

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

MARIA EDUARDA LIMA DA SILVA

**DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA DE UMA PLANTA
PILOTO DE AGITAÇÃO UTILIZANDO DADOS EXPERIMENTAIS**

MANAUS
2023

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

S586dd Silva, Maria Eduarda Lima da
Determinação do consumo de potência de uma planta piloto de agitação utilizando dados experimentais / Maria Eduarda Lima da Silva. Manaus : [s.n], 2023.
70 f.: color.; 29 cm.

TCC - Graduação em Engenharia Química -
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2023.
Inclui bibliografia
Orientador: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva

1. Consumo de potência. 2. Sistema de agitação. 3. Impelidores. I. Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (Orient.). II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Determinação do consumo de potência de uma planta piloto de agitação utilizando dados experimentais

Elaborado por Jeane Macelino Galves - CRB-11/463

MARIA EDUARDA LIMA DA SILVA

**DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA DE UMA PLANTA
PILOTO DE AGITAÇÃO UTILIZANDO DADOS EXPERIMENTAIS**

**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

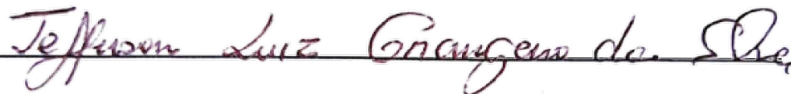
MANAUS
2023

MARIA EDUARDA LIMA DA SILVA

**DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA DE UMA PLANTA
PILOTO DE AGITAÇÃO UTILIZANDO DADOS EXPERIMENTAIS**

**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. Nazareno de Pina Braga – UFAM



Prof. Dra. Elinéia Castro Costa – UEA

Conceito:

Manaus, 20 de Março de 2023.

**“A minha graça é tudo o que você precisa, pois o meu poder
é mais forte quando você está fraco.”
2 Coríntios 12:9.**

**“Gostaria que você soubesse que existe dentro de si uma força capaz de
mudar sua vida. Basta que lute e aguarde um novo amanhecer.”
Margaret Thatcher**

AGRADECIMENTOS

Agradeço imensamente a Deus, pela oportunidade de viver, pela sabedoria que me concedeu durante toda a vida escolar, pela força que me sustentou quando eu estava fraca, por ter me trazido até aqui e por todas as oportunidades que surgiram durante a minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais, Simone e Luiz, pelo sacrifício e esforço durante toda a minha vida para proporcionar os estudos adequados para me tornar quem eu sou hoje. A minha irmã, Marília, por todo o cuidado e apoio durante meu crescimento e anos de graduação.

A esta universidade e todos os professores que fizeram a diferença na minha formação. Ao meu orientador Prof. Dr. Jefferson Grangeiro, por toda a ajuda, instrução e material que propiciou a realização deste trabalho.

A empresa júnior StartHub, local onde eu tive o primeiro contato com o mercado de trabalho, onde eu comecei a moldar a profissional e líder que sou hoje, aos colegas que conheci, trabalhei e vivi experiências importantes que marcaram minha trajetória profissional.

Ao meu líder e gestor na Raízen, Fredson Rocha, que enxergou em mim, quando eu ainda era estagiária, o potencial da profissional que eu me tornaria e me presenteou com oportunidades, pela contribuição diária com o meu desenvolvimento profissional e por toda compreensão. Ao meu parceiro de trabalho, Rafael Yudi, pelo companheirismo e ensinamentos de engenharia que me proporciona no ambiente profissional.

Aos meus amigos do período escolar, Victor, Liliane, Natália e Eunice, que apesar dos anos passados, são minhas referências em amizade, por vibrarem sinceramente a cada conquista durante nosso crescimento, pelo apoio em situações difíceis e pelo carinho que temos um pelo outro.

As minhas amigas companheiras desde o início da graduação, Jafia e Thayná, por cada disciplina juntas, pelo suporte emocional nos momentos difíceis da graduação, por nos ajudarmos e comemorarmos cada conquista nesse ciclo importante da minha vida e pelas memórias criadas juntas.

Ao meu parceiro e minhas parceiras da engenharia química, Gabriel, Maressa e Pâmela, pela paciência, ajuda, dedicação e esforço que compartilhamos durante esses anos de graduação, pelas disciplinas, seminários e trabalhos que concluímos juntos e apoiamos uns aos outros.

Para finalizar, agradeço a todos que passaram pela minha vida e contribuíram de alguma forma para que eu estivesse aqui, encerrando esse ciclo e ajudando a me tornar Engenheira Química.

RESUMO

Processos industriais em diversas áreas dependem de uma operação de agitação de fluidos eficiente, sendo o consumo de potência do sistema um fator importante no projeto de agitadores, principalmente referente a perdas econômicas. Além disso, o estudo teórico de sistemas submetidos a agitação dependem de correlações empíricas, com isso, trabalhos experimentais em unidades-piloto são muito utilizados como referência para cálculos do consumo de potência de forma a realizar aumento de escala e prever resultados do processo em equipamentos maiores. Dessa forma, este trabalho tem como objetivo a analisar a influência das variáveis do sistema de agitação no consumo de potência de uma planta piloto, utilizando os dados experimentais disponíveis na literatura. Para atingir este objetivo, analisou-se o comportamento do consumo de potência em função da variação dos parâmetros geométricos (relação D_i/T , w/D_i , e ângulo de inclinação das pás), e ainda as curvas de número de potência em função do número de Reynolds. Os dados experimentais foram obtidos para um tanque de 50 L, com configuração de 3 chicanas e sem chicanas, foram utilizados 60 impelidores de quatro pás retas, organizados em grupos de cinco variações da largura da pá do impelidor ($w/D_i = 0,14; 0,17; 0,20; 0,25$ e $0,30$), em cada grupo utilizou-se 6 variações do diâmetro do impelidor ($D_i/T = 0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55$ e $0,70$) e variou-se duas vezes os ângulos das pás (45° e 90°), para cada configuração adotada. Os resultados demonstraram que o consumo de potência aumenta com o crescimento da velocidade rotacional, contudo constatou-se que esse aumento depende do diâmetro do impelidor escolhido. Além disso, comprovou-se graficamente o comportamento do consumo de potência estabelecido na literatura, a presença de chicanas aumenta consideravelmente a potência do sistema, assim como o aumento da largura das pás do impelidor e a ampliação do ângulo das pás. As análises das curvas do número de potência em relação ao número de Reynolds demonstraram que o número de potência de tanques com chicanas atinge a estabilidade ao chegar no regime turbulento, porém, para tanques sem chicanas o número de potência diminui com o aumento de Reynolds sem atingir uma estabilidade. A partir dos dados experimentais e das análises realizadas, desenvolveu-se uma planilha didática que simula o comportamento dos impelidores de fluxo axial e radial em função das variáveis analisadas para uso como ferramenta de ensino de sistemas de agitação.

Palavras-chave: Consumo de potência, Sistema de agitação, Impelidores, Número de potência, Chicanas, Curvas de potência, Número de Reynolds, Parâmetros Geométricos

ABSTRACT

Industrial processes in several areas depend on an efficient fluid agitation operation, and the system power consumption is an important factor in the design of agitators, mainly referring to economic losses. In addition, the theoretical study of systems subjected to agitation depend on empirical correlations, with this, experimental work in pilot units is widely used as a reference for calculations of power consumption in order to perform scale-up and predict process results in bigger equipment. Thus, this work aims to analyze the influence of agitation system variables on the power consumption of a pilot plant, using the experimental data obtained in the literature. To achieve this objective, the behavior of power consumption was analyzed as a function of the variation of geometric parameters (D_i/T , w/D_i , and angle of inclination of the blades), and also the power number curves as a function of the Reynolds number. The experimental data were obtained for a 50 L tank, with a configuration of 3 baffles and without baffles, 60 impellers with four straight blades were used, organized in groups of five variations of the width of the impeller blade ($w/D_i = 0,14; 0,17; 0,20; 0,25$ e $0,30$), in each group 6 impeller diameter variations were used ($D_i/T = 0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55$ e $0,70$) and the blade angles were varied twice (45° and 90°), for each adopted configuration. The results showed that power consumption increases with increasing rotational speed, however it was found that this increase depends on the chosen impeller diameter. In addition, the behavior of power consumption established by the literature was graphically proven, the presence of baffles considerably increases the power of the system, as well as the increase in the width of the impeller blades and the expansion of the angle of the blades. The analysis of the power number curves in relation to the Reynolds number showed that the power number of tanks with baffles reaches stability when reaching the turbulent regime, however, for tanks without baffles the power number decreases with the increase of Reynolds, without achieving stability. From the experimental data and the analysis carried out, a didactic worksheet was developed that simulates the behavior of axial and radial flow impellers as a function of the analyzed variables for use as a teaching tool for agitation systems.

Key-words: Power consumption, Agitation system, Impellers, Power number, Baffles, Power curves, Reynolds number, Geometric parameters

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração de um tanque agitado convencional.....	13
Figura 2 - Vórtice formado em um tanque agitado sem chicanas (A) e com chicanas (B)..	14
Figura 3 - Impelidor de pás retas inclinadas a 45°.....	16
Figura 4 – Tipos de impelidores âncora (A) e espiral dupla (B).....	17
Figura 5 - Perfis de fluxo do tipo: (a) Axial; (b) Radial; (c) Tangencial.....	18
Figura 6 - Regime de escoamento laminar (A) e turbulento (B).....	19
Figura 7 - Característica da curva de potência em regiões de diferentes regimes.....	25
Figura 8 - Relação entre o número de potência e o número de Reynolds para fluidos newtonianos para projetos de impelidores em tanques sem e com chicanas.....	26
Figura 9 - Gráfico do número de potência máximo versus número de Reynolds crítico.....	28
Figura 10 - Dinamômetro do transdutor de torque.....	30
Figura 11 - Unidade piloto de 50 L.....	32
Figura 12 - Tanque de 50 L da unidade piloto.....	32
Figura 13 - Dimensões principais do tanque piloto de 50 L e chicanas.....	33
Figura 14 - Conjunto de agitação da planta piloto de 50 L.....	34
Figura 15 - Esquema de medição de torque através de torquímetro.....	34
Figura 16 - Fotografia do sistema de aquisição de dados.....	35
Figura 17 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,14$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	45
Figura 18 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,14$	46
Figura 19 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,14$	47
Figura 20 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,14$	48
Figura 21 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,20$	49
Figura 22 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,20$	50
Figura 23 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,20$	51
Figura 24 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,20$	52

Figura 25 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,30$	53
Figura 26 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,30$	54
Figura 27 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,30$	55
Figura 28 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,30$	56
Figura 29 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $D_i/T = 0,33$	57
Figura 30 - Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $D_i/T = 0,33$	58
Figura 31 - Comparação do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanques com 3 chicanas impelidor de pás retas inclinadas 45° e 90°, com relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,14$	59
Figura 32 - Comparação do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanques com 3 chicanas impelidor de pás retas inclinadas 45° e 90°, com relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,20$	60
Figura 33 - Comparação do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanques com 3 chicanas impelidor de pás retas inclinadas 45° e 90°, com relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,30$	61
Figura 34 – Número de potência em função do número de Reynolds para tanques com 3 chicanas para os impelidores de pás retas inclinadas 45° e 90°, com relações geométricas $w/D_i = 0,14$ e $D_i/T = 0,33$	62
Figura 35 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds para tanques com 3 chicanas e sem chicanas, para os impelidores de pás retas inclinadas 45° e 90°, com relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$	63
Figura 36 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds para tanques com 3 chicanas e sem chicanas, para os impelidores de pás retas inclinadas 45° e 90°, com relações geométricas $w/D_i = 0,30$ e $D_i/T = 0,55$	64
Figura 37 – Planilha didática de ensino e simulação de sistemas de agitação utilizando os dados experimentais de Silva (2019).....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos processos de agitação.....	11
Tabela 2 - Dimensões do tanque de 50 L e das chicanas.....	34
Tabela 3 - Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/Di = 0,14$	37
Tabela 4 - Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/Di = 0,17$	38
Tabela 5 - Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/Di = 0,20$	39
Tabela 6 - Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/Di = 0,25$	40
Tabela 7 - Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/Di = 0,30$	41
Tabela 8 – Velocidade rotacional mínima e máxima permitidas para impelidores em tanque com chicanas e sem chicanas, com relação geométrica $w/Di = 0,14$	44

