do diâmetro do tanque e pode ser utilizado mais de uma pá em um único eixo. Esse tipo de impelidor é escolhido quando se deseja fornecer elevados níveis de turbulência.

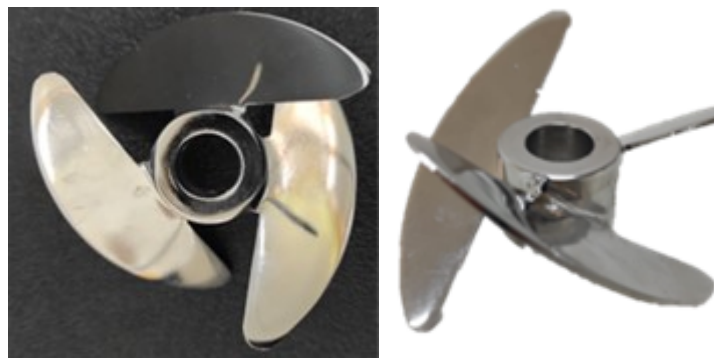
Figura 2: Impelidor tipo Turbina de Rushton



Fonte: Aatoria Própria, 2021

O impelidor Orelha de elefante ou *Elephant Ear – (EE)*, é um impelidor axial, que possui três pás planas de formato triangular e inclinadas por um ângulo de  $45^\circ$ , em alguns casos pode ocorrer variações das quantidades de pás. Devido à geometria, o padrão do escoamento produzido é radial e axial.

Figura 3: Impelidor tipo Orelha de Elefante

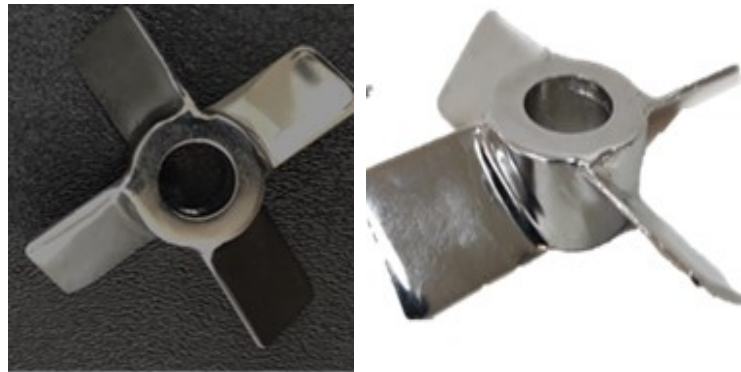


Fonte: Aatoria Própria, 2021

Impelidores tipo pás inclinadas (Figura 5), foram projetadas para inclinar e assim, promover um fluxo axial, maior que o radial. Sendo mais comum a lâmina possuir  $45$  graus, o rotor axial para fluxo radial pode ser acertado para cada processo característico. Esses tipos de impelidores são muito usados em operações de mistura e dispersão, pois é essencial maior potência e turbulência.



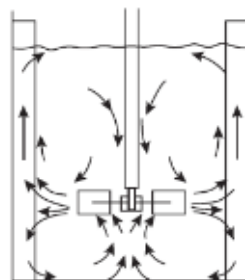
Figura 4: Impelidor tipo Pá Inclinada



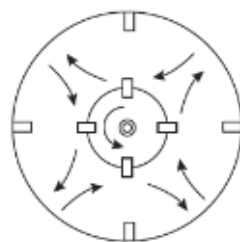
Fonte: Autoria Própria, 2021

Dependendo do tipo de impelidor, o escoamento pode ser radial, axial e tangencial. O escoamento radial é aquele que gera linhas de fluxo perpendicularmente ao eixo do agitador, ou seja, impulsiona a grande massa líquida contra as paredes do tanque, ocorre quando o fluido é impelido radialmente do eixo do impelidor em direção à parede do vaso (Figura 4). Impelidores tipo turbina são empregadas visando este tipo de escoamento.

Figura 5: Linhas de escoamento radial provocado por diferentes impelidores.



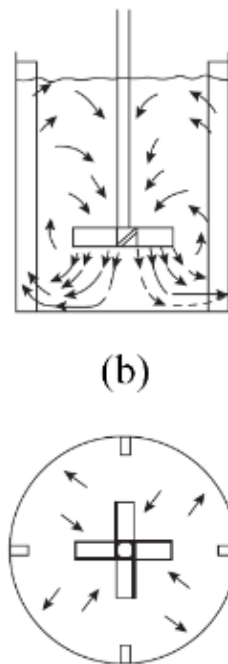
(a)



Fonte: Towler (2008), adaptado

O escoamento axial, portanto, gera linhas de fluxo paralelas ao eixo do agitador, ou seja, impulsiona a grande massa líquida contra o fundo do tanque. Escoamento este, ocasionado geralmente por impelidores tipo hélice naval.

Figura 6: Linhas de escoamento axial provocado por diferentes impelidores



Fonte: Towlre (2008), adaptado

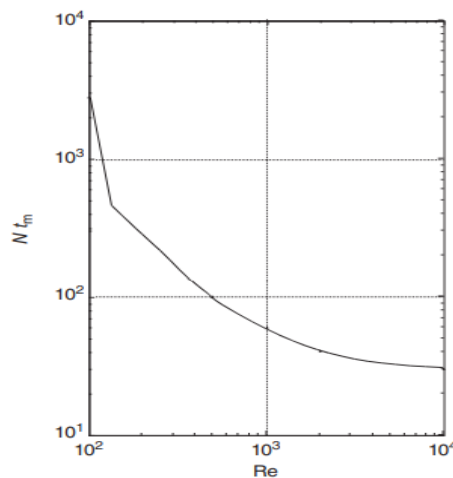
### 3.3 EFEITO DOS IMPELIDORES NA AGITAÇÃO E TEMPO DE MISTURA

O tempo de mistura é o parâmetro que identifica o tempo médio para que o fluido atinja um estado de mistura completo, ou seja, quanto menor o tempo de mistura, mais rápido o fluido atinge a homogeneidade. Esse fator é calculado contando o tempo necessário, para que, a partir da adição de um traçador (como um corante, uma base, um ácido, por exemplo), seja atingida a homogeneidade. O tempo de mistura é dado como o tempo de mistura pela função da grandeza da geometria do tanque e do impelidor, propriedades do fluido, velocidade do impulsor e taxas de aeração.

Algumas Relações estão disponíveis para tempos de mistura em reatores de tanque agitado com vários tipos de agitadores. Uma delas, para a turbina Rushton padrão é mostrado na Figura 2, em que o produto da velocidade do agitador  $N$  ( $s^{-1}$ ) e o máximo do tempo de mistura  $t_m$  (s) é plotado contra o número de Reynolds nas coordenadas log – log. Para  $(Re)$  acima de aproximadamente 5000, o produto  $N t_m$  se aproxima valor constante de 30 (KATOH et al., 2015). A existência de partículas sólidas suspensas no líquido causa um aumento no tempo de mistura do líquido. Para o cálculo do número de  $(Re)$  usa-se a (Equação 1) e (Equação 2):

$$Re = \frac{Nd^2\rho}{\mu} \quad (1)$$

Figura 7: Correlações para tempo de mistura  $Nt_m$  versus número de Reynolds.



Fonte: KATOH et al., 2015

$$tm = \frac{Ntm}{N} \quad (2)$$

### 3.4 EFEITO DOS IMPELIDORES NA TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA

Os coeficientes de transferência de calor podem ser pressupostos por uma variedade de correlações, podendo essas ser empíricas ou semiempíricas. Essas

correspondências para o coeficiente de transferência de calor ( $h$ ), estão prontas para aquecimento ou resfriamento de fluidos em fluxo forçado em vários dispositivos de transferência de calor, ou seja, em convecção sem mudança de fase, condensação de vapores, ebulição de líquidos, e outros casos, como funções de propriedades físicas de fluidos, geometria de dispositivos e condições de operação, como velocidade do fluido (KATOH et al., 2015).

