

UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS – UEA
ESCOLA SUPERIOR DE TECNOLOGIA – EST
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA

BIANCA LORENA DIAS CORTEZ

ELABORAÇÃO DE UMA EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA ESTIMAR O
NÚMERO DE POTÊNCIA DE UM IMPELIDOR DE PÁS RETAS

MANAUS

2021

BIANCA LORENA DIAS CORTEZ

**ELABORAÇÃO DE UMA EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA ESTIMAR O
NÚMERO DE POTÊNCIA DE UM IMPELIDOR DE PÁS RETAS**

**Monografia apresentada ao Curso de Graduação
em Engenharia Química da Escola Superior de
Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas,
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia
Química.**

Orientador: Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva

MANAUS

2021

BIANCA LORENA DIAS CORTEZ

**ELABORAÇÃO DE UMA EQUAÇÃO EMPÍRICA PARA ESTIMAR O
NÚMERO DE POTÊNCIA DE UM IMPELIDOR DE PÁS RETAS**

**Monografia de Conclusão de Curso para obtenção do título de Engenheiro, Habilitação em
Engenharia Química – Escola Superior de Tecnologia, Universidade do Estado do
Amazonas**

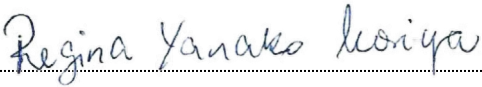
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva – Orientador



Prof. Dr. Erich Potrich – UEAP



Profa. Dra. Regina Yanako Moriya – UEA

Conceito: 9,1

Manaus, 13 de dezembro de 2021.

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, pelo dom da vida, pelas bênçãos diárias e pelas portas que foram abertas para mim durante a trajetória acadêmica.

A toda a minha família, que torceu por mim e me proporcionou apoio incondicional e compreensão durante todos estes anos de sacrifícios. Em especial minha mãe, meu pai e minha irmã, pelo carinho e cuidado de sempre.

A esta universidade e aos professores do curso de Engenharia Química, que trabalham com afinco para propiciar uma formação de bachareis de qualidade em um mercado tão competitivo. Agradeço em especial ao meu orientador Prof. Jefferson Grangeiro, pela enorme paciência e pela didática em esclarecer todas as minhas dúvidas, propiciando o que fosse necessário para a realização deste trabalho. Destaco e agradeço a influência do Prof. Welisson Silva (*in memoriam*), que participou como banca de TCC 1, pelos conselhos e todo o conhecimento que pôde agregar neste trabalho. Que Deus o tenha em sua morada eterna, após uma vida dedicada ao ensino e à pesquisa.

Aos meus colegas de universidade, por cada passo que demos juntos em direção a este objetivo. Pela ajuda em estudos em grupo, parceria em trabalhos, momentos de descontração, enfim, memórias boas que guardarei com carinho. Em especial ao meu amigo Ely Matheus, que me acompanhou em tantos momentos de dificuldade durante o curso, me ensinou tanto e apoiou com um sorriso e boas energias e por isso sempre serei grata. Também agradeço ao meu amigo Luiz Henrique, que desde o Ciclo Básico me presenteou com sua amizade e até hoje se mantém tão próximo.

Aos meus amigos e colegas do Pokémon GO, que me encorajaram e tornaram meus dias mais divertidos e leves. Essas amizades foram responsáveis por muitas alegrias nos últimos anos, são muito especiais para mim independente da distância.

Enfim, agradeço a todos os que, de alguma forma, me incentivaram, me ensinaram, torceram por mim, ou me deram condições para finalizar este trabalho.

RESUMO

Até hoje, o projeto de agitadores industriais depende essencialmente de relações empíricas. Assim, trabalhos experimentais são muito utilizados como referência para o cálculo do consumo de potência de sistemas de agitação. Dessa forma, este trabalho tem por objetivo principal a elaboração de uma equação empírica para calcular o número de potência de um impelidor tipo pás retas inclinadas, por meio da análise de dados experimentais obtidos por Silva (2019) em regime turbulento, por meio do modelo de Nagata (1975). Para atingir este objetivo, analisou-se o comportamento do número de potência em função da variação do Número de Reynolds e dos parâmetros geométricos (relações entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque, D_i/T ; a largura do impelidor e o diâmetro do impelidor, w/D_i ; e ângulo de inclinação das pás,) e ainda a potência consumida do impelidor em função da velocidade rotacional. Os dados experimentais foram obtidos em um tanque de 50 L, com configurações de três e quatro chicanas e sem chicanas. Foram estudados cento e vinte impelidores, organizados em grupos de cinco variações da largura da pá do impelidor (relações $w/D_i = 0,14; 0,17; 0,20; 0,25$ e $0,30$), em cada grupo variou-se o diâmetro do impelidor seis vezes, (relações $D_i/T = 0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55$ e $0,70$) e variou-se quatro vezes os ângulos das pás ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ e 90°), para cada tipo de configuração adotada. Para a medição do torque, necessário ao cálculo do consumo de potência, foi utilizado um torquímetro. Os dados de número de potência e número de Reynolds foram relacionados em tabelas para a elaboração de gráficos, e analisando as tendências das curvas, escolheu-se o modelo I-342 para a elaboração da equação. A principal contribuição deste trabalho é o desenvolvimento de uma equação mais específica para um impelidor baseado em suas relações geométricas para a estimativa de potência, que descreve satisfatoriamente o perfil do número de potência no regime turbulento.

Palavras-chave: Número de Potência, Sistema de agitação, Impelidores, Chicanas, Parâmetros geométricos, Curvas de potência, Equação empírica.

ABSTRACT

Still nowadays, the project of industrial agitators essentially depends on empirical relations. Thus, experimental works are widely used as a reference to calculate the power consumption of agitation systems. So this work's main objective is the preparation of an empirical equation to calculate the power number of a pitched blade impeller, through the analysis of experimental data obtained by Silva (2019) in turbulent regime, through the model of Nagata (1975). To achieve this goal, the power number was analyzed as a function of the variation of the Reynolds Number and the geometric parameters (relations between impeller diameter and tank diameter, D_i/T ; the impeller width and impeller diameter, w/D_i ; and pitch blade angle, θ), and also the power consumed by the impeller as a function of rotational speed. The experimental data was gathered by Silva (2019) in a 50 L tank, with configurations of three and four baffles and without baffles. One hundred and twenty impellers were studied, organized in groups of five variations of the impeller blade width ($w/D_i = 0.14; 0.17; 0.20; 0.25$ and 0.30), in each group there were impellers with six different diameters ($D_i/T = 0.25; 0.33; 0.40; 0.45; 0.55$ and 0.70) and each group of impellers with different diameters had four different blade angles ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ and 90°), for each type of configuration adopted. For measuring torque, which is necessary to calculate power consumption, a torque meter was used. The power number and Reynolds number data were listed in tables for the elaboration of graphs, and analyzing the trends in the curves, the model I-342 was chosen for the elaboration of the equation. The main contribution of this work is the development of a more specific equation for an impeller based on its geometric relations for power estimation, which satisfactorily describes the power number profile in the turbulent regime.

Keywords: Power number, Agitation system, Impellers, Baffles, Geometric parameters, Power curves, Empirical equation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Unidade piloto de agitação da UNICAMP e esquema de agitador mecânico.....	18
Figura 2 – Representação da geometria de um tanque agitado genérico.....	23
Figura 3 – Representação do vórtice central em um tanque.....	24
Figura 4 – Representação do conflito entre pás de um impelidor de quatro pás com as quatro chicanas em um tanque agitado.....	25
Figura 5 – Formação de vórtice por impelidores de pás retas descentralizados e centralizados.....	26
Figura 6 – Linhas de fluxo radial.....	27
Figura 7 – Linhas de fluxo axial.....	27
Figura 8 – Linhas de fluxo tangencial.....	28
Figura 9 – Impelidor de quatro pás retas inclinadas em 45°.....	29
Figura 10 – Impelidor tipo turbina de pás retas (Rushton).....	30
Figura 11 – Impelidor tipo âncora.....	30
Figura 12 – Curva de potência geral em função do número de Reynolds.....	35
Figura 13 – Curvas de potência em função do número de Reynolds para diversos projetos.....	36
Figura 14 – Curva do Número de potência máximo em relação ao Número de Reynolds crítico.....	38
Figura 15 – Dinamômetro do transdutor de torque.....	29
Figura 16 – Diagrama esquemático de medição do torque por meio do deslocamento angular do dinamômetro.....	40
Figura 17 – Unidade piloto de agitação.....	42
Figura 18 – Conjunto do tanque de agitação de 50 L.....	43
Figura 19 – Representação das dimensões do conjunto do tanque de agitação de 50L.....	44
Figura 20 – Sistema de aquisição de dados com destaque para a parte frontal do mostrador digital.....	45

Figura 21 – Número de Potência em relação ao Número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor de pás retas 90°, $D_i/T = 0,25$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	56
Figura 22 – Número de Potência em relação ao Número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor de pás retas 45°, $D_i/T = 0,55$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	57
Figura 23 – Número de Potência em relação ao Número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor de pás retas 90°, $w/D_i = 0,20$, $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	58
Figura 24 – Número de Potência em relação ao Número de Reynolds em tanques sem chicanas com $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,30$, para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	59
Figura 25 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem e com chicanas para o impelidor de pás retas inclinadas 45°, $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	60
Figura 26 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem e com chicanas para o impelidor de pás retas inclinadas 90°, $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,55$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	61
Figura 27 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional em tanque com três chicanas para as relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$).....	62
Figura 28 – Comparação do consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional em tanque sem e com chicanas para pás retas inclinadas 45°, com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$	63
Figura 29 – Comparação do consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional em tanque sem e com chicanas para pás retas 90°, com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$	63
Figura 30 – Número de Potência em relação ao parâmetro w/D_i em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,25$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	64
Figura 31 – Número de Potência em relação ao parâmetro w/D_i em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,33$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	65
Figura 32 – Número de Potência em relação ao parâmetro w/D_i em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,70$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	65
Figura 33 – Número de Potência em relação ao parâmetro D_i/T em tanques com três chicanas com $w/D_i = 0,14$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	66

Figura 34 – Número de Potência em relação ao parâmetro D_i/T em tanques com três chicanas com $w/D_i = 0,20$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	67
Figura 35 – Número de Potência em relação ao parâmetro D_i/T em tanques com três chicanas com $w/D_i = 0,30$, para fluxo axial ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$).....	68
Figura 36 – Número de Potência em relação ao ângulo de inclinação das pás (θ) em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,25$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	69
Figura 37 – Número de Potência em relação ao ângulo de inclinação das pás (θ) em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,33$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	69
Figura 38 – Número de Potência em relação ao ângulo de inclinação das pás (θ) em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,70$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	70
Figura 39 – Número de Potência experimental e ajustado para tanques com três chicanas e pás retas inclinadas a 45° , com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,40$	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Processos químicos e físicos em que se a agitação se aplica.....	21
Tabela 2 – Dimensões do tanque de agitação e chicanas.....	43
Tabela 3 – Relação das variáveis observadas em relação aos impelidores.....	46
Tabela 4 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,14$	47
Tabela 5 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,17$	48
Tabela 6 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,20$	49
Tabela 7 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,25$	50
Tabela 8 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,30$	51
Tabela 9 – Resultados de Número de Potência para Tanques com Três e Quatro Chicanas (relação $w/D_i = 0,20$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	55
Tabela 10 – Resultados do Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com três chicanas, pás retas inclinadas a 45° , com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,40$	72
Tabela 11 – Valores das variáveis ajustadas pelo programa Solver para tanques com três chicanas e um impelidor de pás retas inclinadas a 45° , com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,40$	73

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Z	Altura do líquido
H	Altura do tanque
ρ	Massa específica, kg/m ³
D _i	Diâmetro do impelidor
T	Diâmetro do tanque
C	Distância entre o fundo e o impelidor
I-111	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 30 graus
I-112	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 45 graus
I-113	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 60 graus
I-114	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
I-121	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 30 graus
I-122	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
I-123	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 60 graus
I-124	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-131	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 30 graus
I-132	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
I-133	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 60 graus
I-134	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
I-141	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 30 graus
I-142	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
I-143	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 60 graus
I-144	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
I-151	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 30 graus
I-152	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus
I-153	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 60 graus
I-154	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 90 graus
I-161	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
I-162	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
I-163	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
I-164	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
I-211	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 30 graus

- I-212 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-213 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-214 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-221 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-222 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-223 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-224 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-231 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-232 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-233 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-234 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-241 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-242 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-243 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-244 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-251 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-252 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-253 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-254 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-261 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-262 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-263 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-264 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-311 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-312 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-313 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-314 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-321 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-322 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-323 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-324 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-331 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-332 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-333 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 60 graus

- I-334 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-341 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-342 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-343 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-344 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-351 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-352 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-353 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-354 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-361 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-362 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-363 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-364 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-411 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-412 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-413 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-414 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-421 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-422 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-423 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-424 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-431 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-432 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-433 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-434 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-441 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-442 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-443 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-444 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-451 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 30 graus
- I-452 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus
- I-453 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 60 graus
- I-454 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 90 graus
- I-461 Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 30 graus

I-462	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
I-463	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 60 graus
I-464	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
I-511	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 30 graus
I-512	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 45 graus
I-513	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 60 graus
I-514	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
I-521	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-522	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-523	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-524	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-531	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 30 graus
I-532	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
I-533	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 60 graus
I-534	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
I-541	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 30 graus
I-542	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
I-543	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 60 graus
I-544	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
I-551	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 30 graus
I-552	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 30 graus
I-553	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 30 graus
I-554	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 30 graus
I-561	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 30 graus
I-562	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
I-563	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 60 graus
I-564	Impelidor Pás Retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
PBT	<i>Pitched blade turbine</i> , impelidor de pás inclinadas
FBT	<i>Flat blade turbine</i> , impelidor de pás retas
w_B	Largura das chicanas
w	Largura do impelidor
Z	Nível do líquido
n_B	Número de chicanas
N_{FR}	Número de Froude, adimensional

N_{Re}	Número de Reynolds, adimensional
N_{ReC}	Número de Reynolds crítico, adimensional
n_p	Número de pás
N_P	Número de Potência, adimensional
N_{Pmax}	Número de Potência máximo, adimensional
P	Potência, W
T_q	Torque, N.m
N	Velocidade rotacional, s^{-1}
μ	Viscosidade dinâmica, kg/m.s
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 PROCESSOS DE AGITAÇÃO E MISTURA.....	20
2.1.1 Classificação dos Processos de Agitação e Mistura	21
2.2 GEOMETRIA DO SISTEMA DE AGITAÇÃO.....	22
2.2.1 Tanques Agitados	22
2.2.2 Chicanas	24
2.2.3 Posição dos Impelidores	25
2.2.4 Tipos de Fluxos Gerados por Impelidores	25
2.2.4.1 Fluxo radial.....	26
2.2.4.2 Fluxo axial.....	26
2.2.4.3 Fluxo tangencial.....	27
2.3 TIPOS DE IMPELIDORES.....	28
2.3.1 Impelidor tipo Pás Retas Inclinadas	29
2.3.2 Impelidor tipo Turbina de Pás Retas (Rushton)	29
2.3.3 Impelidor tipo Âncora	30
2.4 NÚMEROS ADIMENSIONAIS NA AGITAÇÃO.....	30
2.4.1 Número de Reynolds e o regime de escoamento	31
2.4.2 Número de Potência	32
2.5 CONSUMO DE POTÊNCIA EM AGITADORES.....	32
2.5.1 Curvas de Potência (Número de Potência x Número de Reynolds)	34
2.6 NÚMERO DE POTÊNCIA (N_p) DETERMINADO POR NAGATA (1975).....	36
2.7 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA EM UNIDADES PILOTO DE AGITAÇÃO COM TRANSDUTORES DE TORQUE (TORQUÍMETRO).....	28
3. MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 MATERIAIS.....	31
3.1.1 Unidade Piloto de Agitação	31
3.1.2 Software	45

3.1.3 Impelidores de Quatro Pás Retas Inclinadas.....	45
3.2 MÉTODOS.....	52
3.2.1 Metodologia para Análise dos Dados Experimentais por Torquímetro – MAGTROL.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	54
4.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AGITAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS PRINCIPAIS VARIÁVEIS.....	54
4.2 NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS EM TANQUES SEM CHICANAS.....	56
4.3 COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA EM TANQUES COM E SEM CHICANAS	59
4.4 CONSUMO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ROTACIONAL.....	60
4.5 NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS.....	64
4.5.1 Número de Potência em função da relação w/D_i.....	64
4.5.2 Número de Potência em função da relação D_i/T.....	66
4.5.3 Número de Potência em função do ângulo de inclinação das pás.....	68
4.6 ELABORAÇÃO DA EQUAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA.....	70
5. CONCLUSÕES.....	75
6. PERSPECTIVAS.....	77
REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

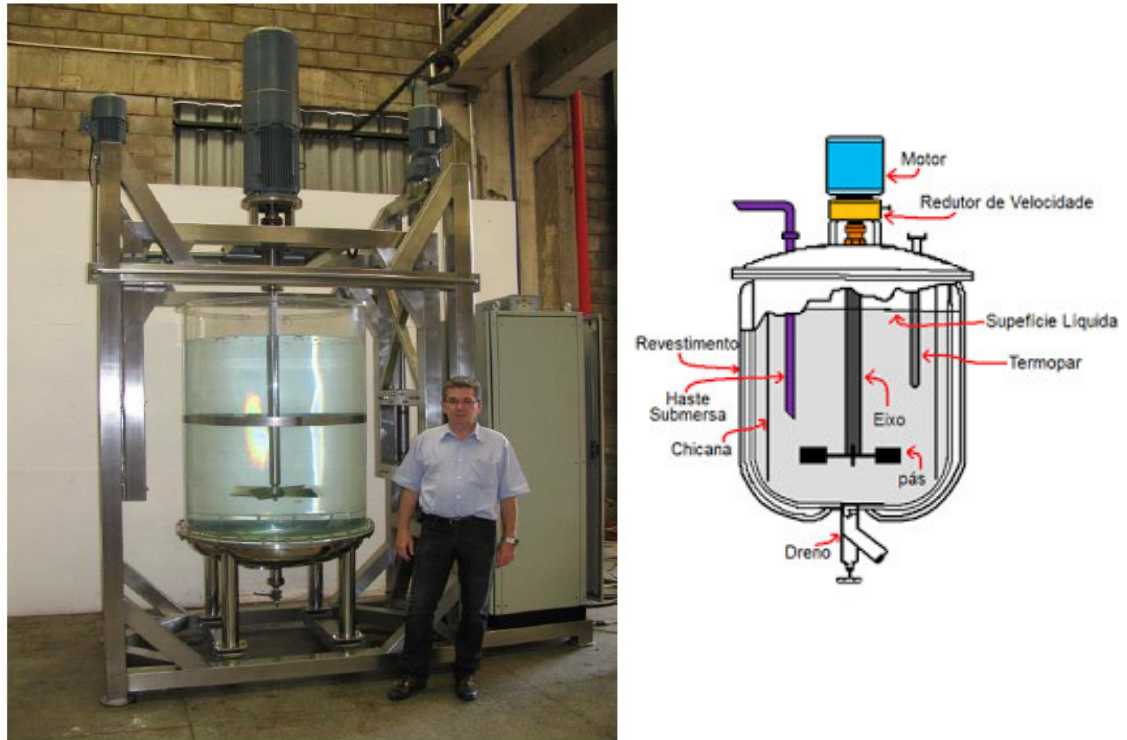
No meio industrial, muitas operações dependem da agitação e mistura de fluidos. A operação de agitação refere-se ao movimento induzido em um fluido por meios mecânicos em um recipiente. A mistura por sua vez, relaciona-se a duas fases ou mais, inicialmente separadas, que são distribuídas de forma aleatória dentro ou através uma da outra. (McCABE; SMITH; HARIOTT, 1993) Por serem operações tão fundamentais para a execução de diversos processos como conhecemos hoje, esses fenômenos foram e continuam sendo muito estudados, devido à contínua necessidade de implementar novas tecnologias e consequentes avanços na Engenharia.