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

g	Aceleração gravitacional
Z	Altura do Líquido
H	Altura do tanque
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 45 graus
I-121	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
I-131	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
I-141	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
I-151	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus
I-161	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
I-112	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
I-122	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-132	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
I-142	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
I-152	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,14$, $D_i/T = 0,55$ 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-211	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 45 graus
I-221	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
I-231	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
I-241	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
I-251	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus
I-261	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
I-212	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
I-222	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-232	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
I-242	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
I-252	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,17$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 90 graus
I-262	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 45 graus
I-321	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
I-331	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
I-341	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
I-351	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus

I-361	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
I-312	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
I-322	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-332	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
I-342	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
I-352	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,20$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 90 graus
I-362	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 45 graus
I-421	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
I-431	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
I-441	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
I-451	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus
I-461	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
I-412	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,25$ e ângulo da pá de 90 graus
I-422	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 90 graus
I-432	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
I-442	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
I-452	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 90 graus
I-462	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 45 graus
I-521	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,33$ e ângulo da pá de 45 graus
I-531	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 45 graus
I-541	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 45 graus
I-551	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 45 graus
I-561	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 45 graus
I-512	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,25$ 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-532	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,40$ e ângulo da pá de 90 graus
I-542	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,45$ e ângulo da pá de 90 graus
I-552	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo da pá de 90 graus
I-562	Impelidor pás retas com $w/D_i = 0,30$, $D_i/T = 0,70$ e ângulo da pá de 90 graus
W	Largura da pá do impelidor
w_B	Largura das chicanas
ρ	Massa específica, kg/m^3
N_q	Número de bombeamento, adimensional
n_B	Número de chicanas
N_{FR}	Número de Froude, adimensional

N_m	Número de mistura, adimensional
N_P	Número de potência, adimensional
$N_{P_{max}}$	Número de potência máximo, adimensional
n_p	Número de pás
N_{Re}	Número de Reynolds, adimensional
N_{ReC}	Número de Reynolds crítico, adimensional
P	Potência, W
CSTR	Reator Tanque Agitado Contínuo
Q	Taxa de bombeamento, m^3/s
t	Tempo de mistura, s
T_q	Torque, N.m
N	Velocidade rotacional, s^{-1}
μ	Viscosidade dinâmica, kg/m.s

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 REVISÃO DE LITERATURA	10
2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE AGITAÇÃO.....	10
2.2 SISTEMAS DE AGITAÇÃO.....	12
2.2.1 Tanque Agitado.....	12
2.2.2 Chicanas.....	13
2.2.3 Sistema de Acionamento.....	15
2.2.4 Impelidores.....	15
2.2.5 Padrões de Fluxo.....	17
2.3 REGIMES DE ESCOAMENTO EM TANQUES AGITADOS	18
2.4 FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA AGITAÇÃO	20
2.4.1 Número de Reynolds.....	20
2.4.2 Número de Froude.....	20
2.4.3 Número de Bombeamento.....	21
2.4.4 Número de Mistura.....	21
2.4.4 Número de Potência.....	22
2.5 CONSUMO DE POTÊNCIA	22
2.5.1 Curva de Potência.....	25
2.6 NÚMERO DE POTÊNCIA DETERMINADO POR NAGATA (1975).....	27
2.7 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA EM UNIDADE PILOTO DE AGITAÇÃO COM TRANSDUTORES DE TORQUE	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 MATERIAL.....	31
3.1.1 Unidade Piloto de Agitação	31
3.1.2 Software.....	35
3.1.3 Fluido de ensaio e Instrumentos de medição	35
3.1.4 Impelidores de Quatro Pás Retas Inclinadas	36
3.2 MÉTODOS.....	41
3.2.1 Metodologia Para Obtenção de Dados Experimentais por Torquímetro MAGTROL.....	41
3.2.2 Metodologia Para Análise de Dados Experimentais Obtidos por Silva (2019).....	42
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	43

4.1. CONSUMO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ROTACIONAL.....	43
4.1.1. Consumo de potência em função da relação D_i/T.....	43
4.1.2. Consumo de potência em função da relação w/D_i.....	57
4.2. COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA COM AGITADORES DE FLUXO AXIAL E DE FLUXO RADIAL.....	59
4.3. NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS.....	62
4.4. ELABORAÇÃO DA PLANILHA.....	65
5 CONCLUSÕES.....	66
6 PERSPECTIVAS.....	68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1 INTRODUÇÃO

As técnicas de agitação e mistura são encontradas em diversos processos dentro de indústrias de transformação, principalmente como equipamentos destinados à promoção de reações químicas, trocadores de calor e de massa, podendo-se citar: reatores CSTR; tanques de floculação; tanques de dissolução de ácidos, base; tanques de dispersão de gases; tanques de extração; tanques de retenção de produto em processamento. Enquanto a agitação pode envolver o movimento de uma única fase, a mistura está associada à presença de mais de uma fase para diminuir a heterogeneidade entre fases e/ou características físico-químicas (CREMASCO, 2014).

A operação de agitação caracteriza-se por promover movimentos ou fluxos em um produto, basicamente empregada em tanques de estocagem, cujos componentes do produto devem permanecer distribuídos uniformemente em toda a extensão do tanque, sem que haja separação ou concentração, enquanto durar o período de estocagem. O sistema de agitação é composto pelo conjunto conhecido como tanque agitado, que consiste normalmente em um tanque cilíndrico, um ou mais impelidores, um motor e usualmente chicanas (SOUZA, 2011; JOAQUIM JUNIOR et al., 2012).

Uma grande variedade de impelidores é disponibilizada pelos fabricantes de agitadores e a geometria do impelidor é determinante no processo de agitação e mistura, ela irá determinar a eficiência do processo, assim como o consumo de potência do sistema. Segundo Souza (2011) uma das formas de se avaliar um bom projeto do agitador é relacionando sua eficiência de mistura com o seu consumo de potência, fazendo a verificação da potência instalada por unidade de volume processado.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho consiste em analisar o consumo de potência em tanques de agitação sem chicanas e com chicanas, utilizando dados experimentais de uma planta piloto. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- I. Analisar desenvolvimento das curvas de potência em função da variação do diâmetro do agitador;
- II. Interpretar o número de potência em função do regime de escoamento;
- III. Verificar a influência dos agitadores de fluxo radial e de fluxo axial no consumo de potência da planta de agitação;
- IV. Propor uma planilha de dados para simular o consumo de potência de impelidores de pás retas com objetivo de auxiliar o ensino de sistemas de agitação nas práticas da disciplina Operações Unitárias.

2 REVISÃO DE LITERATURA

A operação de agitação refere-se à movimentação de líquidos e de pastas em tanques por meio de dispositivos, cujo objetivo reside, entre outros, no incremento das taxas de transferência de calor e de massa, bem como na facilitação da realização de reações químicas. As técnicas de agitação e mistura são encontradas em diversos processos dentro de indústrias de transformação, principalmente como equipamentos destinados à promoção de reações químicas, trocadores de calor e de massa, podendo-se citar: reatores CSTR; tanques de floculação; tanques de dissolução de ácidos, base; tanques de dispersão de gases; tanques de extração; tanques de retenção de produto em processamento (CREMASCO, 2014).

Muitas operações industriais dependem do sucesso de uma efetiva agitação e mistura de fluidos. Apesar de geralmente serem confundidos, agitação e mistura não são sinônimos. A agitação refere-se ao movimento induzido de um material de uma maneira específica, geralmente em um padrão circulatório dentro de algum tipo de recipiente. A mistura é a distribuição aleatória, dentro e através uma da outra, de duas ou mais fases inicialmente separadas. Um único material homogêneo, como um tanque cheio de água fria, pode ser agitado, mas não pode ser misturado até que algum outro material (como uma quantidade de água quente ou algum sólido em pó) seja adicionado a ele (McCABE; SMITH; HARRIOT, 2005).

A agitação é o coração de um grande número de processos industriais em diversas áreas, tais como mineração, alimentícia, petrolífica, produtos químicos, farmacêuticos, tratamento de efluentes, entre outros. Essa operação deve ser analisada de diversos ângulos e em cada caso deve-se verificar qual é a etapa crítica do processo em estudo. Por exemplo, em um cristalizador, os parâmetros importantes são o nível de supersaturação, o calor transferido associado ao controle de temperatura, a suspensão dos cristais, a taxa de crescimento e a nucleação secundária. Nos fermentadores, outros parâmetros merecem maiores cuidados como a transferência de oxigênio, a dispersão do ar e a estabilidade dos microorganismos. Portanto, é vital considerar os diferentes aspectos ligados à agitação nos diversos processos (JOAQUIM JUNIOR et al., 2012).

2.1. CLASSIFICAÇÃO DOS PROCESSOS DE AGITAÇÃO

Os processos relacionados à agitação podem ser classificados em cinco tipos de aplicação de acordo com as definições de Nagata (1975), conforme ilustrado na Tabela 1.

Tabela 1 - Classificação dos processos de agitação

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

Fonte: OLDSHUE (1983)

A primeira coluna da Tabela 1 (Aplicação) mostra cinco classes de aplicações primárias no processo de agitação. As outras duas colunas apresentam a diferença entre processos físicos e processos químicos relacionados a essa aplicação. Por exemplo: na aplicação líquido-sólido, a concentração de sólidos na suspensão pode ser medida através de parâmetros físicos, enquanto na dissolução o material sólido passa da fase sólida para a fase líquida, denotando, portanto, um processo de transferência de massa (JOAQUIM JUNIOR et al., 2012).

No caso da aplicação líquido-gás, os processos podem ser resumidos a dois: a dispersão de gases e a absorção. O objetivo da dispersão é distribuir bolhas de gás por uma fase líquida contínua, de forma a aumentar a área de contato entre gás e líquido e, por conseguinte, facilitar a transferência de massa através dessa interface. 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 (HARNBY; EDWARDS; NIENOW, 1985; BARROS; LEITE; BERTOLI, 2005).

Nos líquidos imiscíveis, a emulsão ocorre quando um líquido é disperso por um sistema de agitação em outro, ao qual não se mistura, por exemplo, água e óleo. Normalmente deseja-se conseguir uma emulsão estável, ou seja, aquela em os componentes permanecem emulsificados após o processo sem a necessidade de agitação constante. Já na extração, observa-se a formação de emulsões instáveis apenas para que a transferência de massa entre as fases ocorra, podendo haver ou não reação química (OLDSHUE, 1983).

A mistura de líquidos miscíveis é um dos processos mais comuns com o objetivo de efetuar uma mistura homogênea entre dois líquidos (processamento físico) ou promover uma reação química entre duas matérias-primas que se encontram na fase líquida (JOAQUIM JUNIOR et al., 2012).

A última aplicação é uma categoria geral, na qual a descrição da necessidade de agitação é dada em termos de movimentação do fluido. A aplicação física refere-se ao conhecimento da capacidade de bombeamento do impelidor bem como do escoamento do fluido ao redor do impelidor do fundo do tanque e das chicanas. Desse modo, a transferência de calor se comporta como um processamento químico, pois, geralmente, a necessidade de troca de calor se dá quando ocorrem reações químicas (NAGATA, 1975).

2.2. SISTEMAS DE AGITAÇÃO

O sistema de agitação consiste normalmente em um tanque cilíndrico, um ou mais impelidores, um motor e usualmente chicanas. O sistema de agitação é também integrado à geometria do vaso para propiciar as melhores condições para o processo e a maior economia operacional possível. A geometria desse sistema é de suma importância pois determinará qual será o perfil de velocidades no interior do tanque. Este perfil, por sua vez, determinará a interação entre os fluidos do sistema, a existência e intensidade da turbulência, o comportamento da superfície, enfim, todos os fatores que levarão ao sucesso ou fracasso do processo (JOAQUIM JUNIOR et al., 2012; SOUZA, 2011).