### 3.4.1 Determinação de Coeficiente de troca térmica para Fluxo Forçado Através de Tubos (Conduítes)

Para determinação de  $h$  individual para aquecimento ou resfriamento de fluidos através de tubos circulares sem mudança de fase, em regime de fluxo turbulento, são preestabelecidas como (Equação 3) e (Equação 4), nas quais são avaliadas todas as propriedades do fluido na temperatura média  $T_m$  (KATOH et al., 2015).

$$\left(\frac{hd_i}{\kappa}\right) = 0.023 \left(\frac{d_i v \rho}{\mu}\right)^{0.8} \left(\frac{c_p \mu}{\kappa}\right)^{1/3} \quad (3)$$

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{1/3} \quad (4)$$

O coeficiente de filme  $h$  para fluxo turbulento de água através de um tubo pode ser estimado pela (Equação 5):

$$h = \frac{(3210 + 43t)v^{0.8}}{d_i^{0.2}} \quad (5)$$

O fluxo através do tubo pode também ser laminar, quando a viscosidade do fluido é muito alta ou o diâmetro do conduto é muito pequeno. Sendo assim o coeficiente  $h$  para fluxo laminar através de tubos retos pode ser obtido pelas seguintes equações adimensionais (Equação 6) e (Equação 7) (KATOH et al., 2015).

$$Nu = \left(\frac{hd_i}{\kappa}\right) = 1.62 Re^{1/3} Pr^{1/3} \left(\frac{d_i}{L}\right)^{1/3} \quad (6)$$

$$Nu = 1.75 \left(\frac{Wc_p}{\kappa L}\right)^{1/3} = 1.75(Gz)^{1/3} \quad (7)$$

### 3.4.2 Determinação de Coeficiente h para Fluxo Forçado Através de Múltiplos Tubos

O escoamento do fluido também pode ocorrer através de vários tubos idênticos, e não através de um único tubo. Nesse caso o coeficiente de filme h e a taxa de transferência de calor na superfície externa do tubo pode ser estimada através da (Equação 9) e (Equação 10) (KATOH *et al.*, 2015).

$$\left(\frac{hd_0}{\kappa}\right) = 0.3 \left(\frac{d_0 G_m}{\mu}\right)^{0.6} \left(\frac{c_p \mu}{\kappa}\right)^{1/3} \quad (9)$$

$$Nu = 0.3 Re^{0.6} Pr^{1/3} \quad (10)$$

### 3.4.3 Determinação de Coeficiente h para Troca Térmica Através de Jaquetas e Serpentinhas

Existem várias correlações disponíveis para a estimar a taxa de transferência de calor em biorreatores envoltos por uma manta térmica (jaqueta), ou os que possuem tubos em espiral (serpentinhas) instalados dentro do recipiente agitado (KATOH *et al.*, 2015).

- Coeficiente de transferência de calor entre o líquido e a parede do vaso aquecido por jaqueta ou entre o líquido e a superfície da bobina helicoidal (serpentina), ambos agitados por impelidores de pás com lâminas planas podem ser descritos conforme a (Equação 12), sendo os valores de alfa 0,36 para a transferência de calor da parede do vaso, e 0,87 para a superfície da serpentina (KATOH *et al.*, 2015).

$$\left(\frac{hD}{\kappa}\right) = \alpha \left(\frac{L^2 N \rho}{\mu}\right)^{2/3} \left(\frac{c_p \mu}{\kappa}\right)^{1/3} \quad (12)$$

Considerando a troca térmica entre o líquido e a parede do tanque de diâmetro  $D$  agitado por um impelidor do tipo turbina com aletas, foram correlacionados que os valores de alfa foram de 0,54 para um tanque sem defletores/chicanas, e 0,74 para um tanque com defletores/chicanas.

Coeficiente de transferência de calor entre o líquido e a superfície da bobina helicoidal em um tanque agitado por impelidores do tipo turbina com lâminas planas, é descrito pela (Equação 13), onde  $d_0$  é o diâmetro externo do tubo da bobina (KATOH et al., 2015).

$$\left(\frac{hd_0}{\kappa}\right) = 0.17 \left(\frac{L^2 N \rho}{\mu}\right)^{0.67} \left(\frac{c_p \mu}{\kappa}\right)^{0.37} \quad (13)$$

As equações apresentadas acima são utilizadas quando são conhecidos os valores de entrada e saída, ou seja, quando se tem um sistema do tipo helicoidal com fluxo contínuo ao redor do casco.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. MODULO DE CONTROLE BIORREATOR

A interface para controle de biorreatores TECNAL, consiste em um módulo de controle com tela sensível ao toque integrada, compatível com a linha BIO-TEC-IHM, conforme ilustra a Figura 8. Possui entrada para sensor de temperatura (Pt-100), nível de espuma por haste condutiva, eletrodo de pH, sensor de oxigênio dissolvido (polarográfico), sensor de pressão digital e válvula de alívio para despressurização automática, controle automático da temperatura do interior do vaso de reação (amostra) operando através de manta e serpentina ou banho termostatzado (TEC-BIO-T), condições ambientais máximas: 0 a 50 °C a 80% UR, potência: 2000W (TECNAL, 2020).

*Figura8: Módulo para controle de biorreator modelo bio-tec-pro.*



*Fonte: TECNAL, 2021.*

### 4.2. SENSOR pH

O sensor de pH digital é da marca HAMILTON e possui por especificações o princípio de medição o eletrodo combinado de pH com compensação automática de

temperatura, sua faixa de leitura contempla o pH do 0 ao 14, tem uma profundidade de 325 mm e diâmetro de 12 mm.

#### 4.3. TERMOSTATO

O equipamento utilizado era com um sensor de temperatura tipo Pt-100.

#### 4.4. REAGENTES

Foi adicionado uma solução de 10% de ácido clorídrico e hidróxido de sódio, para se analisar o tempo de mistura monitorando o tempo de estabilização do pH após perturbação no sistema.

#### 4.5. TEMPO DE MISTURA

O tempo de mistura é definido como o tempo medido para um volume de material traçador a ser disperso em todo o recipiente dentro de  $\pm 5\%$  de sua concentração estável final (AN ZHANG et al, 2014). O biorreator foi envolvido em várias rotações (200, 400 e 600 rpm) e realizou-se dois métodos, o traçador de pH e a proposta para cálculo de tempo de mistura segundo KATOH (2015) conforme descrito no item 3.3 da revisão bibliográfica. Para o método do rastreador de pH o biorreator foi preenchido com 2,0L de água, foi adicionada a base (NaOH) ajustando o pH para 9 e em seguida acresceu 100mL de uma solução de HCl 0,1M e assim a variação de pH pode ser medida e registrada. Após estabilização, adicionou-se 100mL de NaOH 0,1M para nova observação de estabilização do pH. Utilizou-se o biorreator de bancada da marca Tecnal como mostra a Figura 9, com três tipos diferentes de impelidores (Pás inclinadas, Pás Elefante e Pás Rushton), O experimento foi realizado em triplicata. Foi usado como base o Katoh (2015), para análise e validação dos valores obtidos.



Figura 9: Biorreator de bancada TEC-BIO-FLEX-II, marca TECNAL.



Fonte: TECNAL, 2021.