A qualidade dos medicamentos produzidos em farmácias de manipulação relaciona-se com diversos fatores, sendo um deles o processo de mistura. Para que o medicamento manipulado seja seguro e eficaz, é necessária uma mistura homogênea. Caso contrário, a mistura sem homogeneidade poderá ocasionar variações na quantidade de princípio ativo, resultando em um produto de baixa qualidade e oferecendo riscos ao usuário do produto (BRITTES; MOREIRA, 2006; FERREIRA et al., 2003).

A agitação é um fator de grande importância para os biorreatores, especialmente em larga escala, pois falhas no processo de mistura podem ocasionar condições não homogêneas de temperatura e de concentração de substrato, prejudicando o desempenho do sistema. Os biorreatores estão presentes, além de tradicionalmente na produção de enzimas para aplicação industrial, no tratamento de efluentes e na indústria de alimentos. (NOVAES, 2008)

O sistema de agitação está intimamente ligado às relações geométricas do tanque, para que sejam fornecidas as melhores condições para o processo, além da economia de custos operacionais. Esta economia está relacionada com o fato de a geometria do tanque ser produto da otimização do uso de chapas, do número de soldas e cortes, atendendo com sucesso a necessidade da produção. (RAZUK, 1992) Paralelamente, o gasto energético do impelidor deve ser bem estudado, visto que representa boa porcentagem do custo final do projeto. (SIMÕES, 2017) A Figura 1 ilustra uma unidade piloto de agitação com capacidade de 1000 L, localizada na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), juntamente com um esquema de agitador mecânico.

Figura 1 – Unidade piloto de agitação da UNICAMP e esquema de agitador mecânico.



Fonte: SOUZA (2011); DIAS (2018).

Os agitadores ou misturadores devem ser dimensionados para cada caso específico, dependendo das características do produto, podendo apresentar-se com variações de faixas de potência, de rotação, comprimento de haste e diâmetro de hélices, por exemplo. Fatores como densidade e viscosidade da fase a ser agitada, além do tipo de processo químico ou físico que se deseja atender, influenciam diretamente no dimensionamento do equipamento. (DA SILVA; SABIONI, 2013)

Sendo assim, o objetivo geral deste trabalho consiste em desenvolver uma equação empírica do número de potência em função dos parâmetros geométricos de um impelidor de pás retas, utilizando dados experimentais de uma planta piloto, como uma ferramenta de atualização de dados. Os objetivos específicos do trabalho foram:

- i. Analisar o dimensionamento de um sistema de agitação em relação as suas principais variáveis: variação do diâmetro do agitador, largura da pá e ângulo de inclinação.
- ii. Interpretar os números adimensionais (número de Reynolds e número de potência) em um sistema de agitação com e sem chicanas;

- iii. Interpretar o número de potência de agitação em função dos parâmetros geométricos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As operações unitárias podem ser descritas como aplicações tecnológicas de ciências básicas como matemática, física, química e biologia, e ciências da engenharia. São operações fundamentadas pela termodinâmica e pelos fenômenos de transporte, provendo embasamento e suporte teórico à aplicação técnica dessas ciências. (CREMASCO, 2014)

Em geral, a agitação envolve a produção de movimento em uma única fase, enquanto que a mistura está relacionada à presença de mais de uma fase ou substância, com o intuito de diminuir a heterogeneidade entre essas fases ou de suas características físico-químicas. As técnicas de agitação e mistura estão presentes na execução de vários processos das indústrias, especialmente em equipamentos destinados à promoção de reações químicas, trocadores de calor e de massa, como tanques de floculação, tanques de extração, tanques de dissolução de ácido e outros. (CREMASCO, 2014)

As operações de agitação e mistura são consideradas decisivas em alguns processos de indústrias como a farmacêutica, de alimentos, de cosméticos, de petroquímicos e etc. Processos envolvendo a dispersão de sólidos, cristalização, adsorção, precipitação são exemplos de operações onde a mistura afeta diretamente a qualidade ou a conversão do produto final. (HOSSEINI, 2008)

2.1 PROCESSOS DE AGITAÇÃO E MISTURA

Os processos a serem realizados pelo sistema de agitação em um tanque são determinantes em sua escolha. Para Oldshue (1983), um projeto inicial do processo é o primeiro ponto a ser analisado, em relação à fluido-mecânica dos impelidores, a definição dos regimes de escoamento requeridos pelo processo e a similaridade desses parâmetros nos diversos tamanhos de vaso. A agitação mecânica pode ser empregada em processos com uma, duas ou mesmo três fases distintas de seus componentes. (ENGENDRAR, 2021)

2.1.1 Classificação dos Processos de Agitação e Mistura

Os principais processos químicos e físicos relacionados à agitação são classificados em cinco tipos, e estão relacionados na Tabela 1, conforme as definições de Nagata (1975):

Tabela 1 – Processos químicos e físicos em que se a agitação se aplica.

Aplicação	Processo Químico	Processo Físico
Líquido-sólido	Dissolução	Suspensão
Líquido-gás	Absorção	Dispersão
Líquidos imiscíveis	Extração	Emulsão
Líquidos miscíveis	Reação	Mistura
Movimentação de fluidos	Transferência de calor	Bombeamento

Fonte: Oldshue, 1983.

Na primeira coluna da Tabela 1, citam-se cinco tipos de relações entre fases em um processo onde a agitação se aplica, e nas duas colunas seguintes, os fenômenos químicos e físicos representados por cada aplicação. Por exemplo, no meio cuja relação é a de líquido-sólido, a dissolução baseia-se na mudança do material presente na fase sólida para a fase líquida, sendo assim uma operação em que ocorre transferência de massa. Já na suspensão, a concentração de sólidos no meio pode ser medida por meio de parâmetros físicos. (ENGENDRAR, 2021)

Na aplicação líquido-gás, a absorção é outro exemplo de operação de transferência de massa, onde um componente de uma mistura gasosa se transfere para um líquido absorvente devido à solubilidade e à diferença de concentração entre as fases. (LEITE et al., 2005) A dispersão por sua vez, caracteriza-se pela distribuição física do gás no líquido.

Nos líquidos imiscíveis, as emulsões estáveis ocorrem como resultado do processamento físico, formando produtos como a maionese e o xampu. Já na extração líquido-líquido, observa-se a formação de emulsões instáveis apenas para que a transferência de massa entre as fases ocorra, podendo haver ou não reação química. (MACHADO, 2007)

Em líquidos miscíveis, o objetivo do processamento físico é a obtenção de uma mistura homogênea entre estes, e do processamento químico, é favorecer uma reação química entre componentes das fases líquidas. A movimentação de fluidos apresenta-se como uma categoria geral, na qual a aplicação física refere-se à capacidade de bombeamento do impelidor do sistema,

e a aplicação química é representada pelo fenômeno de transferência de calor, pois geralmente acompanha a ocorrência das reações químicas. (SILVA, 2019; NAGATA, 1975)

2.2 GEOMETRIA DO SISTEMA DE AGITAÇÃO

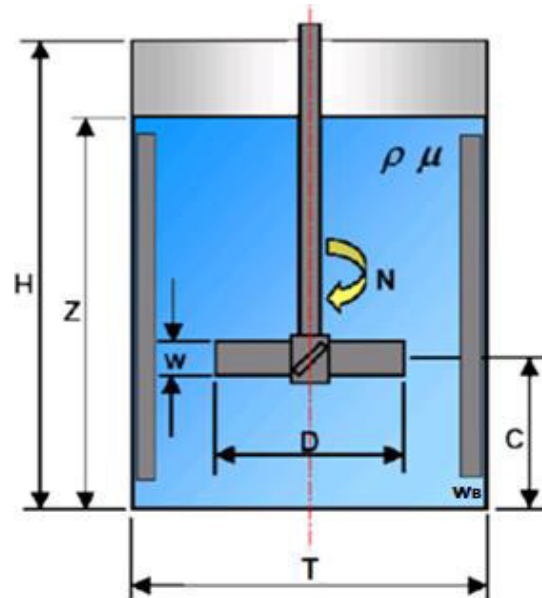
O correto dimensionamento e otimização de tanques agitados requer a compreensão de todas as variáveis que possivelmente afetarão o desempenho destas unidades. A diversidade de cada uma destas variáveis proporciona uma vasta gama de possibilidades para resolução de qualquer necessidade de mistura, bem como resulta em alta complexidade dos projetos. (PEITER, 2017)

Os parâmetros geométricos do sistema de agitação são responsáveis por determinar o perfil de velocidades, tipo de fluxo formado e consumo de potência pela pá do impelidor, especialmente. Por sua vez, essas características estabelecem a existência e a intensidade da turbulência no sistema, a interação entre os fluidos, o comportamento da superfície, fatores esses que estipulam a viabilidade do sistema. (SILVA, 2020; SOUZA, 2011)

2.2.1 Tanques Agitados

O chamado tanque agitado consiste normalmente em um conjunto formado por: um tanque cilíndrico, um ou mais impelidores, um motor, e em geral, chicanas. Em alguns tanques também é possível observar camisas ou serpentinas para promover a troca de calor. São equipamentos utilizados para realizar a agitação e/ou mistura de meios monofásicos, bifásicos ou trifásicos. (JOAQUIM JUNIOR et al., 2012; CREMASCO, 2014). Cada elemento do tanque possui diversos formatos para diferentes tipos de aplicação e a combinação desses vários elementos é feita em função do processo para qual o tanque será projetado. (PEITER, 2017) A Figura 2 apresenta uma ilustração de um tanque agitado genérico.

Figura 2 – Representação da geometria de um tanque agitado genérico.



Fonte: SILVA (2019).

As dimensões que caracterizam um sistema de agitação são o diâmetro interno do tanque (T), o diâmetro do impelidor (D_i), a largura da pá do impelidor (w), a distância entre o fundo e o impelidor (C), a altura do líquido (Z) e a largura das chicanas (w_B). Segundo Joaquim Júnior et al. (2012), geralmente são empregadas as seguintes relações geométricas padrão:

$$\frac{D_i}{T} = \text{entre } 1/4 \text{ e } 1/2 \quad (1)$$

$$\frac{Z}{T} = 1 \quad (2)$$

$$\frac{C}{T} = \text{entre } 1/6 \text{ e } 1/2 \quad (3)$$

$$\frac{w_B}{T} = \text{entre } 1/10 \text{ e } 1/12 \quad (4)$$

$$\frac{w}{D_i} = \text{entre } 1/4 \text{ e } 1/6 \quad (5)$$

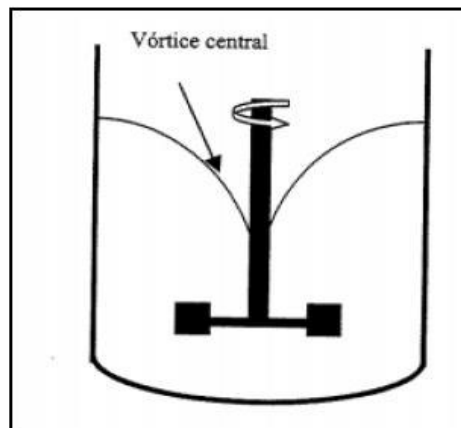
As relações geométricas entre as dimensões do tanque podem variar de acordo com sua aplicação, bem como com as características dos fluxos envolvidos. Para cada processo há uma configuração adequada, que fornece a maior eficiência. Por exemplo, no caso geral de o processo utilizar um impelidor tipo pás inclinadas, as relações geométricas padrão adequadas seriam $w/D_i = 0,2$ e $D_i/T = 0,33$. (JOAQUIM JUNIOR et al., 2012)

2.2.2 Chicanas

As chicanas, “baffles” ou ainda defletores, são acessórios presentes nas paredes do reservatório do tanque, responsáveis por maximizar a transferência de potência para o fluido, minimizando a “rotação sólida” do fluido e evitando a entrada de ar no sistema, causada pelo vórtice na superfície. O número de chicanas normalmente empregadas são quatro e possuem uma largura entre 1/10 a 1/12 do diâmetro do tanque. (JOAQUIM JÚNIOR et al, 2012; VERGEL, 2013)

O fenômeno da rotação sólida se dá quando, durante a mistura, o fluido movimenta-se como um corpo sólido, formando uma depressão na superfície livre do fluido, podendo avançar ao longo do impelidor, caracterizando-se o vórtice, como representado na Figura 3. (BATTAGLINI, 1998; JOAQUIM JUNIOR et al., 2012)

Figura 3 – Representação do vórtice central em um tanque.



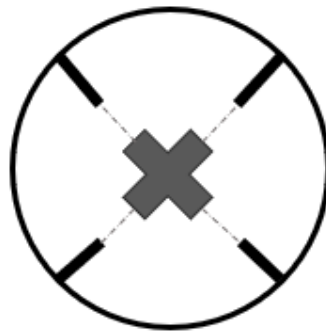
Fonte: GARAVITO (2013).

Segundo Razuk (1992), dependendo das condições de rotação, a formação do vórtice é passível de ocorrer quando o impelidor está posicionado no centro de um tanque sem chicanas ou quando se apresenta muito próximo da superfície do fluido. Quando o impelidor gira a altas velocidades e seu eixo coincide com o tanque, o vórtice pode alcançá-lo e o gás sobre o fluido é aspirado originando bolhas e ocasionando a aeração da mistura. Já segundo Martini (2010), se o vórtice for capaz de alcançar a superfície inferior do impelidor, surgem vibrações no eixo, assim

como a redução na capacidade de cisalhamento entre o fluido e o impelidor, o que atrapalha a operação.

O número de chicanas a ser instalado em tanques de agitação normalmente varia de dois a quatro chicanas. A técnica preferencial é a de utilizar-se três chicanas ao trabalhar com impelidores de quatro pás ou quatro chicanas ao trabalhar com impelidores de três pás, desse modo não haverá a coincidência de todas as pás com a direção das chicanas durante as rotações. Procura-se evitar esta coincidência (ilustrada na Figura 4), por causar uma turbulência extra no sistema. (SOUZA, 2011)

Figura 4 – Representação do conflito entre pás de um impelidor de quatro pás com as quatro chicanas em um tanque agitado.



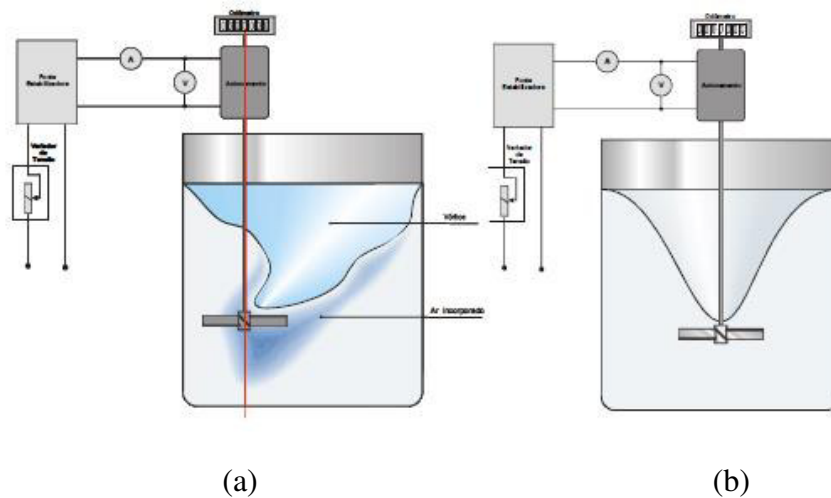
Fonte: Elaboração própria.

2.2.3 Posição dos Impelidores

Um dos principais fatores que afetam a eficiência do processo de mistura é posição do agitador no tanque de mistura. Para determinar o posicionamento ideal do impelidor, faz-se necessária a análise de vários aspectos como: o agitador em sua totalidade, viscosidade e densidade do produto, o processo de mistura a ser realizado (líquido-líquido, líquido-sólido, líquido-gás ou líquido-sólido-gás), volume da batelada ou do tanque, aplicação de mais de um sistema de agitação (sistemas combinados), dentre outros. (SOUZA, 2011)

Um exemplo de como a posição do impelidor pode afetar o sistema de mistura é o ilustrado por FREITAS (1993) na Figura 5, que em seu estudo de sistema agitado sem chicanas, utilizando um impelidor de pás retas, aponta a formação de maior vórtice no sistema cujo eixo do agitador está centrado. Na Figura 5a é demonstrada a formação do vórtice na posição descentralizada, e na Figura 5b, na posição centralizada do agitador.

Figura 5 – Formação de vórtice por impelidores de pás retas descentralizados e centralizados.



Fonte: FREITAS (1993).

2.2.4 Tipos de Fluxos Gerados por Impelidores

Os impelidores, por possuírem geometrias diferentes, geram diferentes fluxos nos fluidos. Estes fluxos gerados pelos impelidores podem ser agrupados em três grupos: fluxo radial, axial e tangencial. (OLDSHUE, 1983; SIMÕES, 2017) Estas classificações se dão pela predominância de um padrão de fluxo sobre os outros determinados pela geometria do impelidor, pois na verdade, todo impelidor produz os três tipos de fluxo. Além disso, a disposição do impelidor também é capaz de afetar o padrão de fluxo. (SILVA, 2010)

2.2.4.1 Fluxo radial

No fluxo radial, as linhas de fluxo são geradas de forma perpendicular ao eixo do agitador, ou seja, na direção radial, fazendo com que o líquido seja impelido contra as paredes do tanque. Se o tanque apresentar chicanas, o impelidor radial produz correntes fortes na direção vertical. Caso não possua chicanas, haverá a formação de vórtices, um efeito geralmente indesejável para a maioria dos processos, por não contribuir com a oxigenação do fluido, bem como também não favorecer a agitação. (SIMÕES, 2017)

Os impelidores deste grupo geralmente apresentam elevada taxa de consumo de potência, grande capacidade de dispersão e alto cisalhamento, mostrando uma agressividade maior ao produto. São bastante utilizados na dispersão de produtos gasosos, em processos de forte transferência de massa e para dissolução de materiais no estado sólido. (QUEIROZ, 2009) A Figura 6 ilustra as linhas de fluxo radial em um sistema de agitação.

Figura 6 – Linhas de fluxo radial.



Fonte: JOAQUIM JÚNIOR et al. (2012).

2.2.4.2 Fluxo axial

As linhas características do fluxo axial apresentam-se paralelas ao eixo do impelidor, como demonstrado na Figura 7, indicando que o fluido é impelido contra o fundo do tanque. A orientação do impelidor e o sentido de rotação de seu eixo (horário ou anti-horário) estabelecem a direção do escoamento axial, se é para cima ou para baixo. (MARTINI, 2010)

Figura 7 – Linhas de fluxo axial.



Fonte: JOAQUIM JÚNIOR et al. (2012).

Em geral, impelidores de fluxo axial são mais eficientes que os impelidores radiais, produzindo um fluxo maior com a mesma potência. Entre suas características, destacam-se o baixo consumo de potência, pouca agressividade ao produto e vasta gama de utilização por promover uma boa distribuição geométrica do fluxo dentro do tanque. (GARAVITO, 2013; SIMÕES, 2017)

2.2.4.3 Fluxo tangencial

Nesse tipo de fluxo, são geradas linhas de fluxo circulares em regime laminar (Figura 8), fazendo com que o fluido seja impulsionado ao redor da parede do vaso em movimento circular lento. É um fluxo empregado em sistemas em que há a necessidade da mistura de produtos de alta viscosidade. O impelidor do tipo âncora é o principal representante deste grupo, que é formado por impelidores que consomem muita potência, apresentam alto torque e alto investimento de aquisição. (GARAVITO, 2013)

Figura 8 – Linhas de fluxo tangencial.



Fonte: JOAQUIM JÚNIOR et al. (2012).