2.2.1. Tanque Agitado

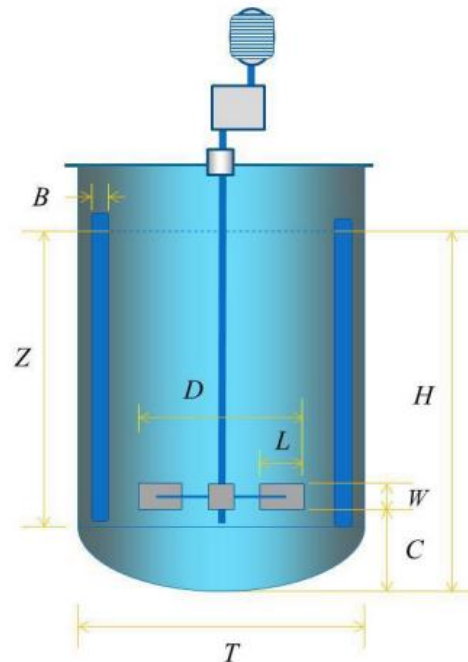
O tanque é o recipiente que conterá o produto e onde todo o processo será realizado. Preferencialmente, o tanque deverá ser cilíndrico e vertical, com relação entre o diâmetro interno e altura por volta de 0,87. Além disso, o fundo deve ter uma geometria que favoreça o fluxo gerado pelo impelidor (RAZUK, 1992).

A utilização de tanques cilíndricos é recomendada devido a sua simetria, o que implica em uma construção mais fácil, uma maior sanitariedade – quando exigida pelo processo – e um comportamento mais homogêneo do fluxo. A instalação vertical do tanque facilita o processo de agitação, pois permite que, com um único impelidor ou para tanques de diâmetro menores, com uma série de impelidores no mesmo eixo, vertical e paralelo, ao eixo do tanque se agite todo o conteúdo do mesmo de forma aproximadamente homogênea (SOUZA, 2011; SOUZA & RAZUK, 1996).

As dimensões características do sistema de agitação são o diâmetro interno (T), o diâmetro do impelidor (D), 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 (B). A relação geométrica entre as diversas partes do tanque varia muito em função da aplicação desejada e das características

dos fluidos envolvidos. A Figura 1 ilustra um tanque agitado convencional e suas dimensões características. Normalmente são praticadas as seguintes relações geométricas entre as partes do tanque de agitação (JOAQUIM JUNIOR et al.,2012):

Figura 1 - Ilustração de um tanque agitado convencional



Fonte: GONZALEZ (2015)

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

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

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

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

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

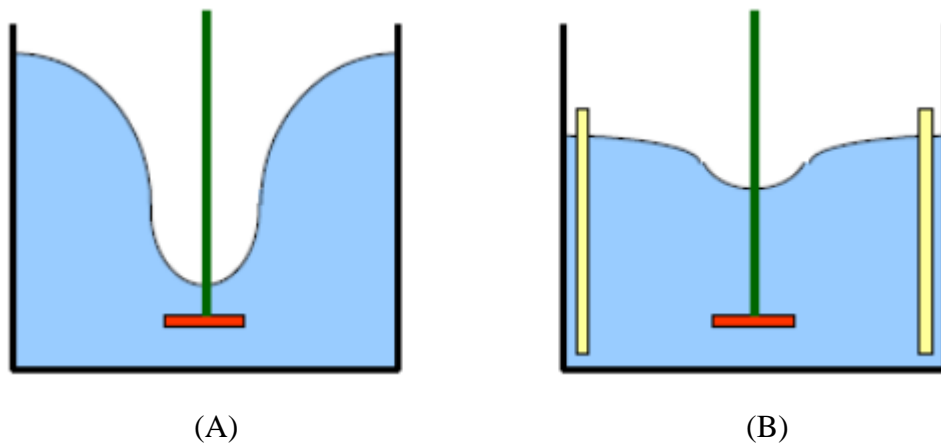
2.2.2. Chicanas

As chicanas são chapas localizadas nas laterais internas do tanque com o objetivo de provocar distúrbio, redirecionar o fluxo do sistema, evitando o fluxo tangencial e transformando-o em fluxo radial e/ou axial, e maximizar a transferência de potência para o fluido, minimizando a “rotação sólida” e evitando entrada de ar no sistema causada pelo vórtice na superfície. A rotação sólida ocorre quando o fluido se movimenta como se fosse um corpo sólido, conseqüentemente apresentando um nível de mistura muito pequeno dentro do fluido, o

que pode causar classificação, estratificação e separação do sistema em várias fases (JOAQUIM JUNIOR et al., 2012).

Como apresentado na Figura 2, em sistemas equipados com chicanas não é observada a formação de vórtices superficiais para os níveis normais de agitação, o que resulta em uma menor aeração do produto. Porém, ao comparar os dois sistemas girando à mesma rotação, um sem chicanas e outro com chicanas, a potência consumida pelo segundo será bem maior. O padrão para utilização de chicanas é: quatro chicanas espaçadas de 90° com altura a partir da linha de tangência ao nível do líquido. A largura da chicana é $1/10$ ou $1/12$ do diâmetro do tanque. A distância para fixação da chicana é geralmente de $1/4$ da largura da chicana entre a base da chicana e a base do tanque. A utilização de apenas duas chicanas causa instabilidade mecânica no sistema de agitação em que são empregados alta intensidade de agitação (SOUZA, 2011).

Figura 2 - Vórtice formado em um tanque agitado sem chicanas (A) e com chicanas (B)



Fonte: GONZALEZ (2015)

Existem diversas controvérsias com relação ao número ideal de chicanas a serem instaladas em tanques agitados, normalmente variando de duas a quatro chicanas, quando dispostas no costado do tanque. A técnica preferencial e mais convincente é a de utilizar três chicanas quando estiver trabalhando com impelidores de quatro pás ou quatro chicanas quando estiver trabalhando com impelidores de três pás, desta forma não haverá a coincidência de todas as pás com as chicanas na passagem das pás pelas mesmas (SOUZA, 2011).

2.2.3. Sistema de Acionamento

O sistema de acionamento é o que moverá o impelidor, normalmente é composto por um motor (elétrico ou hidráulico) e um redutor de velocidade onde é acoplado o eixo motriz dos impelidores, obtendo-se a rotação desejada final. A seleção do acionamento deve levar em consideração primeiramente a rotação e potência requeridas pelo sistema de agitação (BARBOSA, 2004).

2.2.4. Impelidores

Todo tanque agitado contém um ou mais impelidores, também conhecidos como impulsores, agitadores ou misturadores. A sua principal função é provocar a movimentação do fluido, ou seja, proporcionar a mistura desejada. Há diversos modos de classificação de impelidores, por tipo de padrão de fluxo, por tipo de geometria e tipo de rotação (CREMASCO, 2014).

No que se refere à classificação dos impelidores em função da rotação, têm-se (SOUZA, 2011):

- Impelidores rápidos: são representados pelos impelidores de quatro pás retas à 45°, impelidores de três pás de alta eficiência, turbinas radiais, dispersores e navais. São assim chamados por necessitarem de rotações relativamente elevadas. Tem um pequeno tamanho em relação ao tanque e, normalmente impõe ao fluido altas velocidades em sua proximidade;
- Impelidores lentos: representados pelas âncoras e impelidores helicoidais. Com grande dimensão, abrangem normalmente quase toda a totalidade do tanque, arrastando o fluido com suas grandes pás por toda a extensão do tanque. São normalmente utilizados com fluidos de alta viscosidade ou não-newtonianos.

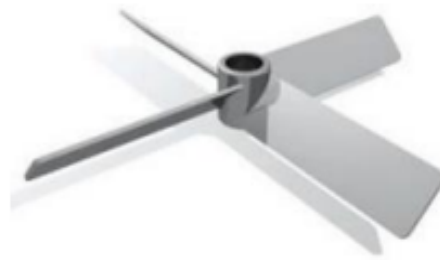
Pela classificação dos tipos de impelidores segundo a geometria, têm-se (CREMASCO, 2014):

- Turbinas: Estes impelidores são caracterizados por um ângulo de inclinação com a vertical, nos quais as lâminas podem ser curvadas. A ação de mistura se dá pela entrada e descarga de líquido pelas lâminas das turbinas com fluxo radial que atinge as paredes do recipiente. Esse fluxo divide-se em correntes e provoca a mistura devido a sua energia cinética. Existem diversos tipos de turbina, como exemplo tem-se as pás retas 90°, esse tipo de impelidor provoca fluxo predominantemente radial, podendo ser de 4 pás ou mais sendo adequado para agitação de fluidos viscosos. Outro exemplo são as

pás inclinadas, que provocam fluxo axial, sendo útil ao se trabalhar com suspensão de sólidos. Nessa classe estão os impelidores com pás dispostas em 45° com a horizontal (Figura 3) e os impelidores conhecidos como de alta eficiência.

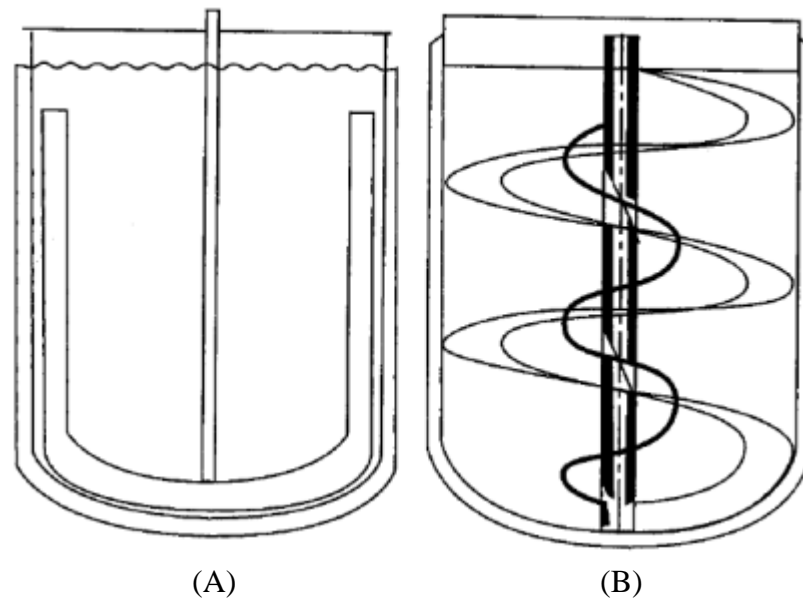
- Hélice naval: Esse tipo de impelidor é caracterizado por apresentar padrão de fluxo predominantemente axial. Ele promove bombeamento no interior do tanque ocasionando menor tempo de mistura quando comparado aos outros tipos. É indicado para operação com emulsões que apresentam baixa viscosidade, em solubilizações e para reações químicas.
- Pás: Constituem-se de duas ou mais lâminas na vertical. Sua vantagem é a simplicidade de construção e baixo custo, a desvantagem é que há baixo fluxo axial. Nesta classe estão os impelidores espiral dupla e âncora. O tipo espiral dupla provoca padrão de escoamento misto devido ao movimento de pás, sendo que a interna impulsiona o fluido para baixo e a externa para cima. O impelidor tipo âncora provoca o fluxo tangencial. Assim como o tipo espiral dupla, é indicado quando se opera com fluidos que apresentam consistência elevada. A Figura 4 apresenta ilustração dos dois tipos de impelidor de Pás.