#### 4.6. TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A taxa de transferência de calor no biorreator foi avaliada conforme método para obtenção do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) para escoamento laminar através de tubos (conduítes) proposto por KATOH (2015) conforme descrito no item 3.4.1 da revisão bibliográfica. De forma experimental, foi estipulado o tempo necessário para que ocorra a troca térmica tanto para aquecimento ( $20^{\circ}\text{C}$  a  $50^{\circ}\text{C}$ ) quanto para resfriamento ( $50^{\circ}\text{C}$  a  $20^{\circ}\text{C}$ ), uma vez que a falta de dados práticos prejudicou o cálculo do coeficiente de transferência de calor ( $h$ ) propriamente dito. O biorreator foi preenchido com 2,0L de água destilada e sua temperatura estabilizada em  $50^{\circ}\text{C}$ , o set point do banho foi ajustado para  $10^{\circ}\text{C}$  com o intuito de realizar a troca térmica com o tanque até que este atingisse  $20^{\circ}\text{C}$ . Em seguida, após estabilização da temperatura do tanque em  $20^{\circ}\text{C}$ , o set point foi reajustado para  $70^{\circ}\text{C}$  para que após a troca térmica a temperatura do tanque retornasse a  $50^{\circ}\text{C}$ . Utilizou-se o biorreator de bancada e o banho termostatizado, ambos da marca Tecnal. O experimento foi realizado com três tipos diferentes de impelidores (Pás inclinadas, Pás Elefante e Pás Rushton), sendo que cada um deles foi avaliado nas rotações de 200, 400 e 600rpm respectivamente.

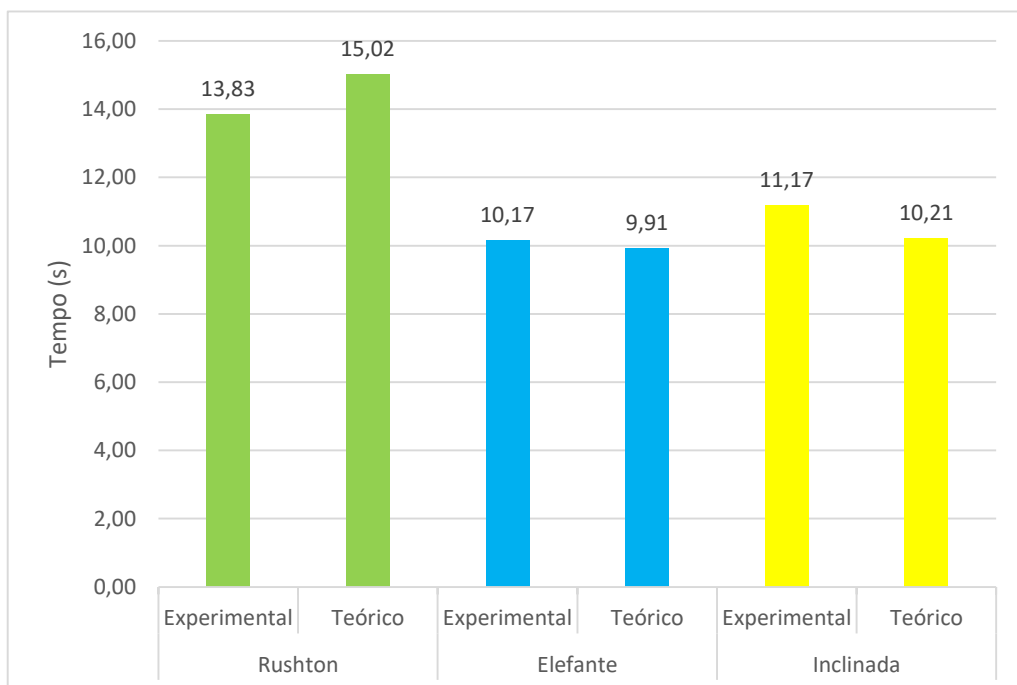
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir será exposto e discutido os resultados dos testes realizados a partir da metodologia apresentada no presente trabalho para a obtenção do tempo de mistura e para o cálculo da taxa de transferência de calor.

### 5.1. TEMPO DE MISTURA

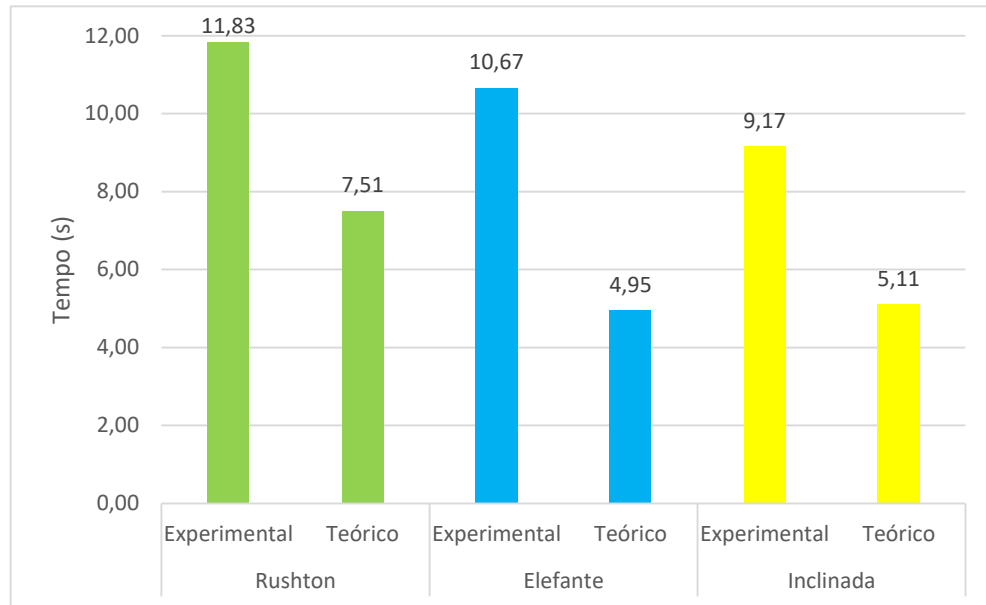
Os resultados do experimento para avaliação do tempo de mistura utilizando-se da metodologia descrita no item 4.5 (demonstrados no apêndice A) do referencial bibliográfico estão apresentados nas Figuras 10, 11 e 12. Os resultados estão relacionados para cada especificação de rotação e tipo de impelidor e relaciona a média dos tempos de mistura obtidos experimentalmente e teórico.

Figura 10: Comparação do tempo médio de mistura experimental em relação ao tempo teórico para cada tipo de impelidor na rotação de 200 rpm.



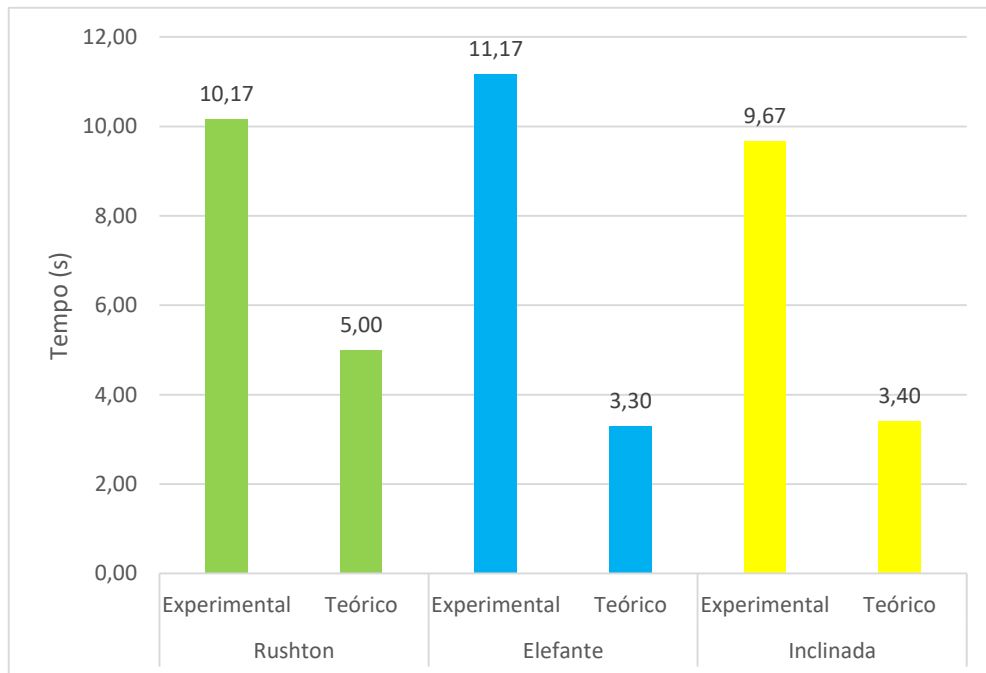
Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 11: Comparação do tempo médio de mistura experimental em relação ao tempo teórico para cada tipo de impelidor na rotação de 400 rpm.



