

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

MÁRCIO FERNANDO THOMAS

TEMPO DE MISTURA E CONSUMO DE POTÊNCIA NA AGITAÇÃO DE
LÍQUIDOS EM TANQUE COM IMPULSOR MECÂNICO

SANTOS/SP

Junho / 2019

MÁRCIO FERNANDO THOMAS

**TEMPO DE MISTURA E CONSUMO DE POTÊNCIA NA AGITAÇÃO DE
LÍQUIDOS EM TANQUE COM IMPULSOR MECÂNICO**

Dissertação apresentada a Universidade Santa Cecília
como parte dos requisitos para obtenção de título de
mestre no Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica, sob a orientação do Prof. Dr.
Vitor da Silva Rosa.

SANTOS/SP

Junho / 2019

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo,
exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Thomas, Márcio Fernando.

TEMPO DE MISTURA E CONSUMO DE POTÊNCIA NA AGITAÇÃO DE LÍQUIDOS
EM TANQUE COM IMPULSOR MECÂNICO / Márcio Fernando Thomas --
2019 61 p.

Orientador: Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP,
2019.

1. Tempo de Mistura. 2. Potência Consumida. 3. Líquido
Newtoniano. 4. Tanque. 5. Impulsor Axial. 6. Impulsor Radial.
7. Chicana Modificada com Orifícios. I. Rosa, Vitor da Silva.
II. TEMPO DE MISTURA E CONSUMO DE POTÊNCIA NA AGITAÇÃO DE
LÍQUIDOS EM TANQUE COM IMPULSOR MECÂNICO

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha esposa Janaína Helena Steffen por todo incentivo, amor, doçura e paciência, à minha mãe Antônia Imelda Thomas e aos meus familiares que me apoiaram de diversas maneiras durante esta importante etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao meu orientador, Prof. Dr. Vitor da Silva Rosa, que me acolheu e conduziu de forma brilhante no decorrer deste trabalho.

Ao prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior pela orientação no projeto e montagem das unidades experimentais com impulsores e sistema de troca térmica e desenvolvimento dos métodos de determinação do tempo de mistura e consumo de potência com motor em balanço.

A toda minha família e amigos, que acompanharam e mandaram bons votos para que este trabalho fosse concluído com maestria e entusiasmo.

Aos estagiários Murilo Antunes Alves Lucindo, Breno Dantas Santos, Natalia Zogaib Bastos, Geovanna Rodrigues Trindade, Felipe dos Santos Pitta e Juliana Sanches da Silva, que me auxiliaram no preparo dos materiais e na execução dos testes de bancada realizados em laboratório.

A Universidade Santa Cecília, por abrir as suas portas e permitir que eu consiga realizar mais um sonho em minha vida.

RESUMO

Os tanques com agitação e mistura são largamente empregados em processos químicos, petroquímicos, alimentícios e farmacêuticos como reatores químicos, trocadores de calor, destiladores, armazenadores, flotadores, diluidores e concentradores. Uma das principais variáveis de projeto são o consumo de potência e o tempo de mistura, os quais dependem do tipo de tanque, do tipo de impulsor mecânico, da presença ou não de chicanas, das propriedades físicas dos líquidos e da reologia dos líquidos. Não foi encontrado na literatura estudos de possíveis modificações estruturais na chicana e o seu impacto nas variáveis de projeto supracitadas. Desse modo, o presente estudo teve por objetivo avaliar experimentalmente o tempo de mistura e o consumo de potência na agitação de líquidos newtonianos em um tanque contendo um impulsor axial e um impulsor radial com o uso de uma chicana modificada com orifícios. A unidade experimental consistiu de um tanque com volume de 10 litros, um motor elétrico com potência de 2 hp em balanço sobre rolamentos, um impulsor axial com 4 pás inclinadas a 45°, um impulsor radial tipo turbina com 6 pás planas e uma chicana modificada contendo 4 placas, com 15 orifícios cada. Os líquidos empregados para agitação foram água e solução de sacarose em duas concentrações mássicas: 20 % e 50 %. O método empregado para a determinação do tempo de mistura foi a adição de líquido quente em líquido frio, de modo, que o tempo para a temperatura do sistema estabilizar era o tempo de mistura. Cada líquido foi submetido a rotações entre 200 e 1000 rpm em função do tipo de impulsor. Também se mediu a potência consumida pelo impulsor mecânico. Com os resultados obtidos determinou-se expressões semi-empíricas para o tempo de mistura e o consumo de potência válidas para Reynolds entre 1500 e 100000. Concluiu-se que a melhor condição de tempo de mistura ocorreu com o uso da chicana modificada com orifícios e o impulsor radial. No entanto, do ponto de vista energético e econômico, recomenda-se o uso do impulsor axial, apesar do sistema requerer uma rotação maior do impulsor mecânico para manter a turbulência que seria gerada com o impulsor radial.

Palavras Chave: Tempo de mistura; Potência consumida; Líquido newtoniano; Tanque; Impulsor axial; Impulsor radial; Chicana modificada com orifícios.

ABSTRACT

Stirring and mixing tanks are widely used in chemical, petrochemical, food and pharmaceutical processes such as chemical reactors, heat exchangers, distillers, storage tanks, floats, diluents and concentrators. The main design variables are the power consumption and the mixing time, which depend on the type of tank, the type of mechanical impeller, the presence or absence of baffles, the physical properties and the rheology of the liquids. We did not find in the literature studies of possible structural modifications in the baffle and their impact on the mentioned design variables. Thus, the present study aimed to evaluate experimentally the mixing time and the power consumption in the stirring of Newtonian liquids in a tank containing an axial impeller and a radial impeller using hole-modified baffles. The experimental unit consisted of a tank with a volume of 10 liters, an electric motor with power of 2 hp balanced on bearings, an axial impeller with 4 blades inclined at 45 °, a radial impeller type turbine with 6 flat blades and a modified baffle containing 4 plates, with 15 holes each. The liquids used for stirring were water and sucrose solution in two mass concentrations: 20% and 50%. The method used for the determination of the mixing time was the addition of hot liquid into cold liquid, so the time for the system temperature to stabilize was the mixing time. Each liquid was mixed at speeds between 200 and 1000 rpm depending on impeller type. The power consumed by the mechanical impeller was also measured. With the results obtained, we determined semi-empirical expressions for the mixing time and the power consumption valid for Reynolds between 1500 and 100000. It was concluded that the best condition of mixing time occurred with the use of modified baffles with holes and the radial impeller. However, from an energy and economic point of view, the use of the axial impeller is recommended, although the system requires a greater rotation of the mechanical impeller to maintain the turbulence that would be generated with the radial impeller.

Keywords: Mixing time; Power consumed; Newtonian liquid; Tank; Axial impeller; Radial impeller; Modified baffles with holes.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tempo de mistura para impulsor naval com 3 pás. (Adaptado de Fox e Gex, 1956)	14
Figura 2 – Tempo de mistura para impulsor radial turbina com 6 pás planas. (Adaptado de Norwood e Metzner, 1960)	15
Figura 3 – Fator fRe – adaptado de Fasano, Bakker e Penney (1994)	17
Figura 4 – Fator $f\mu$ – adaptado de Fasano, Bakker e Penney (1994)	17
Figura 5 – Fator $f\Delta\rho$ – adaptado de Fasano, Bakker e Penney (1994)	18
Figura 6 – Número de Potência em função do número de Reynolds para sete tipos de impulsores (Adaptado de Rushton et.al., 1950)	20
Figura 7 – Correlações para um tanque padrão (adaptado de McCabe, et.al., 1993)	20
Figura 8 – Unidade experimental. (a) Banho termostático, (b) Suporte do motor elétrico, c) Motor elétrico sobre rolamentos com potência de 2 hp, d) Mandril para acoplamento do impulsor mecânico, e) Tanque de acrílico com volume útil de 10 litros, f) Potenciômetro para controle de rotação do impulsor mecânico, g) Botão liga/desliga da unidade	23
Figura 9 – (a) Impulsor axial com 4 pás, (b) Impulsor radial com 6 pás	23
Figura 10 – Chicana modificada com orifícios	24
Figura 11 – (a) Serpentina espiral, (b) Banho termostático	24
Figura 12 – Fluxograma da unidade experimental	25
Figura 13 – (a) Impulsor radial tipo turbina Rushton com 6 pás planas, (b) Impulsor axial com 4 pás inclinadas a 45°	25
Figura 14 – Chicana modificada com 60 orifícios	26
Figura 15 – Temperatura em função do tempo – Ensaio 30	30
Figura 16 – Tempo de mistura em função de Reynolds – impulsor axial	31
Figura 17 – Tempo de mistura em função de Reynolds – impulsor radial	32
Figura 18 – Modelos- impulsor axial	36
Figura 19 – Modelos- impulsor axial	36
Figura 20 – Comparação do tempo de mistura entre os impulsores axial e radial	37
Figura 21 – Número de Potência em função do número de Reynolds para o Impulsor Axial	38
Figura 22 – Número de Potência Corrigido pela viscosidade relativa	40
Figura 23 – Relação $(Np*\mu_{rel})$ em função de Reynolds – Impulsor axial e chicana modificada	41
Figura 24 – Relação $(Np*\mu_{rel})$ em função de Reynolds – Impulsor radial e chicana modificada	42
Figura 25 – Efeito do tipo de impulsor no consumo de potência com a chicana modificada	42
Figura 26 – Ábaco: impulsor axial e chicana modificada	43
Figura 27 – Ábaco: impulsor radial e chicana modificada	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Constantes de taxa de mistura - Fasano, Bakker e Penney (1994)	16
Tabela 2 – Valores das dimensões dos impulsores empregados no estudo.....	26
Tabela 3 – Dimensões da chicana padrão, chicana modificada e tanque	27
Tabela 4 – Propriedades físicas dos líquidos de processo a 20°C (Coulson e Richardson, 1999)	27
Tabela 5 – Planejamento experimental.....	28
Tabela 6 – Tempo de mistura obtidos experimentalmente e número de Reynolds	30
Tabela 7 – Variáveis K1, K2, R ² e R ² ajust para cada grupo.....	33
Tabela 8 – Análise da significância dos parâmetros do modelo apresentado na Eq. 20	33
Tabela 9 – Variáveis K3, K4, R ² e R ² ajust para cada grupo.....	34
Tabela 10 – Análise da significância dos parâmetros do modelo apresentado na Eq. 23	35
Tabela 11 – Comparação quantitativa para o tempo de mistura entre os impulsores axial e radial	37
Tabela 12 – Viscosidade relativa para os fluidos ensaiados.....	38
Tabela 13 – Números de potência, potência corrigido e Reynolds para todos os ensaios	39
Tabela 14 – Parâmetros da equação 28	40
Tabela 15 – Análise da significância dos parâmetros do modelo apresentado na Eq. 28	41

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

pH	Potencial de Hidrogênio
T_m	Tempo de mistura (s)
f_p	Fator tempo de mistura de Fox e Gex (1956)
H	Altura do nível de líquido no tanque (m)
Dt	Diâmetro interno do tanque (m)
N	Rotação (rpm)
Da	Diâmetro do impulsor (m)
g	Aceleração da gravidade (m/s^2)
Re	Número de Reynolds (adimensional)
ρ	Densidade do líquido (kg/m^3)
μ	Viscosidade do líquido ($Pa \cdot s$)
f_t	Fator tempo de mistura de Norwood e Metzner (1960)
T_{99}	Tempo de mistura para condição de 99% de homogeneidade (s)
a	Constante da Equação 3 (adimensional)
b	Constante da Equação 3 (adimensional)
T_{99corr}	Tempo de mistura corrigido para 99% de homogeneidade na Equação 4 (s)
f_{Re}	Fator de influência do número de Reynolds na Equação 4 (adimensional)
f_{μ}	Fator de influência da viscosidade na Equação 4 (adimensional)
$f_{\Delta\rho}$	Fator de influência da densidade na Equação 4 (adimensional)
μ_0	Viscosidade do fluido do tanque antes da adição ($Pa \cdot s$)
μ_a	Viscosidade do fluido adicionado ao tanque ($Pa \cdot s$)
μ^*	Viscosidade relativa de Fasano, et.al. (1994) para a equação 5 (adimensional)
Ri	Número de Richardson (adimensional)
$\Delta\rho$	Diferença de densidade ($= \rho_a/\rho_0 $) [kg/m^3]
ρ_a	Densidade do fluido adicionado (kg/m^3)
ρ_0	Densidade do fluido no tanque antes da adição (kg/m^3)
P	Potência consumida pelo impulsor (W)
N_p	Número de potência (adimensional)
E	Altura do impulsor com relação ao fundo do tanque (m)

J	Largura da chicana (m)
L	Comprimento da pá do impulsor mecânico (m)
W	Altura da pá do impulsor mecânico (m)
d	Diâmetro do eixo do impulsor (m)
e	Espessura do disco central do impulsor radial (m)
e'	Espessura da lâmina do impulsor (m)
α	Ângulo de ataque da lâmina do impulsor axial (°)
ϕ	Diâmetro dos furos da chicana modificada (m)
Do	Distância entre furos da chicana modificada (m)
No	Quantidade de furos em cada aleta da chicana modificada
B	Braço (m)
F	Força (N)
T _{est}	Temperatura de estabilização (°C)
K _n	Parâmetros utilizados para regressão não linear
R ²	Coeficiente de determinação para regressão não linear
R ² _{ajust}	Coeficiente ajustado de determinação para regressão não linear
t	Fator estatístico “t” de Student
-p	Fator estatístico “-p value” de Student
μ_{rel}	Viscosidade relativa (adimensional)
μ_{ref}	Viscosidade do líquido de referência (Pa·s)

SUMÁRIO

SUMÁRIO	12
1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Consumo de Potência.....	19
1.2 Fatores de Forma	19
2 OBJETIVOS	21
2.1 Objetivo geral.....	21
2.2 Objetivos específicos	21
3 MATERIAL E MÉTODO	22
3.1 Unidade experimental.....	22
3.2 Planejamento experimental.....	27
3.3 Método	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1 Modelos para o cálculo do tempo de mistura	29
4.2 Análise do tipo de impulsor no tempo de mistura.....	36
4.3 Modelos para a potência consumida pelo impulsor mecânico	37
4.4 Análise do efeito do tipo de impulsor no consumo de potência.....	42
4.5 Análise simultânea do tempo de mistura e do consumo de potência pelo impulsor mecânico	43
5 CONCLUSÕES	44
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	45
7 REFERÊNCIAS	45
APÊNDICES	47
Apêndice A – Gráficos da temperatura do líquido em agitação ao longo do tempo	47

1 INTRODUÇÃO

A agitação e a mistura é uma operação unitária comumente encontrada em indústrias químicas, petroquímicas, alimentícias e farmacêuticas. Geralmente, os equipamentos empregados para as indústrias supracitadas são os tanques, os quais podem operar como reatores químicos, trocadores de calor, destiladores, extratores, diluidores, flotadores e armazenadores.

Basicamente, o projeto de um tanque com agitação e mistura envolve a determinação de variáveis como o consumo de potência, o tempo de mistura e a eficiência de transferência de calor e massa. O tipo de impulsor mecânico (axial ou radial) e o tipo de fluido (Newtoniano ou não-Newtoniano) impacta diretamente nas variáveis mencionadas e no custo do projeto.

Dentre as variáveis de projeto, o tempo de mistura é uma das mais significativas, pois indica a duração da operação de homogeneização. No entanto, a determinação do tempo de mistura depende de inúmeros parâmetros como: a) Geometria do tanque, b) Tipo de impulsor mecânico, c) Geometria das chicanas, d) Propriedades físicas das fases em agitação e mistura, e) Tipo de escoamento (laminar ou turbulento), f) Tipo de regime de processo (contínuo ou batelada) e g) Reologia dos líquidos, o que torna complexa a determinação de uma equação para a predição do tempo de mistura.

Segundo Paul, Atiemo-Obeng e Kresta (2004), o tempo de mistura pode ser determinado experimentalmente de forma qualitativa e quantitativa. Os métodos qualitativos envolvem mudança de cor e são denominados de análises colorimétricas. A mudança de cor pode ser ocasionada com reações ácido-base ou reações com iodo na presença de um indicador, geralmente, ficando incolor com a mudança de pH do meio em análise. Os equipamentos de análise no método colorimétrico são espectrofotômetros ou de forma robusta, apenas visual.

A determinação quantitativa do tempo de mistura pode ser feita com análise da mudança de temperatura adicionando um líquido com uma temperatura diferente do líquido em agitação, a utilização de um traçador radioativo ou a medida da condutividade elétrica. No entanto, todas essas análises devem ser feitas do modo menos invasivo possível, pois a colocação de sondas no leito em agitação, pode modificar o escoamento e, por consequência, fornecer medidas errôneas do tempo de mistura.

No contexto histórico, houve uma intensa produção de trabalhos científicos, visando determinar expressões a partir de dados experimentais para o cálculo do tempo de mistura, sendo que seu auge se deu entre os anos 70 e 80 do século XX.

Fox e Gex (1956) realizaram um estudo pioneiro na determinação experimental do tempo de mistura em tanques com agitação. Os autores empregaram tanques com diâmetro interno entre 0,3 metros e 4,2 metros, com chicanas e utilizaram como fluidos de processo, a água, glicerina e óleos vegetais, todos Newtonianos. O método empregado para a determinação do tempo de mistura foi o visual, através de uma reação de neutralização entre hidróxido de sódio e ácido clorídrico, no qual, inicialmente foi colocada fenolftaleína, de modo que a solução básica estava com a coloração rosa e, após adicionar o ácido, mediu-se o tempo para o meio ficar completamente incolor. Esse tempo de reação foi considerado o tempo de mistura. Na equação 1 está apresentada a expressão proposta por Fox e Gex para o cálculo do tempo de mistura para o impulsor axial tipo naval com 3 pás.

$$T_m = \frac{f_p \cdot H^{1/2} D_t}{(ND_a^2)^{2/3} g^{1/6}} \quad (1)$$

O fator tempo de mistura (f_p) presente na Equação 1 é determinado graficamente como função do número de Reynolds, a partir da Figura 1.

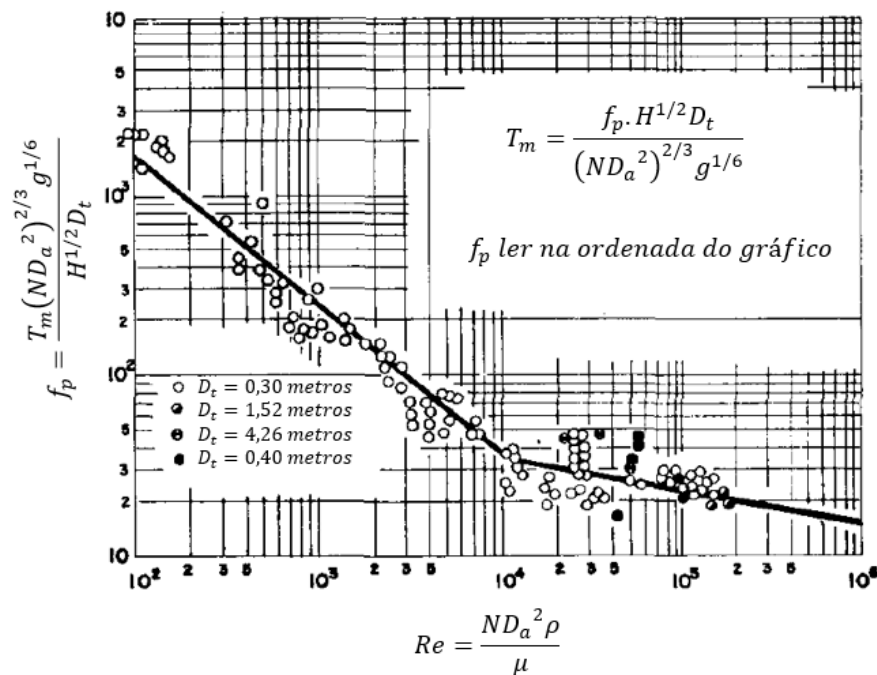


Figura 1 – Tempo de mistura para impulsor naval com 3 pás. (Adaptado de Fox e Gex, 1956)

Norwood e Metzner (1960) estudaram a influência do número de Reynolds no tempo de

mistura com a agitação promovida por um impulsor radial tipo turbina com 6 pás planas em tanques com chicanas e diâmetro interno entre 0,15 a 0,40 metros. Os fluidos empregados no processo foram líquidos newtonianos de baixa viscosidade. O tempo de mistura (Equação 2) foi determinado experimentalmente pelo método de neutralização ácido-base com o uso de um indicador de pH.

$$T_m = \frac{f_t H^{1/2} D_t^{3/2}}{(ND_a^2)^{2/3} g^{1/6} D_a^{1/2}} \quad (2)$$

O fator tempo de mistura (f_t) presente na Equação 2 é determinado graficamente como função do número de Reynolds (Figura 2).