Figura 3 – Impelidor de pás retas inclinadas a 45°



Fonte: GARAVITO (2013)

Figura 4 – Tipos de impelidores âncora (A) e espiral dupla (B)



Fonte: PAUL, ATIEMO-OBENG E KRESTA (2004)

2.2.5. Padrões de Fluxo

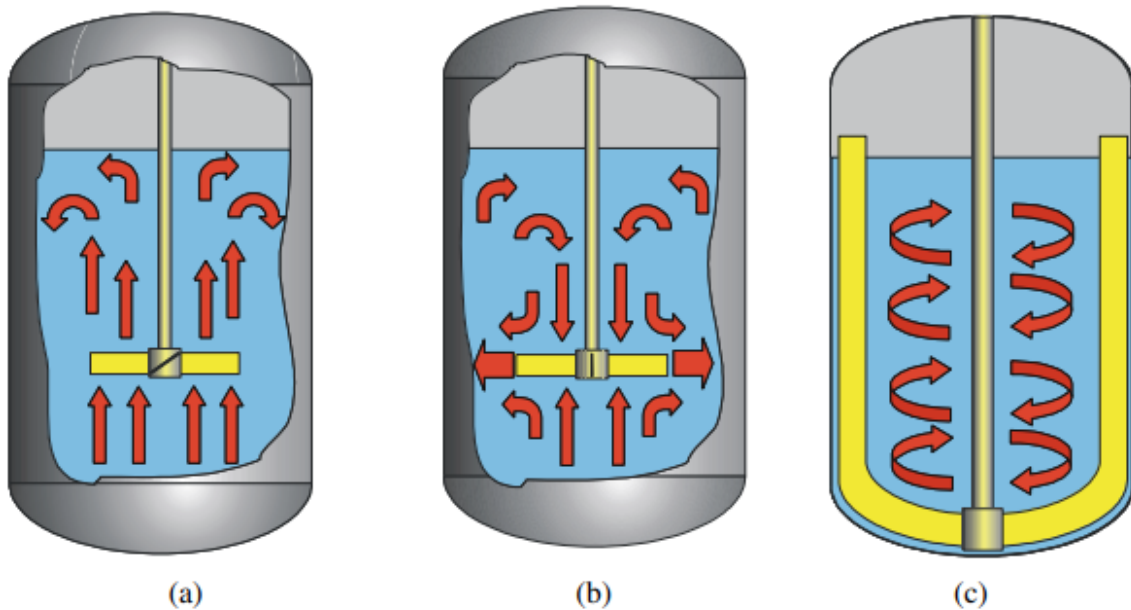
Segundo Oldshue (1983), os impelidores são divididos segundo o padrão de fluxo gerado por eles em dois grandes grupos: os impelidores de fluxo radial e os impelidores de fluxo axial.

Os impelidores de fluxo radial geram um fluxo horizontal em direção às paredes do vaso. Se o vaso possuir chicanas, o impelidor radial produzirá fortes correntes na vertical, paralelas às chicanas. Caso não existam chicanas, pode-se verificar a formação de vórtices e fluxo tangencial no vaso, que é um efeito indesejado para a grande parte dos processos. Os impelidores de fluxo axial produzem fluxo paralelo ao eixo do impelidor. Se forem instalados em tanques sem chicanas, podem produzir vórtices e fluxos tangenciais com todos os seus inconvenientes. Porém, impelidores de fluxo axial são mais eficientes do que impelidores radiais, produzindo um fluxo maior com a mesma potência (SOUZA, 2011).

Além dos fluxos axial e radial, existe o fluxo gerado por impelidores do tipo âncora, predominantemente tangencial. Estes impelidores geram um fluxo maior próximo à parede do vaso enquanto próximo ao centro o fluxo é quase nulo, sendo que na maioria das vezes os fluxos tangenciais são prejudiciais à mistura (HARNBY; EDWARDS; NIENOW, 1985).

A Figura 5 ilustra os diferentes perfis de fluxo por impelidores do tipo radial, axial e tangencial.

Figura 5 - Perfis de fluxo do tipo: (a) Axial; (b) Radial; (c) Tangencial.



Fonte: SOUZA (2011)

2.3. REGIMES DE ESCOAMENTO EM TANQUES AGITADOS

Segundo Souza (2011), assim como em qualquer operação que envolve movimentação de fluidos, a forma como os fluidos se deslocam é um dos fatores determinantes sob vários aspectos na agitação:

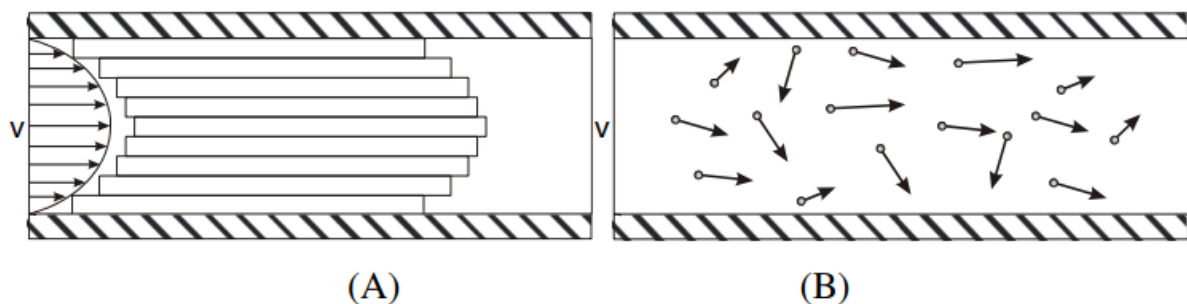
- determinará a potência necessária para impulsionar o fluido;
- poderá induzir vibrações e ruídos durante o processo;
- poderá provocar a aeração (intencional ou não) do fluido;
- influenciará a eficiência de mistura ou outros processos;
- determinará a eficácia ou não do processo.

Por estas e outras razões é importante conhecer a maneira como o fluido se comporta em determinadas condições de temperatura, pressão e velocidade. Desta forma 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.

O cientista britânico Osborne Reynolds realizou experimentos que permitiram visualizar os diferentes regimes de escoamento, o mesmo definiu duas formas ou regimes distintos de escoamento de um fluido: o regime laminar e o regime turbulento, representados

na Figura 6. O escoamento laminar se caracteriza pelo movimento suave e em lâminas ou camadas de fluidos. O escoamento turbulento é caracterizado por movimentos aleatórios, tridimensionais de partículas fluidas adicionadas ao movimento principal. Nesse tipo de escoamento há uma maior dissipação de energia devido ao atrito entre as partículas de fluidos, formação de vórtices e haverá maior perda de carga. O escoamento turbulento ocorre normalmente em velocidades mais elevadas e tem um comportamento difícil de prever e mensurar (VILLAR ALÉ, 2011; SOUZA, 2011).

Figura 6 - Regime de escoamento laminar (A) e turbulento (B)



Fonte: MACINTYRE (1983)

A operação e projeto de equipamentos de mistura nos dois regimes de fluxo são bem diferentes, devido ao fluxo para uma dada geometria e conjunto de condições de contorno é um desenvolvimento contínuo de números de Reynolds muito baixos (operação laminar) a muito altos (operação totalmente turbulenta). Em um número de Reynolds baixo, a viscosidade domina, distúrbios infinitesimais são amortecidos e tem-se o fluxo laminar. Em um Reynolds muito alto, as forças inerciais dominam, as mudanças na viscosidade não têm efeito nos resultados do processo e os distúrbios infinitesimais crescem de forma tão complexa que é chamado de turbulência. Com essa complexidade de interações ocorre a rápida dispersão e mistura. Em algum lugar entre os extremos está uma região de transição, onde ambas as forças inerciais e viscosas desempenham um papel (PAUL, ATIEMO-OBENG, KRESTA, 2004).

É possível constatar experimentalmente ou, até mesmo, matematicamente, que dificilmente um sistema de agitação trabalhará em regime laminar. Para tal regime o impelidor necessariamente trabalharia em rotações baixíssimas. Quando o regime laminar é desejado, recorre-se normalmente aos impelidores tipo âncora, pequenos impelidores navais em grandes tanques de estocagem, ou quatro pás retas a 45 graus na posição descentrada. Ainda assim, próximo ao impelidor, observar-se-á um comportamento turbulento (SOUZA, 2011).

2.4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA AGITAÇÃO

A complexidade no estudo teórico de sistemas líquidos submetidos a agitação é considerável já que frequentemente o balanço de massa, energia e quantidade de movimento têm de ser resolvidos simultaneamente. Uma forma de contornar essas dificuldades é através do uso de correlações adimensionais empíricas, como o Número de Reynolds, Número de Potência, Número de Froude e Número de Bombeamento (SAITO, 2002).

2.4.1. Número de Reynolds

Para sistemas de mistura, o número de Reynolds é definido pela Equação 6. É a relação entre as forças de inércia e as forças viscosas, através dele é possível determinar o regime de movimento: laminar, transição e turbulento. O escoamento é considerado laminar quando o número de Reynolds é menor que 10 e turbulento para valores acima de 1×10^4 , a região de transição ocorre entre esses valores (GONZALEZ, 2015).

$$N_{Re} = \frac{\rho N D_i^2}{\mu} \quad (6)$$

Em que:

N_{Re} é o número de Reynolds (adimensional);

ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3);

N é a velocidade rotacional (s^{-1});

D_i é o diâmetro do impelidor (m);

μ é a viscosidade absoluta do fluido (kg/m.s).

Em baixos valores do número de Reynolds, a viscosidade é o fator determinante, mostrando que as forças viscosas são predominantes. Em altos valores de número de Reynolds, a densidade é o fator que determina que as forças inerciais são predominantes (SPOGIS, 2002).

2.4.2. Número de Froude

O número de Froude inclui as forças gravitacionais que agem sobre o sistema, sendo usado para considerar os efeitos da superfície livre no número de potência, que resulta na formação do vórtice central que é geralmente visível em tanques sem chicanas. O número de Froude (Equação 7) aumenta com o aumento da velocidade rotacional, com o aumento do

diâmetro do impelidor e conseqüentemente a potência consumida diminui (UHL; GRAY, 1966).

$$N_{FR} = \frac{N^2 D_i}{g} \quad (7)$$

Onde:

N_{FR} é o número de Froude (adimensional);

N é a velocidade rotacional (s^{-1});

D_i é o diâmetro do impelidor (m);

g é a aceleração gravitacional (m/s^2).

2.4.3. Número de Bombeamento

O bombeamento é definido como a capacidade do impelidor em movimentar o fluido, relacionando o maior fluxo gerado à área do impelidor. O número de bombeamento tem grande importância no critério de seleção e definição de um sistema de agitação, é utilizado para comparar a capacidade de bombeio de diferentes impelidores em tanques de geometrias distintas. Ele pode ser calculado através da Equação 8, sendo a relação entre a taxa de bombeio (Equação 9), dado pelo volume bombeado por área do impelidor e por tempo, com a velocidade de rotação e tamanho do impelidor (GONZALEZ, 2015; SPOGIS, 2002).

$$N_Q = \frac{Q}{ND_i^3} \quad (8)$$

Em que:

N_Q é o número de bombeamento (adimensional);

Q é a taxa de bombeamento (m^3/s);

N é a velocidade rotacional (s^{-1});

D_i é o diâmetro do impelidor (m);

$$Q = N_q \cdot N \cdot D_i^3 \quad (9)$$

2.4.4. Número de Mistura

O número de mistura está relacionado com o tempo requerido para alcançar um determinado grau de mistura ou homogeneidade de líquidos miscíveis em um tanque agitado,

sendo uma função da velocidade de rotação e do tempo de mistura. Esse número pode ser calculado pela Equação 10 (CACHONI, 2018).

$$N_m = N \cdot t \quad (10)$$

Em que:

N_m é o número de mistura (adimensional);

N é a velocidade rotacional (s^{-1});

t é o tempo de mistura (s).

2.4.5. Número de Potência

O número de potência é o coeficiente de arraste nos sistemas de agitação, ele relaciona o consumo de potência (P) e as características mecânicas do agitador, para escoamentos turbulentos é representado pela Equação 11 (SILVA, 2002).

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_i^5} \quad (11)$$

No caso de regime laminar a relação da Equação 12 é válida:

$$N_p = \frac{P}{\mu N^2 D_i^3} \quad (12)$$

Em que:

N_p é o número de potência;

P é a potência (J/s ou W);

ρ é a massa específica do fluido (kg/m^3);

N é a velocidade rotacional (s^{-1});

D_i é o diâmetro do impelidor (m);

μ é a viscosidade absoluta do fluido ($kg/m.s$).