Fonte: Autoria Própria, 2021

Figura 12: Comparação do tempo médio de mistura experimental em relação ao tempo teórico para cada tipo de impelidor na rotação de 600 rpm.



Fonte: Autoria Própria, 2021

Como pode ser observado na Figura 10, pode-se analisar que os valores obtidos experimentalmente, para a rotação de 200 rpm, foram satisfatórios quando relacionados aos valores teóricos calculados, visto que eles estão próximos, se comparados entre si. Pelo cálculo do desvio padrão confirma-se a boa performance obtida pelos impelidores nesta velocidade, conforme o método disposto por Katoh (2015), uma vez que os procedimentos experimentais não acarretaram interferências significativas, tendo em conta que os valores obtidos dos desvios padrões estão abaixo de 12%, para os três tipos de pás.

Neste tipo de rotação, analisa-se que a pá tipo elefante tem melhor eficiência experimental, como também melhor eficiência teórica, se comparado com os outros impelidores, sendo o tempo de mistura em torno de 10 segundos. Esse bom resultado pode ser explicado por sua geometria e sua configuração, podendo esta última ser radial e axial, cuja combinação segundo Bustamante (2013, p. 13), fornece uma melhor mistura ao processo.

A pá tipo Inclinação, ficou em segunda melhor eficiência teórica e experimental, sendo o tempo de mistura em torno de 11 segundos. Para se obter uma melhor eficiência para este tipo de pá é de extrema importância analisar a dinâmica dos escoamentos, Buffo (2016, p. 29) menciona que a eficiência desse impelidor aumenta consideravelmente com a diminuição do ângulo de inclinação e com a razão entre diâmetros do impelidor e do vaso.

A terceira melhor eficiência teórica e experimental tem-se a pá Rushton, sendo o tempo de mistura em torno de 14 segundos. Embora a pá Rushton tenha seu uso muito difundido ela apresenta algumas desvantagens, Bustamante (2013, p. 14) cita que há formação de “cavernas” nas regiões próximas as pás e formação de regiões estagnadas em zonas distantes do impelidor quando operado em cultivos não-Newtonianos, podendo essas serem as causas da menor eficiência em relação as outras impelidores.

Pode-se ser observado discrepâncias entre os valores reais e experimentais, tanto para a rotação de 400 quanto a de 600 rpm em relação a todos os impelidores. Em relação aos valores teóricos obtidos, observa-se que houve uma redução em comparação com a rotação de 200 rpm.

Fazendo um comparativo entre os resultados obtidos através dos experimentos no laboratório e os resultados teóricos, tomando por base os dados da Figura 10, verifica-se que o tempo de mistura diminui à medida que a agitação aumenta, portanto quanto maior a velocidade de rotações, menor o tempo que a substância demorará para se misturar ao solvente. Os resultados alcançados acordam com os resultados obtidos por Vasconcelos et al. (1995), que atestou que estas ocorrências acontecem pelos efeitos opostos das misturas mecânicas gerado pelo agitador, ou seja, quanto maior a agitação menor será o tempo de mistura.

## 5.2 CÁLCULO DA TAXA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A partir da metodologia apresentada no item 3.4.1 para fluxo laminar, obteve-se como resultado os coeficientes individuais de transferência de calor, sendo eles, 1302,37 W/m<sup>2</sup>°C para o resfriamento e 1412,34 W/m<sup>2</sup>°C para o aquecimento. Estes valores são apresentados na Tabela 1. Analisando os resultados obtidos e comparando-os com o valor aproximado do coeficiente global de transferência de calor para um trocador água-água proposto por Holman (1983), para um intervalo de 850 – 1700 W/m<sup>2</sup>°C conforme apresenta a Tabela 2, conclui-se que estes estão coerentes com a literatura.

Tabela 1: Valores calculados para o coeficiente individual de troca térmica (h) em suas respectivas temperaturas.

Temperatura (°C)	10	70
Re	2029,98	6421,47
h (W/m <sup>2</sup> .°C)	1302,37	1412,34

Fonte: Autoria própria, 2021

Tabela 2: Valores aproximados dos coeficientes globais de transferência de calor (U) para algumas situações físicas segundo HOLMAN.

Valores aproximados dos Coeficientes Globais de Transferência de Calor (U)	
Situação Física	W/m <sup>2</sup> .°C
Condensador de Vapor	1100 – 5600

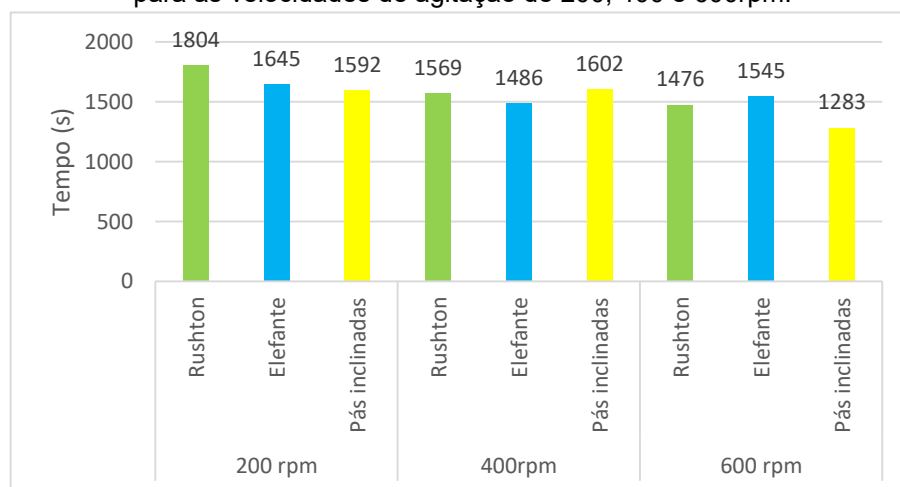
Aquecedor de água de alimentação	1100 – 8500
Condensador de R-12 resfriado com água	280 - 850
Trocador de Calor Água – Água	850 – 1700
Trocador Água – Óleo	110 – 350
Vapor – Óleo Combustível leve	170 – 340
Vapor – Óleo Combustível pesado	56 – 170
Vapor – Querosene ou Gasolina	280 – 1140

Fonte: Aatoria própria, adaptado de HOLMAN (1983)

Como não foi possível aferir todas as temperaturas necessárias para calcular o  $h$  de maneira experimental, foi realizada uma relação a fim de mensurar o tempo necessário para se alcançar uma temperatura pré-estabelecida (20 e 50°C). Os resultados podem ser verificados conforme ilustrados pelas Figuras 13 e 14, que foram construídos com os dados apresentados no Apêndice A.