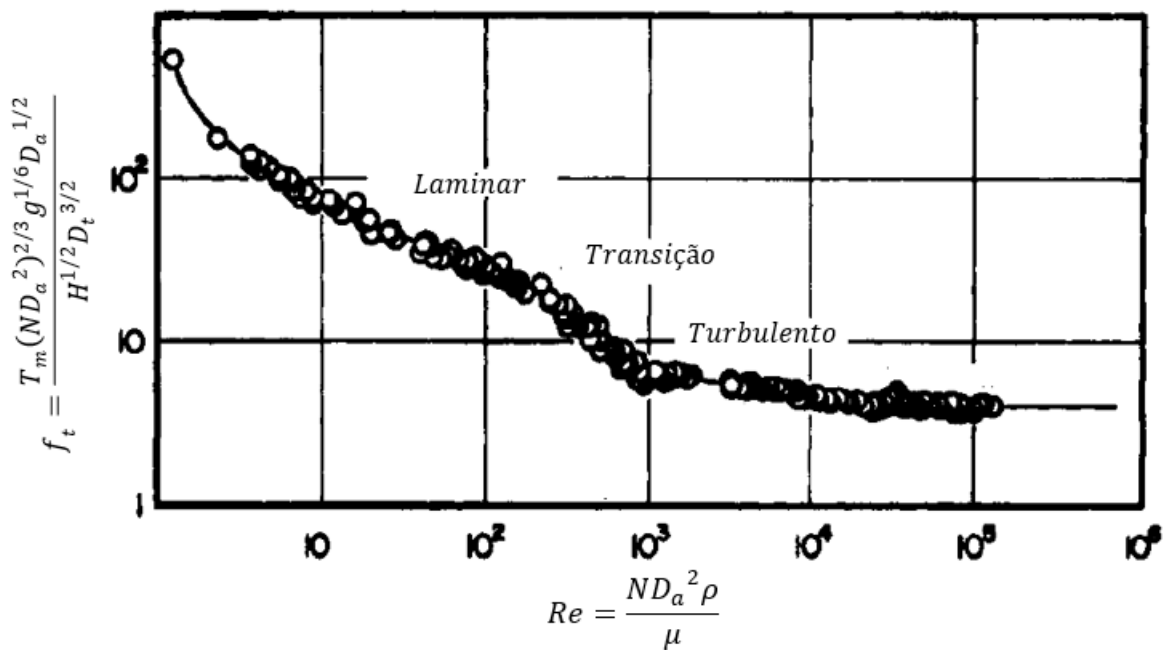


Figura 2 – Tempo de mistura para impulsor radial turbina com 6 pás planas. (Adaptado de Norwood e Metzner, 1960)

Fasano, Bakker e Penney (1994) realizaram um estudo para determinação do tempo de mistura na agitação de fluidos newtonianos com os seguintes impulsores mecânicos: a) axial de alta eficiência com 3 pás, b) Radial com 4 pás planas, c) Radial tipo turbina com 6 pás planas e d) axial com 4 pás inclinadas a 45°. Os tanques empregados continham chicanas. O método empregado para o cálculo do tempo de mistura foi baseado na escala de agitação, na qual o tempo de mistura ocorre quando 99% das fases estão com o mesmo grau de uniformidade.

Na Equação 3 tem-se a predição do tempo de mistura para a condição de 99% de uniformidade (T_{99}).

$$T_m = T_{99} = \frac{4,605}{aN\left(\frac{D_a}{D_t}\right)^b \left(\frac{D_t}{H}\right)^{0,5}} \quad (3)$$

A Equação 3 é válida para regime turbulento (Reynolds acima de 10000), com volume de líquido adicionado ao tanque sendo menor ou igual a 5% do líquido que já se encontra no processo previamente sob agitação. As constantes a e b da Equação 3 são funções do tipo de impulsor, as quais estão disponíveis na Tabela 1.

Tabela 1 – Constantes de taxa de mistura - Fasano, Bakker e Penney (1994)

Tipo de impulsor	a	b
Turbina radial de seis lâminas	1,06	2,17
Plana radial de quatro lâminas	1,01	2,30
Plana axial de quatro lâminas a 45°	0,641	2,19
Turbina de alta eficiência de três lâminas	0,272	1,67

Quando o líquido em agitação estiver com Reynolds entre 100 e 10000, o tempo de mistura calculado na Equação 3 deverá ser corrigido, pela Equação 4.

$$T_{99_{corr}} = T_{99} f_{Re} f_{\mu} f_{\Delta\rho} \quad (4)$$

Os parâmetros da Equação 4, f_{Re} , f_{μ} e $f_{\Delta\rho}$, são referentes a influência do número de Reynolds, influência da viscosidade e da massa específica no tempo de mistura. Na Figura 3 tem-se a curva para a obtenção do f_{Re} .

O parâmetro referente a correção da viscosidade (f_{μ}) é calculado em função da relação entre a viscosidade do líquido antes da adição do líquido (μ_0) pela viscosidade do líquido adicionado ao tanque (μ_a), conforme apresentado na Equação 5. Na Figura 4 está a curva do parâmetro (f_{μ}) em função da relação viscosa (μ^*). Para valores de Reynolds diferentes dos valores apresentados nas curvas, deverá ser realizada interpolação entre as curvas apresentadas.

$$\mu^* = \mu_0 / \mu_a \quad (5)$$

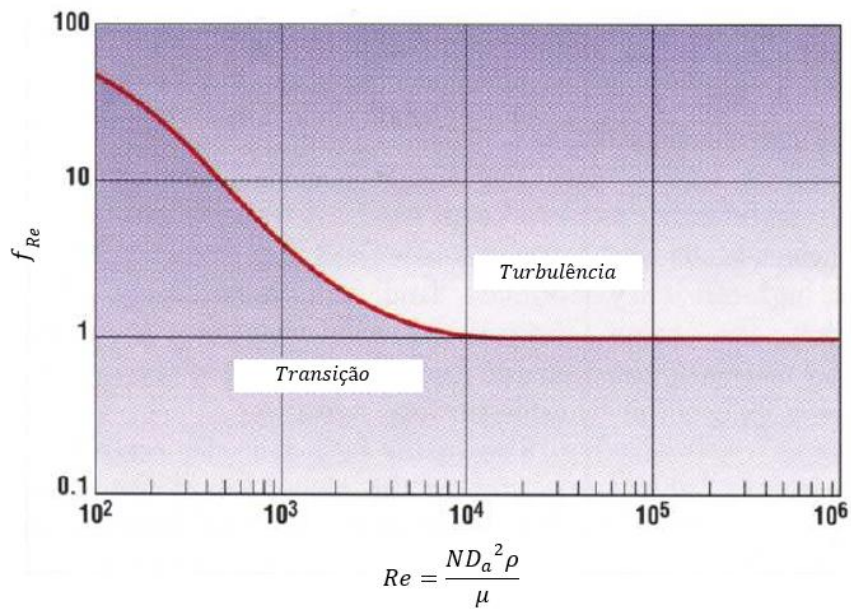


Figura 3 – Fator f_{Re} – adaptado de Fasano, Bakker e Penney (1994)

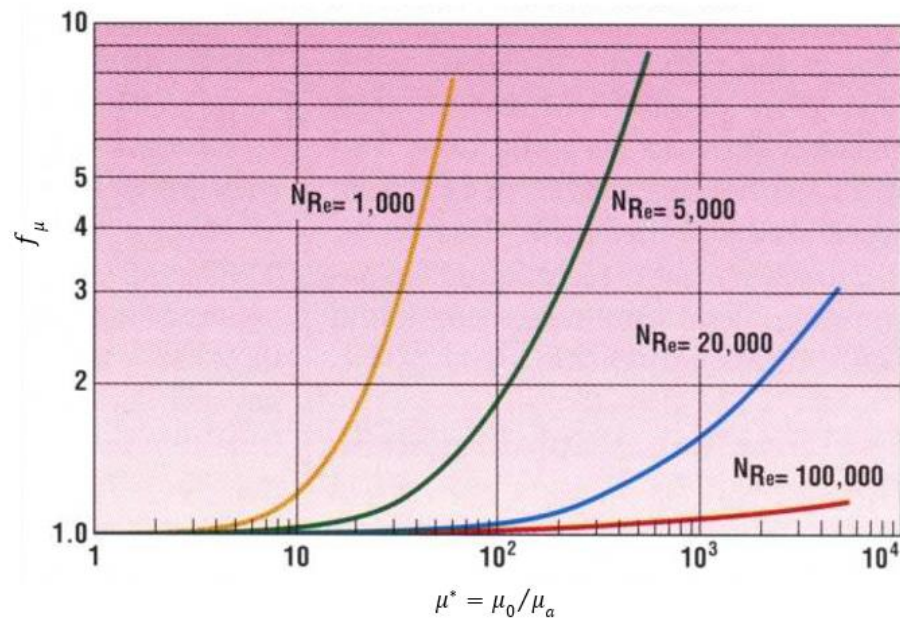


Figura 4 – Fator f_μ – adaptado de Fasano, Bakker e Penney (1994)

O parâmetro $f_{\Delta\rho}$, concernente à influência da massa específica, é calculado como função do número de Richardson (Ri), como ilustrado na Equação 6. Na Figura 5 está a curva do parâmetro ($f_{\Delta\rho}$) em função do número de Richardson.

$$Ri = \frac{\Delta\rho g H}{\rho_0 N^2 D_a^2} \quad (6)$$

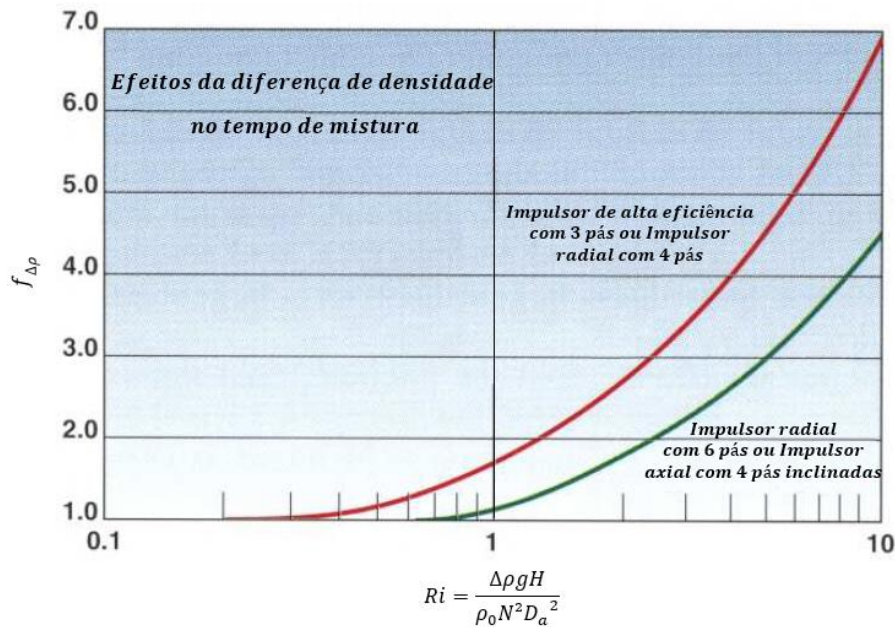


Figura 5 – Fator $f_{\Delta\rho}$ – adaptado de Fasano, Bakker e Penney (1994)

Rosseburg et. al. (2018) realizaram um estudo sobre a influência do tamanho de tanques industriais no tempo de mistura. Para tal, os autores empregaram um tanque com volume de 15 m³, todos contendo chicanas. O motor elétrico do tanque foi colocado na parte inferior do tanque, de modo, que o sistema mecânico era promovido de baixo para cima através de impulsor tipo turbina Rushton (6 pás planas) em multi-estágios. Na Equação 7 pode se observar uma relação entre o tempo de mistura e o número de Reynolds para o tanque com volume de 15 m³ com impulsor contendo duas turbinas Rushton, em um processo onde a relação do nível do líquido no tanque pelo diâmetro do mesmo, H/D_t , é de 2,4.

$$N \cdot T_M \sim Re^{0,41} \quad (7)$$

Autores como Nienow et. al. (1996) e Sieblist et. al. (2015) propuseram correlações para o cálculo do tempo de mistura em tanques na agitação de líquidos sem considerar o efeito da aeração, enquanto pesquisadores como Machon e Jahoda (2000), Shewale e Pandit (2006) e Montante e Paglianti (2015) avaliaram o efeito da presença de uma fase gasosa no tempo de mistura em tanques de pequena escala.

De modo geral, cada geometria de tanque, e de impulsor mecânico, presença de chicanas, tipo de líquido e quantidade de fases no sistema irá provocar um efeito distinto no tempo de mistura, o que torna os estudos apresentados na literatura particulares a cada condição experimental empregada.

1.1 Consumo de Potência

Outra forma de medição da performance do processo de mistura é através da medição da potência consumida no processo. A energia colocada no sistema através do trabalho de eixo é absorvida sob forma de fricção e tensões de cisalhamento viscoso e turbulento e liberada sob forma de calor residual. Estimar o consumo de energia é fundamental para o correto dimensionamento do sistema.

De acordo com Paul, Atiemo-Obeng e Cresta (2004), a potência consumida por um agitador pode ser obtida através da multiplicação do bombeamento e altura manométrica do impulsor e é definido conforme a Equação 8.

$$P = N_p \rho N^3 D_a^5 \quad (8)$$

Em que N_p é o número de potência e depende basicamente do tipo de impulsor e do número de Reynolds.

O número de potência N_p , é uma função da largura e comprimento da lâmina do impulsor, número de lâminas, ângulo de ataque, configuração das chicanas e altura do impulsor com relação ao piso do tanque. A Figura 6 apresenta as correlações entre o número de potência e Reynolds para vários tipos de impelidores. Podemos notar que para Reynolds menor que 100 (regime laminar), o consumo de potência e consequentemente a qualidade da mistura obtidas acabam se tornando extremamente pobres. Para estas condições, devem ser utilizados impulsores projetados para regime laminar.

1.2 Fatores de Forma

O projetista possui uma infinidade de possibilidades de arranjos para os diversos componentes de um tanque agitado, com relação as razões geométricas do tanque, aletas e demais acessórios estáticos e o impulsor, em função do tipo de fluido a ser agitado e o resultado esperado. Dessa forma, as correlações da figura 7 descrevem um ponto de partida para o desenvolvimento de sua proposta para um tanque de agitação. Estas correlações são também as que mais são utilizadas no campo de pesquisas dos fenômenos que envolvem agitação e mistura.

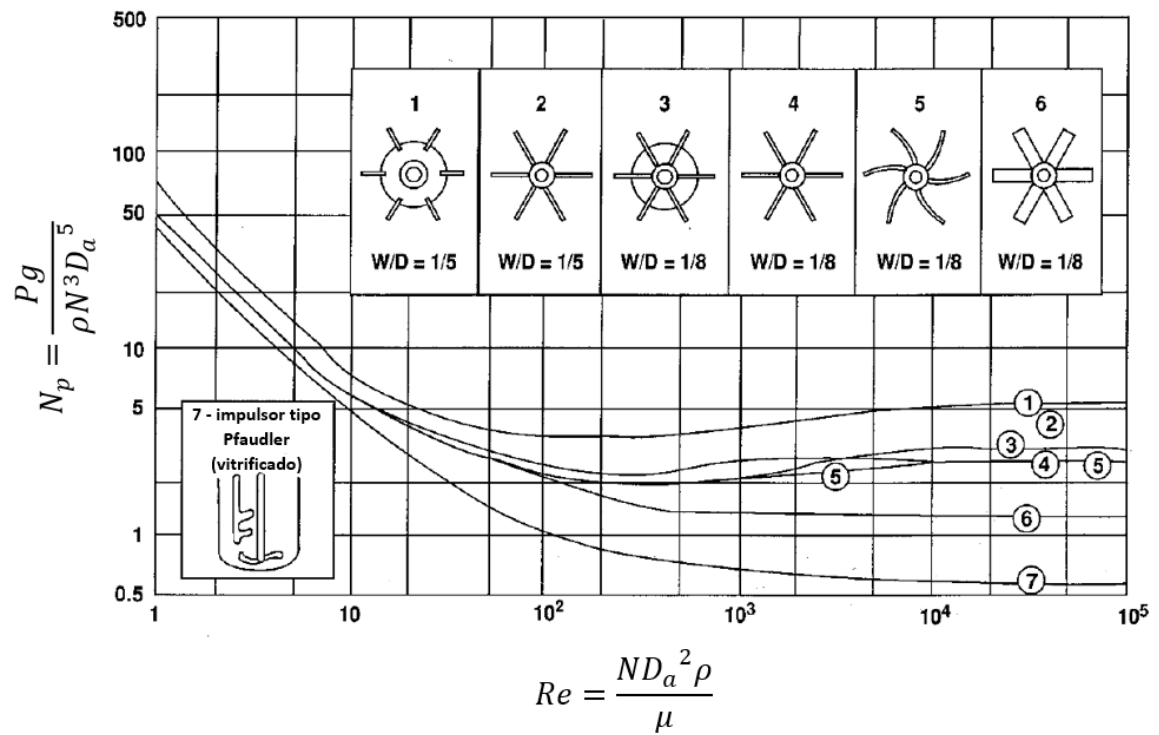


Figura 6 – Número de Potência em função do número de Reynolds para sete tipos de impulsores (Adaptado de Rushton et.al., 1950)

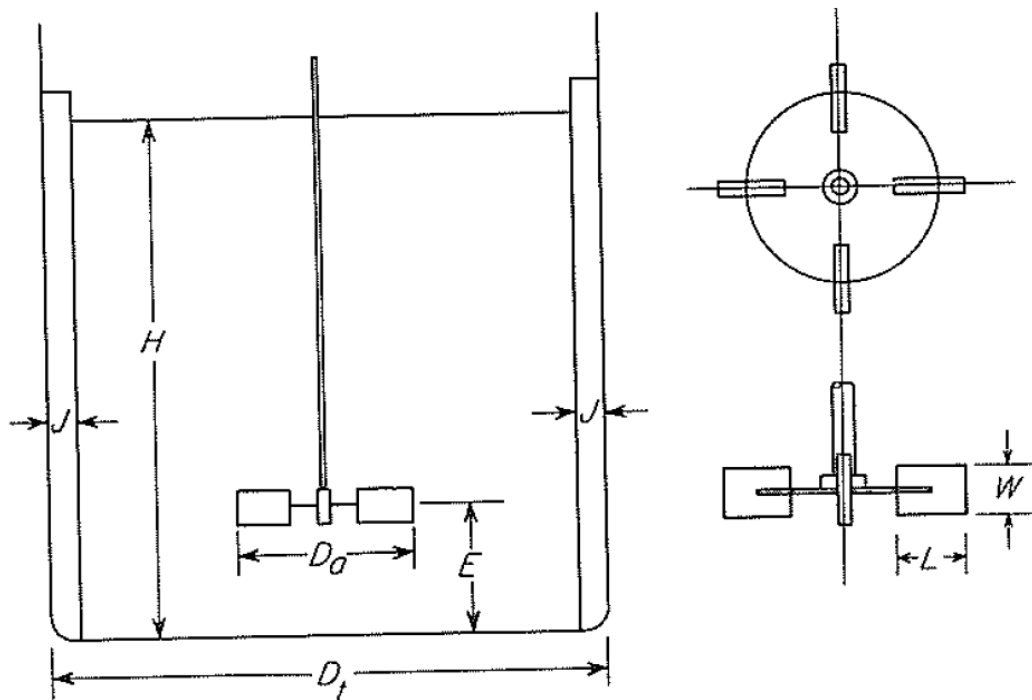


Figura 7 – Correlações para um tanque padrão (adaptado de McCabe, et.al., 1993)

As proporções normalmente utilizadas entre cada uma das dimensões listadas na figura 7 são apresentadas nas equações 9 a 14:

$$\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (9)$$

$$\frac{H}{D_t} = 1 \quad (10)$$

$$\frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad (11)$$

$$\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3} \quad (12)$$

$$\frac{W}{D_a} = \frac{1}{5} \quad (13)$$

$$\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4} \quad (14)$$

O número de chicanas normalmente são quatro e o número de aletas dos impulsores variam de 4 até 16, porém normalmente ficam entre 6 e 8 aletas. Em casos especiais, diferentes proporções podem ser adotadas tornando-se vantajosas, conforme cada caso.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O trabalho visou determinar experimentalmente o tempo de mistura e o consumo de potência na agitação de líquidos newtonianos em um tanque com volume de 10 litros equipado com impulsores do tipo axial e radial e com chicana modificada com orifícios.