2.5. CONSUMO DE POTÊNCIA

Uma consideração importante no projeto de um tanque agitado é a potência transferida do impelidor para o fluido. O cálculo da potência pode ser efetuado de diversas maneiras e depende do processo, do regime de escoamento e do fluido. Entretanto, para o caso do

escoamento turbulento em um sistema homogêneo, a estimativa da potência é realizada através de análise dimensional e/ou medidas experimentais do torque (JOAQUIM JUNIOR et al., 2012).

A potência fornecida não depende unicamente do tipo de impelidor e da velocidade da rotação, mas também das propriedades físicas do fluido (como viscosidade e densidade) e da geometria do tanque e do impelidor, a profundidade do líquido, a presença ou ausência de chicanas e a localização relativa do impelidor em relação ao tanque. Portanto, para caracterizar o comportamento de um impelidor é necessário levar em consideração todo o ambiente em que opera o sistema (SILVA; SOUZA; NUNHEZ, 2008).

Para números de Reynolds abaixo de 10, a densidade do fluido não tem nenhum efeito sobre o consumo de potência dos impelidores. Porém, quando os impelidores operam no regime de transição e no regime turbulento, a densidade do fluido tem efeito no consumo de potência. Para os efeitos da viscosidade do fluido no consumo de potência, na região turbulenta, quando o Reynolds é elevado, a viscosidade não influencia e o número de potência é essencialmente constante. Já para a região de transição até a região laminar, o efeito da viscosidade no consumo de potência se torna significativo, pois em baixos números de Reynolds as forças viscosas predominam sobre as forças inerciais, ou seja, o número de potência se torna inversamente proporcional ao número de Reynolds (ou diretamente proporcional a viscosidade) (RUSHTON; COSTICH; EVERETT, 1950; OLDSHUE, 1983).

Quando a velocidade do impelidor aumenta para produzir condições turbulentas, a potência necessária para girar o impelidor cresce, iniciando, então, a formação de um vórtice em volta do eixo para tanques sem chicanas. Em altas velocidades, o vórtice pode, eventualmente, atingir o impelidor. Nessas circunstâncias, o ar será arrastado para o meio do líquido e a potência consumida diminuirá. Outro parâmetro que influencia a potência fornecida ao fluido é a presença de chicanas, pois o fluido sofre mais atrito, além disso, a distância entre o impelidor e o fundo do tanque (C) influencia o número de potência, ainda que em menor escala. Dependendo do tipo de impelidor, da relação entre o número de chicanas, da largura da chicana (B) e do diâmetro do tanque (T), o número de potência pode aumentar ou diminuir com a distância C (SILVA; SOUZA; NUNHEZ, 2008; JOAQUIM JUNIOR et al., 2012).

As variáveis citadas são utilizadas para calcular a potência P e o torque T_q . Segundo Joaquim Junior et al (2012), a potência consumida por um misturador é calculada como sendo o produto da força de arraste do impelidor pela velocidade relativa entre a pá do impelidor e o fluido, sendo descrita pela Equação 13.

$$P = k \cdot \rho \cdot N^3 \cdot D_i^5 \quad (13)$$

Em que:

k é uma constante de proporcionalidade;

ρ é a densidade do fluido (kg/m^3);

N é a velocidade rotacional (s^{-1});

D_i é o diâmetro do impelidor (m).

A análise dimensional aplicada a um tanque agitado fornece uma relação para o escoamento turbulento do tipo (MARTINI,2010):

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_i^5} = k \left(\frac{\rho N D_i^2}{\mu} \right)^a \left(\frac{N^2 D_i}{g} \right)^b \left(\frac{T}{D_i} \right)^c \left(\frac{C}{D_i} \right)^d \left(\frac{Z}{D_i} \right)^e \quad (14)$$

Segundo a análise dimensional, a potência tem as mesmas unidades do produto entre a massa específica ρ (kg/m^3), 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).

Na Equação 14, k é uma constante, o primeiro grupo adimensional é o Número de Reynolds, o segundo é o Número de Froude e os demais números representam os efeitos da geometria, visto que cada parâmetro geométrico está dividido pelo diâmetro do impelidor. (D_i). Se for mantida a similaridade geométrica, a Equação 14 pode ser simplificada para (SILVA, 2002):

$$N_p = k(N_{Re})^a \quad (15)$$

A Equação 15 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 15 pode ser simplificada novamente, para $N_p = k$, uma relação válida para tanques com chicanas. No caso do tanque não apresentar chicanas, mesmo para números de Reynolds elevados, pode existir a influência do número de Froude no número de potência (SILVA, 2019).

O torque é um fator de grande importância nos projetos de agitadores, pois influencia diretamente o custo do equipamento, o tamanho do eixo do impelidor, o peso do impelidor e as

propriedades do fluido a ser misturado também influenciam esse valor. O torque é definido como o produto da força aplicada sobre o fluido e a distância da pá do impelidor, sendo uma relação entre a velocidade rotacional do impelidor (N em rps) e a potência consumida no processo (P), para o cálculo em sistemas de agitação utiliza-se a Equação 16 (GARAVITO, 2013).

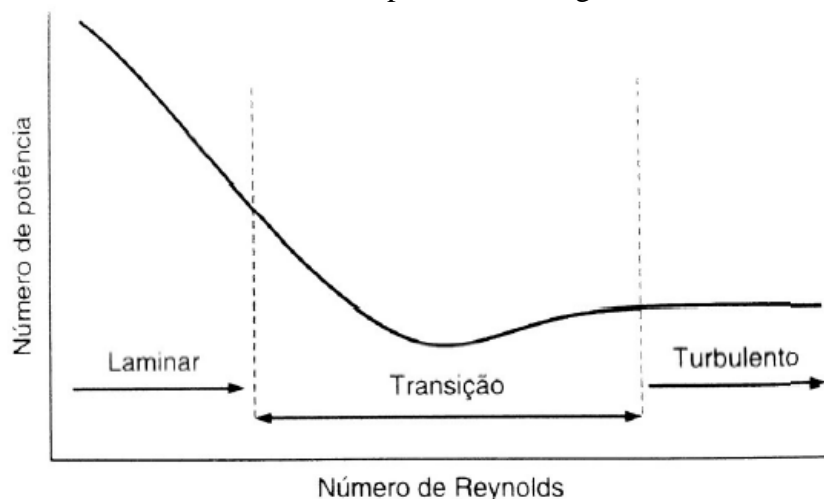
$$T_q = \frac{P}{2\pi N} \quad (16)$$

2.5.1. Curva de Potência

A curva de potência é um gráfico que relaciona o número de potência e o número de Reynolds, a obtenção dessa curva em laboratório ou escala piloto é bastante utilizada para a estimativa de potência em escala industrial. Apesar de ser relativamente fácil obter esses consumos de potência e aplicar procedimentos de aumento de escala para se estimar a potência do equipamento industrial, existe a desvantagem de que muitas vezes não há um entendimento dos fenômenos físicos ocorridos no processo. Desta forma, o equacionamento fica limitado a uma correlação matemática dependente de uma lei de potência (JOAQUIM JUNIOR et al, 2012).

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 representado na Figura 7, que fornece a curva de potência do sistema (SILVA, 2019).

Figura 7 - Característica da curva de potência em regiões de diferentes regimes.

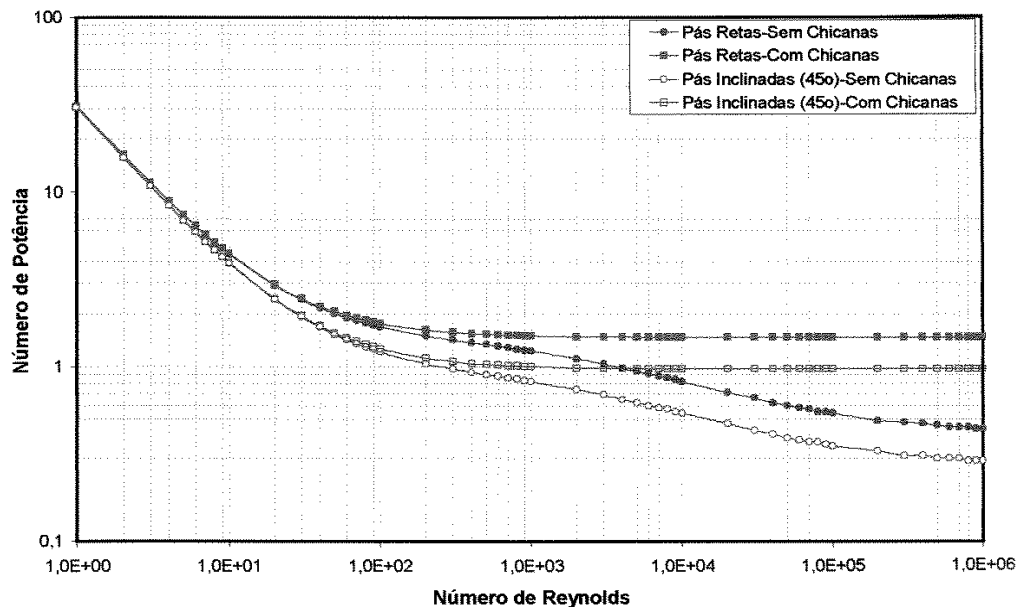


Fonte: JOAQUIM JUNIOR ET AL (2012)

É possível visualizar num gráfico de $N_p \times N_{Re}$ que na região laminar a relação entre o número de potência e o número de Reynolds apresenta perfil linear. Na região chamada de transição, a relação citada apresenta um caráter não linear. Na região turbulenta verifica-se que o número de potência é constante e independente do número de Reynolds. Todavia, este fato não indica que a potência seja constante. Ela aumenta na região turbulenta ao elevar o número de Reynolds. Assim sendo, não é apreciável existir um exagero no valor do número de Reynolds (GARAVITO, 2013).

As curvas de potência para diferentes impelidores podem ser encontradas na literatura, mas é preciso ressaltar que tais curvas são aplicáveis a líquidos newtonianos para geometria de tanque em que foi testada. A Figura 8 apresenta um exemplo de um desses trabalhos publicados e mostra curvas de potência para diferentes impelidores. Na região de regime laminar ($N_{Re} < 10$), o número de potência é proporcional a N_{Re}^{-1} e a potência depende fortemente da viscosidade, enquanto na região turbulenta, o número de potência é constante e independente da viscosidade (JOAQUIM JUNIOR et al, 2012).

Figura 8 - Relação entre o número de potência e o número de Reynolds para fluidos newtonianos para projetos de impelidores em tanques sem e com chicanas.