2.3 TIPOS DE IMPELIDORES

No sistema de agitação, os impelidores são os dispositivos encarregados por imprimir velocidade ao fluido no interior de um tanque. Podem ser classificados de acordo com o regime da mistura, sendo suas características geométricas responsáveis por caracterizar o fluxo gerado e

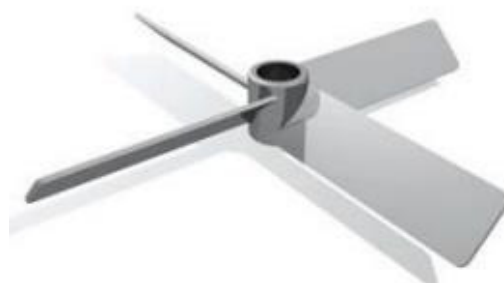
a capacidade de mistura. Partindo do conhecimento das necessidades do processo, pode-se definir a geometria e rotações dos impelidores. (SPOGIS, 2002)

De acordo com o regime de escoamento, os impelidores podem ser classificados em laminar ou turbulento; e de acordo com o fluxo gerado, podem ser classificados em impelidores de fluxo axial e fluxo radial. Dentre a grande variedade de impelidores existentes, os mais empregados comercialmente para regime turbulento são: o impelidor naval, de pás retas (FBT, do inglês *flat blade turbine*), de pás inclinadas (PBT, do inglês *pitched blade turbine*) e tipo Rushton, com 4 ou 6 pás planas. (VERGEL, 2013)

2.3.1 Impelidor tipo Pás Retas Inclinadas

Dos impelidores axiais, a turbina com pás retas inclinadas, com 4 ou 6 pás dispostas com ângulo entre 10 a 90° (comumente a 45°, como na Figura 9) de inclinação com relação ao seu plano horizontal, é amplamente utilizada em função da variedade de aplicações possíveis nos processos de agitação como mistura, suspensão, incorporação de sólidos e transferência de calor, além de seu baixo custo em comparação com outros impelidores de alta eficiência. (SILVA, 2014)

Figura 9 – Impelidor de quatro pás retas inclinadas em 45°.



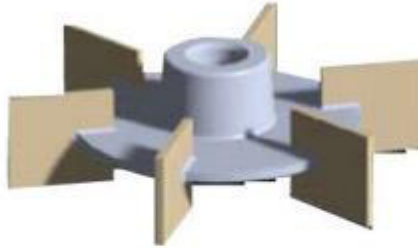
Fonte: GARAVITO (2013).

2.3.2 Impelidor tipo Turbina de Pás Retas (Rushton)

São impelidores de fluxos radiais, empregados em aplicações que demandam altas tensões de cisalhamento e turbulência com um baixo bombeamento, como em processos de transferência de massa gás-líquido, líquido-líquido e operações de dispersão. Os impelidores tipo Rushton

(com disco, Figura 10) apresentam um padrão de fluxo radial mais uniforme, porém consomem uma maior potência em relação aos impelidores abertos. (MORO, 2016; VERGEL, 2013)

Figura 10 – Impelidor tipo turbina de pás retas (Rushton).



Fonte: MORO (2016).

2.3.3 Impelidor tipo Âncora

Os impelidores tipo âncora ou hélice possuem eixo vertical e concêntrico ao tanque, são classificados como de regime laminar, possuindo diâmetros muito próximos do diâmetro interno do vaso. A mistura no sistema com esse tipo de impelidor ocorre principalmente pela dissipação de quantidade de movimento na região próxima a pá. O impelidor âncora apresenta um alto componente tangencial, dispensando a presença de chicanas. (SPOGIS, 2002) Um tipo deste impelidor é representado na Figura 11.

Figura 11 – Impelidor tipo âncora.



Fonte: MORO (2016).

2.4 NÚMEROS ADIMENSIONAIS NA AGITAÇÃO

Há uma série de números adimensionais empregados no cálculo dos sistemas de agitação, como o Número de Reynolds, Número de Potência, Número de Froude e Número de Bombeamento. Para este trabalho, os de maior relevância serão os dois primeiros.

2.4.1 Número de Reynolds e o Regime de Escoamento

Na agitação, a forma com que os fluidos se deslocam é um dos fatores determinantes sob aspectos importantes como: a determinação da potência necessária para impulsionar o fluido; a possível indução de vibrações e ruídos durante o processo; a estimulação de aeração (intencional ou não) do fluido; a influência na eficiência do processo de agitação. Por essas e outras razões é necessário conhecer a maneira como o fluido se comporta em determinadas condições de temperatura e de pressão. Com este conhecimento, pode-se avaliar qual será a perda de potência ou qual será a vibração induzida pelo escoamento do fluido através das pás de um impelidor, por exemplo. (GOMES, 2012)

As duas formas ou regimes de escoamento de um fluido são o regime laminar e o regime turbulento. No regime laminar, as partículas do fluido se deslocarão por meio de um caminho aproximadamente linear, na direção do fluxo, como em lâminas paralelas, sem troca de massa entre elas. Essa forma de escoamento dissipa menos energia, ocorrendo geralmente a baixas velocidades. Já no regime turbulento, que ocorre em velocidades mais elevadas, as partículas do fluido deslocam-se em movimentos não lineares aleatórios. Assim sendo, nesse tipo de escoamento observa-se, além de uma maior dissipação de energia devido ao atrito entre as partículas, a formação de vórtices e áreas de recirculação. (MACINTYRE, 1983; BRUNETTI, 2008)

Na agitação de fluidos, os regimes de escoamento são caracterizados pelo número de Reynolds, um número adimensional que relaciona as forças inerciais e as forças viscosas, e está atrelado ao impelidor. É definido conforme a equação 1:

$$N_{Re} = \frac{\rho N D_i^2}{\mu} \quad (1)$$

Em que ρ (kg/m^3) representa a massa específica do fluido, N (s^{-1}) e D_i (m) representam a velocidade rotacional e o diâmetro do impelidor, respectivamente; e μ (kg/m.s) a viscosidade dinâmica do fluido.

Tem-se então que a classificação do regime de escoamento em um sistema de agitação pela faixa de número de Reynolds varia para cada impelidor, dependendo de suas características geométricas. Em geral, para valores do número de Reynolds menores que 10^1 , o escoamento é considerado laminar, e para regime turbulento, o número de Reynolds será maior que 10^4 . Assim sendo, entre a faixa $10^1 < N_{Re} < 10^4$, é observado um regime de transição. (BRUNETTI, 2008) Mas segundo Oldshue (1983), para determinado impelidor, a faixa que compreende o valor do número de Reynolds que indica o início do regime turbulento é de 10^3 a 10^5 , sendo que para valores do número de Reynolds maiores que 10^5 , o regime é totalmente turbulento, independente do tipo do impelidor.

2.4.2 Número de Potência

O número de potência representa a relação entre as diferenças de pressão provenientes do fluxo (força de arraste) e as forças inerciais, demonstrado pela equação 2:

$$N_p = \frac{P}{\rho \cdot N^3 D_i^5} \quad (2)$$

Onde P (W) representa a potência consumida na agitação, ρ (kg/m³), é a massa específica do fluido, e N (s⁻¹) e D_i (m) representam a velocidade rotacional e o diâmetro do impelidor, respectivamente.

Essa equação demonstra a proporcionalidade da potência em relação à densidade do fluido, ao cubo da velocidade de rotação e a quinta potência do diâmetro do impelidor, sendo a constante de proporcionalidade chamada Número de Potência (N_p). No regime turbulento, o valor de N_p decresce com o aumento do Número de Reynolds (N_{Re}). (MARTINI, 2010; SPOGIS, 2002)

2.5 CONSUMO DE POTÊNCIA DE IMPELIDORES

Em sistemas de agitação e mistura, o consumo de potência é outra das considerações importantes a se levar em consideração, por sua significativa contribuição com o custo da energia aplicada ao processo. A maior parte da energia fornecida pelo impelidor transforma-se em energia cinética turbulenta no interior do vaso, enquanto o resto se dissipa pelas forças viscosas do fluido. Assim, no cálculo da potência, considera-se a transferência da energia do impelidor para o fluido, necessária para superar as forças de arrasto atuantes sobre ele. (VERGEL, 2013)

As variáveis usadas para estabelecer o estudo do cálculo de potência do impelidor são: as propriedades reológicas do fluido (densidade, massa específica e viscosidade), velocidade de rotação do impelidor, diâmetro do tanque e do impelidor, altura do líquido, presença ou ausência de chicanas e posicionamento do impelidor em relação ao tanque. (SILVA; SOUZA; NUNHEZ, 2008)

Para números de Reynolds abaixo de 10^1 (regime laminar), a massa específica do fluido não tem efeito sobre o consumo de potência do impelidor. Apenas durante a operação em regime turbulento é que a massa específica do fluido deve ser levada em conta. (ENGENDRAR, 2021)

Ainda na região turbulenta, onde o número de Reynolds é muito alto, o número de potência é essencialmente constante, logo, a viscosidade não apresenta efeito sobre a potência. Já na região de transição para o regime laminar, o efeito da viscosidade ganha importância, pois as forças viscosas predominam sobre as forças inerciais. Isto significa que o número de potência é inversamente proporcional ao número de Reynolds, e diretamente proporcional à viscosidade. O efeito da viscosidade depende ainda da presença e da forma das chicanas no sistema de agitação. (OLDSHUE, 1983)

A velocidade do impelidor relaciona-se também com o consumo de potência de forma proporcional, pois um aumento de velocidade, para atingir as condições turbulentas no sistema, demanda mais potência para girar o impelidor. Na falta de chicanas, haverá a formação de vórtice no tanque. (SILVA; SOUZA; NUNHEZ, 2008) A velocidade rotacional também se relaciona com a medida experimental do torque, definida pela equação 3:

$$T_q = \frac{P}{2\pi N} \quad (3)$$

Conhecendo o valor da velocidade rotacional (N) e pela medida experimental do torque (T_q), é possível calcular a potência (P) consumida pelo impelidor. Em geral, quanto maior a viscosidade do meio, maior deverá ser o torque aplicado ao eixo e aos impelidores. (GARAVITO, 2013)

O torque é definido como o produto da força aplicada sobre o fluido e a distância da pá do impelidor, sendo a força responsável pela rotação do fluido. Esta variável é de grande importância no projeto de sistemas de agitação, influenciando diretamente o custo da unidade. Várias variáveis características do processo de mistura influenciam no valor do torque, tais como: tamanho do eixo do impelidor, peso do impelidor e as propriedades do fluido. (NAVARRO,

2011) Para o caso do escoamento turbulento em um sistema homogêneo, realiza-se a estimativa da potência por meio de medidas experimentais do torque ou por análise dimensional.

Segundo o teorema de PI de Buckingham (UHL; GREY, 1966), que define a relação das variáveis através de números adimensionais, a análise dimensional aplicada em um tanque agitado em regime turbulento origina a seguinte relação:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_i^5} = k \left(\frac{\rho N D_i^2}{\mu} \right)^a \left(\frac{N^2 D_i}{g} \right)^b \left(\frac{T}{D_i} \right)^c \left(\frac{C}{D_i} \right)^d \left(\frac{Z}{D_i} \right)^e \dots \quad (4)$$

Segundo a análise dimensional, a potência tem as mesmas unidades do produto entre a massa específica ρ (kg/m³), o cubo da velocidade rotacional N (s⁻¹) e o diâmetro do impelidor D_i (m) quando elevado à quinta potência, sendo o número de potência N_p uma constante de proporcionalidade. Assim sendo, quanto maior seu valor, maior será o consumo de energia em forma de potência. (MARTINI, 2010; SPOGIS, 2002)

Na equação 4, sendo k uma constante, o primeiro grupo adimensional representa o número de Reynolds, o segundo, representa o número de Froude (leva em consideração a contribuição das as forças gravitacionais em agitação) e os outros grupos são os efeitos da geometria do sistema, visto que a variável D_i (diâmetro do impelidor) está presente. A equação em questão pode ser simplificada da seguinte forma, mantida a similaridade geométrica:

$$N_p = k(N_{Re})^a \quad (5)$$

A equação 5 é válida para tanques sem chicanas e com regime de escoamento turbulento. Nessas condições, o número de Froude não apresenta influência no valor do número de potência. Em casos onde o número de Reynolds é muito elevado, a equação 5 pode ser simplificada novamente, para $N_p = k'$, uma relação válida para tanques com chicanas. (SILVA, 2014; VERGEL, 2013)

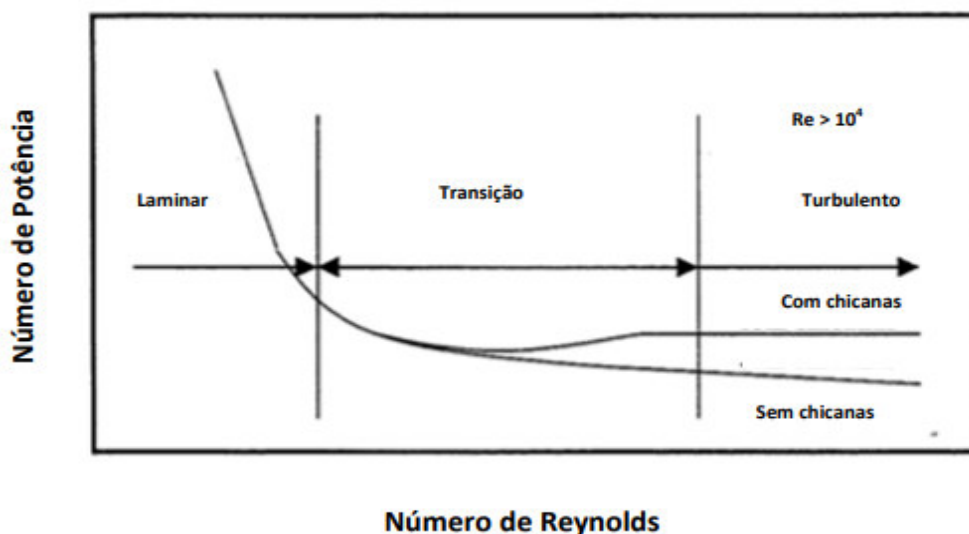
2.5.1 Curvas de Potência (Número de Potência x Número de Reynolds)

A curva de consumo de potência em função do número de Reynolds, obtida por meio de experimentos ou em escala piloto, é muito utilizada para estimar o valor da potência em escala industrial, sendo aplicados procedimentos de “*scale-up*” (aumento de escala). (SILVA, 2019)

As condições básicas de teste para obtenção da curva incluem geralmente um tanque de fundo chato, com altura do líquido (Z) igual ao diâmetro interno do tanque (T) e apenas um

impelidor, posicionado a uma dada distância (C) do fundo. Os dados são apresentados na forma de um gráfico log-log como mostra a Figura 12, que fornece a curva de potência do sistema. (SILVA, 2019)

Figura 12 – Curva de potência geral em função do número de Reynolds.

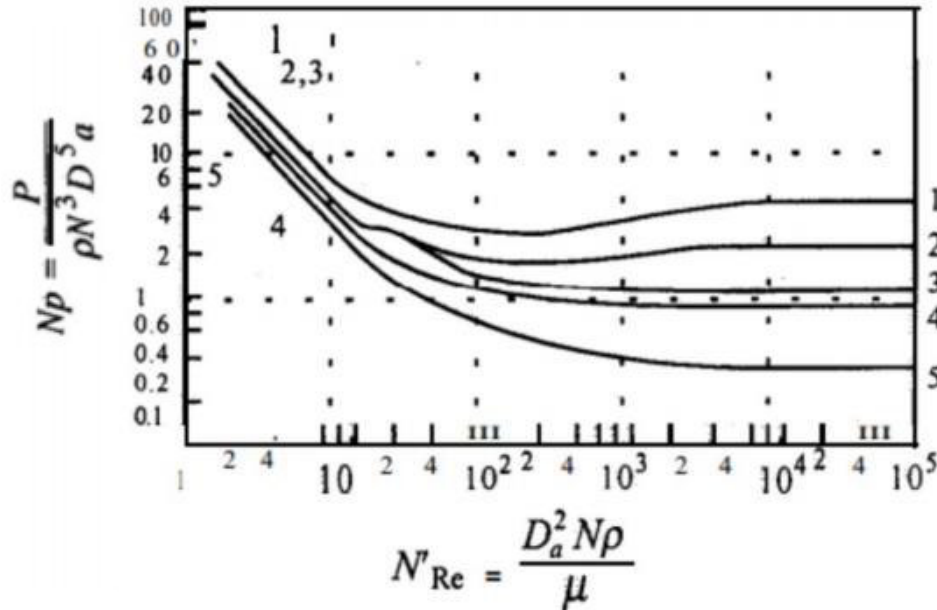


Fonte: SOPHIA (2010).

No escoamento laminar, onde as forças viscosas predominam ($Re < 10^1$ a 10^2 , dependendo do impelidor de interesse), o coeficiente angular da curva de potência vale -1, ou seja, o número de potência é inversamente proporcional ao número de Reynolds ($N_P \propto \frac{1}{N_{Re}}$), e a viscosidade do fluido tem influência forte no consumo de potência. Na zona de transição gradual, a curva mostra uma não linearidade, portanto a relação entre N_P e N_{Re} não é fácil de ser entendida. Já no regime turbulento ($Re > 10^4$), o número de potência é constante e independe da viscosidade. Entre as regiões de regime laminar e turbulento existe uma zona de transição gradual. A figura 12 ilustra esta característica. (JOAQUIM JUNIOR et al, 2012; SOPHIA, 2010)

As curvas de potência variam de acordo com a geometria e o tipo do impelidor. Na literatura, as curvas que são encontradas aplicam-se a fluidos newtonianos, obtidas para diferentes impelidores no mesmo sistema de agitação. (BARBOSA, 2004; SILVA, 2019) A Figura 13 ilustra uma dessas curvas.

Figura 13 – Curvas de potência em função do número de Reynolds para diversos projetos de impelidores.



Fonte: DIAS (2018).

Cada curva da Figura 13 representa um tipo de agitador e suas características. São elas:

- Curva 1: Turbina Rushton de 6 pás retas com chicanas;
- Curva 2: Impelidor de 6 pás retas, com chicanas;
- Curva 3: Impelidor de 6 pás inclinadas a 45°, com chicanas;
- Curva 4: Propulsor de inclinação 2 D_i (na figura, D_a) com chicanas;
- Curva 5: Propulsor de inclinação D_i (na figura, D_a), com chicanas; (DIAS, 2018)

2.6 NÚMERO DE POTÊNCIA (N_p) DETERMINADO POR NAGATA (1975)

Partindo da observação do fenômeno de agitação e com base na teoria do vórtice combinado de Rankine, que diz que próximo ao centro do vaso, existe uma zona de rotação cilíndrica onde as partículas do fluido rodam com velocidade angular praticamente igual à do impelidor, Nagata (1975) define o número de potência como descrito abaixo, sendo o primeiro termo uma representação do aumento do consumo de potência em função do fator viscosidade.

$$N_p = \frac{A}{N_{Re}} + B \left(\frac{10^3 + 0,6\xi N_{Re}^\alpha}{10^3 + 1,6\xi N_{Re}^\alpha} \right)^p \quad (6)$$

Ao se acrescentar a equação 6 os efeitos do número (n_p) e do ângulo de inclinação das pás (θ), além dos efeitos do nível do líquido no tanque (H), Nagata (1975) chega a uma equação geral para os impelidores de pás retas centralizados em tanques sem chicanas, representada a seguir:

$$N_p = \frac{A}{N_{Re}} + B \left(\frac{10^3 + 1,2N_{Re}^{0,66}}{10^3 + 3,2N_{Re}^{0,66}} \right)^p \left(\frac{H}{T} \right)^{\left(0,35 + \frac{Wn_p}{2T}\right)} (\text{sen}\theta)^{1,2} \quad (7)$$

Onde o n_p é o número de pás, e os coeficientes A, B e p são obtidos pelas equações 8, 9 e 10, respectivamente:

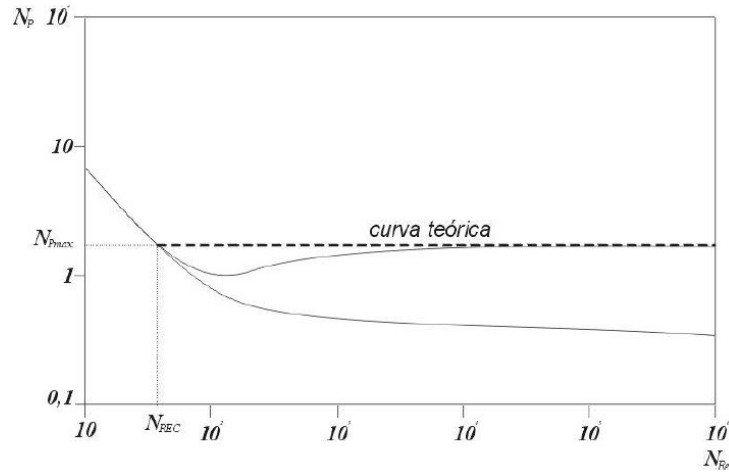
$$A = 14 + \left(\frac{Wn_p}{2T} \right) \left[670 \left(\frac{D_i}{T} - 0,6 \right)^2 + 185 \right] \quad (8)$$

$$B = 10^{\left[1,3 - 4 \left(\frac{Wn_p}{T} - 0,5 \right)^2 - 1,14 \left(\frac{D_i}{T} \right) \right]} \quad (9)$$

$$p = 1,1 + 4 \left(\frac{Wn_p}{T} \right) - 2,5 \left(\frac{D_i}{T} - 0,5 \right)^2 - 7 \left(\frac{Wn_p}{T} \right)^4 \quad (10)$$

Nagata (1975) demonstra ainda, métodos para calcular o número de potência máximo (N_{Pmax}) para impelidores em tanques com chicanas, que surgem a partir de ajustes baseados em observações empíricas. Esse número de potência máximo encontra-se na faixa de trabalho turbulenta do impelidor, quando o N_p é essencialmente constante. A obtenção do N_{Pmax} se dá por meio da determinação do número de Reynolds crítico (N_{Rec}), representado pelo cruzamento da curva $N_p \times N_{Re}$ do impelidor com a reta equivalente ao número de potência no escoamento turbulento, prolongada. (SILVA, 2019) A Figura 14 mostra esse procedimento.