2.2 Objetivos específicos

O presente estudo teve por objetivos específicos:

- a) Projetar e construir uma unidade experimental e desenvolver um método para estudar o tempo de mistura e a potência consumida na agitação de fluidos em tanques;

- b) Propor equações para o tempo de mistura e o consumo de potência em função do tipo de impulsor (axial com 4 pás inclinadas a 45° e radial tipo turbina Rushton com 6 pás planas) para uma chicana modificada;
- c) Avaliar o efeito do tipo de impulsor no tempo de mistura e consumo de potência;
- d) Fornecer ábacos que permitam avaliar de modo simultâneo o tempo de mistura e o consumo de potência em função do número de Reynolds;

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 Unidade experimental

A unidade experimental, localizada no laboratório de operações unitárias da Universidade Santa Cecília, consistiu basicamente de um tanque de acrílico com volume de 10 litros e um motor elétrico com potência de 2 hp em balanço sobre rolamentos, conforme apresentado na Figura 8.

Os periféricos da unidade experimental foram: a) um impulsor axial com 4 pás inclinadas a 45° (Figura 9a), b) um impulsor radial tipo turbina Rushton com 6 pás planas (Figura 9b), c) chicana modificada com orifícios (Figura 10), d) uma serpentina em espiral (Figura 11a) e e) um banho termostático (Figura 11b).

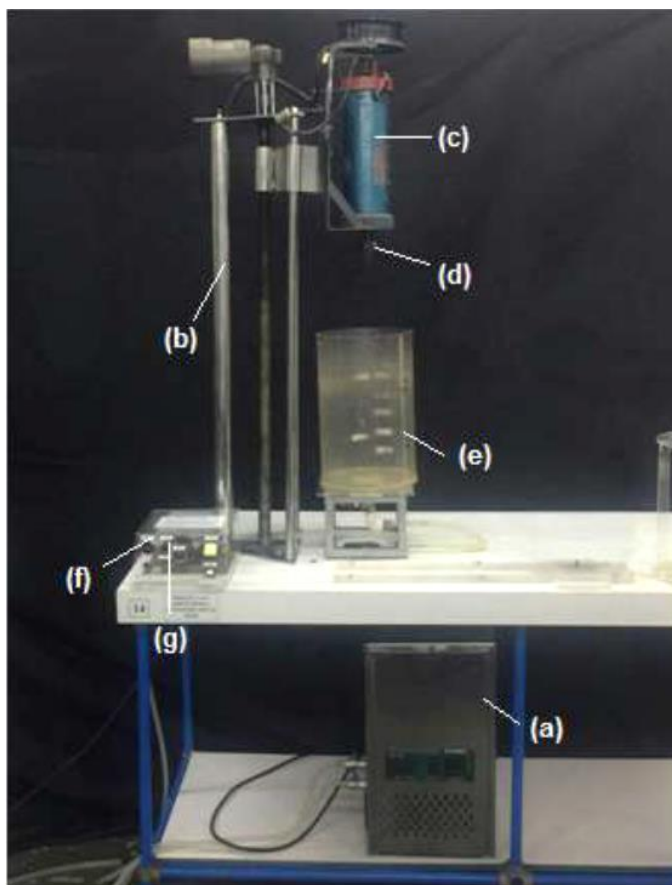


Figura 8 – Unidade experimental. (a) Banho termostático, (b) Suporte do motor elétrico, c) Motor elétrico sobre rolamentos com potência de 2 hp, d) Mandril para acoplamento do impulsor mecânico, e) Tanque de acrílico com volume útil de 10 litros, f) Potenciômetro para controle de rotação do impulsor mecânico, g) Botão liga/desliga da unidade



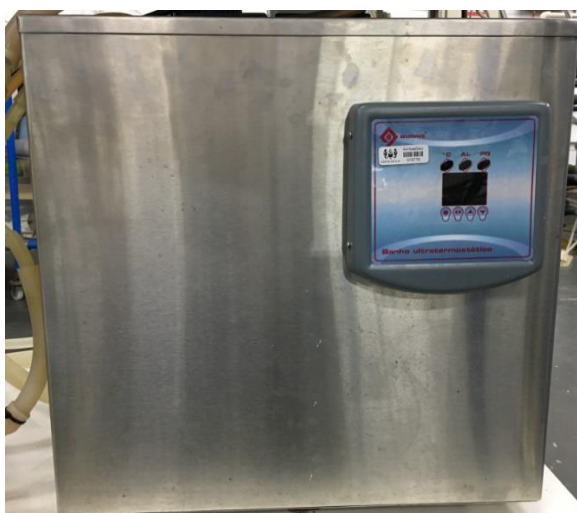
Figura 9 – (a) Impulsor axial com 4 pás, (b) Impulsor radial com 6 pás



Figura 10 – Chicana modificada com orifícios



(a)



(b)

Figura 11 – (a) Serpentina espiral, (b) Banho termostático

Apresenta-se na Figura 12 um fluxograma da unidade experimental. Os detalhes dimensionais dos impulsores mecânicos são fornecidos na Figura 13 e na Tabela 2 os valores das dimensões. Ressalta-se que todas as dimensões do tanque e dos seus periféricos empregados no trabalho foram baseadas nas dimensões padrões de Rushton, Costich e Everett (1950).

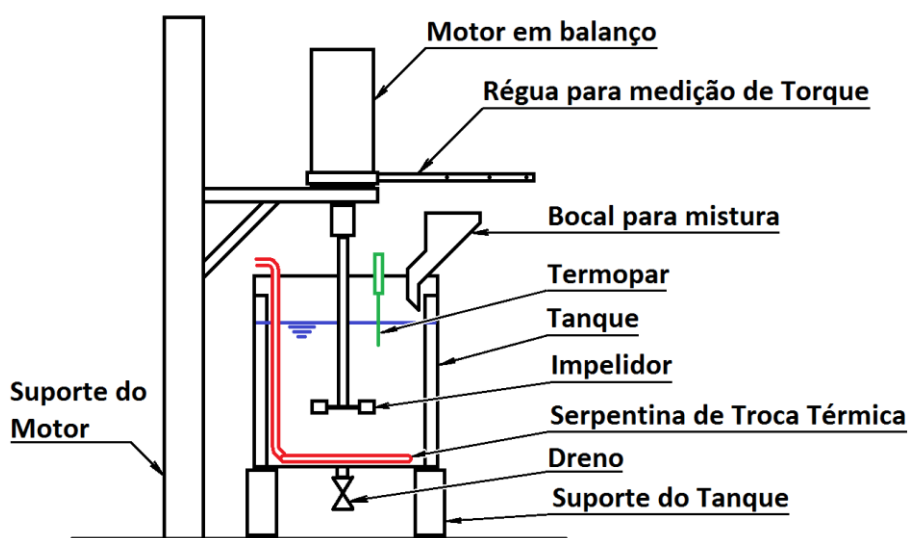


Figura 12 – Fluxograma da unidade experimental

Um esquema detalhado das dimensões do impulsor tipo turbina Rushton com 6 pás planas está disponibilizado na Figura 13 (a) e analogamente, na Figura 13 (b), para o impulsor axial com 4 pás inclinadas a 45° . De modo, que na Tabela 2 estão os valores das dimensões apresentadas nas figuras supracitadas.

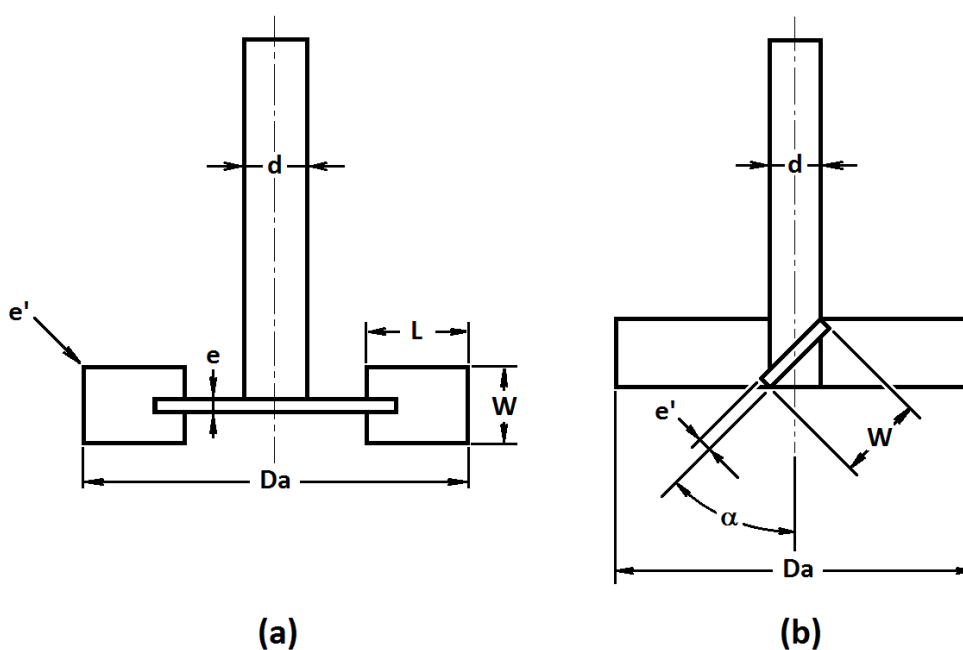


Figura 13 – (a) Impulsor radial tipo turbina Rushton com 6 pás planas, (b) Impulsor axial com 4 pás inclinadas a 45°

Tabela 2 – Valores das dimensões dos impulsores empregados no estudo

Dimensões	Impulsor radial	Impulsor axial
d (m)	0,0120	0,0120
Da (m)	0,0783	0,0780
L (m)	0,0195	-----
W (m)	0,0155	0,0220
e (m)	0,0012	-----
e' (m)	0,0012	0,0020
α (°)	-----	45

Na Figura 14 (a) mostra-se o esquema com as dimensões da chicana modificada com orifícios.

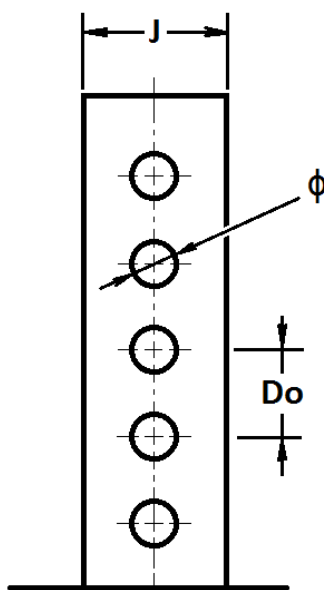


Figura 14 – Chicana modificada com 60 orifícios

A padronização do diâmetro dos orifícios (Equação 15), espaçamento entre os mesmos (Equação 16) e quantidade de orifícios em cada aleta da chicana (Equação 17) foram propostas pelas equações apresentadas por Lucindo et. al. (2018). Ressalta-se que no tanque foi utilizada uma chicana com quatro aletas, sendo que cada uma continha 15 orifícios, totalizando 60 na chicana modificada.

$$\phi = \frac{1}{3}J \quad (15)$$

$$D_0 = \frac{2}{3}J \quad (16)$$

$$N_0 = \frac{H}{2\Phi} \quad (17)$$

Na Tabela 3 estão expostos os valores das dimensões para a chicana modificada com orifícios e os valores do diâmetro do tanque e altura do nível de líquido.

Tabela 3 – Dimensões da chicana padrão, chicana modificada e tanque

Dimensão	Chicana modificada
Dt (m)	0,2349
H (m)	0,2349
J (m)	0,0235
Φ (m)	0,0078
D_0 (m)	0,0157
N_0 (adimensional)	15

3.2 Planejamento experimental

Utilizaram-se como líquidos de processo para a agitação no tanque, visando ampliar a faixa de Reynolds, água, solução de sacarose a 20 % em massa e solução de sacarose a 50 % em massa (Tabela 4) estão apresentadas as propriedades físicas relevantes ao estudo na temperatura de 20 °C.

Tabela 4 – Propriedades físicas dos líquidos de processo a 20°C (Coulson e Richardson, 1999)

Propriedade	Água	Sacarose 20 %	Sacarose 50 %
μ (Pa·s)	0,001002	0,001945	0,015431
ρ (kg/m ³)	998,2	1081,0	1229,5

Empregou-se rotações nos impulsos mecânicos entre 200 e 1000 rpm, devido a limites da unidade experimental. O planejamento experimental da presente dissertação pode ser visto na Tabela 5.

Tabela 5 – Planejamento experimental

Ensaio	Impulsor	Fluido	N (rpm)
1	Axial	Água	200
2	Axial	Água	400
3	Axial	Água	600
4	Axial	Água	800
5	Axial	Água	1000
6	Radial	Água	200
7	Radial	Água	400
8	Radial	Água	600
9	Radial	Água	800
10	Radial	Água	1000
11	Axial	Solução 20 %	200
12	Axial	Solução 20 %	400
13	Axial	Solução 20 %	600
14	Axial	Solução 20 %	800
15	Axial	Solução 20 %	1000
16	Radial	Solução 20 %	200
17	Radial	Solução 20 %	400
18	Radial	Solução 20 %	600
19	Radial	Solução 20 %	800
20	Radial	Solução 20 %	1000
21	Axial	Solução 50 %	200
22	Axial	Solução 50 %	400
23	Axial	Solução 50 %	600
24	Axial	Solução 50 %	800
25	Axial	Solução 50 %	1000
26	Radial	Solução 50 %	200
27	Radial	Solução 50 %	400
28	Radial	Solução 50 %	600
29	Radial	Solução 50 %	800
30	Radial	Solução 50 %	1000

3.3 Método

Inicialmente, escolhido o líquido de processo (baseado no planejamento experimental apresentado na Tabela 5), o mesmo foi acondicionado no tanque com um volume útil de 9 litros.

Posteriormente, foi acionado o banho termostático para que água à 20 °C, percorresse o interior da serpentina em espiral. Em cada ensaio foi ajustada uma rotação com o auxílio de um tacômetro digital. Simultaneamente, 5 % do volume do líquido no tanque foi segregado e aquecido até 90 °C (quando o líquido era a água) ou até 60 °C (com ambas as soluções de sacarose).

A técnica de mensuração do tempo de mistura empregada foi a da diferença de temperaturas através da adição de líquido quente em líquido frio. Com a amostra

correspondente a 5 % do volume na temperatura desejada, a mesma era despejada de uma única vez no tanque já em agitação pré-estabelecida, de modo que foi medida a variação de temperatura do leito através de um termopar acoplado na unidade (colocado na parte superior do tanque e imerso em 30 mm no leito líquido) e medido o tempo de variação da referida propriedade. Foi adotado que quando a temperatura não variasse mais em um intervalo superior a 3 segundos, essa temperatura de estabilização era a indicação para o tempo de mistura. Para a coleta dos dados cronológicos, montagem das curvas de temperatura em função do tempo e registro dos dados, foram filmados simultaneamente o cronômetro e indicador de temperatura durante o ensaio.

Visando cumprir um dos objetivos da presente dissertação, ou seja, o cálculo do consumo de potência, em cada experimento foram realizadas medições de torque em três pontos distintos num braço acoplado ao motor elétrico em balanço sobre rolamentos, distantes a 125 mm, 275 mm e 425 mm do eixo do motor.

Os torques foram calculados a partir das forças mensuradas em cada posição supracitada do braço através de um dinamômetro digital, de modo, que o consumo de potência pelo impulsor mecânico foi calculado pela Equação 18.

$$P = 2\pi BFN \quad (18)$$

Para tratamento dos dados e modelamento das equações que descrevem o tempo de mistura e potência consumida em função do Reynolds, os resultados foram separados em dois grupos distintos em função do tipo de impulsor (Axial ou Radial).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Modelos para o cálculo do tempo de mistura

Inicialmente, em cada ensaio realizado, foi observado graficamente a variação da temperatura com o tempo, visando verificar qual foi o tempo necessário para ocorrer a estabilização do sistema. Como exemplo, pode se observar a Figura 15 da curva da temperatura em função do tempo para o ensaio 30 (ver planejamento experimental no item 3.2). As demais figuras contendo a relação da temperatura em função do tempo para os outros ensaios estão apresentadas no Apêndice A.

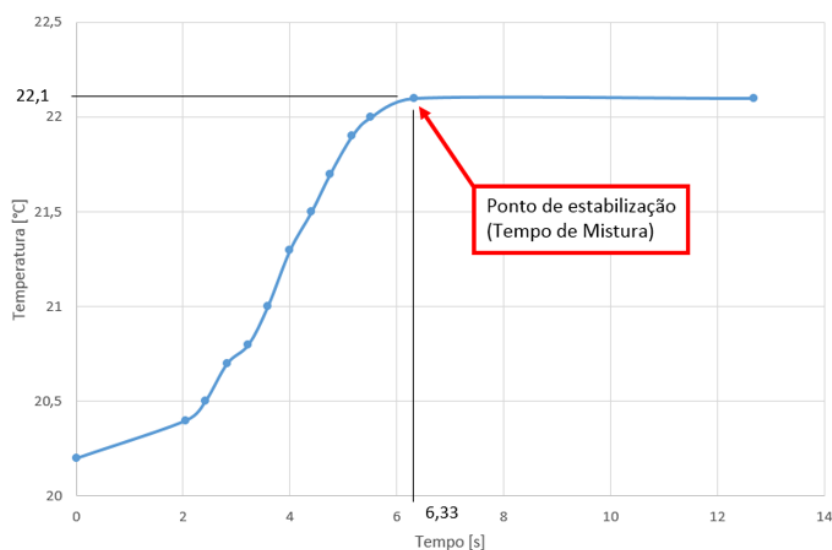


Figura 15 – Temperatura em função do tempo – Ensaio 30

Observou-se na Figura 15 que a curva de estabilização da temperatura em função do tempo segue o formato de uma “curva S”, de modo que o tempo de mistura é identificado como aquele em que a referida curva se torna constante. Os demais ensaios (Ver Apêndice A) apresentaram comportamento semelhante ao apresentado na Figura 15.