Fonte: JOAQUIM JUNIOR ET AL (2012)

2.6. NÚMERO DE POTÊNCIA DETERMINADO POR NAGATA (1975)

Nagata (1975) foi um dos investigadores que estudou o consumo de potência em sistemas agitados. 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 na Equação 17, ajustando a equação através de constantes empíricas e acrescenta um termo representativo do aumento do consumo de potência em função do aumento da viscosidade.

$$N_P = \frac{A}{N_{Re}} + B \left(\frac{10^3 + 0,6\xi N_{Re}^\alpha}{10^3 + 1,6\xi N_{Re}^\alpha} \right)^p \quad (17)$$

Ao se acrescentar os efeitos da altura do nível do líquido (H) e do ângulo de inclinação das pás (θ), Nagata (1975) chega a uma equação geral para os impelidores de pás retas centralizados em tanques sem chicanas, representada pela Equação 18.

$$N_P = \frac{A}{N_{Re}} + B \left(\frac{10^3 + 1,2N_{Re}^{0,66}}{10^3 + 3,2N_{Re}^{0,66}} \right)^p \left(\frac{H}{T} \right)^{\left(0,35 + \frac{Wn_p}{2T}\right)} (\text{sen}\theta)^{1,2} \quad (18)$$

As constantes A, B e p podem ser calculadas pelas equações 19, 20 e 21, respectivamente.

$$A = 14 + \left(\frac{Wn_p}{2T} \right) \left[670 \left(\frac{D_i}{T} - 0,6 \right)^2 + 185 \right] \quad (19)$$

$$B = 10 \left[1,3 - 4 \left(\frac{Wn_p}{T} - 0,5 \right)^2 - 1,14 \left(\frac{D_i}{T} \right) \right] \quad (20)$$

$$p = 1,1 + 4 \left(\frac{Wn_p}{T} \right) - 2,5 \left(\frac{D_i}{T} - 0,5 \right)^2 - 7 \left(\frac{Wn_p}{T} \right)^4 \quad (21)$$

Onde:

T é o diâmetro interno do tanque;

W é a largura da pá do impelidor;

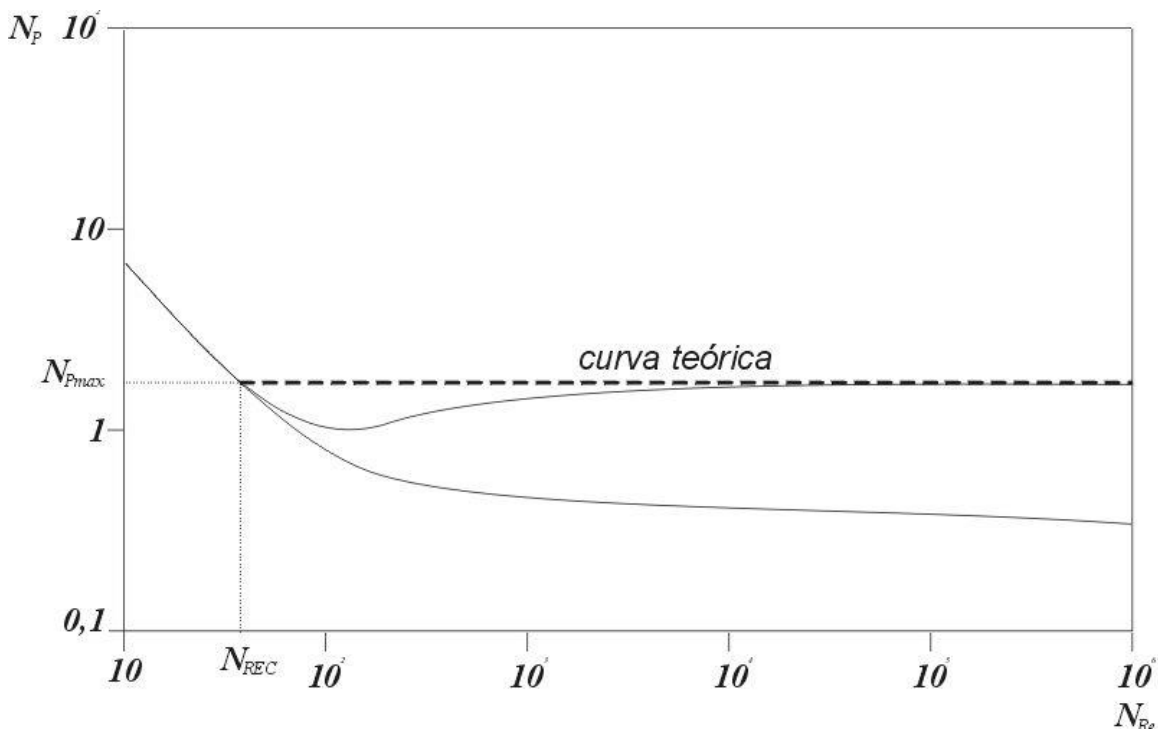
n_p é o número de potência;

D_i é o diâmetro do impelidor (m).

Através de ajustes baseados em observações empíricas, Nagata (1975) apresenta procedimentos para o cálculo do número de potência máximo ($N_{P_{max}}$) de impelidores em vasos equipados com chicana.

O número de potência máximo corresponde à faixa turbulenta de trabalho do impelidor, quando o número de potência é aproximadamente constante. Pelo procedimento apresentado, inicialmente, é estimado o número de Reynolds crítico (N_{ReC}) que corresponde ao cruzamento da curva de número de potência x número de Reynolds do impelidor com o prolongamento da reta equivalente ao número de potência em regime turbulento, conforme mostrado na Figura 9 (SILVA, 2019).

Figura 9 - Gráfico do número de potência máximo *versus* número de Reynolds crítico.



Fonte: NAGATA (1975)

O número de Reynolds crítico para impelidores com pás inclinadas (N_{ReC}) é dado pela Equação 22:

$$N_{ReC} = 10^{4(1-\text{sen}\theta)} \left[\frac{25}{Wn_p/T} \left(\frac{D_i}{T} - 0,4 \right)^2 + \left(\frac{Wn_p/T}{0,11 Wn_p/T - 0,0048} \right) \right] \quad (22)$$

O número de potência máximo ($N_{P_{max}}$) pode ser calculado substituindo N_{ReC} no lugar do N_{Re} na Equação 18. Esse número de potência máximo corresponde à condição em que as

chicanas instaladas no sistema de agitação são as maiores, na condição $\frac{w}{T}$. A potência aumenta rapidamente com a largura das chicanas, até atingir um número máximo, em $\frac{w}{T}$. A influência no número de potência máximo é perdida para larguras maiores de chicanas. Essa condição pode ser representada pela Equação 23, onde w_B é a largura das chicanas e n_B o seu número.

$$\left(\frac{w_B}{T}\right)^{1,2} n_B = 0,35 \quad (23)$$

Segundo Nagata (1975), quando as chicanas são menores do que na condição acima, o número de potência máximo (N_{PB}) pode ser calculado pela Equação 24.

$$N_{PB} = N_{Pmax} - \left[1 - 2,9 \left(\frac{w_B}{T}\right)^{1,2} n_B\right]^2 \left(N_{Pmax} - B \left(\frac{0,6}{1,6}\right)^P\right) \quad (24)$$

2.7. MEDIÇÃO DE POTÊNCIA EM UNIDADE PILOTO DE AGITAÇÃO COM TRANSDUTORES DE TORQUE

Desde o princípio do uso de sistemas de agitação na indústria, destaca-se a necessidade da avaliação de sua potência e rendimento na tentativa de relacionar matematicamente as inúmeras variáveis baseando-se nos resultados de ensaios controlados em unidades piloto, devido a natureza empírica dos processos de agitação de fluidos. Uma unidade piloto para estudo de agitação deve ser composta, basicamente, por um tanque cilíndrico, um sistema de acionamento, normalmente elétrico, que permita a variação contínua de velocidade, o sistema de agitação, propriamente dito com impelidores e eixo, e um sistema de medição de potência (SOUZA, 2011).

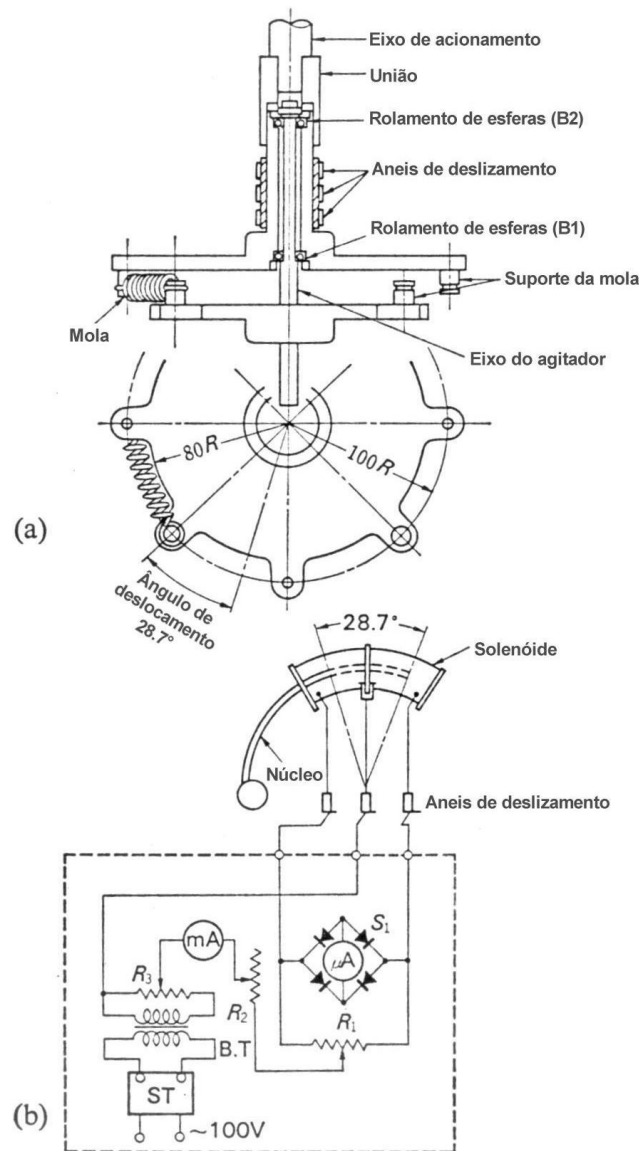
Nagata (1975) utiliza diversos transdutores de torque para diferentes faixas de operação. Os transdutores de torque são basicamente dispositivos instalados no eixo do impelidor, que é seccionado para recebê-lo. O transdutor de torque mede então a deflexão angular relativa entre a porção superior e a porção inferior do eixo por meio de dispositivos elétricos como reostatos, indutores ou extensômetros.

O dinamômetro utilizado por Nagata (1975) pode ser visto na Figura 10, descrito pelo autor como sendo o aparelho que mede a reação ao torque composto 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. (Figura 10a) A medida do torque é dada pelo ângulo de deslocamento entre os dois discos indicado por um medidor por indutância composto por um solenoide fixa ao disco superior e um núcleo de aço fixo no disco inferior. A

indutância do conjunto varia conforme o ângulo de deslocamento relativo entre os dois discos e é medida em microamperes (Figura 10b).

O atrito estático do conjunto pode ser determinado retirando-se as molas e medindo-se o mínimo torque necessário para girar o eixo do agitador. O modelo realizado por Nagata (1975) é considerado um dos mais eficientes e citados em quase toda literatura e publicação dos estudiosos da área.

Figura 10 - Dinamômetro do transdutor de torque.



(a) Dinamômetro No. 2A. (Medidor por indutância).

(b) Diagrama esquemático mostrando o método de medição do deslocamento angular do dinamômetro No. 2A.

Fonte: NAGATA (1975)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1. MATERIAL EMPREGADO POR SILVA (2019)

Nesta seção serão descritos os materiais e metodologia empregados na tese de doutorado de Silva (2019), seus ensaios e dados experimentais obtidos foram utilizados como base para atingir os objetivos deste trabalho. Em seguida, será descrita a metodologia para a análise dos dados e resultados para a determinação do consumo de potência do sistema de agitação.

Para o desenvolvimento dos ensaios experimentais foram necessários os seguintes materiais e equipamentos:

- a) Unidade piloto de agitação de fluidos com capacidade de 50 L;
- b) Impelidores tipo pás retas: 45° e 90°;
- c) Computador para captação de dados da unidade piloto;
- d) Software MAGTROL - “Motor testing software, torque 1.0, revision 1.0”, para coleta do torque e potência apresentados pelo torquímetro;
- e) Instrumentos de medição: trena, micrômetro, paquímetro e termômetro digital;
- f) Fluido de ensaio: água em temperatura ambiente.

3.1.1. Unidade Piloto de Agitação

A unidade piloto de agitação é composta por um tanque de 50 L com fundo toro esférico em acrílico, montado em um chassi móvel, agitador fixado por castelo com acoplamentos e mancais ligado a um torquímetro, leitor de torque com respectiva conversão de potência, painel elétrico com inversor de frequência e programas que realizam a coleta e conversão dos registros em dados. Na Figura 11 é possível visualizar uma fotografia da unidade piloto.

Figura 11 - Unidade piloto de 50 L.