Figura 14 – Curva do Número de potência máximo em relação ao Número de Reynolds crítico.



Fonte: NAGATA (1975).

A equação 2.12 mostra o cálculo para o número de Reynolds crítico para impelidores com pás inclinadas:

$$N_{ReC} = 10^{4(1-\text{sen}\theta)} \left[\frac{25}{\frac{Wn_p}{T}} \left(\frac{D_i}{T} - 0,4 \right)^2 + \left(\frac{\frac{Wn_p}{T}}{0,11 \frac{Wn_p}{T} - 0,0048} \right) \right] \quad (11)$$

O número de potência máximo (N_{Pmax}) pode ser calculado ao substituir N_{ReC} no lugar de N_{Re} na equação 2.7. Esse N_{Pmax} corresponde à condição onde as chicanas do vaso são as maiores, na condição $\frac{w}{T}$. A potência aumenta rapidamente com a largura das chicanas, até atingir um número máximo, em $\frac{w}{T}$. Para larguras maiores de chicanas, a influência no número de potência máximo se perde. A relação entre a largura das chicanas onde a potência máxima é atingida representa-se da seguinte forma, sendo n_B o número de chicanas e w_B sua largura:

$$\left(\frac{w_B}{T} \right)^{1,2} n_B = 0,35 \quad (12)$$

O número de potência máximo N_{PB} , quando as chicanas são menores do que na condição anterior, pode ser calculado conforme cita Nagata (1975):

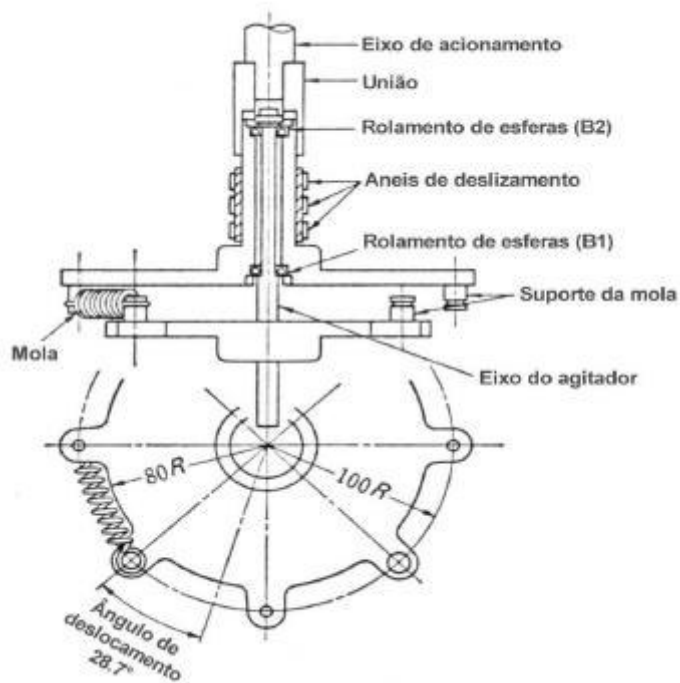
$$N_{PB} = N_{Pmax} - \left[1 - 2,9 \left(\frac{w_B}{T} \right)^{1,2} n_B \right]^2 \left[N_{Pmax} - B \left(\frac{0,6}{1,6} \right)^P \right] \quad (13)$$

2.7 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA EM UNIDADES PILOTO DE AGITAÇÃO COM TRANSDUTORES DE TORQUE (TORQUÍMETRO)

Os transdutores de torque são aparelhos instalados no eixo do impelidor que são capazes de medir a deflexão angular relativa entre a porção superior e inferior do eixo através de dispositivos elétricos como reostatos, indutores ou extensômetros.

Nagata (1975) descreve o dinamômetro utilizado por ele como o aparelho que mede a reação ao torque. Compõe-se por dois discos paralelos, um fixo no eixo do acionamento e outro no eixo do impelidor, conectados por quatro molas helicoidais tangenciais ao eixo e igualmente espaçadas. O dispositivo é ilustrado conforme a Figura 15.

Figura 15 – Dinamômetro do transdutor de torque.

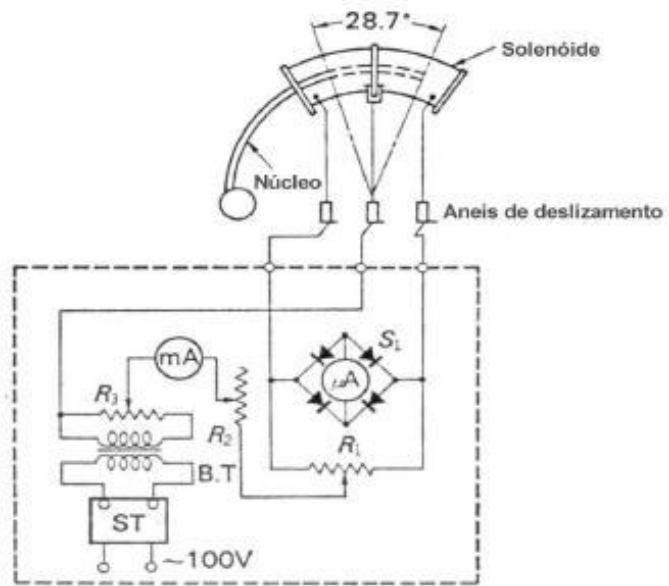


Fonte: NAGATA (1975).

A medida do torque se dá pelo ângulo de deslocamento entre os discos, indicado por um medidor por indutância composto por um solenóide fixo ao disco superior e um núcleo de aço fixo no disco inferior. A indutância do conjunto varia de acordo com o ângulo de deslocamento relativo entre os dois discos e é medida em microamperes. Um esquema ilustrativo desse método de medida é demonstrado na Figura 16. O atrito estático do conjunto pode ser determinado ao

remover as molas e medindo o mínimo torque necessário para girar o eixo do agitador. Este modelo realizado por NAGATA (1975) é considerado um dos mais eficientes e citados em grande parte da literatura e publicações da área.

Figura 16 – Diagrama esquemático de medição do torque por meio do deslocamento angular do dinamômetro.



Fonte: NAGATA (1975).

3 MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção, inicialmente serão descritos os materiais e metodologia empregados por Silva (2019), cujos ensaios e resultados servirão de base para se atingir os objetivos deste trabalho. Após, será descrita a metodologia para a análise dos dados e resultados para a elaboração da equação empírica.

3.1 MATERIAIS

Inicialmente, os materiais necessários aos ensaios experimentais foram os seguintes:

- i. Unidade piloto de agitação de fluidos, cuja capacidade é de 50 litros;
- ii. Impelidores de pás retas: 30°, 45°, 60°, 90°;
- iii. Computador para captação dos dados provenientes das unidades piloto;
- iv. Software MAGTROL para leitura de potência e torque fornecido pelo torquímetro;
- v. Instrumentos para medição como trena, paquímetro, termômetro digital, micrômetro;
- vi. Fluido de ensaio: água, em condições ambientais.

3.1.1 Unidade Piloto de Agitação

A unidade piloto de agitação compõe-se de uma estrutura montada em chassi móvel com tanque acrílico de 50 litros, agitador fixado por castelo com acoplamentos e mancais, painel elétrico de proteção e comandos com saídas para computador, e torquímetro. A Figura 17 ilustra uma fotografia da referida unidade.

Figura 17 – Unidade piloto de agitação.



Fonte: SILVA (2019).

O tanque da unidade de agitação possui fundo toriesférico ASME 10%, com entrada para três chicanas (separadas a 120°) ou quatro chicanas (separadas a 90°) de aço inoxidável, dotado de flange com parafusos de fixação, acoplado a sua parte cilíndrica em acrílico transparente, conforme Figura 18. As dimensões do tanque encontram-se listadas na Tabela 2, e a simbologia destas medidas estão destacadas na Figura 19.

Figura 18 – Conjunto do tanque de agitação de 50 L.



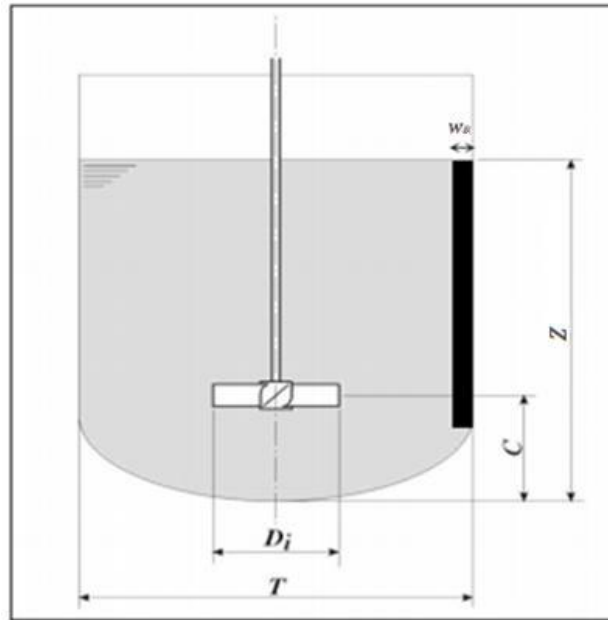
Fonte: SILVA (2019).

Tabela 2 – Dimensões do tanque de agitação e chicanas.

Tanque de 50 litros	
Diâmetro interno (T)	380 mm
Altura do líquido (Z)	380 mm
Altura total do tanque (altura cilíndrica, H_c)	693 mm
Distância do impelidor ao fundo ($C = Z/3$)	126,7 mm
Número de chicanas	3 ou 4
Largura das chicanas (w_B) ($w_B/T = 0,1$)	38 mm

Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

Figura 19 – Representação das dimensões do conjunto do tanque de agitação de 50 L.



Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

Os elementos que compõem o conjunto de agitação do tanque são o motor, as estruturas de acoplamento entre o eixo do motor e o torquímetro, de conexão entre o torquímetro e o eixo do agitador, bem como o eixo do agitador e impelidor propriamente. O sistema para medição do torque é composto por um transdutor de torque, um mostrador digital e o software de coleta de dados instalado em computador, conforme fotografia representada na Figura 20.

O torquímetro Magtrol TM 307 de fornecimento da empresa Magtrol S.A permite medição precisa de torque e velocidade rotacional. O mostrador digital ou *display* (Magtrol 3410) apresenta os valores medidos de torque, velocidade rotacional e potência mecânica. Na Figura 20, destaca-se a parte frontal do mostrador.

Figura 20 – Sistema de aquisição de dados com destaque para a parte frontal do mostrador digital.



Fonte: SILVA (2019).

3.1.2 Software

O software do torquímetro da Magtrol “*Motor testing software, torque1.0, revision 1.0*”- ou apenas “Torque 1.0, é um programa Windows que coleta automaticamente o torque, a velocidade rotacional e os dados de potência mecânica. Os dados podem ser impressos, apresentados de forma gráfica ou rapidamente salvos em uma planilha do Microsoft Excel. Dentre os recursos padrão do Torque 1.0 estão: a obtenção do torque, apresentação de gráficos multi-eixos, parâmetro medido x tempo, razão de amostragem ajustável e ajuste polinomial de curva.

3.1.3 Impelidores de Quatro Pás Retas Inclinadas

As variáveis a serem consideradas para os ensaios, referentes aos impelidores de pás retas, são a largura da pá em relação ao diâmetro do impelidor (w/D_i), variando entre 14% e 30%; o diâmetro do impelidor de em relação ao diâmetro do tanque (D_i/T), variando de 25% a 70%; e o número de pás do impelidor (n_p) fixado em quatro pás. Foram utilizados quatro tipos de impelidores, variando a inclinação de suas quatro pás, entre 30°, 45°, 60° e 90°. O resumo das variáveis se encontra na Tabela 3.

Tabela 3 – Relação das variáveis observadas em relação aos impelidores.

Variável	Conjunto de variações 1	Conjunto de variações 2	Conjunto de variações 3	Conjunto de variações 4	Conjunto de variações 5
$\frac{w}{D_i}$	0,14	0,17	0,20	0,25	0,30
$\frac{D_i}{T}$	0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70	0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70	0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70	0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70	0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70
n_p	4	4	4	4	4
θ	30°; 45°; 60°; 90°	30°; 45°; 60°; 90°	30°; 45°; 60°; 90°	30°; 45°; 60°; 90°	30°; 45°; 60°; 90°

Fonte: Elaboração própria.

Ao total, foram necessários 120 impelidores de quatro pás: para um valor $\frac{w}{D_i}$ fixado (tomaram-se cinco variações), e para um dado ângulo de inclinação de pás (tomaram-se quatro angulações diferentes), foram utilizados seis modelos de impelidor com diferentes diâmetros. Nas Tabelas 4, 5, 6, 7 e 8, são detalhadas as características de cada um dos impelidores, assim como a simbologia a ser adotada para suas referências. Esta simbologia foi elaborada mediante a seguinte lógica:

Por exemplo, Impelidor ‘I-354’, sendo:

I → para ‘impelidor’;





3 → para o terceiro valor de $\frac{w}{D_i}$, onde 1 = 0,14; 2 = 0,17; 3 = 0,20 e 4 = 0,30;

5 → para o quinto valor de $\frac{D_i}{T}$, onde 1 = 0,25; 2 = 0,33; 3 = 0,40; 4 = 0,45; 5 = 0,55 e 6 = 0,70;

4 → para o quarto valor de ângulo θ , onde 1 = 30°; 2 = 45°; 3 = 60° e 4 = 90°.





Desse modo, o impelidor I-354 é aquele que possui as relações $\frac{w}{D_i} = 0,20$, $\frac{D_i}{T} = 0,55$ e ângulo de inclinação das pás $\theta = 90^\circ$.

Tabela 4 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,14$.

TIPO DO IMPELIDOR	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS			
	Modelo	$\frac{D_i}{T}$	D_i (mm)	w (mm)
 <p>30°</p>	I-111	0,25	95	13,30
	I-121	0,33	125,4	17,56
	I-131	0,40	152	21,28
	I-141	0,45	171	23,94
	I-151	0,55	209	29,26
	I-161	0,70	266	37,24
 <p>45°</p>	I-112	0,25	95	13,30
	I-122	0,33	125,4	17,56
	I-132	0,40	152	21,28
	I-142	0,45	171	23,94
	I-152	0,55	209	29,26
	I-162	0,70	266	37,24
 <p>60°</p>	I-113	0,25	95	13,30
	I-123	0,33	125,4	17,56
	I-133	0,40	152	21,28
	I-143	0,45	171	23,94
	I-153	0,55	209	29,26
	I-163	0,70	266	37,24
 <p>90°</p>	I-114	0,25	95	13,30
	I-124	0,33	125,4	17,56
	I-134	0,40	152	21,28
	I-144	0,45	171	23,94
	I-154	0,55	209	29,26
	I-164	0,70	266	37,24


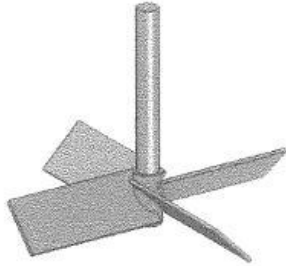


Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

Tabela 5 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,17$.

TIPO DO IMPELIDOR	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS			
	Modelo	$\frac{D_i}{T}$	D_i (mm)	w (mm)
 <p>30°</p>	I-211	0,25	95	16,15
	I-221	0,33	125,4	21,32
	I-231	0,40	152	25,84
	I-241	0,45	171	29,07
	I-251	0,55	209	35,53
	I-261	0,70	266	45,22
 <p>45°</p>	I-212	0,25	95	16,15
	I-222	0,33	125,4	21,32
	I-232	0,40	152	25,84
	I-242	0,45	171	29,07
	I-252	0,55	209	35,53
	I-262	0,70	266	45,22
 <p>60°</p>	I-213	0,25	95	16,15
	I-223	0,33	125,4	21,32
	I-233	0,40	152	25,84
	I-243	0,45	171	29,07
	I-253	0,55	209	35,53
	I-263	0,70	266	45,22
 <p>90°</p>	I-214	0,25	95	16,15
	I-224	0,33	125,4	21,32
	I-234	0,40	152	25,84
	I-244	0,45	171	29,07
	I-254	0,55	209	35,53
	I-264	0,70	266	45,22


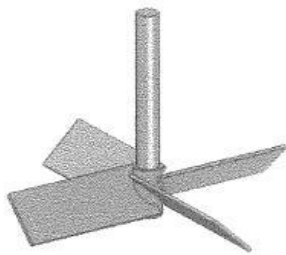


Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

Tabela 6 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,20$.

TIPO DO IMPELIDOR	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS			
	Modelo	$\frac{D_i}{T}$	D_i (mm)	w (mm)
 <p>30°</p>	I-311	0,25	95	19,00
	I-321	0,33	125,4	25,08
	I-331	0,40	152	30,40
	I-341	0,45	171	34,20
	I-351	0,55	209	41,80
	I-361	0,70	266	53,20
 <p>45°</p>	I-312	0,25	95	19,00
	I-322	0,33	125,4	25,08
	I-332	0,40	152	30,40
	I-342	0,45	171	34,20
	I-352	0,55	209	41,80
	I-362	0,70	266	53,20
 <p>60°</p>	I-313	0,25	95	19,00
	I-323	0,33	125,4	25,08
	I-333	0,40	152	30,40
	I-343	0,45	171	34,20
	I-353	0,55	209	41,80
	I-363	0,70	266	53,20
 <p>90°</p>	I-314	0,25	95	19,00
	I-324	0,33	125,4	25,08
	I-334	0,40	152	30,40
	I-344	0,45	171	34,20
	I-354	0,55	209	41,80
	I-364	0,70	266	53,20


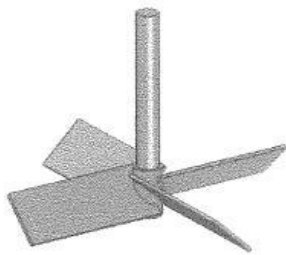


Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

Tabela 7 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,25$.

TIPO DO IMPELIDOR	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS			
	Modelo	$\frac{D_i}{T}$	D_i (mm)	w (mm)
 <p>30°</p>	I-411	0,25	95	23,75
	I-421	0,33	125,4	31,35
	I-431	0,40	152	38,00
	I-441	0,45	171	42,75
	I-451	0,55	209	52,25
	I-461	0,70	266	66,50
 <p>45°</p>	I-412	0,25	95	23,75
	I-422	0,33	125,4	31,35
	I-432	0,40	152	38,00
	I-442	0,45	171	42,75
	I-452	0,55	209	52,25
	I-462	0,70	266	66,50
 <p>60°</p>	I-413	0,25	95	23,75
	I-423	0,33	125,4	31,35
	I-433	0,40	152	38,00
	I-443	0,45	171	42,75
	I-453	0,55	209	52,25
	I-463	0,70	266	66,50
 <p>90°</p>	I-414	0,25	95	23,75
	I-424	0,33	125,4	31,35
	I-434	0,40	152	38,00
	I-444	0,45	171	42,75
	I-454	0,55	209	52,25
	I-464	0,70	266	66,50

Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

Tabela 8 – Impelidores de quatro pás retas inclinadas do piloto de 50 L, para $w/D_i = 0,30$.