Na Tabela 6 estão disponibilizados os valores do tempo de mistura obtidos graficamente em cada experimento, bem como o número de Reynolds do impulsor (Equação 19) correspondente a cada ensaio.

$$Re = \frac{ND_a^2 \rho}{\mu} \quad (19)$$

Tabela 6 – Tempo de mistura obtidos experimentalmente e número de Reynolds

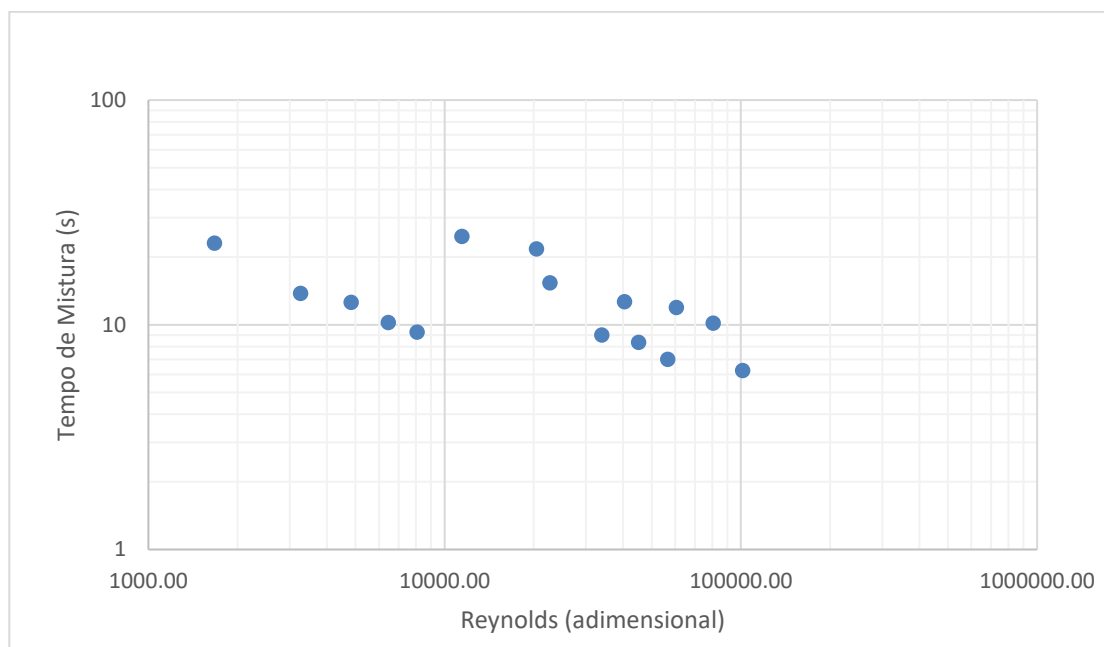
Ensaio	T _{est} (°C)	t _m (s)	Reynolds
1	22,6	21,77	20433,64
2	22,9	8,82	40584,86
3	23,1	11,93	60575,48
4	22,7	10,17	80727,00
5	23,1	6,25	101362,2
6	23,1	13,20	20312,73
7	22,7	10,05	40645,62
8	22,8	6,61	60736,69
9	23,2	7,86	81240,86
10	23,0	4,95	101261,4
11	21,4	24,70	11433,54
12	21,4	15,34	22670,34
13	22,0	9,00	33907,13

(continua)

Tabela 6 – Tempo de mistura obtidos experimentalmente e número de Reynolds (continuação)

14	21,7	8,35	45149,55
15	22,5	7,00	56605,58
16	20,6	13,33	11450,40
17	20,7	7,84	22687,20
18	20,6	5,95	34042,04
19	20,7	5,29	45267,60
20	20,6	7,57	56380,73
21	20,4	23,04	1670,542
22	21,4	13,77	3267,751
23	20,5	12,58	4844,008
24	21,0	10,23	6450,082
25	21,1	9,27	8082,748
26	22,4	11,96	1642,337
27	21,7	8,18	3244,381
28	21,7	6,01	4877,048
29	22,2	6,75	6474,257
30	22,1	6,33	8106,924

Visando verificar qual a tendência do tempo de mistura com o número de Reynolds, plotou-se na Figura 16 os resultados obtidos com o impulsor axial e na Figura 17 com o impulsor radial.

**Figura 16 – Tempo de mistura em função de Reynolds – impulsor axial**

Nota-se na Figura 16, que há a presença de dois fenômenos distintos: um com Reynolds entre 1500 e 10000 (zona de transição) e outro com Reynolds na faixa de 11000 a 100000. Esse

efeito ocorre devido a mudança do escoamento de transição para a plena turbulência, o que é comumente observado com outros parâmetros, como a potência consumida, em tanques com agitação e mistura.

É mister salientar que há dois “*outliers*” na Figura 16, referentes aos ensaios 1 e 11, os quais estão provocando um falso efeito de variação na zona constante do tempo de mistura no número de Reynolds. Desse modo, os modelos de regressão propostos serão obtidos sem esses dois pontos.

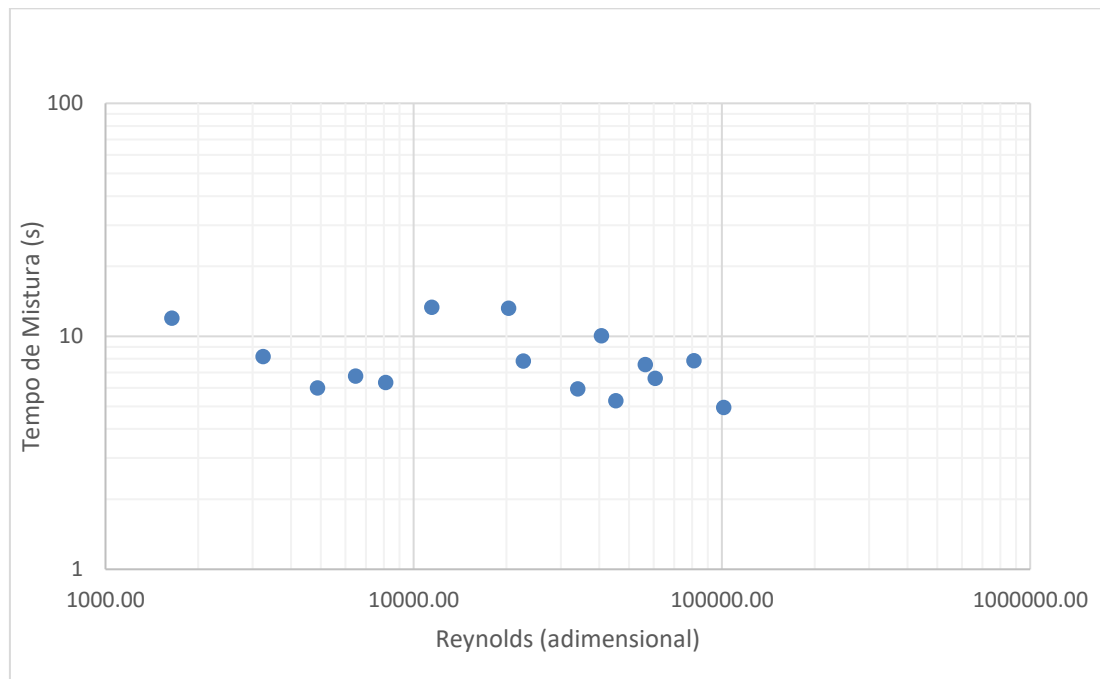


Figura 17 – Tempo de mistura em função de Reynolds – impulsor radial

Analogamente, na Figura 17, com o uso do impulsor radial, observou-se o mesmo comportamento do tempo de mistura com a agitação proveniente pelo impulsor axial (Figura 16).

Desse modo, é necessário propor uma equação para cada região de Reynolds observado, visto que há mudanças repentinas do fenômeno, podendo ser aproximado como uma descontinuidade.

Em ambos os impulsores, foi proposto um modelo não linear (Equação 20) para Reynolds no intervalo de 1500 a 10000.

$$T_m = \frac{K_1}{Re^{K_2}} \quad (20)$$

Os parâmetros K_1 e K_2 foram determinados por uma regressão não-linear realizada no

Excel 2016 em função do tipo de impulsor mecânico. Na Tabela 7 estão listados os valores dos supracitados parâmetros bem como coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust})

Tabela 7 – Variáveis K_1 , K_2 , R^2 e R^2_{ajust} para cada grupo

Impulsor	K_1	K_2	R^2	R^2_{ajust}
Axial	1447,46	0,56	0,975	0,967
Radial	232,11	0,41	0,851	0,801

Observa-se na Tabela 7 que os valores do coeficiente R^2 foram acima de 0,80 (o que é satisfatório) para ambos os impulsores empregados no estudo.

Comparou-se o valor do coeficiente R^2 com o coeficiente R^2_{ajust} (que leva em conta o erro da amostra) percebeu-se que não houve uma variação significativa entre eles, o que indica, que o modelo proposto na Equação 20 para o tempo de mistura, é adequado ao fenômeno, seguindo a tendência da nuvem de pontos.

Na Tabela 8 foi realizado o teste de significância dos parâmetros do modelo para as quatro condições empregadas.

Tabela 8 – Análise da significância dos parâmetros do modelo apresentado na Eq. 20

Grupo	Variável	t	p-value
Axial e CM	K_1	16,701	0,000467
	K_2	-10,836	0,001681
Radial e CM	K_1	6,5708	0,00717
	K_2	-4,1359	0,02565

Pode-se notar que na Tabela 8 todos os valores da estatística t de student (t) foram maiores em módulo que o valor da estatística p-value, o que significa que os parâmetros estimados na regressão não linear são significativos, e, portanto, devem ser considerados nos modelos.

As Equações 21 e 22 apresentam os modelos para o cálculo do tempo de mistura para uso do impulsor axial e impulsor radial, respectivamente. Ressaltando que ambos os modelos são válidos para Reynolds entre 1500 e 10000.

$$T_m = 1447,66/Re^{0,56} \quad (21)$$

$$T_m = 232,11/Re^{0,41} \quad (22)$$

Na região de plena turbulência (Reynolds acima de 10000), em relação ao impulsor axial, devido a retirada dos “*outliers*”, o modelo para essa faixa será proposto para valores de Reynolds entre 20000 e 100000. No caso do impulsor radial, a mudança do escoamento iniciou-se com Reynolds a partir de 11450.

Em ambos os casos, foi proposto um modelo não-linear semelhante ao da Equação 20, conforme apresentado na Equação 23.

$$T_m = \frac{K_3}{Re^{K_4}} \quad (23)$$

Os parâmetros da Equação 23 foram obtidos por regressão não-linear realizada no software Excel 2016.

Na Tabela 9 estão apresentados os valores dos parâmetros, dos coeficientes de determinação (R^2) e determinação ajustado (R^2_{ajust}).

Tabela 9 – Variáveis K3, K4, R^2 e R^2_{ajust} para cada grupo

Impulsor	K3	K4	R^2	R^2_{ajust}
Axial	829,32	0,41	0,42	0,32
Radial	424,97	0,38	0,53	0,47

Observa-se na Tabela 9 que os valores do coeficiente R^2 foram inferiores à 0,50, o que estatisticamente é insatisfatório.

No entanto, comparou-se o valor do coeficiente R^2 com o coeficiente R^2_{ajust} e percebeu-se que não houve uma variação expressiva entre eles, o que indica, que o modelo proposto na Equação 23 para o tempo de mistura, possui uma aderência aos dados observados no experimento.

Na prática, isso também ocorre devido a dispersão da nuvem de pontos entre o valor médio, provavelmente, provocado por pequenas flutuações no tempo de mistura nas maiores rotações.

Na Tabela 10 foi realizado o teste de significância dos parâmetros do modelo para as

quatro condições empregadas.

Tabela 10 – Análise da significância dos parâmetros do modelo apresentado na Eq. 23

Grupo	Variável	t	p-value
Axial e CM	K ₃	3,124	0,0205
	K ₄	-2,0703	0,08386
Radial e CM	K ₃	4,5394	0,0019
	K ₄	-3,0027	0,017

Observou-se na Tabela 10 que todos os valores da estatística t de student (t) foram maiores em módulo que o valor da estatística p-value, o que significa que os parâmetros estimados na regressão não linear são significativos, e, portanto, devem ser considerados nos modelos.

As Equações 24 e 25 apresentam os modelos para o cálculo do tempo de mistura para uso do impulsor axial e impulsor radial, respectivamente. Ressalta-se que a Equação 24 é válida para Reynolds entre 20000 e 100000, e a Equação 25, com Reynolds na faixa de 11500 a 100000.

$$T_m = 829,32/Re^{0,41} \quad (24)$$

$$T_m = 424,97/Re^{0,38} \quad (25)$$

Na Figura 18 está apresentado os modelos obtidos para predição do tempo de mistura com o impulsor axial e a comparação com os dados experimentais. Analogamente, na Figura 19, as mesmas plotagens, porém com o impulsor radial.

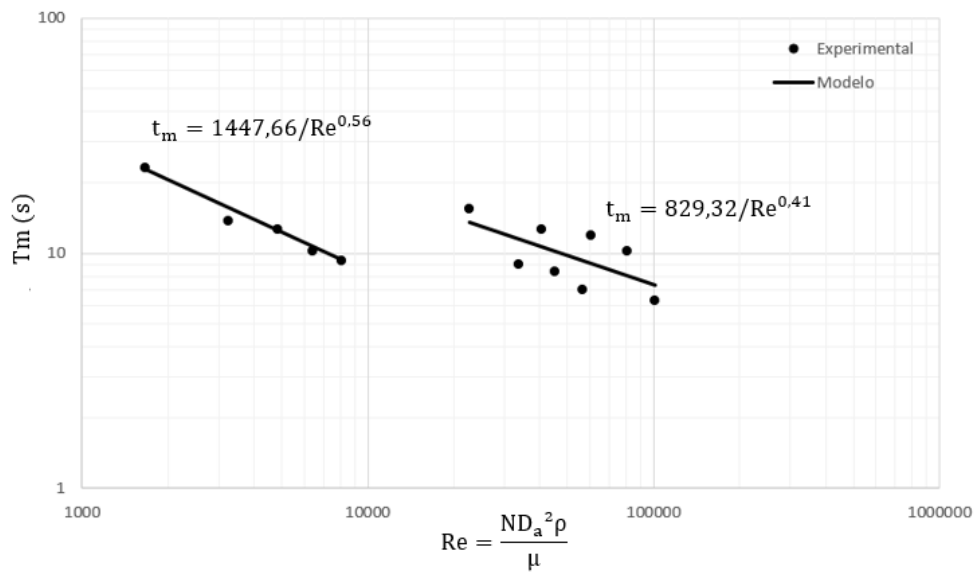


Figura 18 – Modelos- impulsor axial

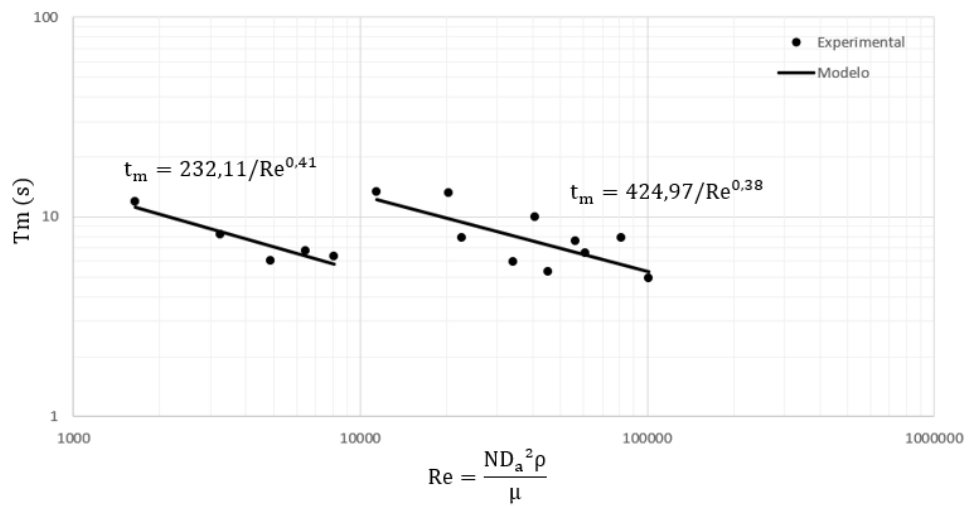


Figura 19 – Modelos- impulsor axial

4.2 Análise do tipo de impulsor no tempo de mistura

Com os modelos para o tempo de mistura apresentados nas Equações 21 e 22, na região de transição e nas Equações 24 e 25, na turbulência, comparou-se o efeito do tipo de impulsor no tempo de mistura (Figura 20).

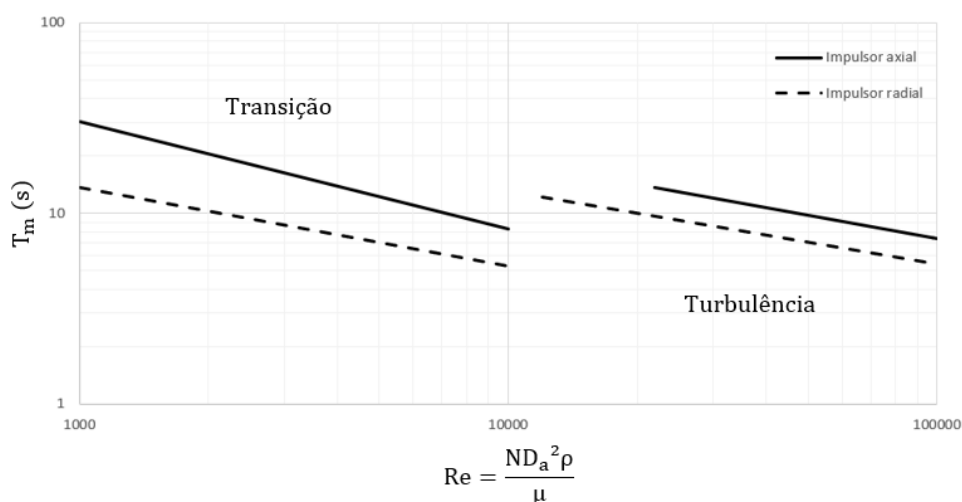


Figura 20 – Comparação do tempo de mistura entre os impulsos axial e radial

Observou-se que em ambas regiões para o escoamento, os menores tempo de mistura foram alcançados com o emprego do impulsor radial. Isso ocorre, pois este tipo de impulsor tem como característica promover elevada turbulência durante a agitação.

Visando levantar a diferença em termos quantitativos, arbitrou-se um Reynolds na região de transição com um valor de 4000 e na região turbulenta, um Reynolds com valor de 40000 para o cálculo do tempo de mistura. Os resultados estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Comparação quantitativa para o tempo de mistura entre os impulsos axial e radial

Reynolds	T_m (s) - Impulsor axial	T_m (s) - Impulsor radial	Desvio (%)
4000 (transição)	14	8	42,8
40000 (turbulência)	11	7,5	31,8

O emprego do impulsor radial na região de transição fornece um tempo de mistura, em média, 42,8% menor quando comparado com o impulsor axial. Analogamente, na região turbulenta, o impulsor radial continua sendo favorável com uma diminuição de 31,8% do tempo de mistura.

4.3 Modelos para a potência consumida pelo impulsor mecânico

Com as forças coletadas em cada distância no braço acoplado ao motor elétrico do tanque, foi possível calcular o consumo de potência pelo impulsor mecânico em cada experimento.

A partir da potência consumida, calculou-se o número de potência (Equação 26), o qual é função do número de Reynolds (Equação 19), relativo ao escoamento.

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_a^5} \quad (26)$$

As curvas geradas do número de potência em função do número de Reynolds apresentaram descolamento dos valores, como pode ser visto na figura 21, o qual impede o modelamento através de regressão linear. A fim de promover a aderência dos dados, foi feita a correção do N_p através da viscosidade relativa (μ_{rel}) entre o líquido de teste e um líquido de referência, conforme a equação 27. Para líquido de referência foi utilizada a água ($\mu_{ref} = \mu_{água} = 0,001002 \text{ Pa}\cdot\text{s}$). Os valores de viscosidade relativa utilizados encontram-se na tabela 12 e a figura 22 apresenta os dados de N_p da figura 21 corrigidos por μ_{rel} .

$$\mu_{rel} = \frac{\mu}{\mu_{ref}} \quad (27)$$

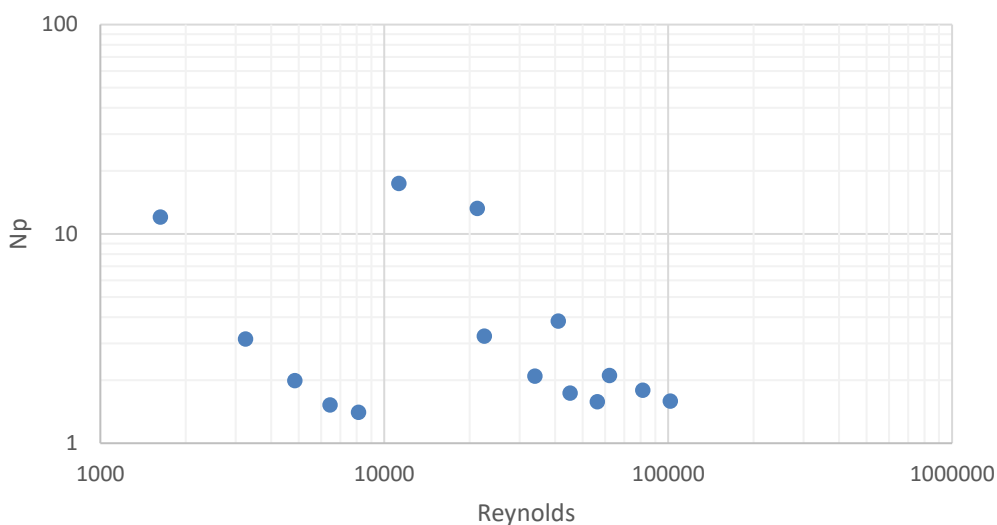


Figura 21 – Número de Potência em função do número de Reynolds para o Impulsor Axial.

Tabela 12 – Viscosidade relativa para os fluidos ensaiados

Fluido	μ_{rel} (adimensional)
Água	1,00000
Solução 20%	1,94112
Solução 50%	15,4002

Na Tabela 13 estão apresentados os valores do número de potência, número de potência

corrigido e número de Reynolds para todos os ensaios.