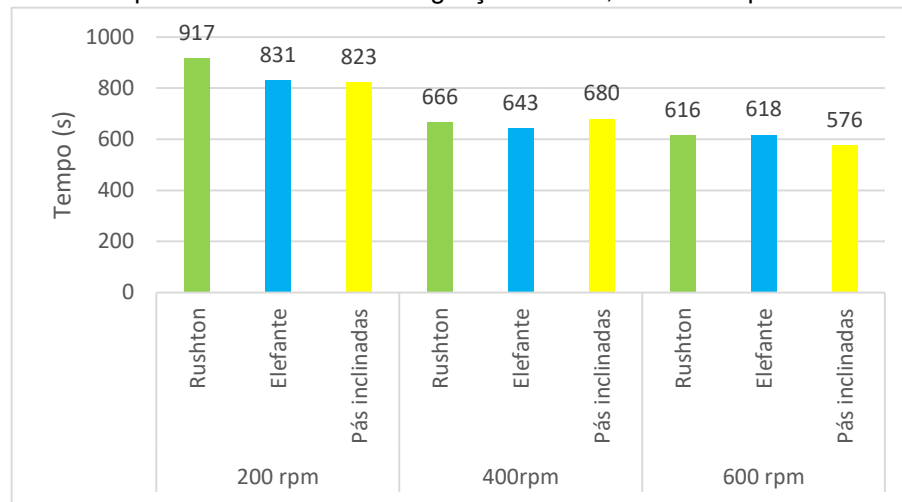
Analisando as Figuras 13 e 14, pode-se verificar o tempo que cada impelidor (dentro das rotações estabelecidas) precisou para voltar a temperatura indicada. Nas Figuras 13 e 14 - onde tem-se a velocidade de agitação versus tempo de troca fria podemos verificar quantos segundos cada tipo de pá precisou. No segundo caso, nas Figuras 13 e 14 - onde tem-se a velocidade de agitação versus tempo de troca quente também se tem a mesma análise.

Figura 13 – Tempo de troca térmica para o resfriamento (50°C – 20°C) e seus respectivos impelidores para as velocidades de agitação de 200, 400 e 600rpm.



Fonte: Aatoria Própria, 2021

Figura 14 – Tempo de troca térmica para o aquecimento (20°C – 50°C) e seus respectivos impelidores para as velocidades de agitação de 200, 400 e 600rpm.



Fonte: Autoria Própria, 2021

A troca de calor acontece quando dois ou mais corpos com temperaturas diferentes são colocados em contato em um mesmo ambiente, ou seja, em um sistema isolado, e assim, depois de certo tempo alcançam o equilíbrio térmico. Pôde-se verificar, nas Figuras 13 e 14, que o tempo de troca fria é duas vezes maior que a troca quente e isso ocorre devido aos fenômenos termodinâmicos. Os líquidos são formados por moléculas que estão em constante movimento e quando essas moléculas estão frias, elas possuem pouca energia e, por isso, movimentam-se mais devagar. Quando as moléculas ganham energia, eleva-se a temperatura, e assim movimentam-se mais rápido, tornando a troca mais rápida.

Nesse sentido, pensando em bioprocessos deve-se levar em consideração que o controle de temperatura é de extrema importância pois, para todos os microrganismos existem três temperaturas cardiais: temperatura mínima abaixo da qual não há crescimento, temperatura máxima acima da qual não há crescimento e temperatura ótima, onde o crescimento é o máximo.

Na figura 15.A constatou-se que o tempo de troca térmica para a rotação de 200 rpm, mudou para cada tipo de impelidor. Verificou-se, para esta rotação, que as pás Inclinadas possuem maior eficiência, tanto para a troca fria, quanto para a troca quente, ficando as pás Elefante em segundo lugar e pás Rushton com a menor eficiência.

Na Figura 15.B constatou-se que o tempo de troca térmica para a rotação de 400 rpm, como constatado anteriormente, mudou para cada tipo de impelidor. Verificou-se, para esta rotação, que as pás Elefante possuem maior eficiência, tanto para a troca fria, quanto para a troca quente, ficando as pás Rushton em segundo lugar de tempo de troca, e por fim notou-se que as pás Inclínadas, para esse caso, possuem menor eficiência, se comparando os três casos.

Na figura 15.C constatou-se que o tempo de troca térmica para a rotação de 600 rpm, novamente mudou para cada tipo de impelidor. Verificou-se, para esta rotação, que as pás Inclínadas possuem maior eficiência, tanto para a troca fria, quanto para a troca quente, ficando as pás Rushton em segundo lugar de tempo de troca, e por fim notou-se que as pás Elefante, para esse caso, possuem menor eficiência, se comparando os três casos.

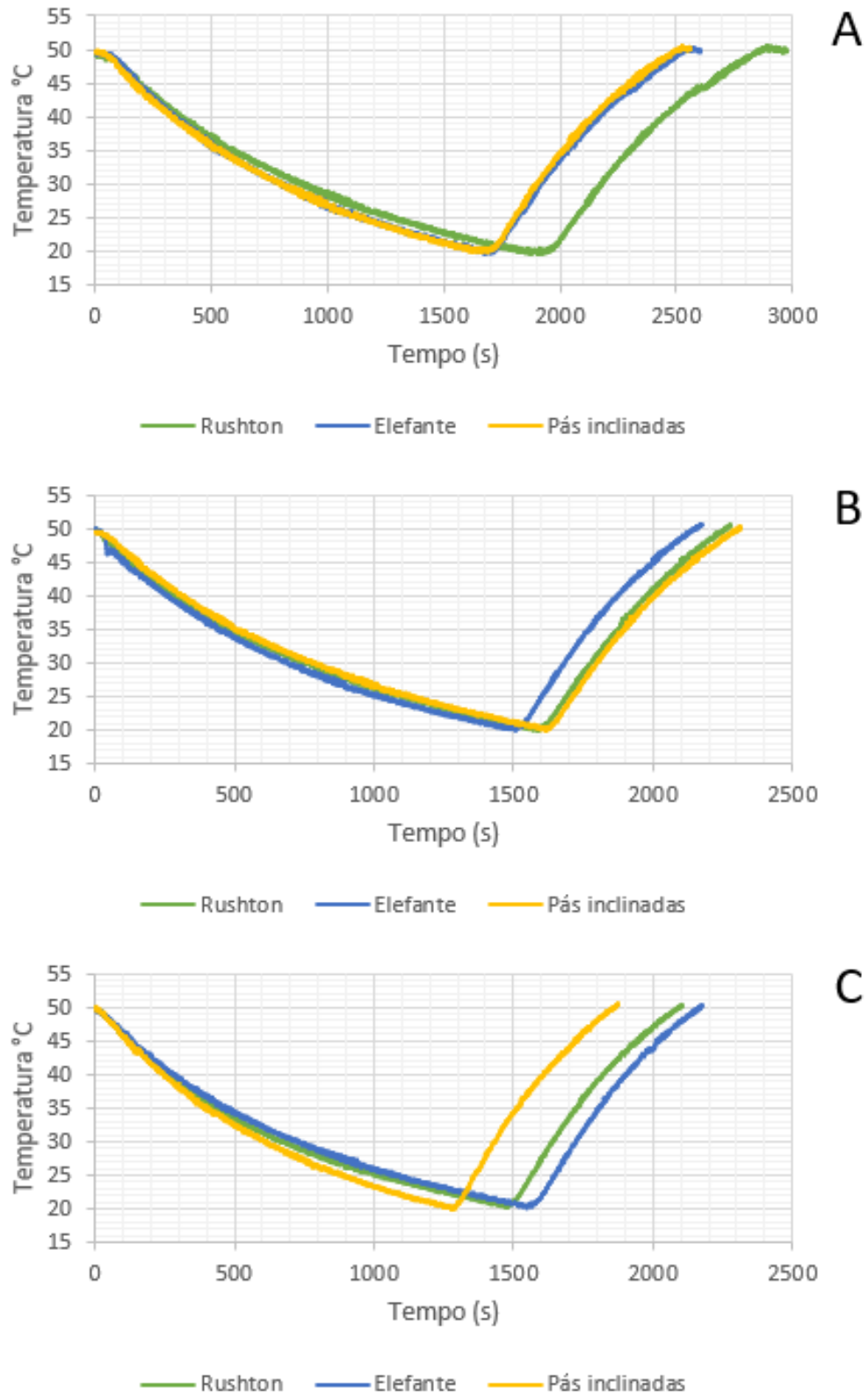
É reportado na literatura que quanto maior a velocidade de agitação, mais será favorecida a troca de massa dentro do biorreator, contudo, também ocorrerá maior dano celular devido ao estresse hidrodinâmico causado a célula (ASSIS et al., 2014).