TIPO DO IMPELIDOR	PARÂMETROS GEOMÉTRICOS			
	Modelo	$\frac{D_i}{T}$	D_i (mm)	w (mm)
 <p>30°</p>	I-511	0,25	95	28,50
	I-521	0,33	125,4	37,62
	I-531	0,40	152	45,60
	I-541	0,45	171	51,30
	I-551	0,55	209	62,70
	I-561	0,70	266	79,80
 <p>45°</p>	I-512	0,25	95	28,50
	I-522	0,33	125,4	37,62
	I-532	0,40	152	45,60
	I-542	0,45	171	51,30
	I-552	0,55	209	62,70
	I-562	0,70	266	79,80
 <p>60°</p>	I-513	0,25	95	28,50
	I-523	0,33	125,4	37,62
	I-533	0,40	152	45,60
	I-543	0,45	171	51,30
	I-553	0,55	209	62,70
	I-563	0,70	266	79,80
 <p>90°</p>	I-514	0,25	95	28,50
	I-524	0,33	125,4	37,62
	I-534	0,40	152	45,60
	I-544	0,45	171	51,30
	I-554	0,55	209	62,70
	I-564	0,70	266	79,80

Fonte: Adaptado de SILVA (2019).

3.2 MÉTODOS

Silva (2019) realizou a medição de torque com a finalidade de levantamento da potência consumida diretamente por meio de um transdutor de torque (torquímetro), interligado com seu mostrador digital conectado ao computador que, por meio do software desenvolvido pelo fabricante do torquímetro, obtém-se dados de torque e estes são convertidos em valores de potência.

3.2.1 Metodologia para Análise dos Dados Experimentais por Torquímetro – MAGTROL

A análise dos dados obtidos por meio do torquímetro segue as etapas listadas a seguir:

- i. Entrada de dados: velocidade rotacional inicial (rpm), velocidade rotacional máxima (rpm); intervalo de tempo entre as medições de 15 em 15 segundos (para cada rotação lida de 5 em 5 rpm);
- ii. Dados de saída do software: velocidade rotacional (rpm), do torque (mW) e potência (W), que são dispostos em uma planilha (bloco de notas), juntamente com o tempo de execução em segundos;
- iii. Os dados de saída são filtrados através do cálculo da média do número de potência de 5 em 5 rpm;
- iv. Com os dados filtrados, cria-se uma tabela contendo as informações mais relevantes como: número de Reynolds, número de potência do sistema eixo + impelidor, potência consumida só do eixo e número de potência só do impelidor;
- v. Calcula-se a média do número de potência (eixo + impelidor) e o número de potência (impelidor) para o número de Reynolds no regime totalmente turbulento, ou seja, $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$, dispondo os dados em uma planilha no Microsoft Excel.
- vi. Com os valores das médias do número de potência para cada tipo de impelidor, na presença e ausência de chicanas, organizou-se estes valores em tabelas para melhor apresentação e organização dos resultados;
- vii. Realizou-se a análise da influência de cada um dos parâmetros geométricos por meio da observação do comportamento de curvas logarítmicas construídas no Microsoft Excel;

- viii. Calculou-se, por meio da função Solver do Microsoft Excel, os parâmetros numéricos da equação empírica para o cálculo do consumo de potência, para o impelidor de geometria $w/D_i = 0,20$ (padrão); $D_i/T = 0,40$ e ângulo de inclinação das pás = 45° (padrão para fluxo axial), tendo como base as análises de comportamento do número de potência realizadas anteriormente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão descritos os resultados das análises do número de potência realizadas em relação a algumas das principais variáveis do sistema de agitação em estudo, para compreender seu comportamento e fornecer a base para a obtenção da equação que descreve o número de potência em um tanque com determinados conjuntos de agitação.

4.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AGITAÇÃO EM RELAÇÃO ÀS PRINCIPAIS VARIÁVEIS

Tomando por base os experimentos realizados por SILVA (2019), foi obtida a Tabela 9, que apresenta os valores do Número de Potência em tanques com três e quatro chicanas, para a relação geométrica padrão de w/D_i , igual a 0,20, em uma região completamente turbulenta ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$). Ao se analisar os resultados, observa-se uma diferença pequena nos resultados do N_P para as duas situações, ou seja, em geral os valores de N_P para tanques com quatro chicanas são um pouco maiores do que os valores para tanques com três chicanas.

Levando-se em conta a equação que descreve o número de potência (equação 2.2), e que este representa a relação entre as diferenças de pressão decorrentes do fluxo e as forças inerciais, é esperado que o valor de N_P seja menor conforme aumenta o valor do diâmetro do impelidor, D_i .

Para o tanque com três chicanas, observou-se que para os conjuntos de variações de angulação $\theta = 30^\circ$, $\theta = 45^\circ$ e $\theta = 60^\circ$ (fluxos axiais), mantendo constante w/D_i , o valor do número de potência diminui até certo ponto, ao se utilizar impelidores de maior diâmetro, voltando a aumentar nos pontos finais. Para o conjunto de angulação $\theta = 90^\circ$, impelidor que provoca um fluxo radial predominante, observa-se que dois pontos e o último destoam do padrão das angulações anteriores, possivelmente por conta do maior cisalhamento conferido de forma característica pelo fluxo radial

Para o tanque com quatro chicanas, o seguinte padrão se mantém: nos conjuntos de variações de angulação cujo fluxo é predominantemente axial, ao aumentar o diâmetro dos impelidores, o valor de N_P diminui até certo ponto, voltando a aumentar nos pontos finais. A exceção se faz por conta do conjunto de angulação $\theta = 90^\circ$, onde N_P só tende a aumentar,

indicando um alto cisalhamento no sistema, caracterizado tanto pela ocorrência do fluxo radial quanto pelo número de chicanas do tanque ser o mesmo número de pás do impelidor.

Tabela 9 – Resultados de Número de Potência para Tanques com Três e Quatro Chicanas (relação $w/D_i = 0,20$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$).

Modelo	$\frac{D_i}{T}$	θ	$\frac{w}{D_i}$	Np (impelidor) – Torquímetro (MAGTROL)	
				Três chicanas	Quatro chicanas
I-311	0,25	30°	0,20	0,82	0,70
I-321	0,33	30°	0,20	0,58	0,55
I-331	0,40	30°	0,20	0,52	0,47
I-341	0,45	30°	0,20	0,43	0,46
I-351	0,55	30°	0,20	0,45	0,50
I-361	0,70	30°	0,20	0,63	0,66
I-312	0,25	45°	0,20	1,37	1,32
I-322	0,33	45°	0,20	1,27	1,32
I-332	0,40	45°	0,20	1,12	1,14
I-342	0,45	45°	0,20	1,06	1,11
I-352	0,55	45°	0,20	1,18	1,25
I-362	0,70	45°	0,20	1,49	1,66
I-313	0,25	60°	0,20	1,97	2,00
I-323	0,33	60°	0,20	1,86	1,87
I-333	0,40	60°	0,20	1,83	1,86
I-343	0,45	60°	0,20	1,76	1,85
I-353	0,55	60°	0,20	2,04	2,16
I-363	0,70	60°	0,20	2,19	2,50
I-514	0,25	90°	0,20	2,42	2,38
I-524	0,33	90°	0,20	2,64	2,76
I-534	0,40	90°	0,20	2,73	2,95
I-544	0,45	90°	0,20	2,62	3,09

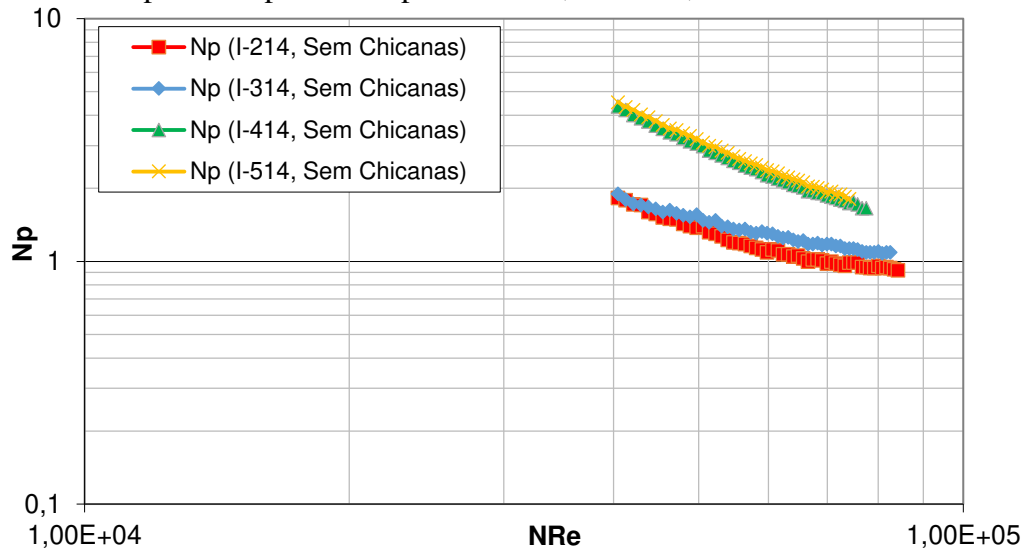
I-554	0,55	90°	0,20	2,60	3,12
I-564	0,70	90°	0,20	2,80	3,30

Fonte: Elaboração própria.

4.2 NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS EM TANQUES SEM CHICANAS

Escolheu-se representar graficamente os resultados do número de potência no tanque de 50 L sem chicanas, pois devido a presença de um vórtice central formado por ação de forças centrífugas capazes de atingir a pá do impelidor, característico de tanques de agitação sem chicanas, faz com que N_P não atinja um valor constante no regime turbulento. Ainda por conta da formação dos vórtices, foi necessário um controle da velocidade rotacional máxima permitida para cada impelidor testado. Assim, na análise das Figuras 21 a 24 o número de potência diminui com o aumento do número de Reynolds sem atingir uma estabilidade, devido à ausência de chicanas. A Figura 21 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em regime totalmente turbulento, no tanque sem chicanas para impelidores de pás retas a 90°, $D_i/T = 0,25$ (o menor valor de diâmetro dentre os impelidores considerados) com análise da variação w/D_i (0,17; 0,20; 0,25 e 0,30). É possível observar que a variação do número de potência cresce com o aumento da relação geométrica w/D_i . Para cada modelo foi analisada uma variação da velocidade rotacional da seguinte forma: I-214 ($w/D_i = 0,17$) de 240 rpm a 500 rpm; I-314 ($w/D_i = 0,20$) de 240 rpm a 490 rpm; I-414 ($w/D_i = 0,25$) de 240 rpm a 460 rpm e I-514 ($w/D_i = 0,30$) de 240 rpm a 440 rpm.

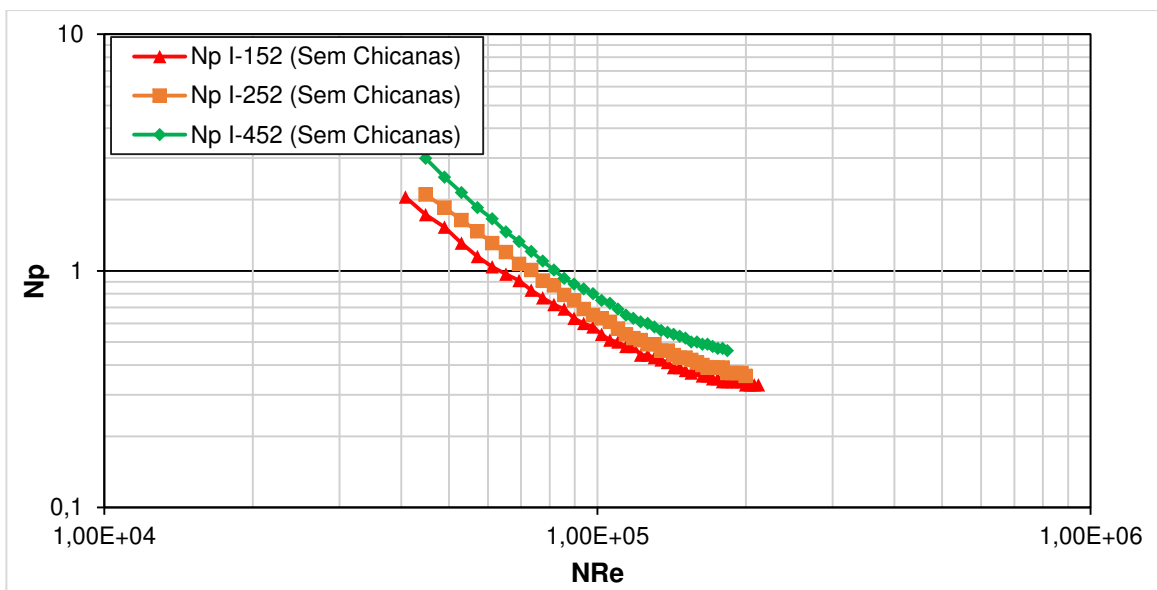
Figura 21 – Número de Potência em relação ao Número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor de pás retas 90°, $D_i/T = 0,25$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 22 traz os resultados do número de potência em função do número de Reynolds em regime totalmente turbulento ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para pás retas inclinadas a 45°, $D_i/T = 0,55$, analisando a variação de w/D_i (0,14; 0,17 e 0,25). Observa-se que a variação do número de potência é maior com o aumento da relação geométrica w/D_i .

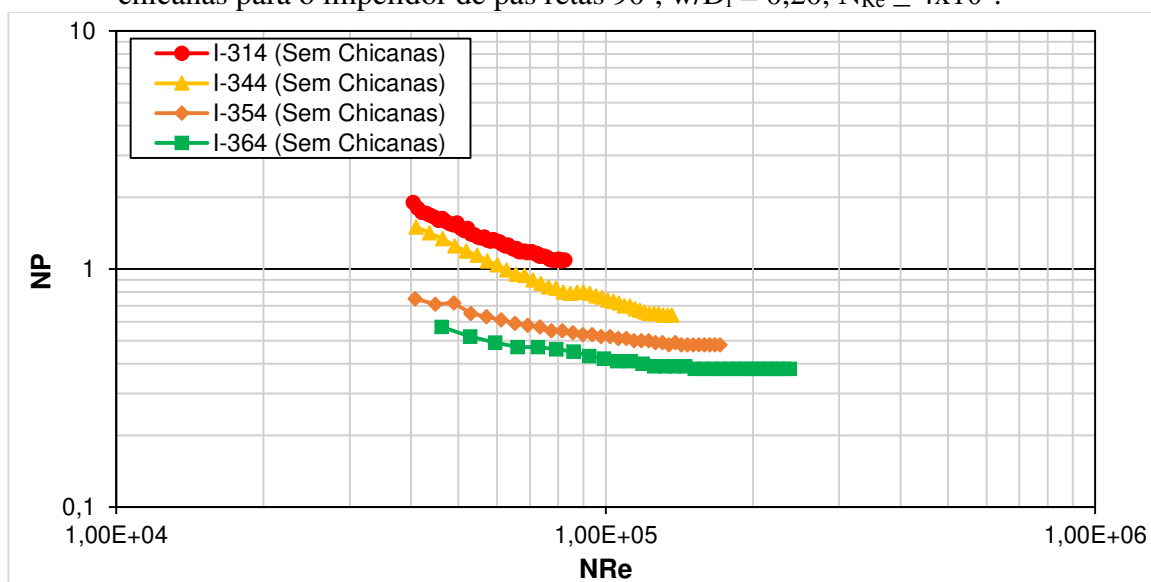
Figura 22 – Número de Potência em relação ao Número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor de pás retas 45°, $D_i/T = 0,55$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 23 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds em regime totalmente turbulento ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$), em tanques sem chicanas para pás retas 90° , $w/D_i = 0,20$ (relação padrão), analisando a variação D_i/T (0,25; 0,45; 0,55 e 0,70). Observa-se que a variação do número de potência diminui com o aumento da relação geométrica D_i/T .

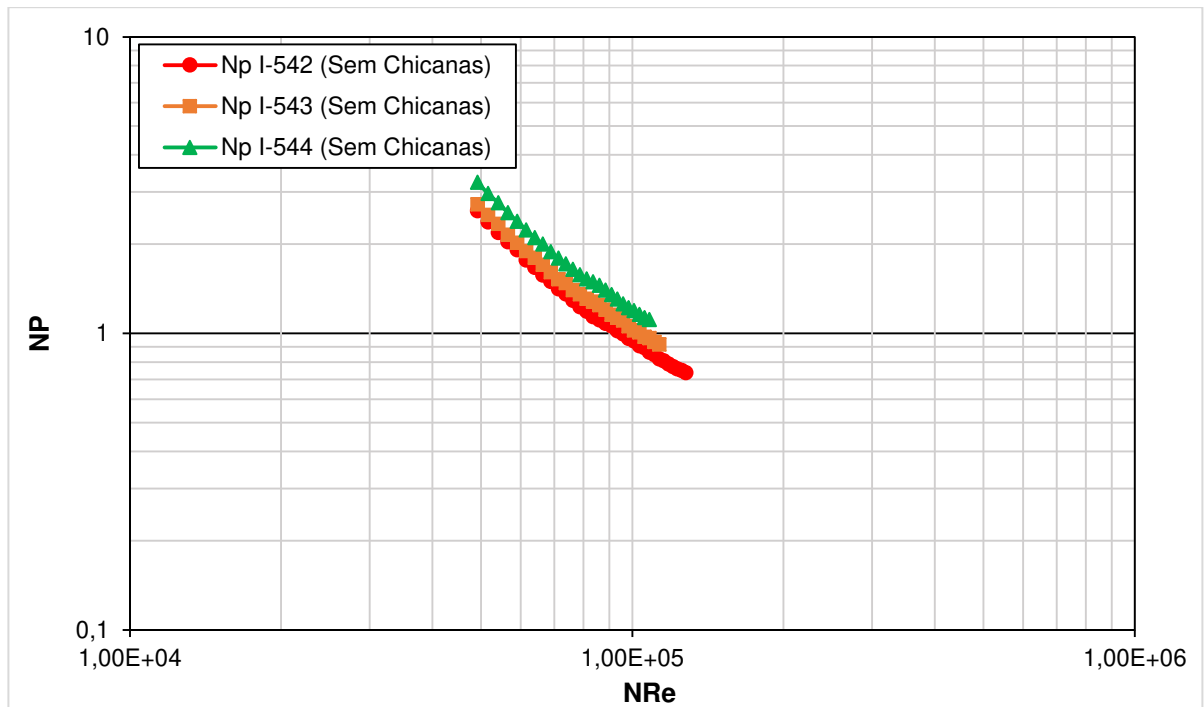
Figura 23 – Número de Potência em relação ao Número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor de pás retas 90° , $w/D_i = 0,20$, $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 24 mostra os resultados do número de potência em função do número de Reynolds em regime totalmente turbulento ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$), no tanque sem chicanas para as seguintes relações geométricas: $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,30$, variando o ângulo de inclinação das pás. É possível observar que a variação do número de potência é maior conforme aumenta a angulação da pá.

Figura 24 – Número de Potência em relação ao Número de Reynolds em tanques sem chicanas com $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,30$, para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$.