Tabela 13 – Números de potência, potência corrigido e Reynolds para todos os ensaios

Ensaio	N_p	$N_p * \mu_{rel}$	Reynolds
1	13,2564	13,2564	21300,16
2	3,8351	3,8351	41048,65
3	2,1112	2,1112	62167,45
4	1,7907	1,7907	81502,83
5	1,5933	1,5933	101865,9
6	18,8641	18,8641	20635,16
7	7,7483	7,7483	41230,01
8	6,6428	6,6428	61673,73
9	6,1135	6,1135	81059,50
10	5,3793	5,3793	101261,4
11	17,4337	33,8401	11270,52
12	3,2541	6,3166	22529,81
13	2,0942	4,0651	33980,21
14	1,7394	3,3763	45160,80
15	1,5790	3,0651	56268,30
16	17,4536	33,8795	11624,66
17	7,1419	13,8633	22681,58
18	6,4439	12,5084	33940,86
19	5,5965	10,8634	45245,11
20	4,9416	9,5922	56605,58
21	12,0626	185,7670	1627,832
22	3,1510	48,5259	3250,022
23	1,9956	30,7333	4839,979
24	1,5242	23,4735	6453,305
25	1,4077	21,6784	8114,983
26	15,1810	233,7906	1643,143
27	6,3762	98,1945	3222,623
28	5,4487	83,9117	4848,037
29	5,2558	80,9400	6462,169
30	5,0209	77,3230	8114,983

Tradicionalmente, o número de potência é proposto a partir de um modelo semi-empírico como função do número de Reynolds, conforme apresentado na Equação 28.

$$N_p = \frac{K_5 Re^{K_6}}{\mu_{rel}} \quad (28)$$

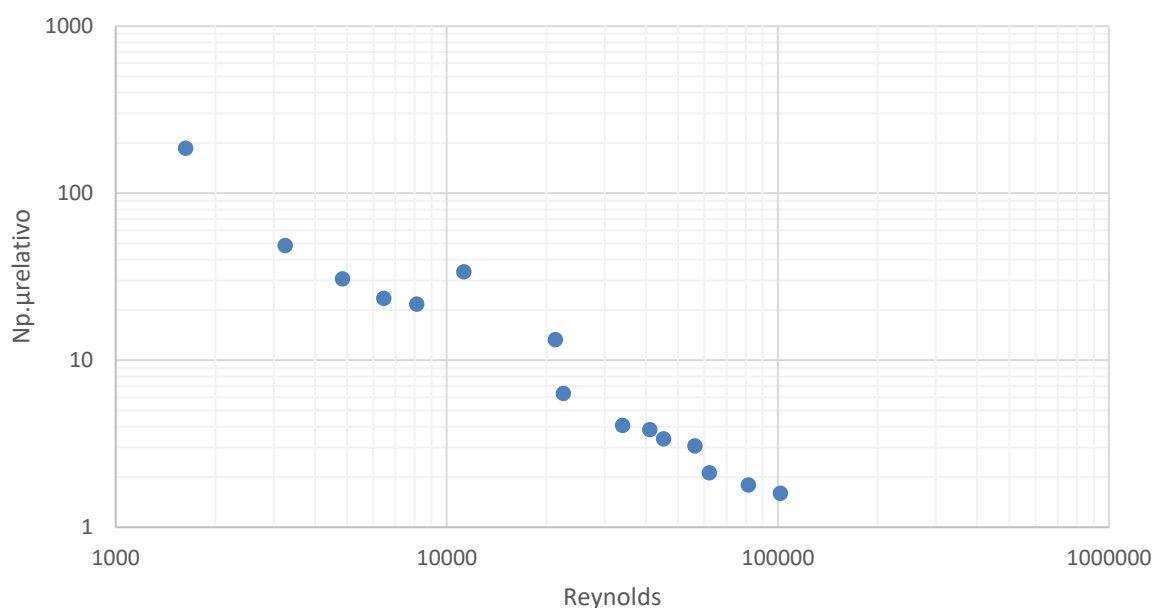


Figura 22 – Número de Potência Corrigido pela viscosidade relativa

A constante e os expoentes da Equação 28 foram obtidos a partir de regressão múltipla não-linear, através do software Excel 2016, de modo, que os mesmos são função do tipo de impulsor mecânico.

Na Tabela 14, estão apresentados os valores dos parâmetros da Equação 28, bem como os valores do coeficiente de determinação e do coeficiente de determinação ajustado para as duas configurações de geometria empregado no estudo.

Tabela 14 – Parâmetros da equação 28

Grupo	K ₅	K ₆	R ²	R ² ajust
Axial e CM	476270	-1,1007	0,957	0,954
Radial e CM	274088	-0,9543	0,971	0,969

A partir dos resultados apresentados na Tabela 14, verificou-se que o modelo apresentado na Equação 28 possui uma excelente aderência aos dados obtidos experimentalmente, visto o valor elevado do coeficiente de determinação (R^2) e a pouca variação entre o mesmo e o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}).

Na Tabela 15 está apresentada a análise estatística da significância dos parâmetros estimados para a Equação 28 em todos os casos.

Tabela 15 – Análise da significância dos parâmetros do modelo apresentado na Eq. 28

Grupo	Variável	t	p-value
Axial e CM	K ₅	20,424	2,914E-11
	K ₆	-17,056	2,804E-10
Radial e CM	K ₅	27,795	5,779E-13
	K ₆	-21,012	2,035E-11

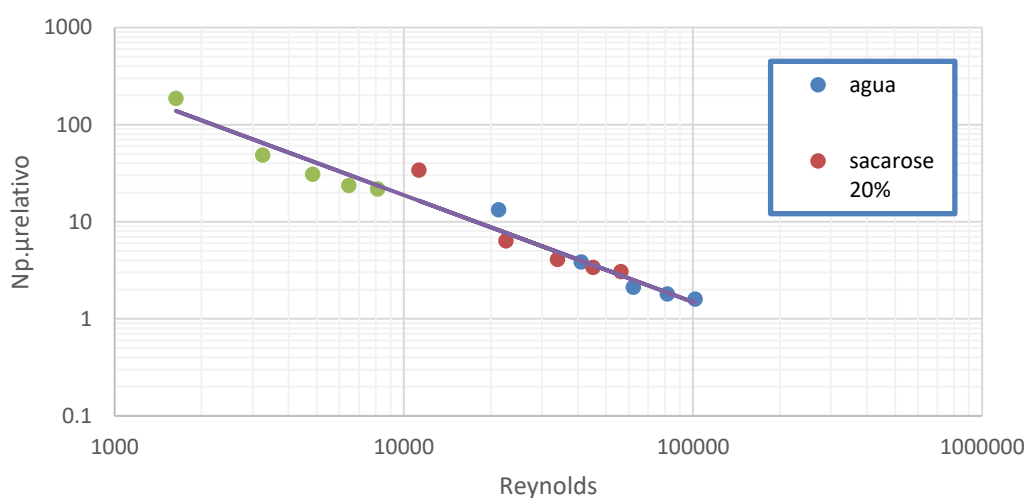
Analisando a tabela 15 todos os parâmetros possuíram a estatística t de student em módulo maior que a estatística p-value, indicando que os parâmetros são significativos.

Na equação 29 está apresentado o modelo para o cálculo do número de potência com o impulsor axial e chicana modificada e na Equação 30 para o impulsor radial e chicana modificada.

$$N_p = \frac{476270 Re^{-1,1007}}{\mu_{rel}} \quad (29)$$

$$N_p = \frac{274088 Re^{-0,9543}}{\mu_{rel}} \quad (30)$$

Na Figura 23 está apresentado o gráfico da relação número de potência corrigido pela viscosidade relativa ($N_p \cdot \mu_{rel}$) em função do número de Reynolds com os dados experimentais e com os previstos pelo modelo para o impulsor axial e a chicana modificada. Analogamente, na Figura 24 para o impulsor axial e a chicana padrão.

Figura 23 – Relação ($N_p \cdot \mu_{rel}$) em função de Reynolds – Impulsor axial e chicana modificada

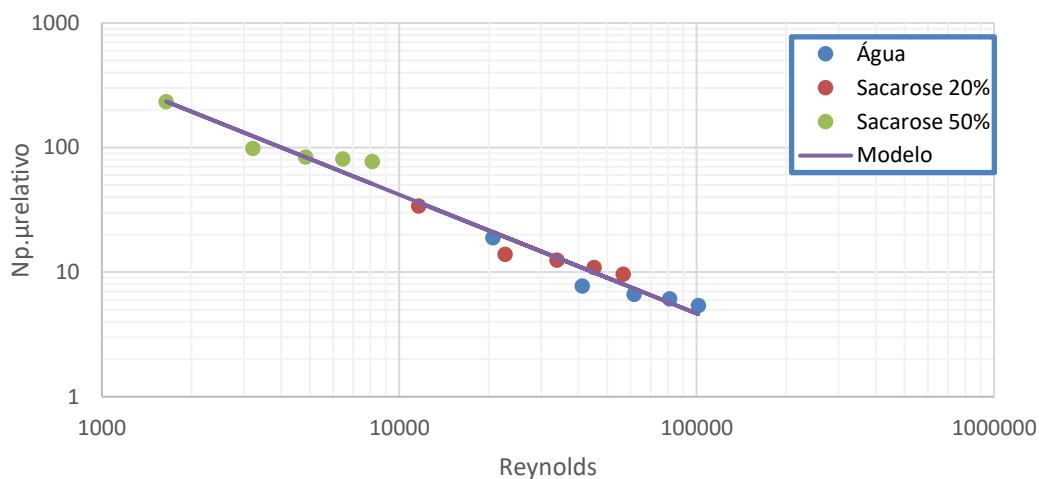


Figura 24 – Relação ($N_p \cdot \mu_{rel}$) em função de Reynolds – Impulsor radial e chicana modificada

4.4 Análise do efeito do tipo de impulsor no consumo de potência

Com os modelos obtidos nas Equações 29 e 30 foi possível avaliar o efeito do tipo de impulsor mecânico no consumo de potência (Figura 25).

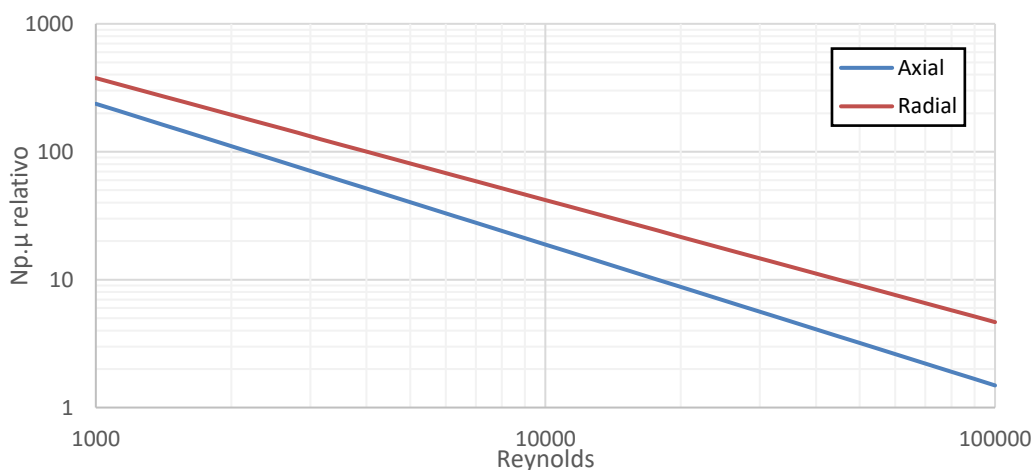


Figura 25 – Efeito do tipo de impulsor no consumo de potência com a chicana modificada

Ao avaliar a Figura 25, observou-se que o consumo de potência foi de 2 a 3 vezes maior com o impulsor radial quando comparado com o impulsor axial, em relação ao número de Reynolds. Esse resultado já era esperado, uma vez que o impulsor radial, devido a sua geometria desfavorável, necessita de um consumo energético elevado para promover a agitação.

4.5 Análise simultânea do tempo de mistura e do consumo de potência pelo impulsor mecânico

Em termos de projeto, verificou-se que a chicana modificada com o impulsor radial fornece o menor tempo de mistura, ou seja, uma homogeneização mais rápida quando comparado com o impulsor axial. No entanto, o consumo de potência com o impulsor radial é em torno de 2 x maior que em relação ao impulsor axial, o que torna os resultados inversamente proporcionais entre si.

No quesito tipo de impulsor mecânico, se o processo demandar um tempo de mistura inferior a 10 segundos e requerer uma turbulência elevada, é interessante projetar um tanque com a chicana modificada e com o impulsor radial tipo turbina. Mas se o processo não demandar uma intensa turbulência, do ponto de vista econômico, o impulsor radial deve ser substituído pelo impulsor axial.

Visando fornecer uma fácil visualização da variação do tempo de mistura e do número de potência em relação ao número de Reynolds, o autor do presente texto fornece as equações apresentadas nas seções 4.3 e 4.4 na forma de ábaco. Na Figura 26 está o ábaco para a agitação promovida com o impulsor axial com a chicana modificada e na Figura 27 para o impulsor radial com a chicana modificada.

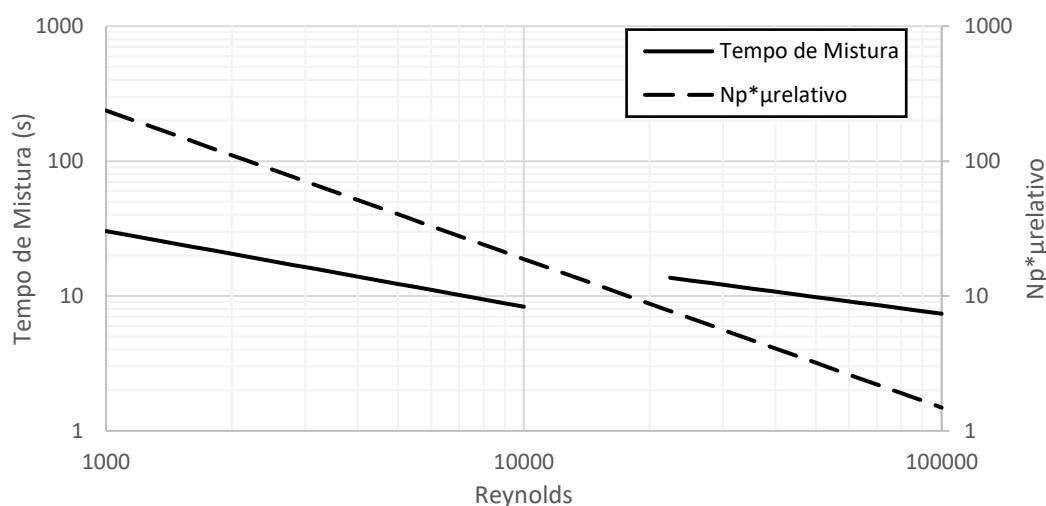


Figura 26 – Ábaco: impulsor axial e chicana modificada

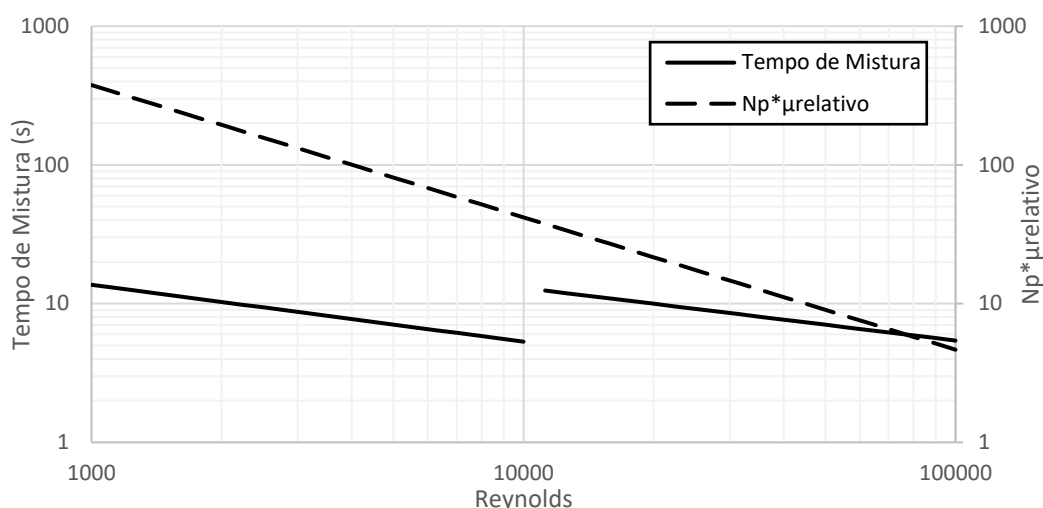


Figura 27 – Ábaco: impulsor radial e chicana modificada

A utilização do ábaco deve ser executada do seguinte modo:

- Inicialmente para uma rotação especificada calcula-se o número de Reynolds;
- Com o número de Reynolds encontra-se a curva cheia e o tempo de mistura é lido na ordenada da esquerda;
- Repetindo o passo b, porém encontrando a curva laranja, lê-se o produto do número de potência pela viscosidade relativa na ordenada da direita.

Desse modo, o estudante ou engenheiro ou pesquisador, pode avaliar de forma simultânea a quantidade de potência que o motor irá requerer para atender o tempo de mistura calculado.

5 CONCLUSÕES

O presente estudo permitiu concluir que:

- Os modelos determinados para o cálculo do tempo de mistura obtiveram um coeficiente de determinação alto, sendo capazes de descrever com boa aproximação a tendência do fenômeno observado, sendo válidos para Reynolds entre 1500 e 100000;
- Os menores valores do tempo de mistura foram encontrados com o uso do impulsor radial;

- c) Em relação ao consumo de potência, os modelos do número de potência em função do número de Reynolds, corrigidos pela viscosidade relativa possuíram um excelente ajuste aos dados observados experimentalmente, possuindo a mesma validade de Reynolds que os modelos para o tempo de mistura;
- d) O impulsor axial apresenta um consumo de potência cerca de 2 a 3 vezes menor que o impulsor radial para um número de Reynolds predefinido;
- e) Analisando de forma simultânea o tempo de mistura e o consumo de potência, recomenda-se para processos que requerem tempos abaixo de 10 segundos e elevada turbulência a utilização do impulsor radial. Se não houver necessidade de uma intensa turbulência, o impulsor radial deve ser substituído pelo impulsor axial, priorizando assim o baixo consumo de energia;

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Sugere-se para continuidade do estudo:

- a) Realizar experimentos em um tanque com volume útil de 50 litros e 1000 litros mantendo-se as condições experimentais, a fim de realizar o scale-up;
- b) Avaliar o tempo de mistura com o emprego de líquidos não-newtonianos;
- c) Verificar outros métodos de predição do tempo de mistura (concentração e condutividade elétrica) a fim de validar o método descrito no presente texto;
- d) Realizar estudos comparativos de tempo de mistura e consumo de potência com o uso de chicana padrão e chicana modificada.