Fonte: SILVA (2019)

O tanque de 50 L apresenta diâmetro interno próximo de 380 mm e altura de cerca de 693 mm, dispõe de fundo toro esférico ASME 10%, com entrada para três chicanas (separadas a 120°) ou quatro chicanas (separadas a 90°) de aço inoxidável 316 L, dotado de flange com parafusos de fixação, acoplado à parte cilíndrica construída em acrílico transparente, conforme a Figura 12.

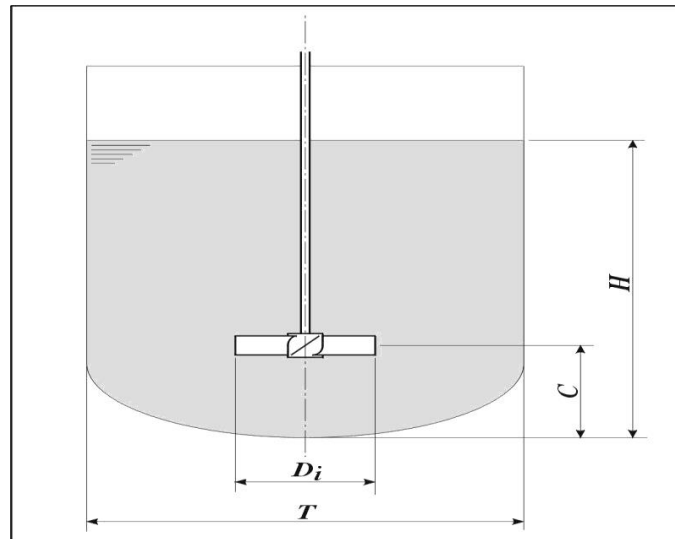
Figura 12 - Tanque de 50 L da unidade piloto.



Fonte: SILVA (2019)

Na Figura 13 representa-se as dimensões do tanque com indicação da simbologia adotada em agitação de fluidos e na Tabela 2 é possível visualizar as dimensões do tanque e chicanas da unidade piloto.

Figura 13 - Dimensões principais do tanque piloto de 50 L e chicanas.



Fonte: SOUZA (2011)

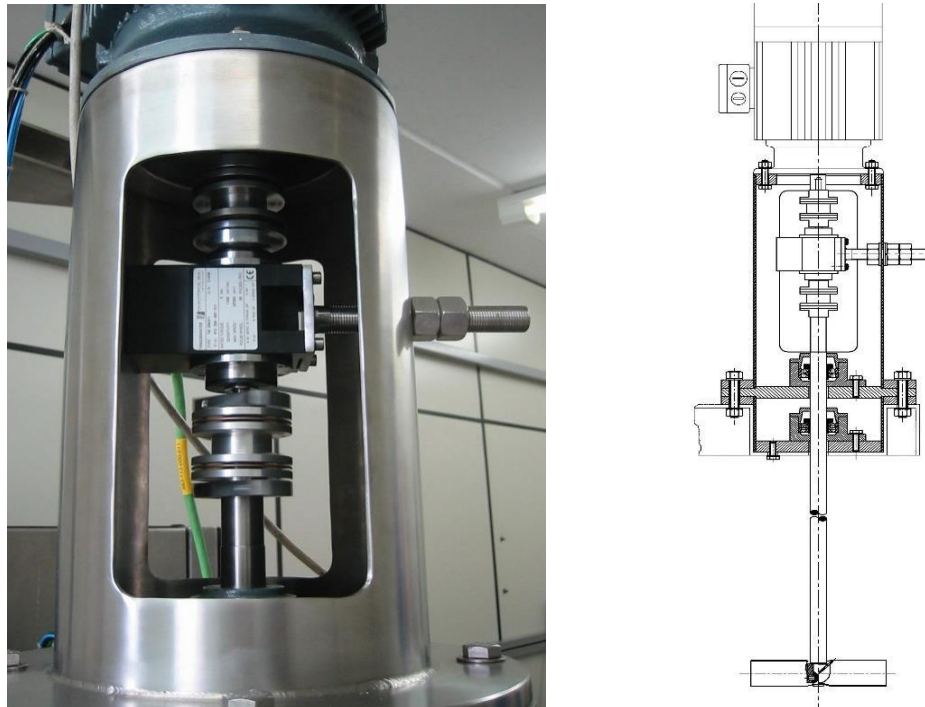
Tabela 2 - Dimensões do tanque de 50 L e das chicanas

Diâmetro Interno (T)	380 mm
Altura do líquido (H=T)	380 mm
Altura cilíndrica (Hc)	693 mm
Distância do impelidor ao fundo do tanque ($C=1/3 H$)	126,7 mm
Número de Chicanas	3 e 4
Largura da chicana (w_B) ($w_B/T=0,1$)	38 mm

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

O conjunto de agitação é composto pelo motor de acionamento, acoplamento entre eixo do motor e torquímetro, conexão entre torquímetro e eixo do agitador, eixo do agitador e impelidor, suportado por duas caixas de mancais. O conjunto está ilustrado na Figura 14.

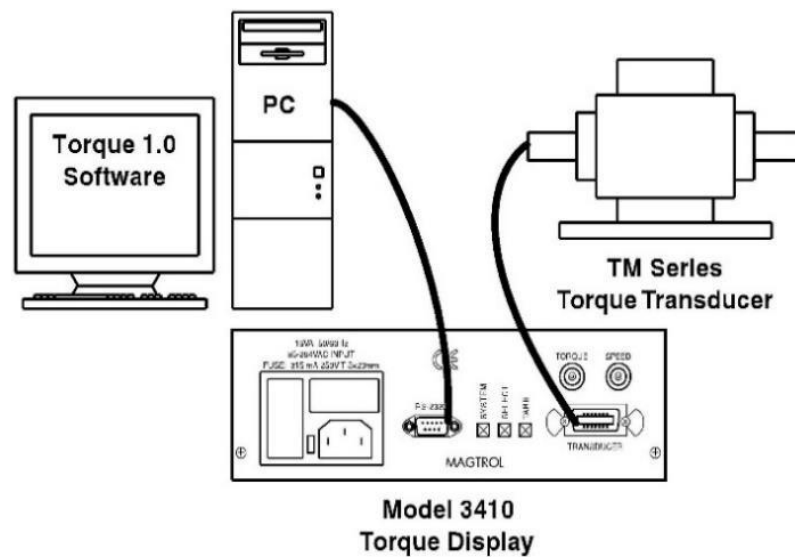
Figura 14 - Conjunto de agitação da planta piloto de 50 L.



Fonte: SILVA (2019)

Através do transdutor de torque Magtrol TM 307 de fornecimento da empresa Magtrol, ocorre uma medição precisa de torque e velocidade, o aparelho é conectado a um display digital ligado ao computador. O sinal capturado é enviado para o software de aquisição de dados (MAGTROL®), conforme ilustrado na Figura 15.

Figura 15 - Esquema de medição de torque através de torquímetro.



Fonte: SOUZA (2011)

3.1.2. Software

Software do torquímetro da MAGTROL “Motor testing software, torque1.0, revision 1.0”- o programa Torque 1.0 da MAGTROL é um programa Windows de fácil uso que coleta automaticamente o torque, a velocidade rotacional e os dados de potência mecânica. Os dados podem ser impressos, apresentados gráfica ou rapidamente salvos em uma planilha do MS-Excel. Os recursos padrão do Torque 1.0 incluem: obtenção do torque, gráficos multi-eixos, parâmetro medido x tempo, razão de amostragem ajustável e ajuste polinomial de curva. O mostrador digital do torquímetro Magtrol 3410 apresenta torque, velocidade rotacional e potência mecânica. Na Figura 16 visualiza-se uma fotografia do computador com o software e o display digital.

Figura 16 - Fotografia do sistema de aquisição de dados.



Fonte: SILVA (2019)

3.1.3. Fluido de Ensaio e Instrumentos de Medição

O fluido utilizado para teste é a água com massa específica de 997 kg/m^3 , viscosidade de $0,8899 \text{ cP}$ e em temperatura ambiente de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Os instrumentos utilizados são: paquímetro, micrômetro, termômetro na escala de 0 a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ e trena de $3,0 \text{ m}$ de comprimento.

3.1.4. Impelidores de Quatro Pás Retas Inclinadas

A unidade piloto de 50 L possui impelidores de quatro pás retas, para este trabalho considerou-se os impelidores com ângulos variando em 45 e 90 graus, definidos como padrões e com vasta literatura indicando o N_p dos impelidores.

As variáveis consideradas para os impelidores nos ensaios são a largura da pá em relação ao diâmetro do impelidor (w/D_i) variando entre 14% e 30%; o diâmetro do impelidor em relação ao diâmetro do tanque (D_i/T) variando de 25% a 70%; o número de pás do impelidor (n_p) fixado em quatro pás.

São necessários 60 impelidores de quatro pás retas, para 5 variações de w/D_i , para 2 ângulos de inclinação de pás, utilizando 6 modelos de impelidor com diâmetros diferentes. É possível verificar as características dos impelidores e a referência de cada um nas Tabelas 3, 4, 5, 6 e 7.

A simbologia utilizada para referenciar cada impelidor, foi elaborada mediante a lógica abaixo:

Utilizando como exemplo o impelidor 'I-452', sendo:

I – Para 'impelidor';

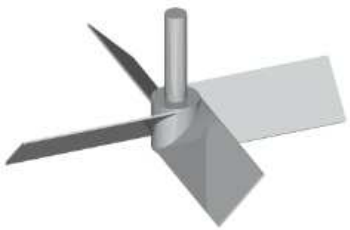

4 → Para o quarto valor de w/D_i , onde 1 = 0,14; 2 = 0,17; 3 = 0,20; 4 = 0,25 e 5 = 0,30;

5 → Para o quinto valor de D_i/T , onde 1 = 0,25; 2 = 0,33; 3 = 0,40; 4 = 0,45; 5 = 0,55 e 6 = 0,70;

2 → Para o segundo valor de ângulo de inclinação das pás, onde 1 = 45° e 2 = 90°.

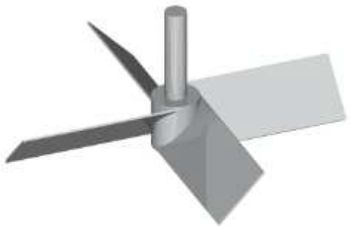

Dessa forma, o impelidor I-452 é aquele que possui as relações $w/D_i = 0,25$, $D_i/T = 0,55$ e ângulo de inclinação das pás de 90°.