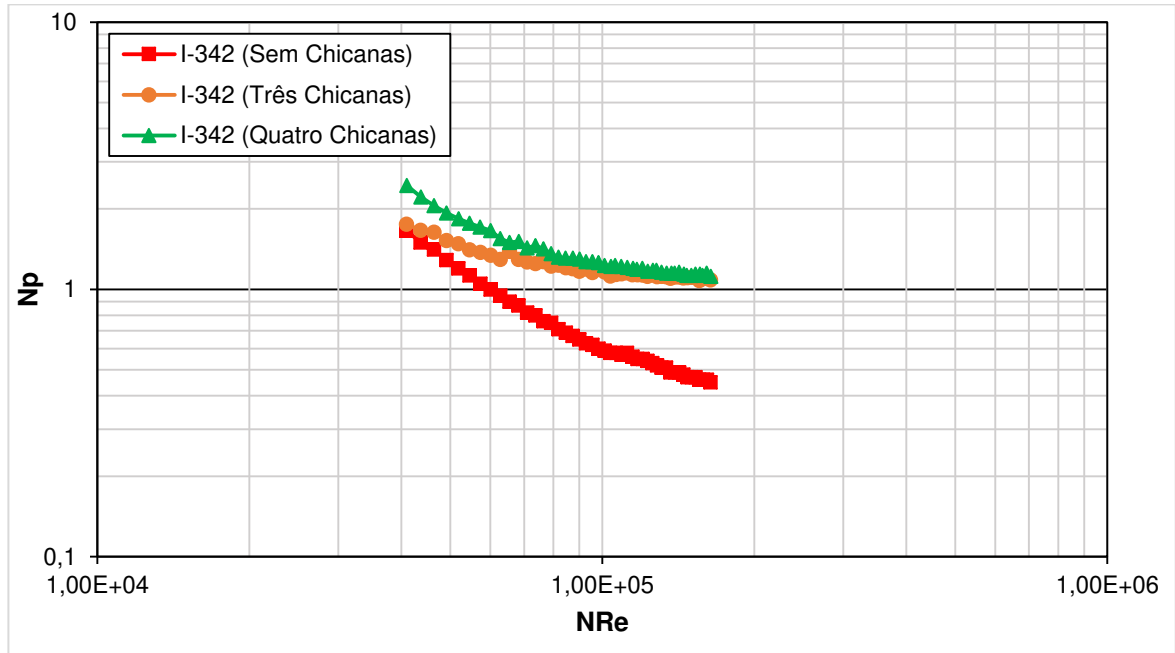


Fonte: Elaboração própria.

4.3 COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA EM TANQUES COM E SEM CHICANAS

A Figura 25 traz uma comparação dos resultados do número de potência em função do número de Reynolds para um tanque sem e com chicanas (3 e 4 chicanas) para um impelidor de pás retas inclinadas 45° , $w/D_i = 0,20$ (configuração padrão) e $D_i/T = 0,45$, num regime totalmente turbulento sendo $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$, e faixa de velocidade rotacional de operação de 75 rpm a 300 rpm. No gráfico é possível observar que a variação do número de potência em tanques com chicanas é maior do que em tanques sem chicanas, onde, a partir de $N_{Re} = 1 \times 10^5$ em tanques com chicanas, N_P tende a estabilizar e assumir um valor constante de aproximadamente igual a 1,1. No mesmo valor analisado de N_{Re} , em tanques sem chicanas não se obtém um valor constante, ou seja, o número de potência continua diminuindo com o aumento do número de Reynolds que, para esse caso, o N_P está em torno de 0,6. Isso se dá devido à formação de vórtices que é característica em sistemas de agitação sem chicanas.

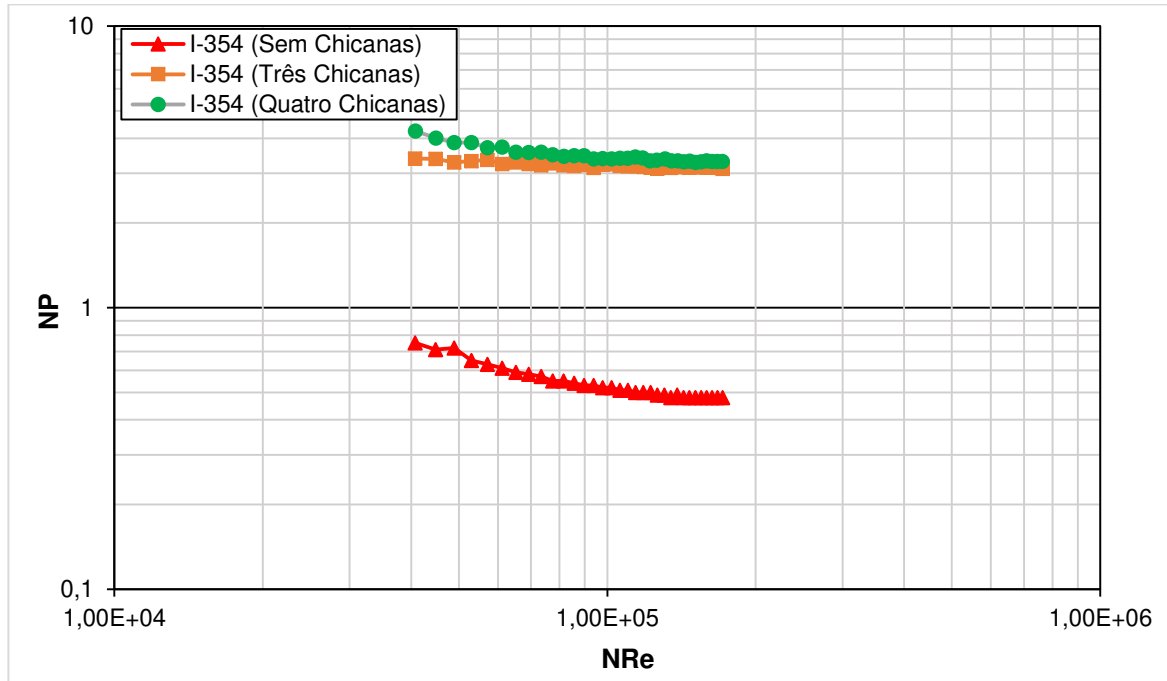
Figura 25 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem e com chicanas para o impelidor de pás retas inclinadas 45°, $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$.



Fonte: Elaboração própria.

A Figura 26 apresenta uma comparação dos resultados do número de potência em função do número de Reynolds para tanque sem e com chicanas (3 e 4 chicanas) para um impelidor pás retas 90°, $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,55$. Os resultados foram analisados em uma faixa onde o número de Reynolds, $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$. Pode-se observar nesta faixa que a variação do número de potência em tanques com chicanas é maior do que em tanques sem chicanas, onde, a partir de $N_{Re} = 1 \times 10^5$ em tanques com chicanas, N_P tende a estabilizar e assumir um valor constante e aproximadamente igual a 3,1 para tanque com três chicanas e 3,3 para tanques com quatro chicanas. Já em tanques sem chicanas, o número de potência continua diminuindo com o aumento do número de Reynolds, chegando a um valor de N_P igual a 0,5 para $N_{Re} = 1 \times 10^5$. Outra observação da Figura 26 é que esta análise dos resultados do número de potência diz respeito a um sistema com um impelidor pás retas 90°, ou seja, impelidor do tipo de fluxo radial.

Figura 26 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem e com chicanas para o impelidor de pás retas inclinadas 90°, $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,55$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$.



Fonte: Elaboração própria.

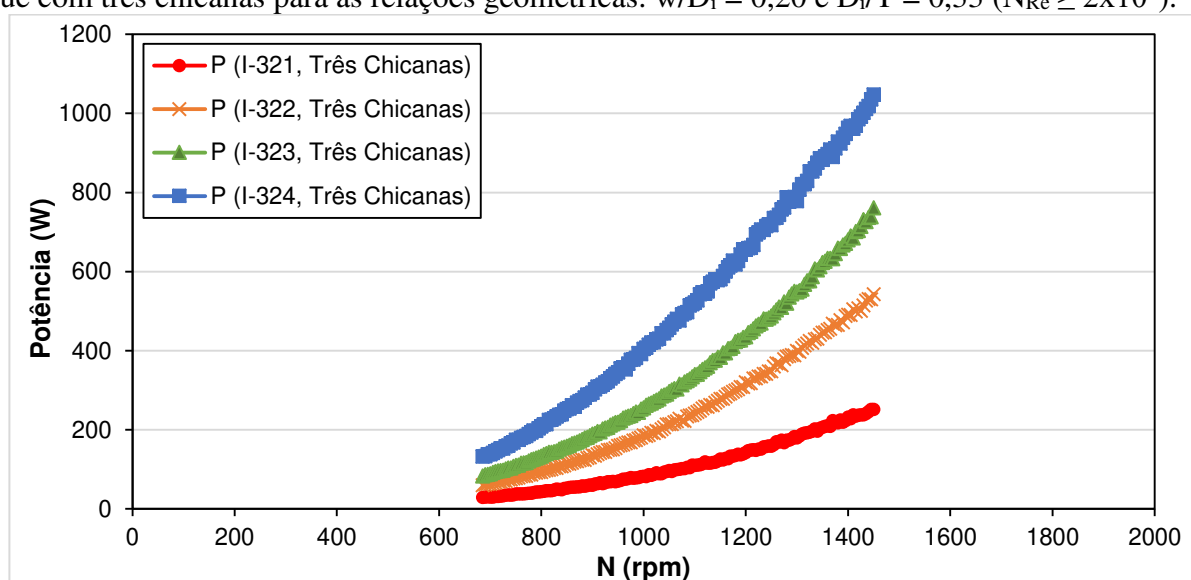
4.4 CONSUMO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ROTACIONAL

O consumo de potência do impelidor é uma variável de estudo muito importante no sistema de agitação pois fornece informações de projeto e eficiência de um determinado impelidor, visto que, a partir do momento em que se controla a velocidade de rotação do impelidor, estará controlando a existência de possíveis instabilidades e não permitindo que o vórtice central atinja a pá do impelidor.

A Figura 27 apresenta resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional do impelidor em tanque com três chicanas com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$ (variação da velocidade rotacional de 685 rpm a 1450 rpm, onde o número de potência já atingiu total estabilidade). Pode-se observar que o consumo de potência cresce exponencialmente com o aumento da velocidade rotacional, e ainda com o aumento do ângulo da pá do impelidor, conforme mostra a Figura 28. No impelidor do modelo I-321 a 685 rpm, o valor da potência é de 29,0 W e no modelo I-322 para 685 rpm o valor da potência é de 60,4 W, sendo uma diferença de 31,4 W. Enquanto que, no final da faixa de rotação para 1450

rpm, no impelidor modelo I-321, o valor da potência é de 251,9 W e para o impelidor modelo I-322 o valor da potência é de 543,1 W, uma diferença de 291,2 W, quase 10 vezes maior na diferença comparada ao início da rotação analisada no regime turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$). Desse modo, os resultados dados pela Figura 28 indicam grande influência do consumo de potência sobre o ângulo da pá do impelidor em valores maiores de rotação.

Figura 27 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional em tanque com três chicanas para as relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$).

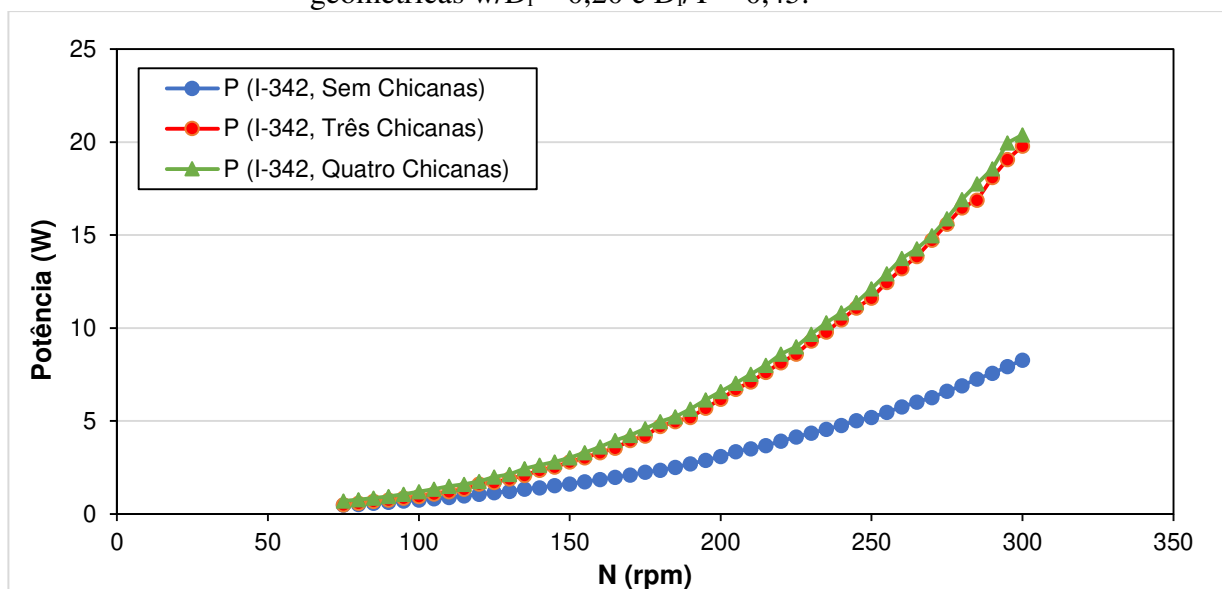


Fonte: Elaboração própria.

Nas Figuras 28 e 29 apresenta-se a comparação dos resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional do impelidor para tanques sem e com chicanas em impelidores de pás retas inclinadas 45° e pás retas 90° , respectivamente. Os parâmetros geométricos utilizados são: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$. Verifica-se que em ambos os casos, que o consumo de potência aumenta com o crescimento da velocidade rotacional. Na Figura 28, para a velocidade rotacional de 300 rpm, o consumo de potência sem chicanas fica em torno de 8 W, enquanto, ao se utilizar chicanas é de, aproximadamente, 20 W. Isso indica uma influência das chicanas em torno de 2,5 maior. Em relação à Figura 29, para a velocidade rotacional de 250 rpm, o consumo de potência sem chicanas é de cerca de 7 W e, em tanques com chicanas, fica em torno de 34 W, ou seja, a influência das chicanas no consumo de potência é quase cinco vezes maior. Com as análises das Figuras 28 e 29, conclui-se então que quanto maior o ângulo da pá do impelidor num

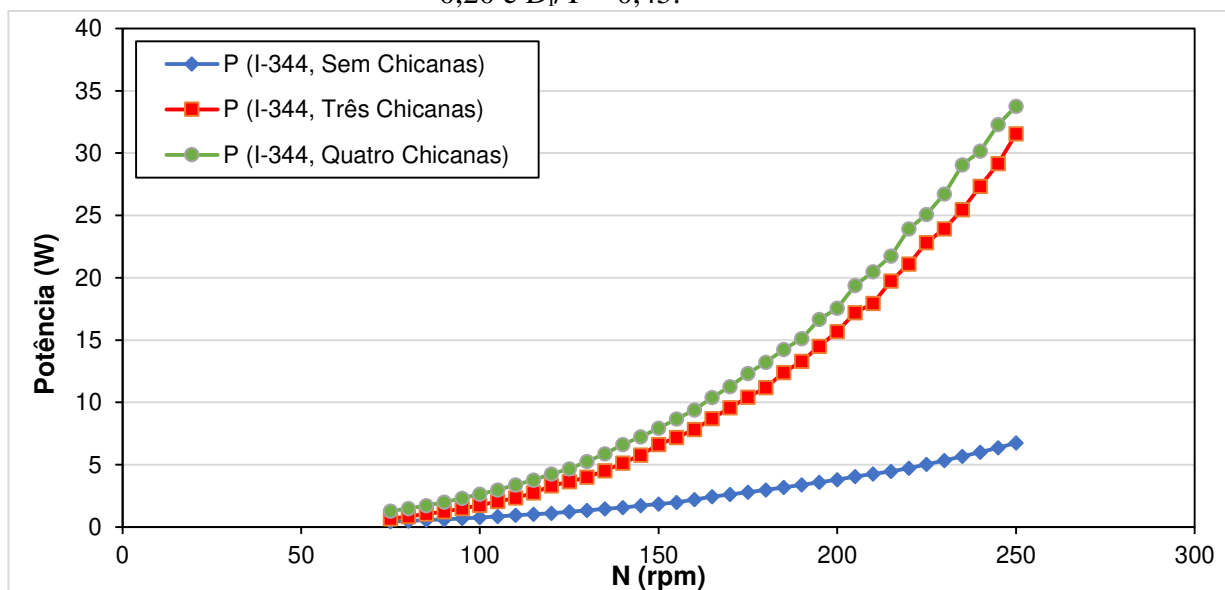
sistema de agitação onde usam-se chicanas, maior será o consumo de potência sobre este impelidor.

Figura 28 – Comparação do consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional em tanque sem e com chicanas para pás retas inclinadas 45° , com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 29 – Comparação do consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional em tanque sem e com chicanas para pás retas 90° , com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$.



Fonte: Elaboração própria.

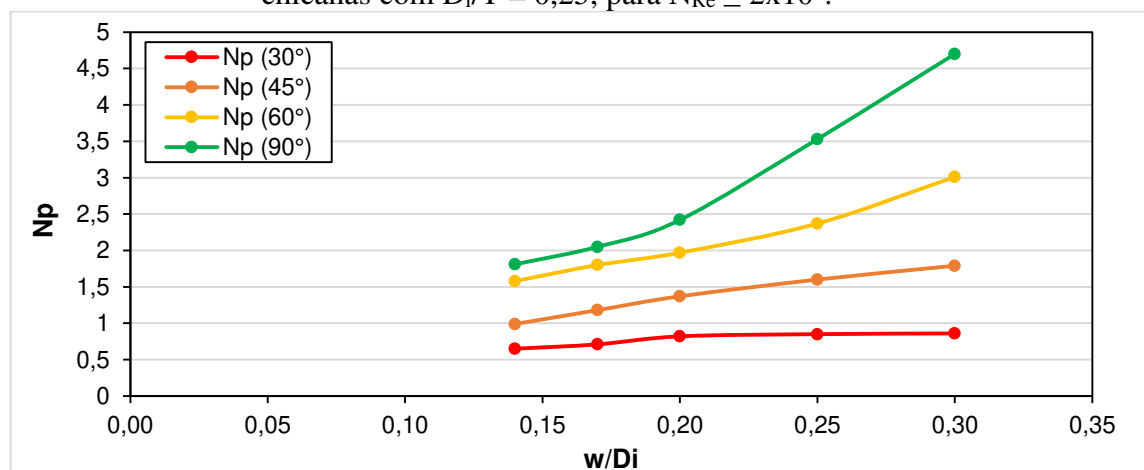
4.5 NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DOS PRINCIPAIS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Para analisar os resultados do torquímetro, referentes apenas ao consumo de potência gerado no impelidor, os dados do número de potência em função da variação dos parâmetros geométricos D_i/T e w/D_i em tanques com três chicanas são apresentados por meio de gráficos nesta seção, para os ângulos de 30° , 45° , 60° e 90° , respectivamente.

4.5.1 Número de Potência em função da relação w/D_i

Na Figura 30, estão dispostos os resultados do número de potência em função da largura das pás, representada pela relação w/D_i em regime totalmente turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$), fixado o parâmetro $D_i/T = 0,25$ (menor configuração da faixa de testes). Em relação ao parâmetro geométrico w/D_i (largura da pá do impelidor/diâmetro do impelidor), verifica-se no referido gráfico que o número de potência expande com o crescimento do valor de w/D_i , devido ao aumento da área da pá sobre o tanque agitado.