7 REFERÊNCIAS

PAUL, E. L., E ATIEMO-OBENG, S. M., **Handbook of mixing**, 1ª Ed., Wiley-Interscience, 2004;

RUSHTON, J. H.; COSTICH, E. W.; EVERETT, H. J. **Power characteristics of mixing impellers**. Chemical Engineering Progress, 46 (8), p. 395-404, 1950;

FOX, E. A., GEX, V. E., **Single-phase blending of liquids**, Aiche Journal, 2 (4), p.539-544,

1956;

NORWOOD, K. W., METZNER, A. B., **Flow patterns and mixing rates in agitated vessels**, Aiche Journal, 6 (3), p. 432-437, 1960;

FASANO, J. B., BAKKER, A., PENNEY, W. R., **Advanced impeller geometry boosts liquid agitation**, Chemical Engineering, 7 pages, 1994;

ROSSEBURG, A., FITSCHEN, J., WUTZ, J., WUCHERPFENNIG, T., SCHLÜTER, M., **Hydrodynamics inhomogeneities in large scale stirred tanks – Influence on mixing time**, Chemical Engineering Science, 188, p.208-220, 2018;

NIENOW, A. W., LANGHEINRICH, C., STEVENSON, N. C., EMERY, A. N., CLAYTON, T. M., SLATER, N. K., **Homogenisation and oxygen transfer rates in large agitated and sparged animal cell bioreactors: some implications for growth and production**, Cytotechnology, 22, p. 87-94, 1996;

SIEBLIST, C., JENZSCH, M., POHLSCHEIDT, M., **Equipment characterization to mitigate risks during transfers of cell culture manufacturing processes**, Cytotechnology, 68 (4), p. 1381-1401, 2016;

MACHON, V., JAHODA, M., **Liquid homogenization in aerated multi-impeller stirred vessel**, Chemical Engineering Technology, 23 (10), p.869-870, 2000;

SHEWALE, S. D., PANDIT, A. B., **Studies in multiple impeller agitated gas-liquid contactors**, Chemical Engineering Science, 61 (2), p.489-504, 2006;

MONTANTE, G., PAGLIANTI, A., **Gas hold-up distribution and mixing time in gas-liquids stirred tanks**, Chemical Engineering Journal, 279, p. 648-658, 2015;

McCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOTT, P., **Unit Operations of Chemical Engineering** 5th.ed. Singapore, McGraw-Hill, 1993;

LUCINDO, M. A. A., SANTOS, B. D., PITTA, F. S., SILVA, J. S., SANTANA, M. C., LIMA, K. S., MORAES JÚNIOR, D., ROSA, V. S., **Tempo de mistura em tanques com impulsores mecânicos com chicana padrão e chicana modificada**, Congresso Nacional de Estudantes em Engenharia Mecânica (CREEM), Brasília, 2018;

APÊNDICES

Apêndice A – Gráficos da temperatura do líquido em agitação ao longo do tempo

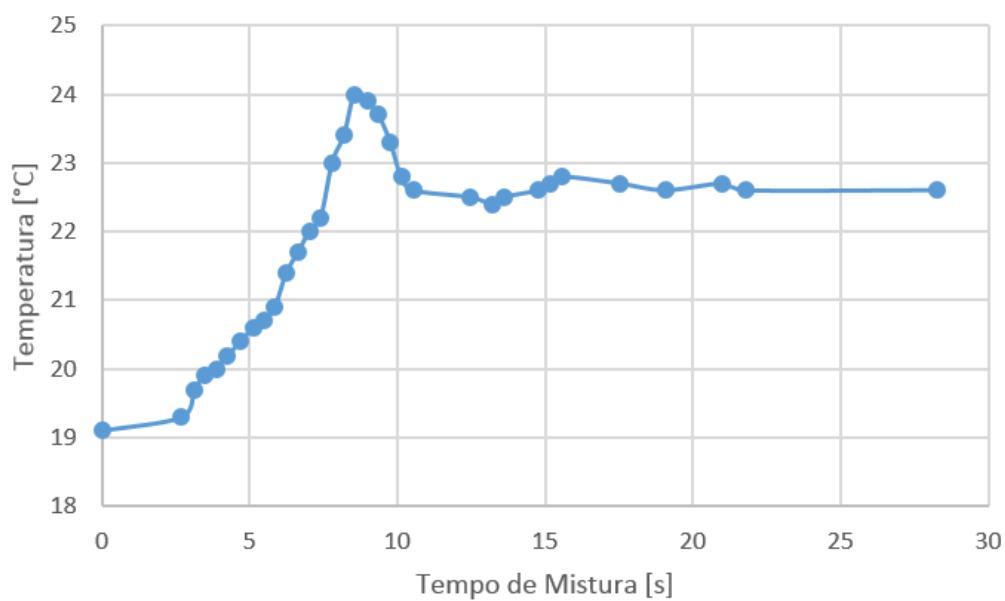


Figura A-1 – Ensaio 1, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Água, 200 RPM

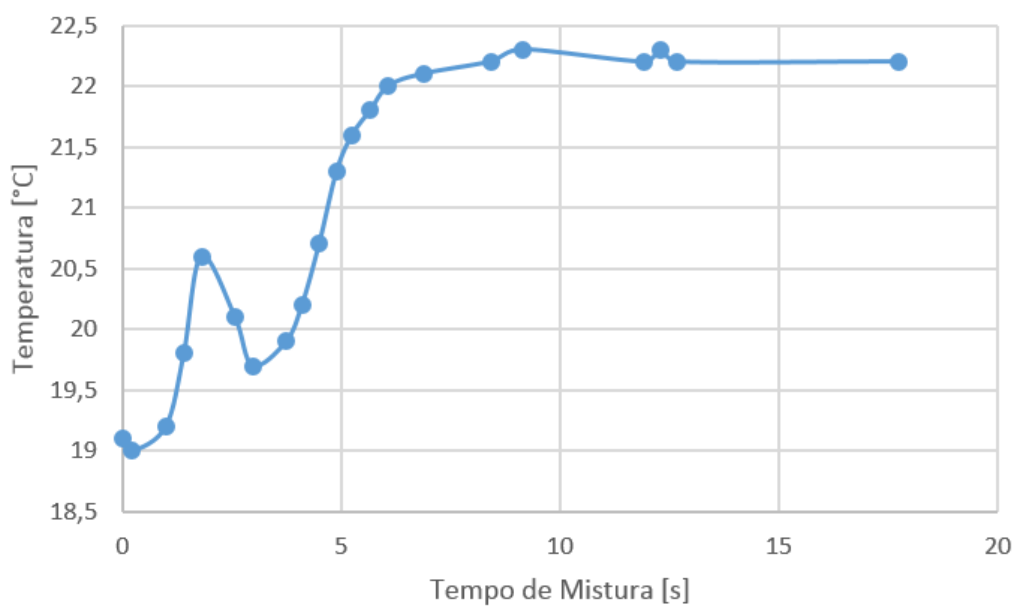


Figura A-2 – Ensaio 2, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Água, 400 RPM

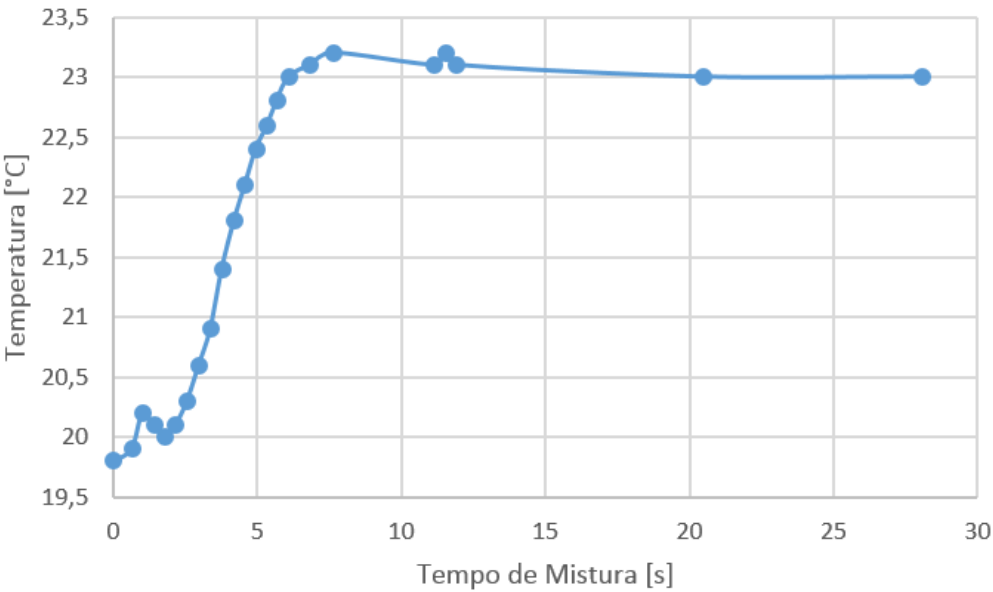


Figura A-3 – Ensaio 3, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Água, 600 RPM

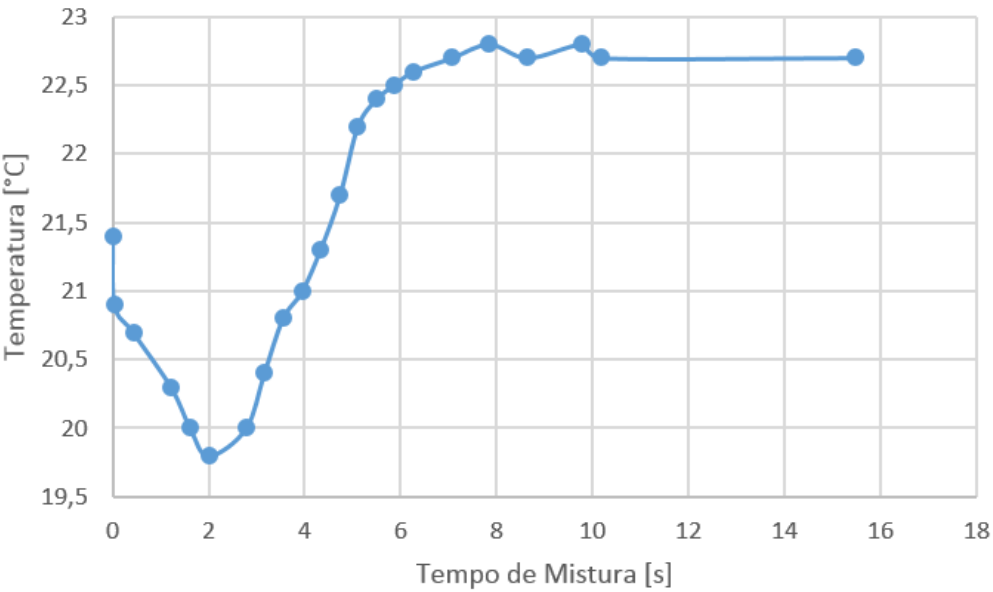


Figura A-4 – Ensaio 4, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Água, 800 RPM

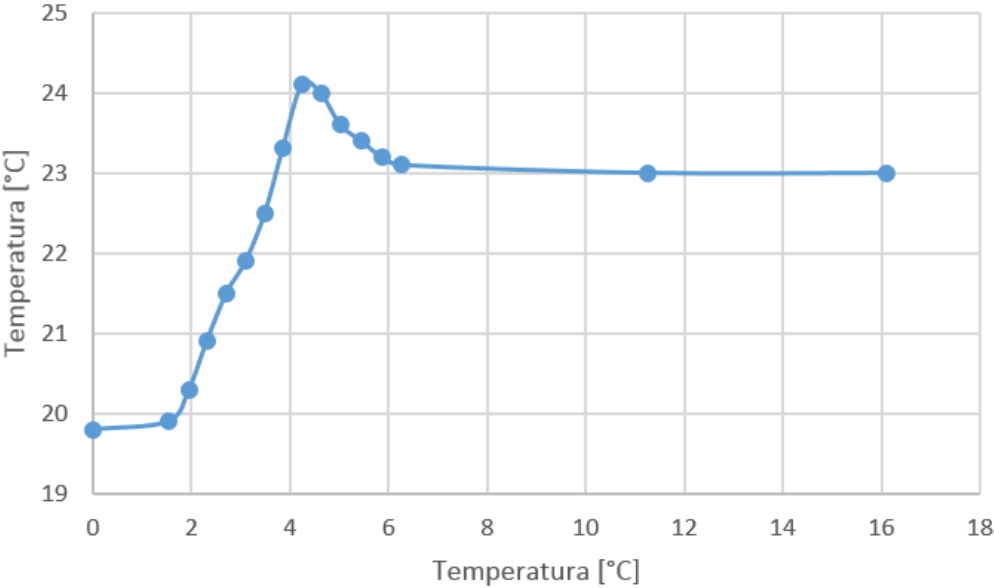


Figura A-5 – Ensaio 5, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Água, 1000 RPM

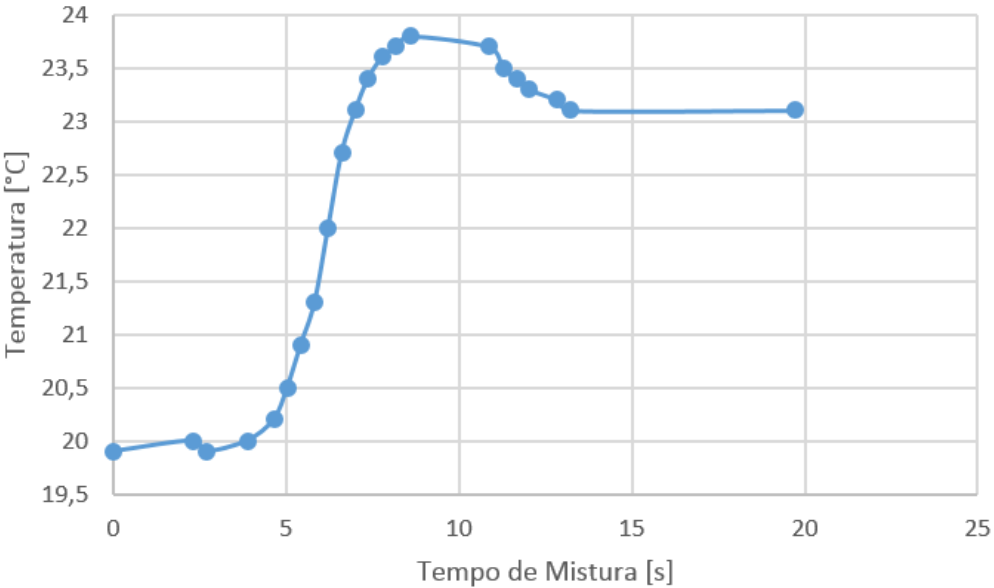


Figura A-6 – Ensaio 6, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Água, 200 RPM

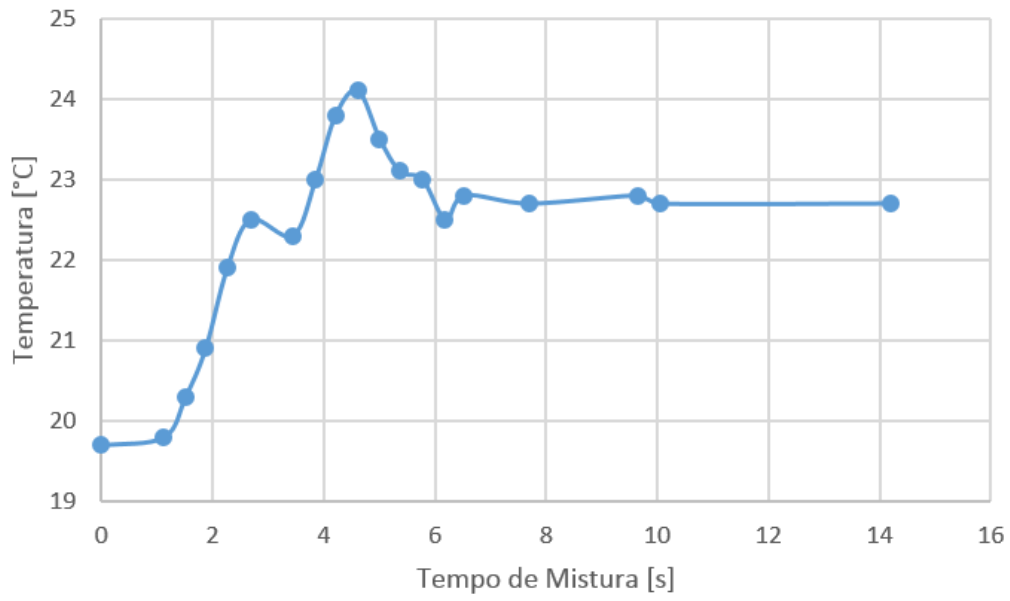


Figura A-7 – Ensaio 7, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Água, 400 RPM

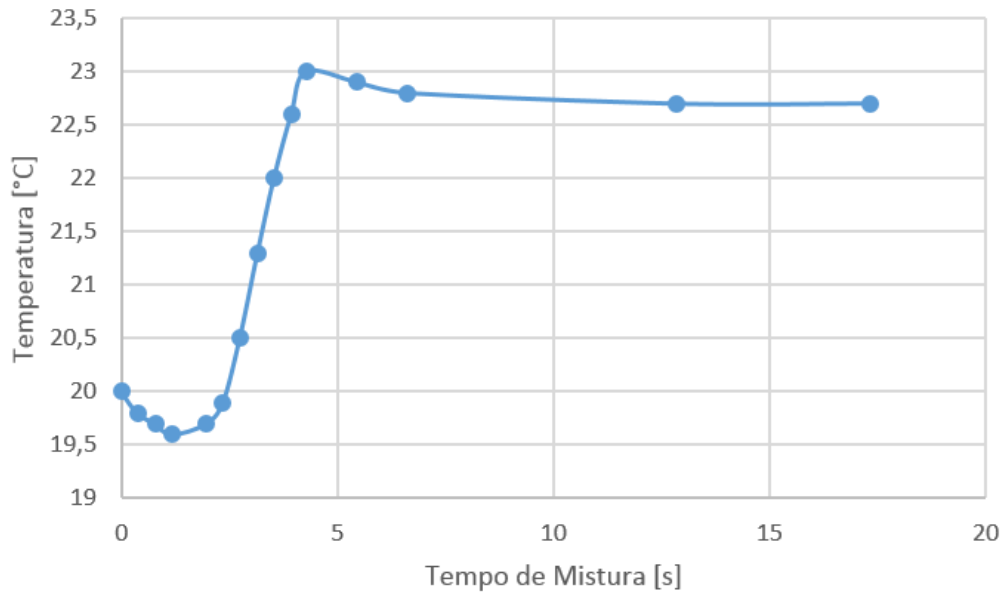


Figura A-8 – Ensaio 8, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Água, 600 RPM

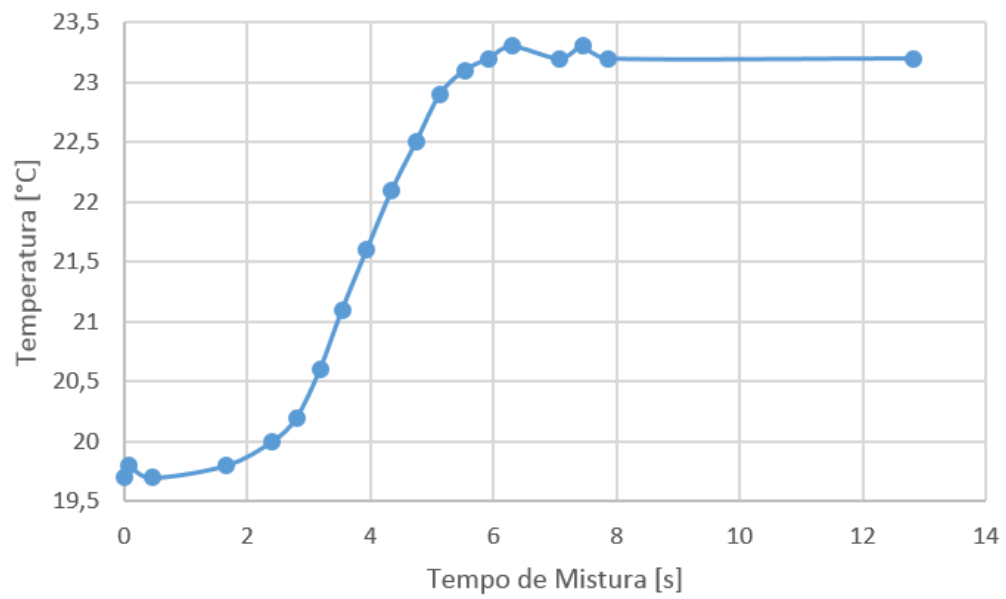


Figura A-9 – Ensaio 9, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Água, 800 RPM

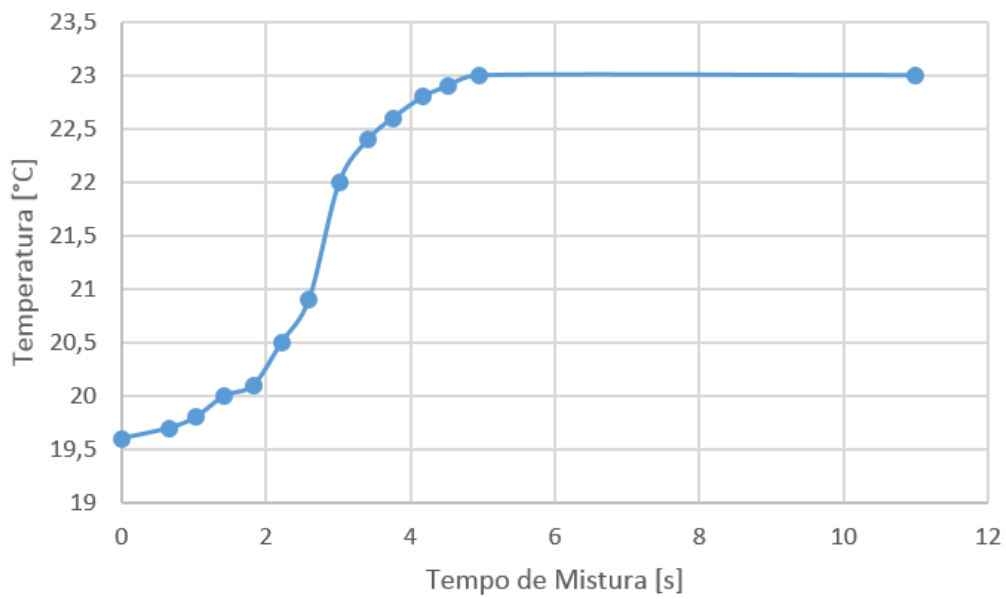


Figura A-10 – Ensaio 10, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Água, 1000 RPM