O impelidor pá inclinada possui escoamento axial radial simultâneo e seu diâmetro é de 5,8 cm, eles são indicados para misturar suavemente o conteúdo de uma cultura sem causar danos as células, já o impelidor tipo pá elefante possui escoamento axial e seu diâmetro é de 5,9 cm, enquanto o impelidor pá Rushton com diâmetro de 4,3 cm, possui escoamento radial unidirecional, e deve ser usado para fermentações de tipos celulares que não são consideradas sensíveis ao cisalhamento.

Conforme discussões anteriores verificou-se que a taxa de transferência térmica sofre alteração a partir dos diferentes tipos de pás.



Figura 15 – Comparação das curvas do tempo de troca térmica para tipo de impelidor em suas respectivas velocidades de agitação (A-200rpm; B-400rpm; C-600rpm).



Fonte: Autoria Própria, 2021

## CONCLUSÃO

No presente trabalho pode-se analisar a taxa de transferência de calor e o tempo de mistura para três tipos diferentes de pás, em um biorreator de bancada. A metodologia empregada foi eficaz para a análise de tempo de mistura e observou-se que a pá elefante possui melhor eficiência tanto nos cálculos teóricos quanto nos valores obtidos em laboratório. Verificou-se que a pá Rushton é muito utilizada em procedimentos de bioprocessos, mas que ela possui a menor eficiência se comparado com os outros tipos de pás estudados. Para a determinação da taxa de transferência de calor a metodologia empregada para o cálculo do  $h$  não foi eficaz, pois como não se conseguiu aferir a temperatura de saída do tubo do trocador de calor não se obteve um método para comprovar o valor obtido. A pá com melhor eficiência para promover a troca térmica é a Inclínada e a com menor eficiência é a Rushton.

Verificou-se que a escolha do tempo de mistura e da capacidade de transferência de calor deve sempre ser realizada de acordo com as demandas e especificações do bioprocessos a ser realizado.

## 8.REFERÊNCIAS

Agência Tribo. Hélices. São Paulo: Tedemix, 2019. Disponível em: <<https://tedemix.com.br/produtos/helices/>> Acesso em: 18 abr. 2021.

BADINO, A. C.; SCHMIDELL, W. Biotecnologia Industrial. Volume 2, Engenharia bioquímica, Cap. 15: Variação de escala, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 2001.

BATTAGLINI, Neusa Maria Pavão. Avaliação do Comportamento de Impelidores Especiais em Mistura de Fluidos. Botucatu, 1998. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/101864/battaglini\\_nmp\\_dr\\_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/101864/battaglini_nmp_dr_botfca.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. Acesso em: 23 de mar. de 2021.

BUFFO, Mariane Molina. Transferência de Oxigênio e cisalhamento em biorreator convencional com diferentes combinações de impelidores. São Carlos, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/7933/DissMMB.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 23 de mar. de 2021.

BUSTAMANTE, M. C. C. Transferência de Oxigênio e Condições de Cisalhamento em Biorreator Convencional com Impelidores Orelha de Elefante. 2013. 15 f (Doutorado em Engenharia Química). UFSCAR, 2013.

CHEN, H. Z.; XU, J.; LI, Z.H. Temperature control at different bed depths in a novel solid-state fermentation system with two dynamic changes of air. *Biochemical Engineering Journal*, v. 23, p. 117–122, 2005.

CHISTI, Y. Hydrodynamic damage to animal cells. *Critical Reviews in Biotechnology*, v.21, p. 67-110, 2011.

COUTO, S. R.; Sanromán M A (2006) Application of solid-state fermentation to food industry - A review. *J. Food Eng* 76(3): 291-302.

GABELLE, J.C.; JOURDIER E.; LICHT, R.B.; CHAABANE, B.F.; HENAUT, I.; MORCHAIN, J.; AUGIER, F. Impact of rheology on the mass transfer coefficient during the growth phase of *Trichoderma reesei* in stirred bioreactors. *Chemical Engineering Science*, v.75, p.408-417, 2012.

GHOTLI, R.A.; AZIZ, A.R.A.; IBRAHIM, S.; BAROUTIAN, S.; ARAMI-NIYA, A. Study of various curved-blade impeller geometries on power consumption in stirred vessel using response surface methodology. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, v.44, p.192-201, 2013.

HOLMAN, J. P., Transferência de Calor; McGraw-Hill; São Paulo; 1983.

INCROPERA, F.; DEWITT, D.P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa, 7ª ed., Rio de Janeiro: LTC, 2014. BIRD, R.B.

KATOH, S.; HORIUCHI, J-I.; YOSHIDA, F. Biochemical Engineering. 2.ed. Kyoto: Wiley – Vch, 2015. 303 p.

RAGHAVARAO, K. S. M. S.; RANGANATHAN, T. V.; Karanth N G (2003) Some engineering aspects of solid-state fermentation. Biochem Eng J 13: 127-135.

RIBEIRO, Maria de Magalhães Gomes Pontes. Efeitos da velocidade de cisalhamento e transferência de oxigênio em biorreator convencional na produção de ácido clavulânico por *Streptomyces clavuligerus*. Araraquara, 2017. Disponível em: <[https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/192657/ribeiro\\_rmmgp\\_me\\_arafcf\\_int.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/192657/ribeiro_rmmgp_me_arafcf_int.pdf?sequence=3&isAllowed=y)> 23 de mar. de 2021.

RUSHTON, J.H.; COSTISH, E.W.; EVERETT, H.J. Power characteristics of mixing impellers. Part I. Chemical Engineering Progress, v.46, p.395-404, 1950.

RUSHTON, J.H.; COSTISH, E.W.; EVERETT, H.J. Power characteristics of mixing impellers. Part II. Chemical Engineering Progress, v.46, p.467-476, 1950.

SHULER, M. L.; KARGI, F. Bioprocess Engineering: Basic Concepts. Second Edition. V. 2, p. 284-327, 2002.

TANG, W., PAN, A.; LU, H.; XIA, J.; ZHUANG, Y.; ZHANG, S.; CHU, J.; NOORMAN, H. Improvement of glucoamylase production using axial impellers with low power consumption and homogeneous mass transfer. Biochemical Engineering Journal, v.99, p.167-176, 2015.

## APÊNDICE A

Tabela 3: diâmetro dos impelidores

<b>Diâmetro impelidores (cm)</b>		
Rushton	Elefante	Pás inclinadas
4,3	5,9	5,8

Fonte: Aatoria própria, 2021

Tabela 4: Propriedades físicas da Água a 20°C.