Figura 30 – Número de Potência em relação ao parâmetro w/D_i em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,25$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

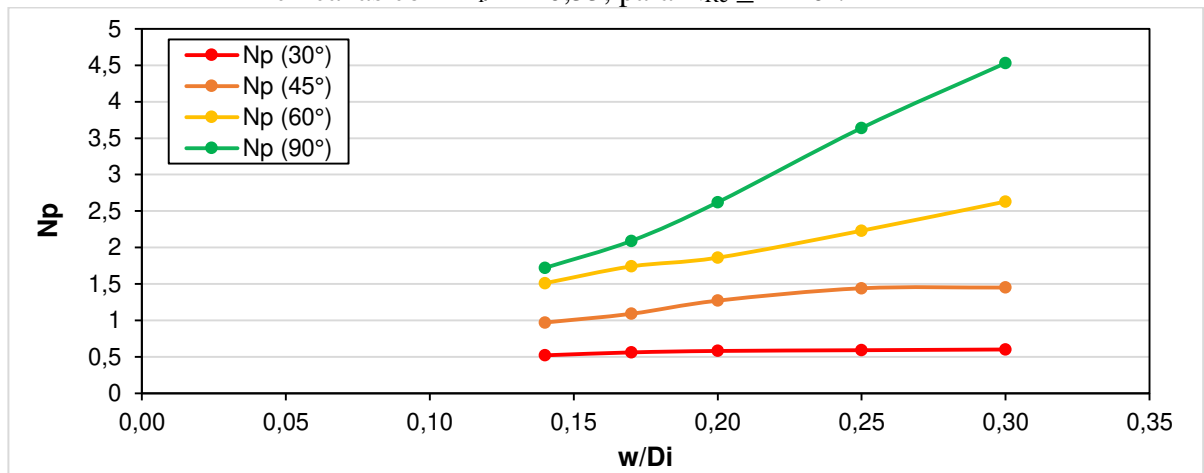


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 31, estão dispostos os resultados do número de potência em função da relação w/D_i em regime totalmente turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$), fixado o parâmetro $D_i/T = 0,33$ (configuração padrão). Em relação a w/D_i , observa-se na dita figura que o número de potência

aumenta com o crescimento do valor de w/D_i , ou seja, da maior área da pá sobre o tanque agitado.

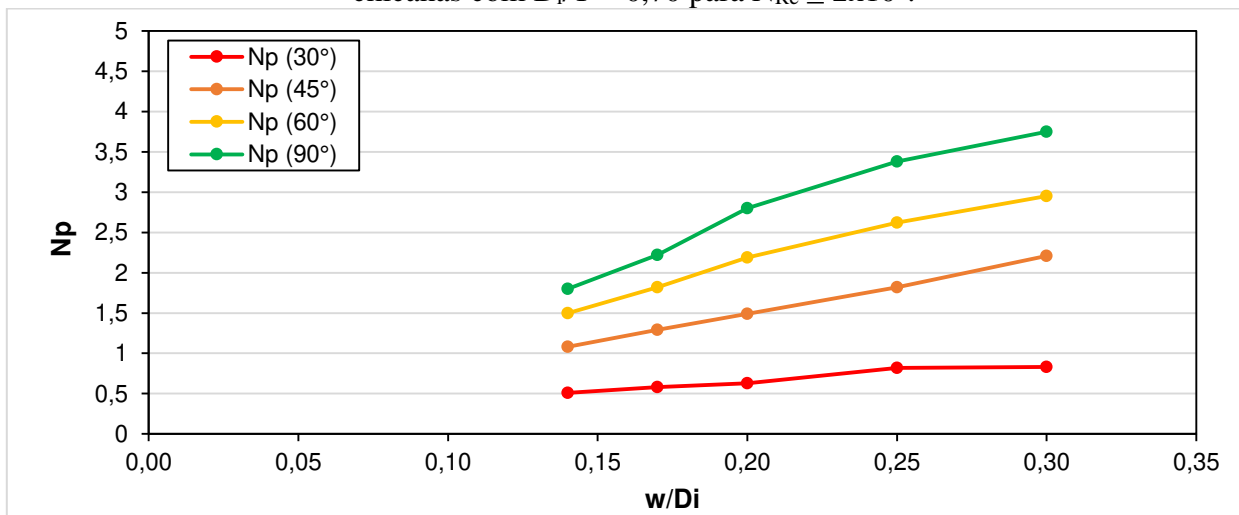
Figura 31 – Número de Potência em relação ao parâmetro w/D_i em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,33$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 32, estão dispostos os resultados do número de potência em função da relação w/D_i em regime totalmente turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$), fixado o parâmetro $D_i/T = 0,70$ (maior configuração da faixa de testes). No gráfico pode-se notar que o número de potência novamente aumenta com o crescimento do valor de w/D_i .

Figura 32 – Número de Potência em relação ao parâmetro w/D_i em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,70$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

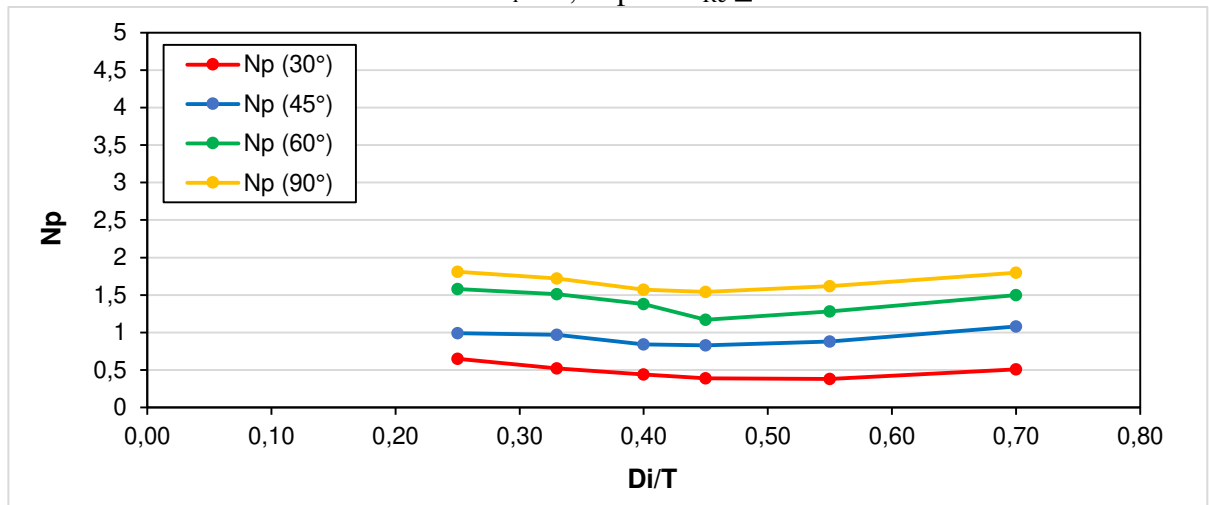


Fonte: Elaboração própria.

4.5.2 Número de Potência em função da relação D_i/T

Nesta análise, o número de potência diminui com o aumento da relação D_i/T até um determinado valor. Na Figura 33 são mostrados os resultados referentes ao número de potência em relação a D_i/T (diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque), com a relação $w/D_i = 0,14$ em tanques com três chicanas, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$. Verifica-se que para todos os modelos de angulação das pás, a reta decresce até o quarto ponto, quando volta a aumentar nos últimos dois pontos. Segundo Joaquim Júnior e colaboradores (2012), o padrão de fluxo de um determinado tipo de impelidor pode se alterar com a alteração de alguns parâmetros como o diâmetro do impelidor, a viscosidade do líquido e a utilização de diversos impelidores no tanque. Em impelidores do tipo pás inclinadas, que normalmente apresentam fluxo axial, o padrão deste fluxo pode se tornar predominantemente radial com o aumento de D_i , e assim, assumindo suas características como alto consumo de potência e cisalhamento.

Figura 33 – Número de Potência em relação ao parâmetro D_i/T em tanques com três chicanas com $w/D_i = 0,14$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

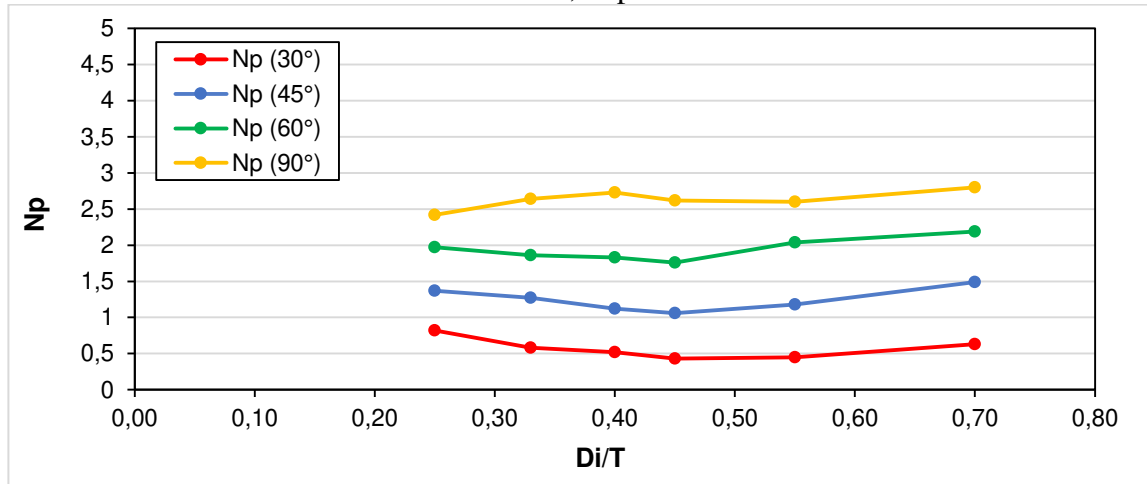


Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 34 são mostrados os resultados referentes ao número de potência em relação a D_i/T com a relação padrão $w/D_i = 0,20$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$, em tanques com três chicanas. Verifica-se que para os modelos de angulação das pás $\theta = 30^\circ$, 45° e 60° a reta decresce até o quarto ponto, quando volta a aumentar nos últimos dois pontos. Já na angulação $\theta = 90^\circ$, o número de

potência no segundo ponto aumenta seu valor, indo contra a relação esperada, devido ao alto consumo de potência usual do fluxo radial ou mesmo pela influência de vibrações no eixo do impelidor.

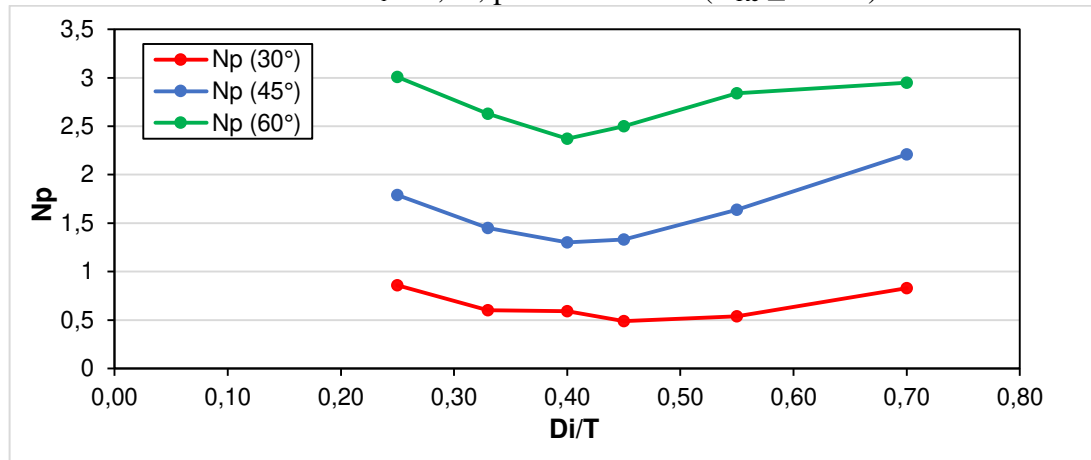
Figura 34 – Número de Potência em relação ao parâmetro D_i/T em tanques com três chicanas com $w/D_i = 0,20$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 35, são mostrados os resultados referentes ao número de potência em relação a D_i/T com a relação $w/D_i = 0,30$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$, em tanques com três chicanas. Verifica-se que para o modelo de angulação das pás $\theta = 30$ a reta decresce até o quarto ponto como nos casos anteriores, voltando a aumentar nos últimos dois pontos. Nas retas referentes à angulação $\theta = 45^\circ$ e 60° , o número de potência diminui somente até o terceiro ponto, aumentando seu valor nos três pontos seguintes.

Figura 35 – Número de Potência em relação ao parâmetro D_i/T em tanques com três chicanas com $w/D_i = 0,30$, para fluxo axial ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$).



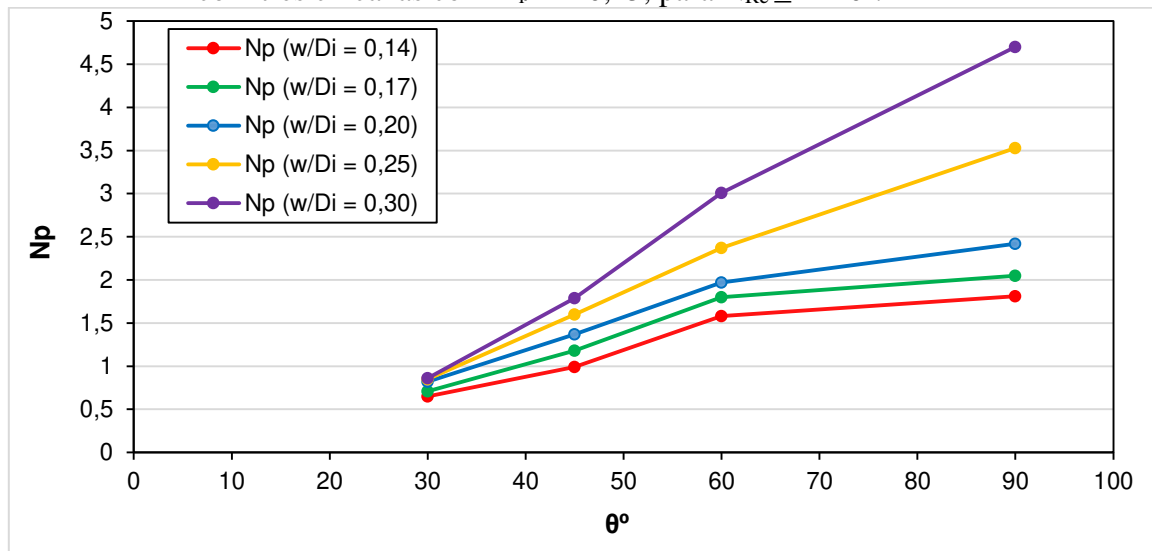
Fonte: Elaboração própria.

4.5.3 Número de Potência em função do ângulo de inclinação das pás

Observou-se também a influência do número de potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanques com três chicanas através das cinco variações do parâmetro w/D_i , fixando três valores para D_i/T : o menor diâmetro dentre os impelidores ($D_i/T = 0,25$), o diâmetro que se encaixa na relação padrão ($D_i/T = 0,33$), e o maior diâmetro dentre os impelidores ($D_i/T = 0,70$).

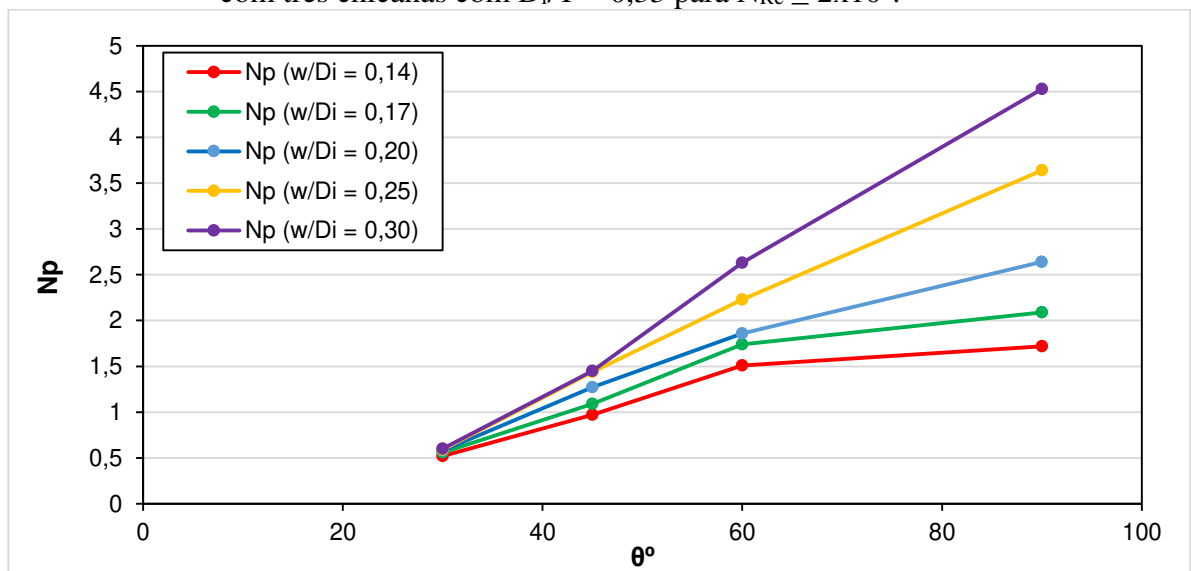
Na Figura 36 estão representados graficamente os resultados do número de potência em relação ao ângulo de inclinação das pás, em tanques com três chicanas com a relação $D_i/T = 0,20$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$. No gráfico em questão, observa-se que o valor do número de potência cresce conforme o ângulo aumenta, para maiores valores de w/D_i .

Figura 36 – Número de Potência em relação ao ângulo de inclinação das pás (θ) em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,25$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.



Fonte: Elaboração própria.

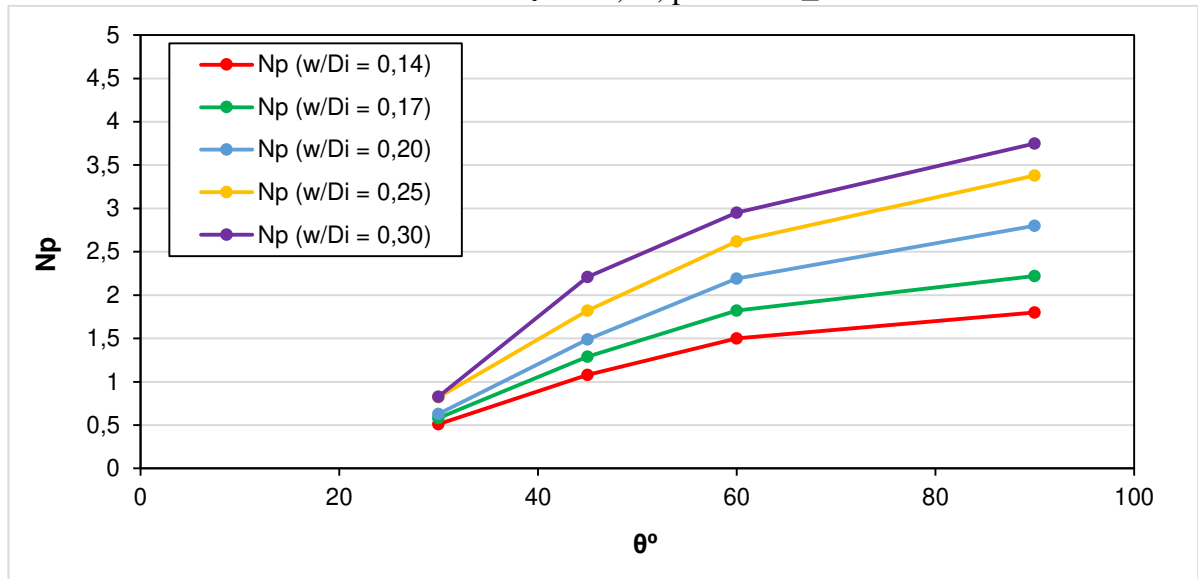
Figura 37 – Número de Potência em relação ao ângulo de inclinação das pás (θ) em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,33$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.



Fonte: Elaboração própria.

Na Figura 38 representam-se graficamente os resultados do número de potência em relação ao ângulo de inclinação das pás, em tanques com três chicanas com a relação $D_i/T = 0,70$, para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$. Observa-se que o valor do número de potência também cresce conforme a angulação é maior, para maiores valores de largura das pás.

Figura 38 – Número de potência em relação ao ângulo de inclinação das pás (θ) em tanques com três chicanas com $D_i/T = 0,70$, para $NRe \geq 2 \times 10^5$.



Fonte: Elaboração própria.