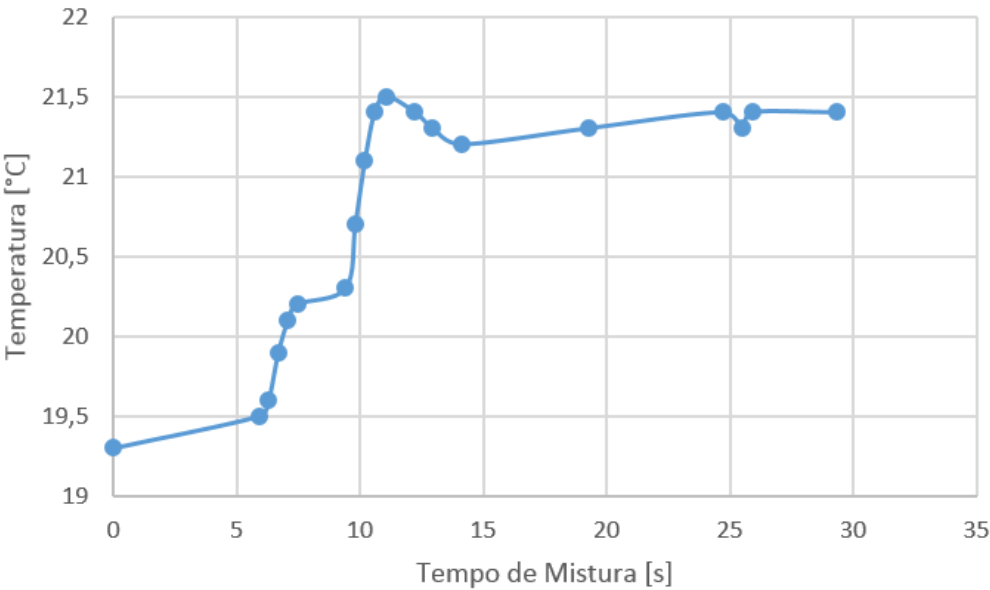


Figura A-11 – Ensaio 11, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 200 RPM

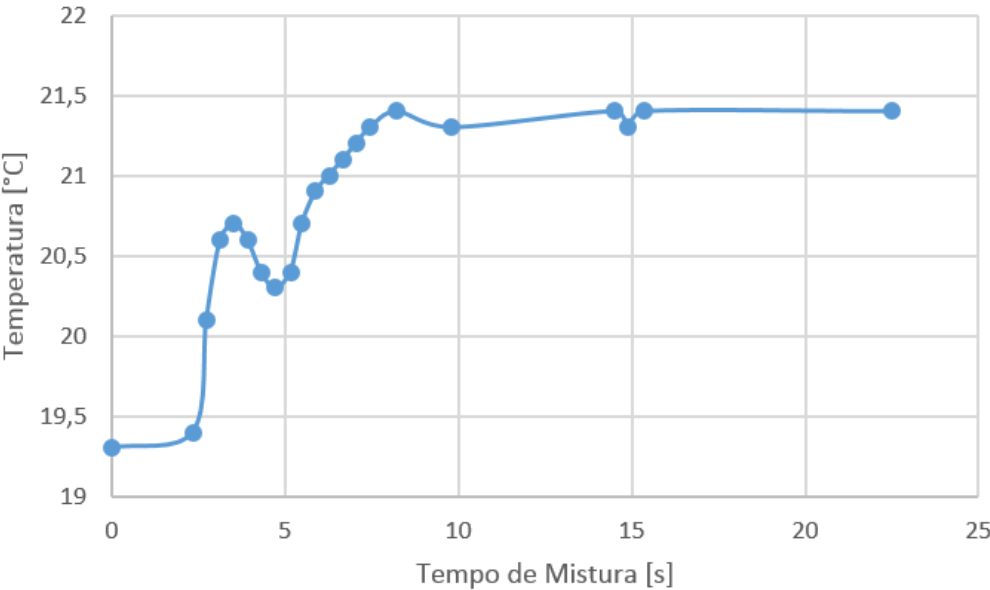


Figura A-12 – Ensaio 12, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 400 RPM

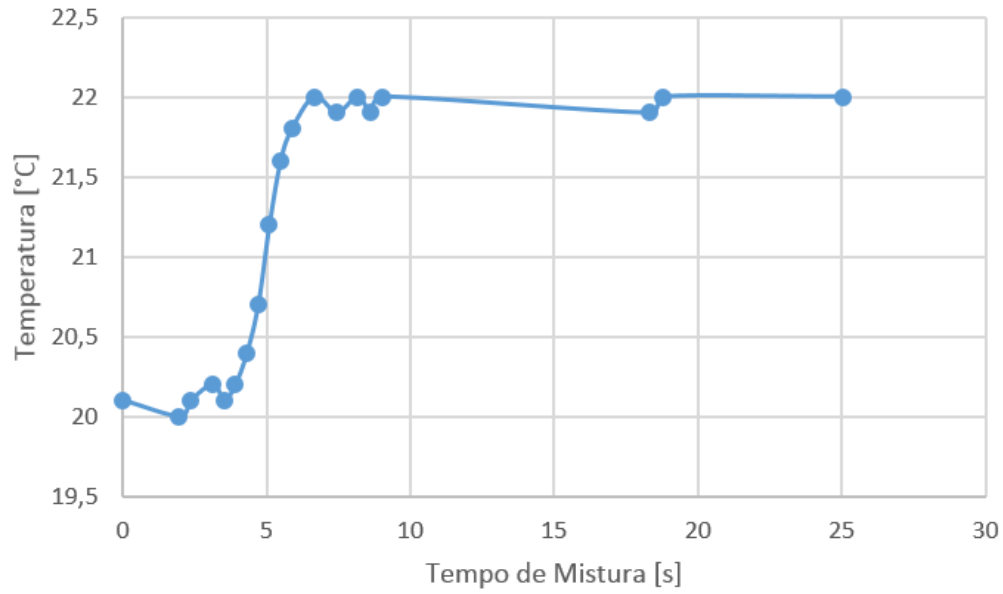


Figura A-13 – Ensaio 13, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 600 RPM

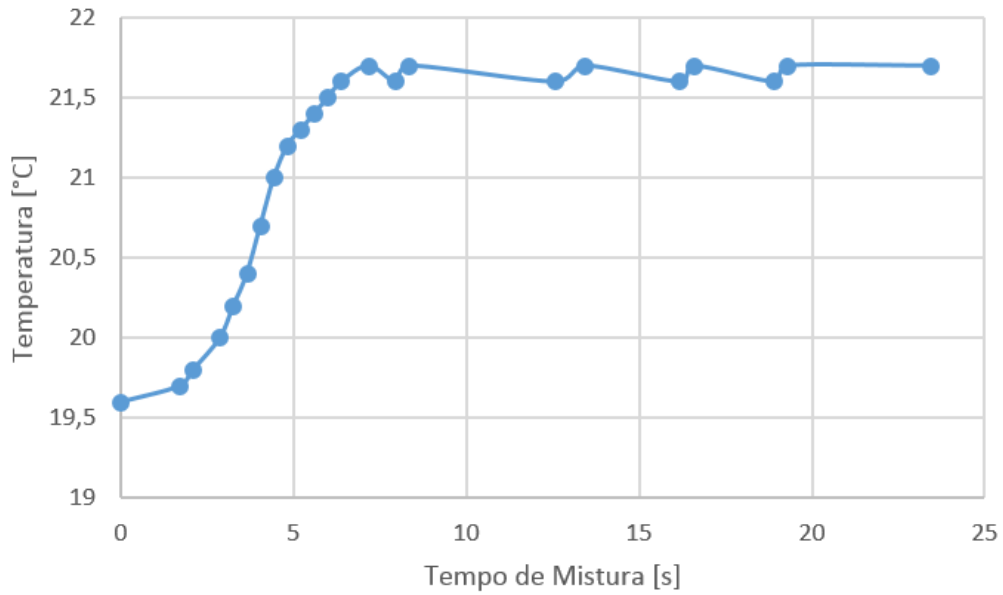


Figura A-14 – Ensaio 14, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 800 RPM

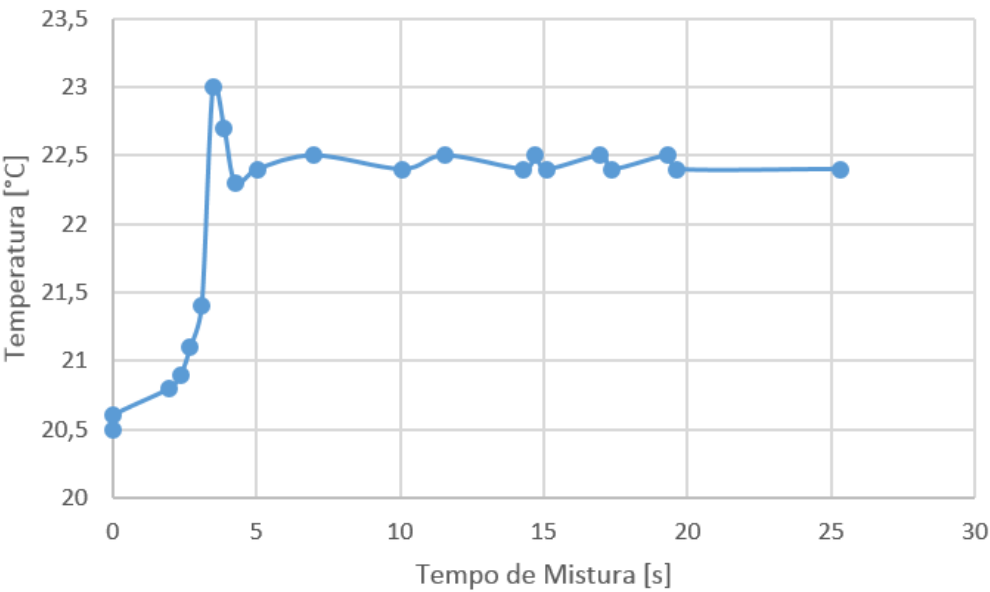


Figura A-15 – Ensaio 15, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 1000 RPM

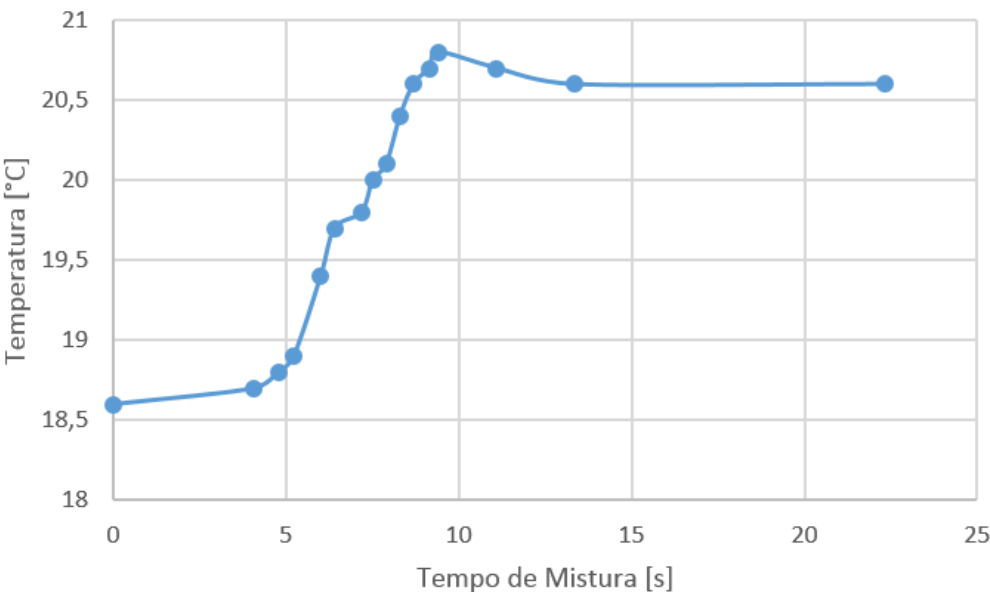


Figura A-16 – Ensaio 16, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 200 RPM

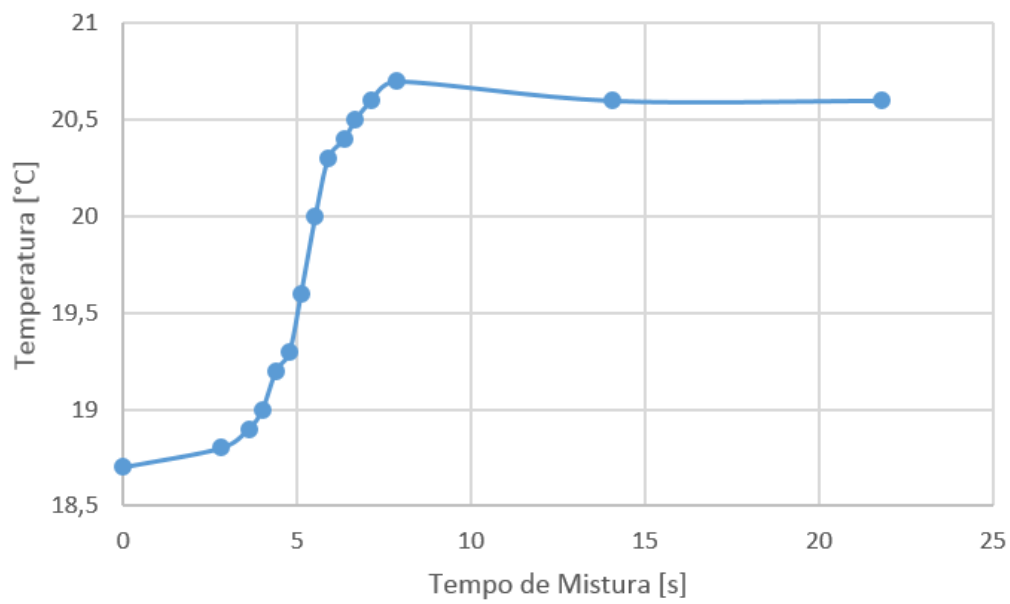


Figura A-17 – Ensaio 17, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 400 RPM

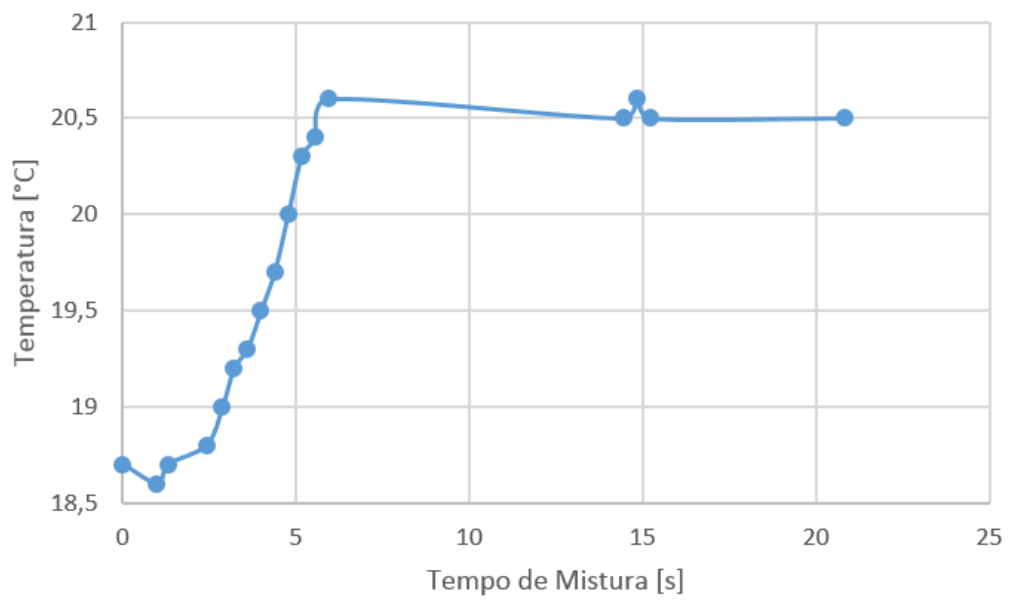


Figura A-18 – Ensaio 18, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 600 RPM

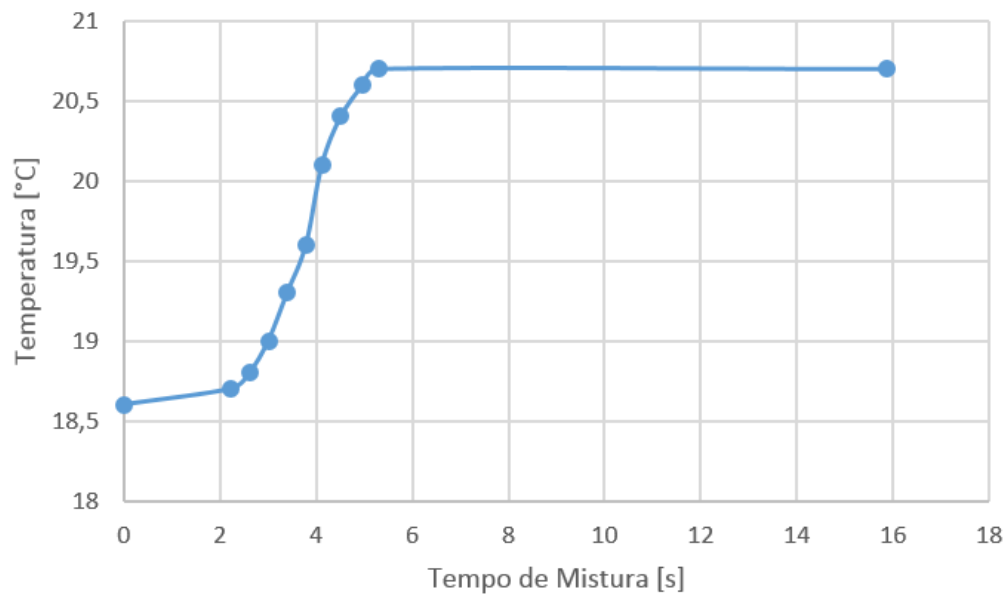


Figura A-19 – Ensaio 19, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 800 RPM

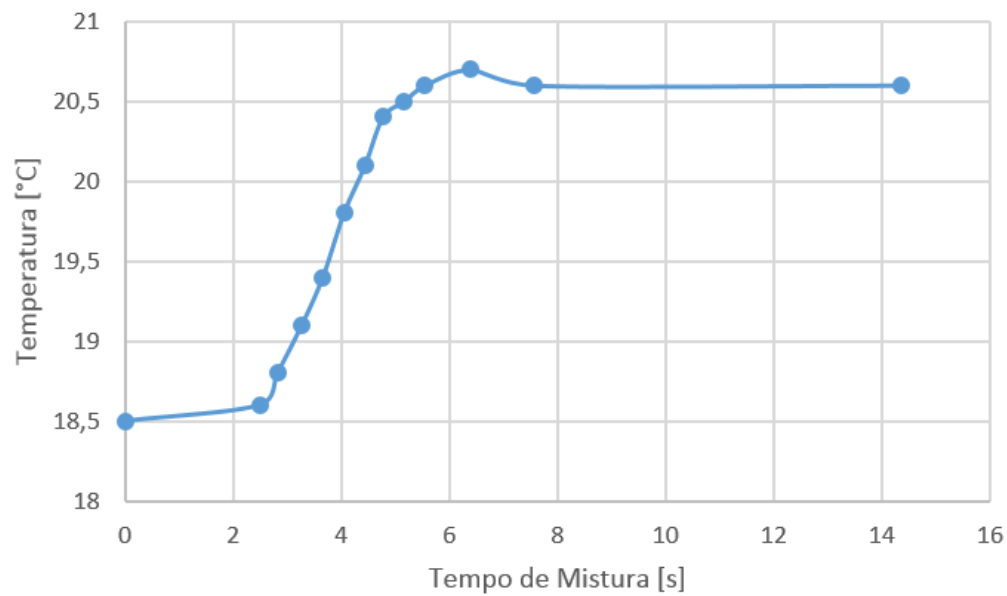


Figura A-20 – Ensaio 20, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 20 %, 1000 RPM