<b>Dados da água</b>	
$\mu$ (g/cm.s)	0,0013
$\rho$ (g/cm <sup>3</sup> )	0,997

Fonte: Aatoria própria, 2021

Tabela 5: Valores calculados para o número de Reynolds (Re), rotação x tempo de mistura (Ntm) e tempo de mistura (tm) para cada tipo de impelidor a 200rpm.

<b>N (rotação) rpm - rps</b>		
<b>200 - 3,33</b>		
Re Rushton	Re Elefante	Re Pás inclinadas
10981,57	15067,74	14812,35
Ntm Rushton	Ntm Elefante	Ntm Pás inclinadas
50	33	34
tm Rushton (s)	tm Elefante (s)	tm Pás inclinadas (s)
15,02	9,91	10,21

Fonte: Aatoria própria, 2021

Tabela 6: Valores calculados para o número de Reynolds (Re), rotação x tempo de mistura (Ntm) e tempo de mistura (tm) para cada tipo de impelidor a 400rpm.

<b>N (rotação) rpm – rps</b>		
<b>400 – 6,66</b>		
Re Rushton	Re Elefante	Re Pás inclinadas
21963,14	30135,48	29624,70
Ntm Rushton	Ntm Elefante	Ntm Pás inclinadas
50	33	34
tm Rushton (s)	tm Elefante (s)	tm Pás' inclinadas (s)
7,51	4,95	5,11

Fonte: Aatoria própria, 2021

Tabela 7: Valores calculados para o número de Reynolds (Re), rotação x tempode mistura (Ntm) e tempo de mistura (tm) para cada tipo de impelidor a 600rpm.

<b>N (rotação) rpm – rps</b>		
<b>600 – 10</b>		
Re Rushton	Re Elefante	Re Pás inclinadas
32977,69	45248,46	44481,54
Ntm Rushton	Ntm Elefante	Ntm Pás inclinadas
50	33	34
tm Rushton (s)	tm Elefante (s)	tm Pás inclinadas (s)
5	3,3	3,4

Fonte: Aatoria própria, 2021

Tabela 8: Valores de tempo de mistura para a adição de ácido/base para cada triplicata e seus respectivos impelidores, média das triplicas e seu desvio padrão para agitação de 200rpm.

<b>Tempo de mistura (s) - Rushton 200 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
14	15	14	14	13	13	13,83	0,75

<b>Tempo de mistura (s) - Elefante 200 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
9	10	11	9	12	10	10,17	1,17

<b>Tempo de mistura (s) - Pás inclinadas 200 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
12	10	11	11	12	11	11,17	0,75

Fonte: Autoria própria, 2021

Tabela 9: Valores de tempo de mistura para a adição de ácido/base para cada triplicata e seus respectivos impelidores, média das triplicas e seu desvio padrão para agitação de 400rpm.

<b>Tempo de mistura (s) - Rushton 400 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
15	11	13	9	12	11	11,83	2,04

<b>Tempo de mistura (s) - Elefante 400 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
13	11	10	9	11	10	10,67	1,37

<b>Tempo de mistura (s) - Pás inclinadas 400 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
11	7	11	8	11	7	9,17	2,04

Fonte: Autoria própria, 2021

Tabela 10: Valores de tempo de mistura para a adição de ácido/base para cada triplicata e seus respectivos impelidores, média das triplicas e seu desvio padrão para agitação de 600rpm.

<b>Tempo de mistura (s) - Rushton 600 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
12	9	11	9	11	9	10,17	1,33

<b>Tempo de mistura (s) - Elefante 600 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
11	11	12	11	12	10	11,17	0,75

<b>Tempo de mistura (s) - Pás inclinadas 600 rpm</b>							
1° triplicata		2° triplicata		3° triplicata		Média	Desvio Padrão
ácido	base	ácido	base	ácido	base		
10	8	11	8	11	10	9,67	1,37

Fonte: Autoria própria, 2021

Tabela 11: Propriedades físicas da água à 20°C para cálculos de tempo de mistura.

<b>Dados</b>	
$d_i$ - diametro interno do tubo (cm)	0,4
$\kappa$ - condutividade termica do fluido (cal/cm.s°C)	0,607
$\rho$ - densidade do liquido (g/cm <sup>3</sup> )	0,997
$\mu$ - viscosidade do liquido (g/cm.s)	0,0013
$c_p$ - calor específico (cal/g.°C)	1
$v$ - velocidade média do fluido (cm/s)	66,3482
$t$ - temperatura media da agua (°C)	20

Fonte: Autoria própria com base em INCROPERA (2014)

Tabela 12: Propriedades físicas da água à 10°C para cálculo do coeficiente de transferência de calor para resfriamento.

<b>Dados</b>	
$d_i$ - diametro interno do tubo (m)	0,004
$\kappa$ - condutividade termica do fluido (kcal/hm°C)	0,4986
$\rho$ - densidade do líquido (kg/m <sup>3</sup> )	999,7
$\mu$ - viscosidade do líquido (kg/mh)	4,7052
$c_p$ - calor específico (kcal/kg°C)	0,001002
$v$ - velocidade média do fluido (m/h)	2388,59
$t$ - Temperatura média da agua (°C)	10
$L$ - Comprimento do tubo (m)	0,45
$Pr$ - Número de Prandtl	9,45

Fonte: Autoria própria com base em INCROPERA (2014)

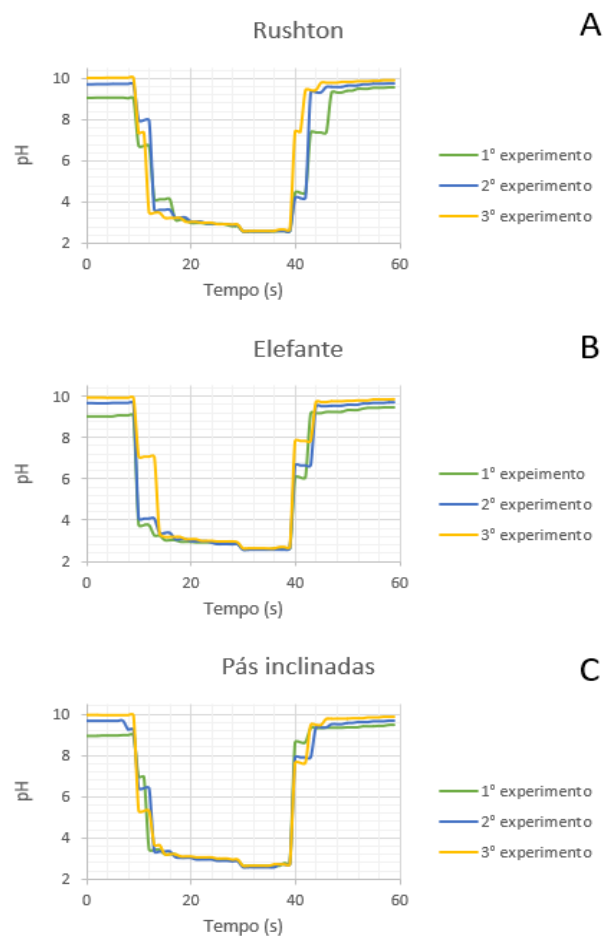


Tabela 13: Propriedades físicas da água à 70°C para cálculo do coeficiente de transferência de calor para aquecimento.