4.6 ELABORAÇÃO DA EQUAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA

Ao se utilizar como modelo as equações de Nagata (1975), foi elaborada uma equação para o número de potência para tanques com três chicanas através dos ajustes de alguns parâmetros das equações modelo. Estes ajustes foram encontrados por meio da ferramenta de análise de dados ‘Solver’, disponível no programa Microsoft Excel. Partindo da equação 13, substituindo os valores de $N_{Pmáx}$, obtém-se a seguinte equação:

$$N_{PB} = B \left(\frac{10^3 + 0,6fN_{Re}^\alpha}{10^3 + 1,6fN_{Re}^\alpha} \right)^p \cdot (\text{sen}\theta)^a - \left[b - c \left(\frac{W_B}{T} \right)^a n_B \right]^2 \left[B \left(\frac{10^3 + 0,6fN_{Re}^\alpha}{10^3 + 1,6fN_{Re}^\alpha} \right)^p (\text{sen}\theta)^a - B \left(\frac{0,6}{1,6} \right)^p \right] \quad (14)$$

Onde:

$$B = 10^{\left[1,3 - 4 \left(\frac{W_{np}}{T} - 0,5 \right)^2 - 1,14 \left(\frac{D_i}{T} \right) \right]}, \text{ ao se ajustar os valores: } 1,3; 4; 0,5; 1,14 \text{ conforme os}$$

parâmetros ‘d’, ‘e’, ‘g’ e ‘h’ da equação abaixo, torna-se:

$$B = 10^{\left[d - e \left(\frac{W_{np}}{T} - g \right)^2 - h \left(\frac{D_i}{T} \right) \right]} \quad (15)$$

E:

$$p = 1,1 + 4 \left(\frac{W_{np}}{T} \right) - 2,5 \left(\frac{D_i}{T} - 0,5 \right)^2 - 7 \left(\frac{W_{np}}{T} \right)^4, \text{ onde ao se ajustar os valores: } 1,1, 4;$$

2,5; 0,5 e 7, conforme os parâmetros 'i', 'j', 'k', 'g' e 'l', torna-se:

$$p = i + j \left(\frac{Wn_p}{T} \right) - k \left(\frac{D_i}{T} - g \right)^2 - l \left(\frac{Wn_p}{T} \right)^4 \quad (16)$$

Assim, para um modelo de um tanque com 3 chicanas com um impelidor de pás retas inclinadas a 45, cujas relações geométricas são $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,40$, apresentam-se os resultados na Tabela 10 e na Figura 39.

Na Tabela 10 são mostrados os resultados do número de potência experimental, número de potência ajustado e do erro entre esses valores. Já na Figura 39 é possível perceber que os valores dos ajustes se adequaram bem ao perfil do número de potência na região totalmente turbulenta.

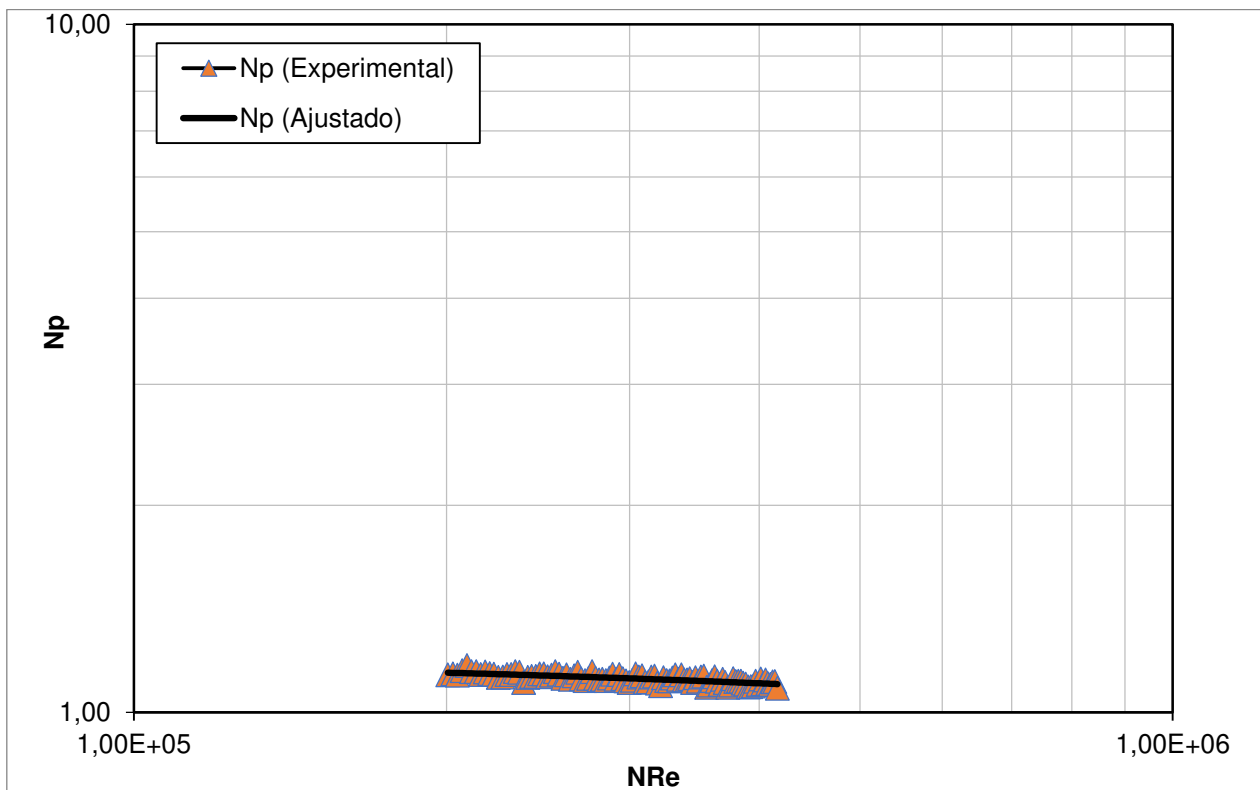
Tabela 10 – Resultados do Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com três chicanas, pás retas inclinadas a 45°, com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,40$

N_{Re}	N_P (experimental)	N_P (ajustado)	Erro
2,01E+05	1,13	1,14	6,22E-05
2,03E+05	1,14	1,14	1,54E-05
2,05E+05	1,13	1,14	6,27E-05
2,07E+05	1,15	1,14	9,46E-05
2,09E+05	1,17	1,14	8,46E-04
2,11E+05	1,15	1,14	3,71E-05
2,14E+05	1,15	1,14	4,69E-05
2,16E+05	1,14	1,14	1,00E-05
2,18E+05	1,14	1,14	4,45E-05
2,20E+05	1,14	1,14	2,90E-07
2,22E+05	1,14	1,14	8,79E-08
2,24E+05	1,12	1,14	1,54E-04
2,26E+05	1,13	1,14	1,26E-04
2,29E+05	1,14	1,14	2,12E-08
2,31E+05	1,14	1,14	1,15E-07
2,33E+05	1,15	1,13	1,40E-04

2,35E+05	1,14	1,13	8,54E-05
2,37E+05	1,11	1,13	8,34E-04
2,39E+05	1,12	1,13	9,39E-05
2,42E+05	1,13	1,13	2,37E-05
2,44E+05	1,13	1,13	2,20E-05
2,46E+05	1,14	1,13	3,61E-05
2,48E+05	1,14	1,13	3,95E-05
2,50E+05	1,13	1,13	1,89E-05

Fonte: Elaboração própria.

Figura 39 – Número de Potência experimental e ajustado para tanques com três chicanas e pás retas inclinadas a 45°, com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,40$.



Fonte: Elaboração própria.

Assim sendo, as variáveis presentes nas equações 14, 15 e 16, que foram ajustadas pelo programa Solver, tem seus valores apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores das variáveis ajustadas pelo programa Solver para tanques com três chicanas e um impelidor de pás retas inclinadas a 45°, com as relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,40$.

f	α (alfa)	a	b	c	d	e	g
0,011	0,648	1,304	0,176	3,329	1,167	3,959	0,578
h	i	j	k	l			
1,171	1,073	3,959	2,512	7,001			

Com estes valores, obtém-se os valores de B e p ao substituir as variáveis nas equações 4.2 e 4.3 conforme abaixo:

$$B = 10 \left[1,167 - 3,959 \left(\frac{0,0342.4}{0,38} - 0,578 \right)^2 - 1,171(0,40) \right]$$

$$B = 2,723$$

$$p = 1,073 + 3,959 \left(\frac{0,0342.4}{0,38} \right) - 2,515 \cdot (0,4 - 0,578)^2 - 7,001 \left(\frac{0,0342.4}{0,38} \right)^4$$

$$p = 2,187$$

Ajustados todos os parâmetros da equação 14, obtém-se a equação abaixo:

$$N_{PB} = 2,723 \cdot \left(\frac{10^3 + 0,6.0,011 \cdot N_{Re}^{0,648}}{10^3 + 1,6.0,011 \cdot N_{Re}^{0,648}} \right)^{2,187} \cdot (\text{sen}45)^{1,304}$$

$$- [0,176 - 3,329 \cdot (0,1)^{1,304} \cdot 3]^2 \left[2,723 \cdot \left(\frac{10^3 + 0,6.0,011 \cdot N_{Re}^{0,648}}{10^3 + 1,6.0,011 \cdot N_{Re}^{0,648}} \right)^{2,187} (\text{sen}45)^{1,304} \right.$$

$$\left. - 2,723 \cdot \left(\frac{0,6}{1,6} \right)^{1,304} \right]$$

$$N_{PB} = 1,733 \cdot \left(\frac{10^3 + 0,0066 \cdot N_{Re}^{0,648}}{10^3 + 0,0066 \cdot N_{Re}^{0,648}} \right)^{2,187} - 0,102 \cdot \left[1,733 \cdot \left(\frac{10^3 + 0,0066 \cdot N_{Re}^{0,648}}{10^3 + 0,0176 \cdot N_{Re}^{0,648}} \right)^{2,187} - 0,7578 \right] \quad (17)$$

A equação 17 é válida então para descrever o perfil do número de potência na região totalmente turbulenta, em tanques com três chicanas com impelidor de pás inclinadas 45° e com relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,40$.

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta algumas informações sobre variáveis de projeto no sistema de agitação, que têm influência no cálculo do número de potência, que por sua vez, é um importante fator para avaliar os custos de um processo em que a agitação ou mistura são operações determinantes para a eficiência.

Ao utilizar chicanas no sistema de agitação de 50 L, pode-se observar que os números de potência são constantes na região de regime totalmente turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$), garantindo, então, uma estabilidade e melhorias de eficiência no projeto de sistema de agitação. Ao se fazer a comparação dos valores de número de potência na utilização de três e quatro chicanas no tanque de agitação, concluiu-se que o uso de quatro chicanas apresenta valores de números de potência um pouco maiores se comparados aos resultados dos números de potência ao se utilizar três chicanas, principalmente para D_i/T entre 0,33 e 0,7.

A variação do número de potência em relação ao número de Reynolds foi representada graficamente e observou-se que os resultados sem chicanas não apresentam estabilidade do número de potência na região turbulenta, diminuindo com o aumento do número de Reynolds sem atingir um valor constante, por conta da formação de vórtices centrais. Na comparação dos resultados do número de potência em tanques sem e com chicanas, verificou-se estabilidade do número de potência na região turbulenta ($N_{Re} \geq 1 \times 10^5$) quando chicanas são utilizadas, que não se observa na ausência destas.

Pela análise dos resultados do consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional no tanque com três chicanas, quatro chicanas e sem chicanas, se concluiu que a potência consumida cresce com o aumento da velocidade rotacional.

Em relação aos parâmetros geométricos w/D_i e D_i/T analisados pela variação do número de potência, verifica-se o grau de importância das variáveis de estudo para interpretar o comportamento do número de potência, em especial no regime totalmente turbulento. Para o aumento da relação geométrica w/D_i , o número de potência também cresce. Com o aumento da relação geométrica D_i/T , o número de potência diminuiu até um determinado valor de D_i/T . E em relação ao ângulo da pá, os valores de número de potência aumentaram com o crescimento do ângulo para cada modelo adotado, com variações dos parâmetros geométricos. Esse aumento do

número de potência, e conseqüentemente do consumo de potência, ocorre devido ao aumento da área de arraste da pá do impelidor.

Uma importante contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de uma equação específica, que pode ser usada para determinar o consumo de potência em função dos parâmetros geométricos do impelidor (relação diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque, relação largura da pá/diâmetro do impelidor e ângulo de inclinação do impelidor), utilizando o modelo de NAGATA (1975), o primeiro a sugerir essa equação. Este trabalho mostra que esta equação pode ser utilizada fornecendo uma boa estimativa para o consumo de potência devido o bom ajuste aos dados experimentais.

6. PERSPECTIVAS

Em função da quantidade de variáveis de projeto existentes para sistemas de agitação, poderia se analisar a influência de outras variáveis que não foram levadas em consideração em termos de análise neste trabalho, realizando estudos por etapas. A variação de nível do líquido, a posição descentralizada do impelidor, a variação do número de pás do impelidor (2, 3, 6 e 8), a aplicação de outros tipos de fluidos, a variação da altura do centro do impelidor em relação ao fundo do tanque são alguns exemplos de variáveis que poderiam ter sua influência estudada. Até mesmo as variáveis utilizadas por este trabalho, poderiam ter sua importância determinada no sistema de agitação por meio de planejamento experimental.

Outro modelo de correlação empírica da literatura é o modelo de Dickey (2003), um modelo mais atual. Então, a comparação entre os dois modelos para descrever o comportamento do número de potência, utilizando os mesmos dados experimentais obtidos por Silva (2019) seria de grande valia.

REFERÊNCIAS

- ARFELLI, S. L. **Projeto mecânico e análise térmica de tanques cilíndricos verticais com agitação e superfície de troca de calor**. Bauru-SP: Universidade Estadual Paulista, 2009.
- BARBOSA, E. J. **Dimensionamento do eixo do impelidor em sistemas de agitação e mistura para processos industriais**. Campinas - SP: Universidade Estadual de Campinas, 2004.
- BATTAGLINI, N. M. P. **Avaliação do comportamento de impelidores especiais em mistura de fluidos**. Botucatu - SP, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 1998.
- BRITTES, J. M.; MOREIRA, A. C. **Estudo de diferentes processos de mistura de pós-usados para o preparo de cápsulas em farmácias magistrais**. Revista Contexto Saúde, Ijuí, v. 5, n. 10, p. 47-53, 2006.
- BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. 2. Ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- CREMASCO, M.A.; **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos**. 2 ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.
- DA SILVA, Ezequias Carvalho; SABIONI, Lucas de Moura. **Sistemas de Agitação e Mistura**. Fatec Garça - Centro Paula Souza. Garça – SP, 2013.
- DIAS, E. F. **Estudo de otimização geométrica de pás de um reator CSTR em seu processo de agitação mecânica da mistura reacional**. Ponta Grossa: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2018.
- DICKEY, D. S., Agitation & Mixing Technology Seminar, Dayton, Ohio - MixTech, Inc, 2003.
- ENGENDRAR. Apostila Beneficiamento - Agitação Mecânica. Disponível em: <<http://www.engendrar.com.br/arquivos/boletim/Beneficiamento-Agitacao.pdf>>. Acesso em: 01 de junho de 2021.
- FERREIRA, Antônio Moisés N. et al. **Validação do processo de mistura e armazenamento de pós para preparo de cápsulas de hidroxizine 25 mg**. Anfarmag, São Paulo, ano IX, n. 43, p. 88-91, 2003.
- FOUST, A. S. et al. **Princípios das operações unitárias**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.
- FREITAS, P. **Análise de relações Potência / Velocidade para projeto de agitadores com respostas dinâmicas desejadas**. Botucatu-SP: Universidade Estadual Paulista, 1993.
- GARAVITO, A. M. T. **Determinação experimental do consumo de potência para impelidores âncora e helicoidal usando fluidos pseudoplásticos de alta viscosidade**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2013.

GOMES, M. H. R. **Apostila de Mecânica dos Fluidos**. Universidade de Juiz de Fora, 2012. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Apostila-de-Mec%3a2nica-dos-Fluidos.pdf>>. Acesso em: 24 de maio de 2021.

HOSSEINI, S. **Solid-Liquid Mixing in Agitated Tanks: Experimental and CFD Analysis**. 139 p. Dissertação de Mestrado. Ryerson University, Toronto, Canadá. 2008.

JOAQUIM JUNIOR C. F.; CEKINSKIE, E.; NUNHEZ, J. R.; URENHA, L. C. **Agitação e Mistura na Indústria**. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

LEITE, André B.; BERTOLI, Sávio Leandro; Barros, Antônio André Chivanga. **Absorção química de dióxido de nitrogênio (NO₂)**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 10, n. 1, 2005.

MACHADO, A. B. **Estudos do processo de extração líquido-líquido para a purificação do ácido acrílico**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2007.

MARTINI, T. L. **Influência dos impelidores e condições de mistura na produção de insumos químicos para o setor coureiro**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

McCABE, Warren L.; SMITH, Julian L.; HARIOTT, Peter. **Unit Operations of Chemical Engineering**. 5ª ed. United States of America – USA. McGraw Hill Book Company. 1993.

MACINTYRE, A. J.; **Máquinas Motrizes Hidráulicas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, p. 649, 1983.

MORO, F. R. **Estudo para a otimização de um impelidor de pás inclinadas em um tanque agitado através da Fluidodinâmica Computacional (CFD)**. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, 2016.

NAGATA, S; **Mixing – Principles and Applications**. New York: Halsted Press Book, 1975. 458p.

NAVARRO, F. A. C. **Análise da influência de impelidores laterais no tempo de mistura em tanques de estocagem de diesel com o uso da fluidodinâmica computacional**. Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas, 2011.

NERY, L. de A. **Concepção e dimensionamento de um eixo para um tanque agitado industrial**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2017.

NOVAES, L. **Estudo da influência da agitação e da estratégia de alimentação sobre o desempenho de um ASBR em escala piloto aplicado ao tratamento de esgoto sanitário**. 143 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

OLDSHUE, J. Y. **Fluid Mixing Technology**. New York: Mc-Graw Publications, 1983.

PEITER, A. S. **Estudo experimental, simulação e modelagem do efeito de agitação e mistura no processo da produção de biodiesel de soja (*Glycine max*) metílico e etílico.** Campina Grande: Universidade Federal de Campina Grande, 2017.

RAZUK, P. C. **Um estudo sobre as operações unitárias de agitação, troca de calor em tanques e mistura de pós.** Bauru-SP, 1992.

QUEIROZ, R. B. **A influência do acabamento da superfície interna do tanque no número de potência de novos impelidores.** Bauru: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2009.

SILVA, A. C. A. **Influência do *Draft Tube* em sistemas mecanicamente agitados para homogeneização de polpa de calcário contendo partículas finas.** Santos: Universidade Santa Cecília, 2014.

SILVA, J. L. G.; **Agitação e mistura na indústria de alimentos.** VIII SEMEALI; Universidade Estadual de Feira de Santana, 2010.

SILVA, J. L. G. **Determinação experimental do número de potência de impelidores de pás retas.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2019.

SILVA, J. L. G.; SOUZA, E.; NUNHEZ, J. R. **Determinação das curvas de potência de impelidores tipo pás retas inclinadas utilizando métodos experimentais.** XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Química. Recife-PE, 2008.

SILVA, P. T. **Estudo do escoamento em um tanque agitado por PIV e CFD.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2020.

SIMÕES, D. de S. **Determinação experimental do número de potência de agitadores de proximidade para líquidos de alta viscosidade.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2017.

SOPHIA, L. V. G. **Análise comparativa das alternativas para simulação CFD de tanque de mistura operando em regime turbulento.** São Bernardo do Campo-SP: Centro Universitário da FEI, 2010.

SOUZA, E. **Consumo de Potência para Impelidores Rápidos Aplicados em Processos de Agitação e Mistura.** 778p. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

SPOGIS, N. **Metodologia para determinação de curvas de potência e fluxos característicos para impelidores axiais, radiais e tangenciais utilizando a fluidodinâmica computacional.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2002.

UHL, V. W.; GRAY, J. B.; **Mixing - Theory and Practice**. New York and London: Academic Press, v.1, 1966. 340 p.

VERGEL, J. L. G. **Estudo da Influência da Malha Computacional, Modelos de Turbulência e Aspectos Numéricos da Modelagem CFD em Impelidores PBT usando Malhas Não-estruturadas**. Dissertação (Mestrado) - Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2013.