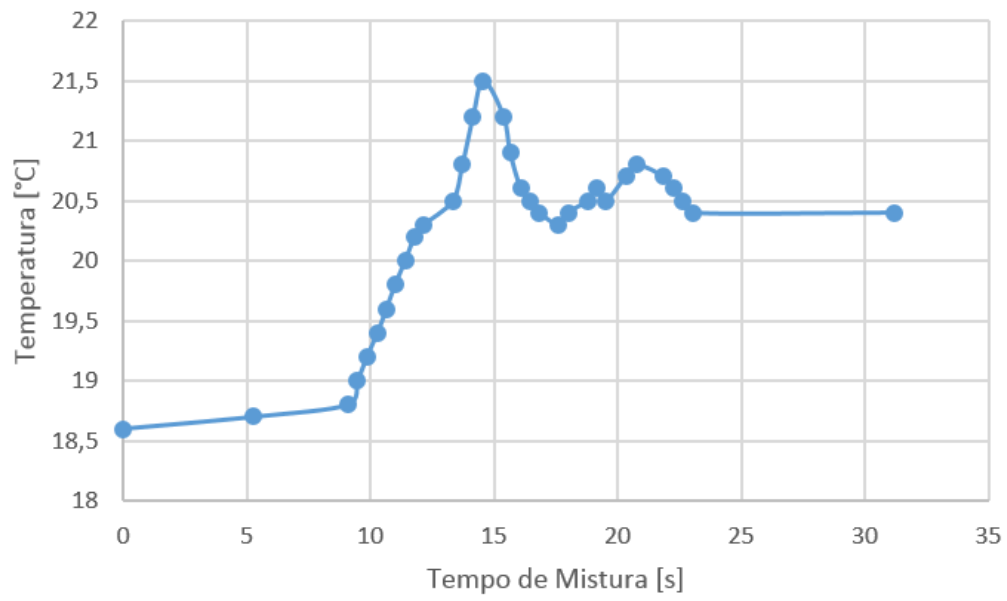


Figura A-21 – Ensaio 21, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 200 RPM

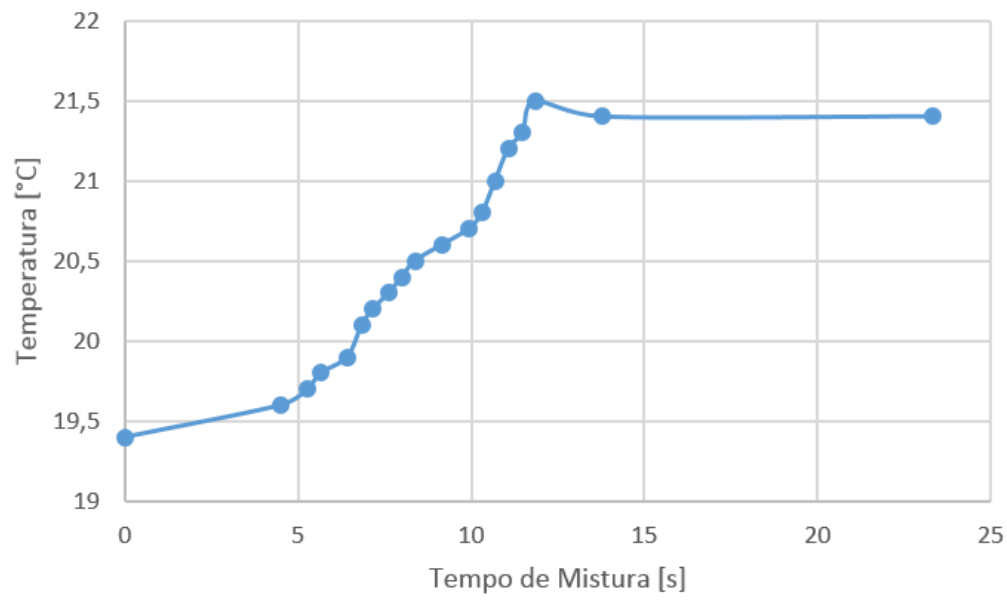


Figura A-22 – Ensaio 22, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 400 RPM

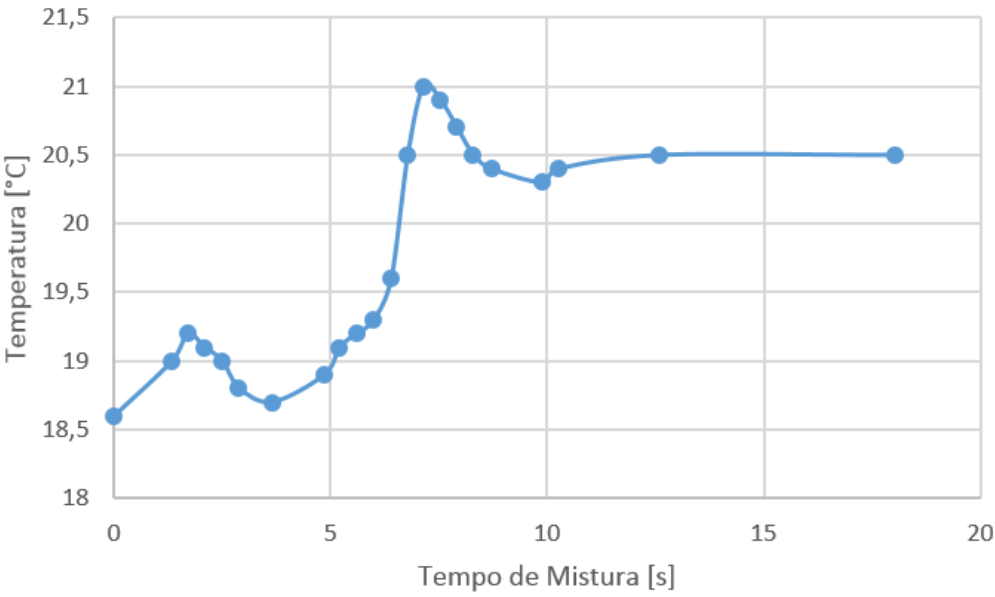


Figura A-23 – Ensaio 23, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 600 RPM

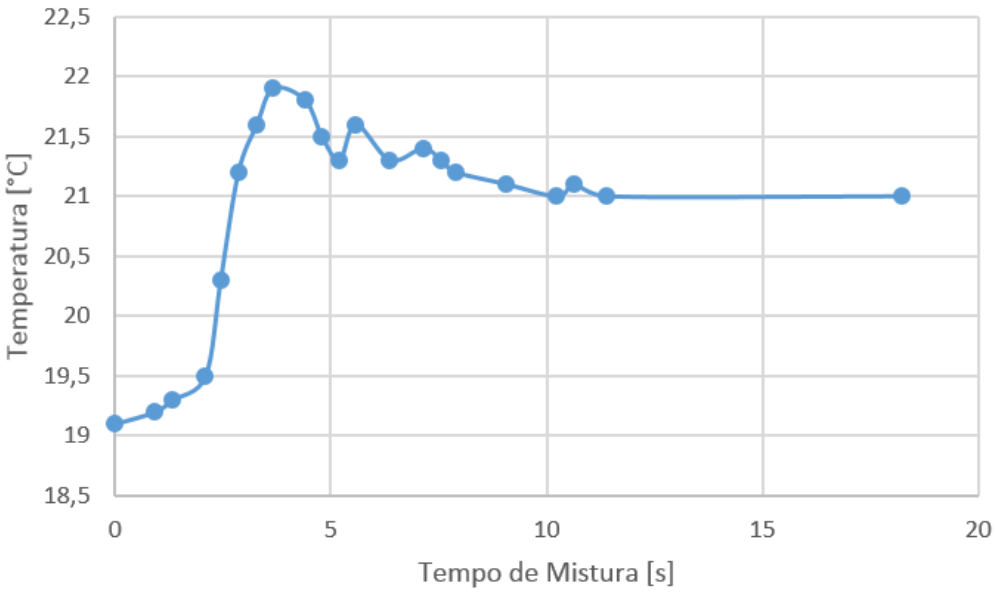


Figura A-24 – Ensaio 24, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 800 RPM

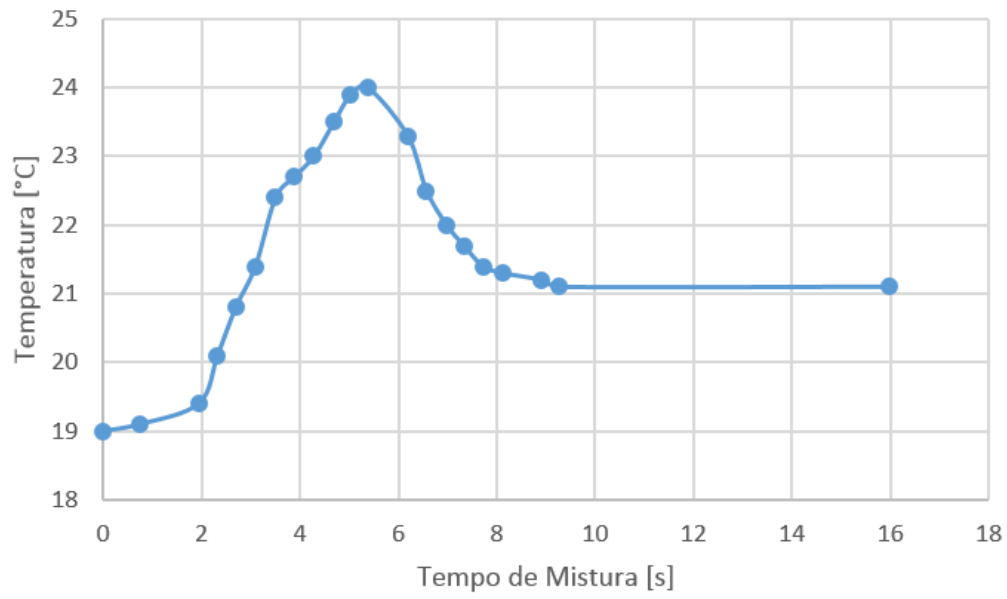


Figura A-25 – Ensaio 25, Impulsor Axial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 1000 RPM

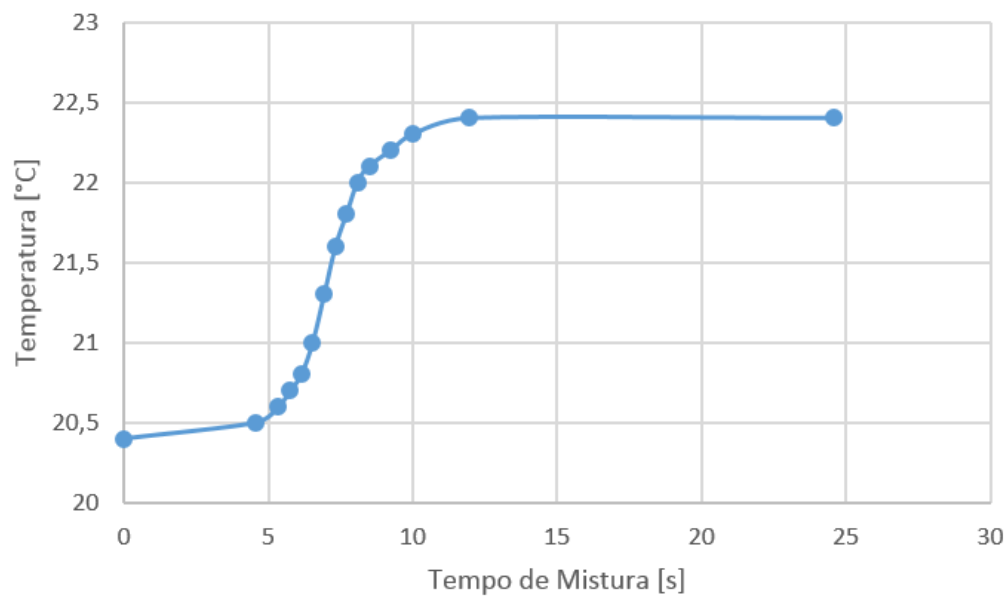


Figura A-26 – Ensaio 26, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 200 RPM

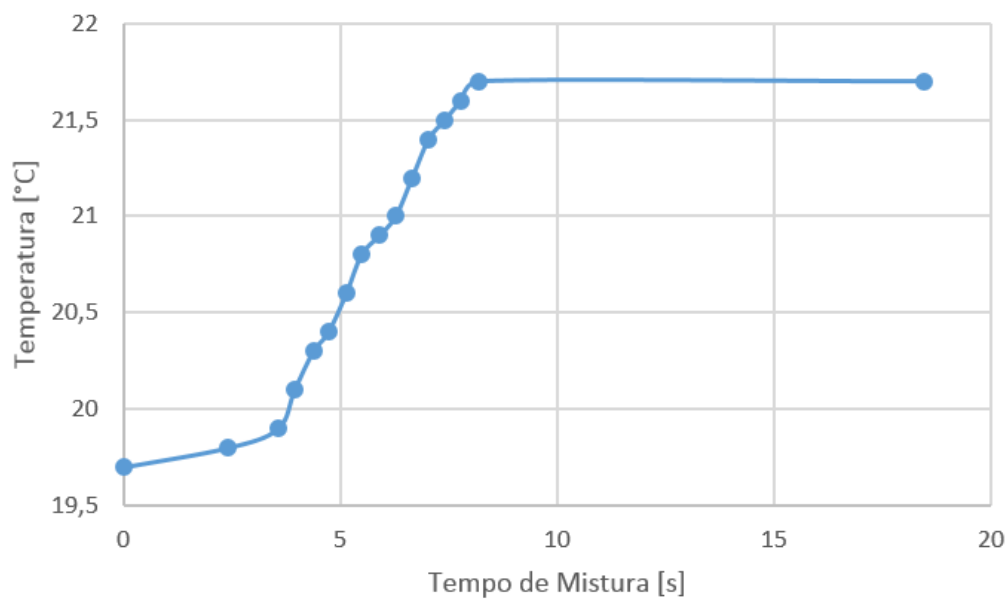


Figura A-27 – Ensaio 27, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 400 RPM

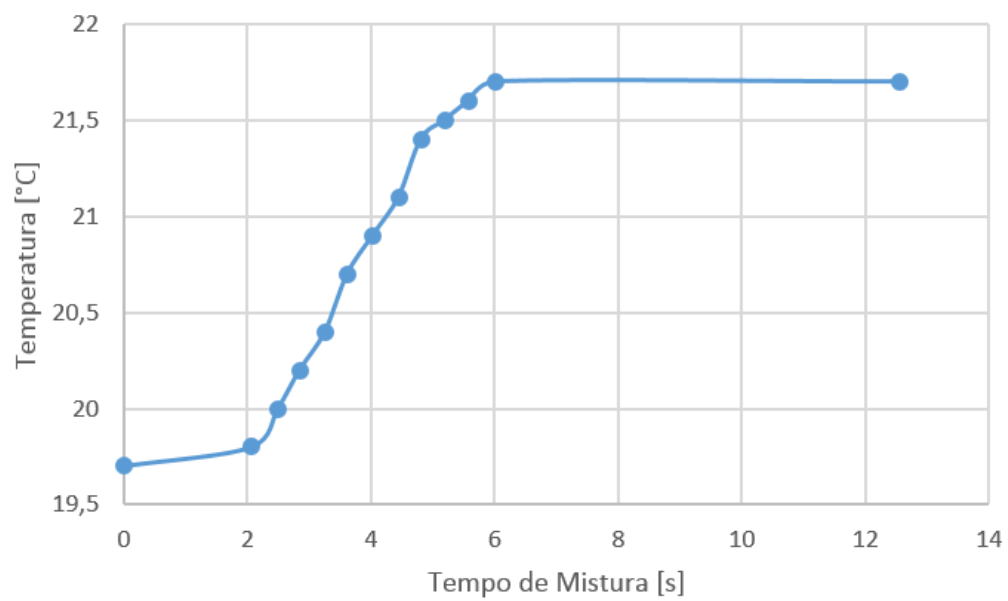


Figura A-28 – Ensaio 28, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 600 RPM

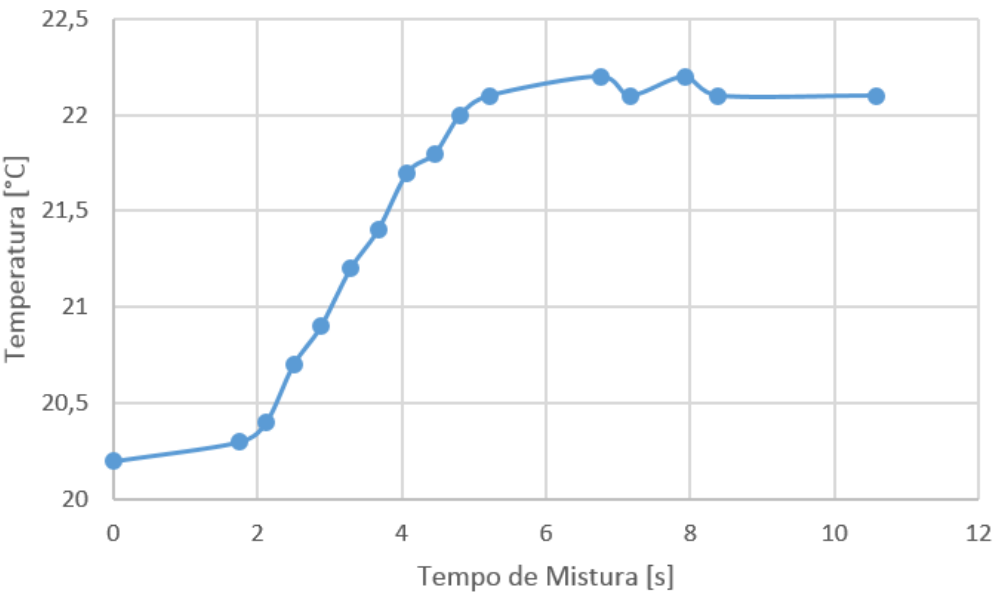


Figura A-29 – Ensaio 29, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 800 RPM

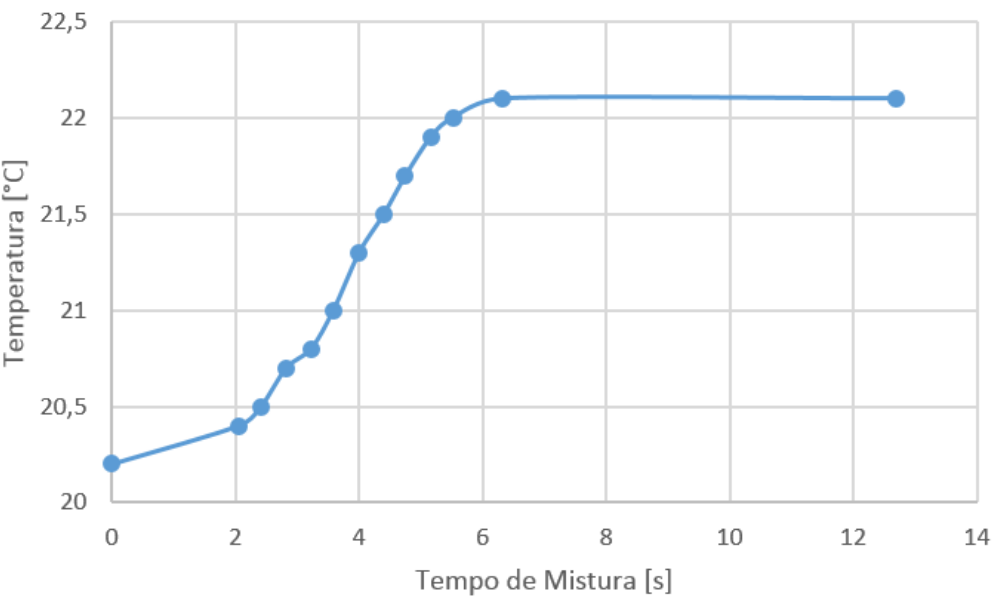


Figura A-30 – Ensaio 30, Impulsor Radial, Chicana Modificada, Solução 50 %, 1000 RPM