<b>Dados</b>	
di - diametro interno do tubo (m)	0,004
$\kappa$ - condutividade termica do fluido (kcal/hm°C)	0,57
$\rho$ - densidade do liquido (kg/m <sup>3</sup> )	977,5
$\mu$ - viscosidade do liquido (kg/mh)	1,4544
cp - calor específico (kcal/kg°C)	0,000938
v - velocidade média do fluido (m/h)	2388,59
t - temperatura media da agua (°C)	70
L - comprimento do tubo (m)	0,45
Pr - Numero de Prandtl	2,55

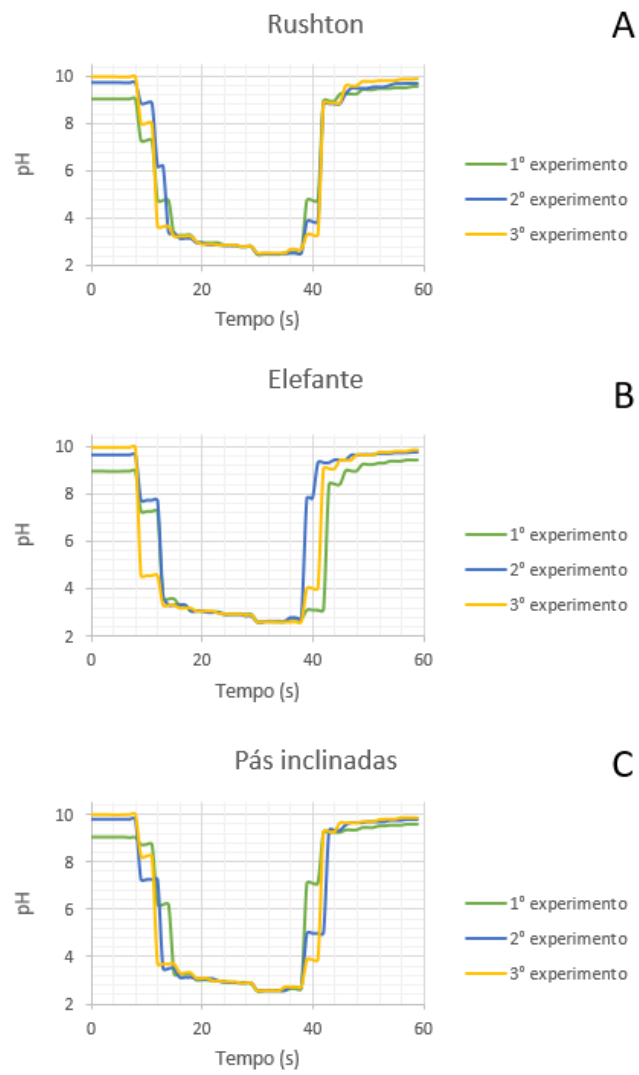
Fonte: Autoria própria com base em INCROPERA (2014)

Figura 16: Tempo vs variação de pH para cada triplicata e seus respectivos impelidores na rotação de 200 rpm.



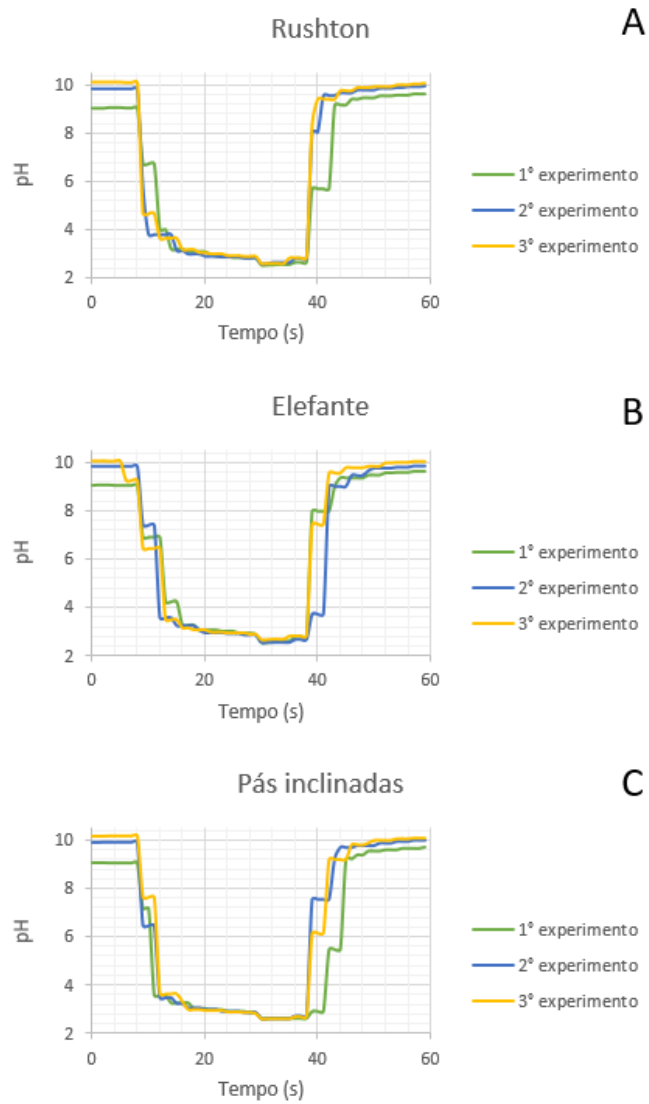
Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 17: Tempo vs variação de pH para cada triplicata e seus respectivos impelidores na rotação de 400 rpm.



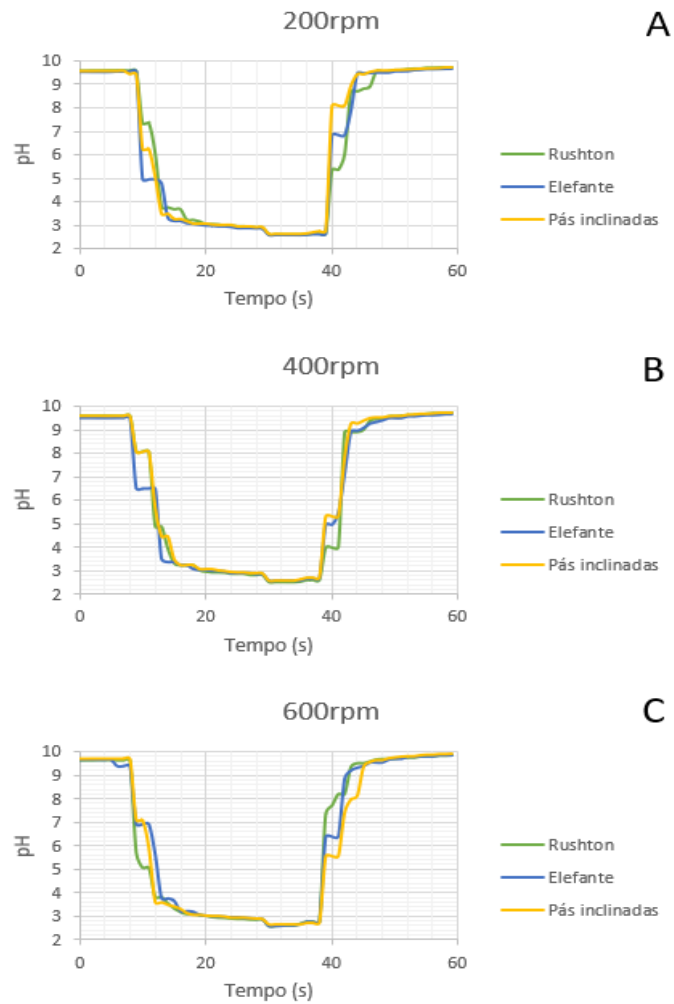
Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 18: Tempo vs variação de pH para cada triplicata e seus respectivos impelidores na rotação de 600 rpm.



Fonte: Autoria própria, 2021

Figura 19 – Comparação do tempo vs pH das médias das triplicatas para cada tipo de impelidor nas rotações de 200, 400 e 600 rpm.



Fonte: Autoria própria, 2021