Tabela 3 - Impelidores de 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>45°</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>90°</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

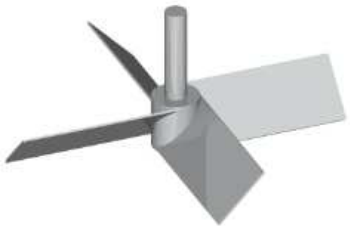

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

Tabela 4 - Impelidores de 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>45°</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>90°</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

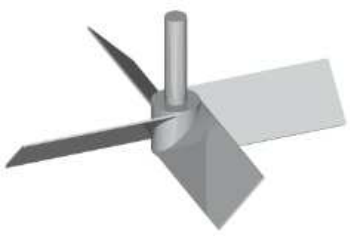

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

Tabela 5 - Impelidores de 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>45°</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>90°</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

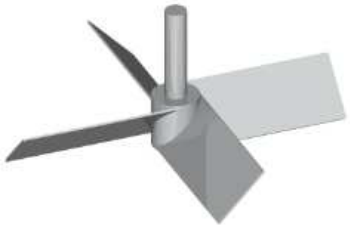

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

Tabela 6 - Impelidores de 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)
 45°	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	0,7	266	66,50
 90°	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	0,7	266	66,50

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

Tabela 7 - Impelidores de 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)
 45°	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	0,7	266	79,80
 90°	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	0,7	266	79,80

Fonte: Adaptado de SILVA (2019)

3.2. MÉTODOS

3.2.1. Metodologia Para obtenção de Dados Experimentais por Torquímetro – MAGTROL utilizada por Silva (2019)

O método utilizado por Silva (2019) para as medições de torque com a finalidade de levantamento da potência consumida é realizado por meio de um transdutor de torque (torquímetro), interligado com o display digital acoplado ao computador, que por meio do software do fabricante do torquímetro Magtrol, são obtidos os dados de torque e convertidos em potência. A obtenção dos dados experimentais envolve as seguintes etapas:

- a) É realizada entrada de dados do software: 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);
- b) São coletados os dados de saída do software: velocidade rotacional (rpm), torque (mW) e potência (W), que são dispostos em uma planilha (bloco de notas), juntamente com o tempo de execução em segundos;
- c) Os dados de saída foram filtrados através do cálculo da média de potência de 5 em 5 rpm;

3.2.2. Metodologia Para Análise de Dados Experimentais Obtidos por Silva (2019)

- a) Com os dados filtrados, criou-se uma tabela com as informações mais relevantes como: velocidade rotacional, número de Reynolds, número de potência do impelidor, potência consumida apenas do impelidor;
- b) Com os dados experimentais para cada tipo de impelidor, na presença e ausência de chicanas, os valores foram organizados em tabelas para melhor apresentação;
- c) Realizou-se a análise da influência do regime de escoamento no número de potência e da variação do diâmetro do impelidor e da largura da pá do impelidor no consumo de potência, através da construção de curvas logarítmicas construídas no Microsoft Excel;
- d) Realizou-se a análise do consumo de potência em função dos impelidores de fluxo axial e radial através de gráficos comparativos construídos no Microsoft Excel;
- e) Tendo como base os dados experimentais obtidos nos ensaios por Silva (2019) e as análises de comportamento do consumo de potência que foram realizadas, elaborou-se em três etapas uma planilha que simula o consumo de potência de impelidores de quatro pás retas para uso como ferramenta didática na disciplina de operações unitárias:
 - I. Usando o referencial teórico deste trabalho, elaborou-se uma série de abas da planilha com a teoria de sistemas de agitação;
 - II. A partir dos dados experimentais, construiu-se abas da planilha que permitem o input de variáveis e têm como saída o cálculo do número de Reynolds e número de potência utilizando as fórmulas da literatura, e o respectivo consumo de potência utilizando a função PROCV do excel;
 - III. Utilizou-se Visual Basic para construção de abas que permitem selecionar através de botões e gerar as análises gráficas do impelidor selecionado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados os resultados das análises do consumo de potência realizadas em relação às principais variáveis do sistema de agitação, como o diâmetro do impelidor, largura e ângulo de inclinação das pás, além da análise da influência do regime de escoamento do fluido na potência do impelidor, para compreender o comportamento do mesmo e utilizar como base para elaboração de uma planilha didática que simule o consumo de potência de impelidores de pás retas.

4.1. CONSUMO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ROTACIONAL

O consumo de potência é uma variável importante no estudo dos sistemas de agitação, pois a mesma fornece informações de projeto e determina a eficiência de um impelidor, principalmente porque o controle sobre a velocidade de rotação do impelidor permite controlar a existência de instabilidades no sistema, não permitindo que o vórtice central atinja a pá do impelidor.

Os resultados apresentados levam em consideração dados do experimento realizado por Silva (2019) do consumo de potência apenas do impelidor, para tanque com três chicanas e tanque sem chicanas, com variação dos seguintes parâmetros geométricos: D_i/T (relação entre o diâmetro do impelidor e diâmetro do tanque 0,25; 0,33; 0,45; 0,55 e 0,70; w/D_i (relação entre a largura da pá e diâmetro do impelidor) 0,14; 0,17; 0,20; 0,25 e 0,30 e variação do ângulo da pá do impelidor 45° e 90° . Se apresenta as análises para uma região completamente turbulenta para tanques com três chicanas, $NRe \geq 2 \times 10^5$ e para tanques sem chicanas $NRe \geq 4 \times 10^4$.

4.1.1. Consumo de potência em função da relação D_i/T

Ao analisar os dados tabelados nota-se alguns padrões na disposição dos mesmos, para tanques com três chicanas, o regime turbulento inicia-se na velocidade rotacional de 155 rpm (para os impelidores com maior relação D_i/T) até a velocidade rotacional máxima de 2500 rpm (para os impelidores com maior relação D_i/T). Para tanques sem chicanas, o intervalo analisado inicia-se na velocidade rotacional mínima, correspondente ao $NRe \geq 4 \times 10^4$, de 35 rpm (para os impelidores com maior relação D_i/T) até a velocidade máxima de 700 rpm (para os impelidores com maior relação D_i/T). Os intervalos analisados para cada relação D_i/T estão dispostos na Tabela 8.

Tabela 8 – Velocidade rotacional mínima e máxima permitidas para impelidores em tanque com chicanas e sem chicanas, com relação geométrica $w/D_i = 0,14$

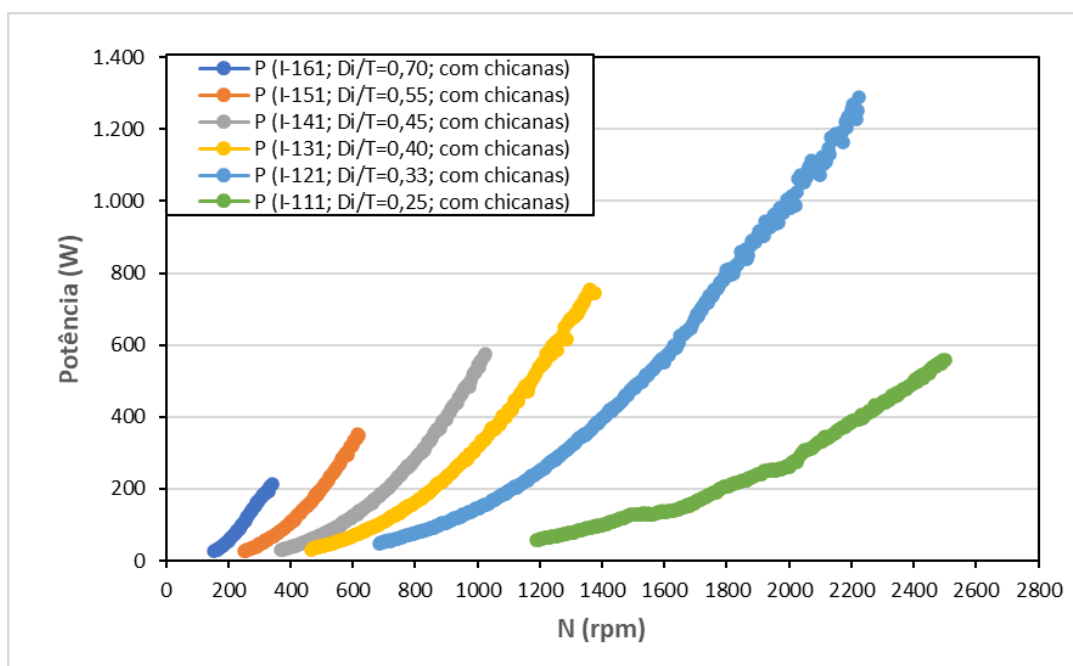
D _i /T	Com chicanas				Sem chicanas			
	45°		90°		45°		90°	
	N mín. (rpm)	N máx. (rpm)	N mín. (rpm)	N máx. (rpm)	N mín. (rpm)	N máx. (rpm)	N mín. (rpm)	N máx. (rpm)
0,25	1190	2500	1190	2500	240	700	240	550
0,33	685	2225	685	2155	140	475	140	375
0,40	465	1375	465	1390	95	375	95	300
0,45	370	1025	370	1035	75	320	75	270
0,55	250	620	250	625	50	260	50	220
0,70	155	340	155	350	35	220	35	180

Fonte: Elaboração própria

Observa-se que os impelidores em tanques sem chicanas não atingem velocidades rotacionais muito altas quando comparados com a velocidade rotacional atingida pelos impelidores em tanques com chicanas, isso se deve a falta de estabilidade do tanque sem chicanas, quanto maior a velocidade rotacional ocorre a formação do vórtice central, característico dessa operação sem chicanas, que atinge a pá do impelidor. Devido a formação desses vórtices, torna-se necessário o controle da velocidade rotacional máxima para cada agitador. Nota-se ainda que, com o aumento da relação D_i/T a velocidade rotacional máxima permitida para cada impelidor se torna mais restrita com um intervalo menor de dados coletados, sendo que para tanques com chicanas o regime totalmente turbulento é atingido em velocidades rotacionais menores com o aumento do diâmetro do impelidor.

A Figura 17 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, impelidor pás retas inclinadas 45°, com $w/D_i = 0,14$, com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 17 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,14$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$

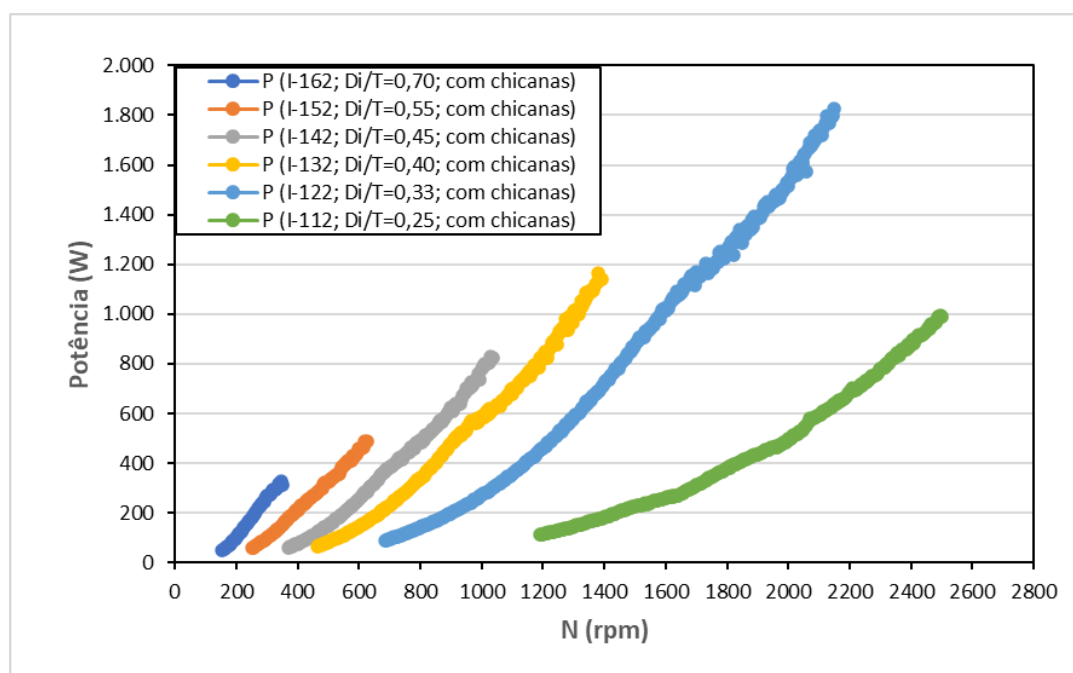


Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Figura 17 que com o crescimento da velocidade rotacional, o consumo de potência aumenta para todos os impelidores, resultado já esperado a partir da equação de potência em que se verifica que a potência consumida é diretamente proporcional à velocidade rotacional. O impelidor I-121 com relação $D_i/T=0,33$ é o que apresentou maior quantidade de pontos no intervalo observado, chegando à velocidade rotacional de 2225 rpm e potência consumida de 1288,7 W. Contudo, o impelidor I-111 com relação $D_i/T=0,25$ foi o que atingiu maior velocidade rotacional permitida, 2500 rpm e potência consumida de 558,7 W. Ao comparar os dois, nota-se que o impelidor I-111 que possui a menor relação D_i/T caracteriza-se por um menor crescimento da potência consumida com o acréscimo da velocidade rotacional. No modelo I-111 para 2.000 rpm, o valor da potência é de 261,4 W e para o modelo I-121 para 2.000 rpm o valor da potência é 1.001,8 W, uma diferença de 740,4 W.

A Figura 18 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, impelidor pás retas inclinadas 90° , com $w/D_i=0,14$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 18 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,14$

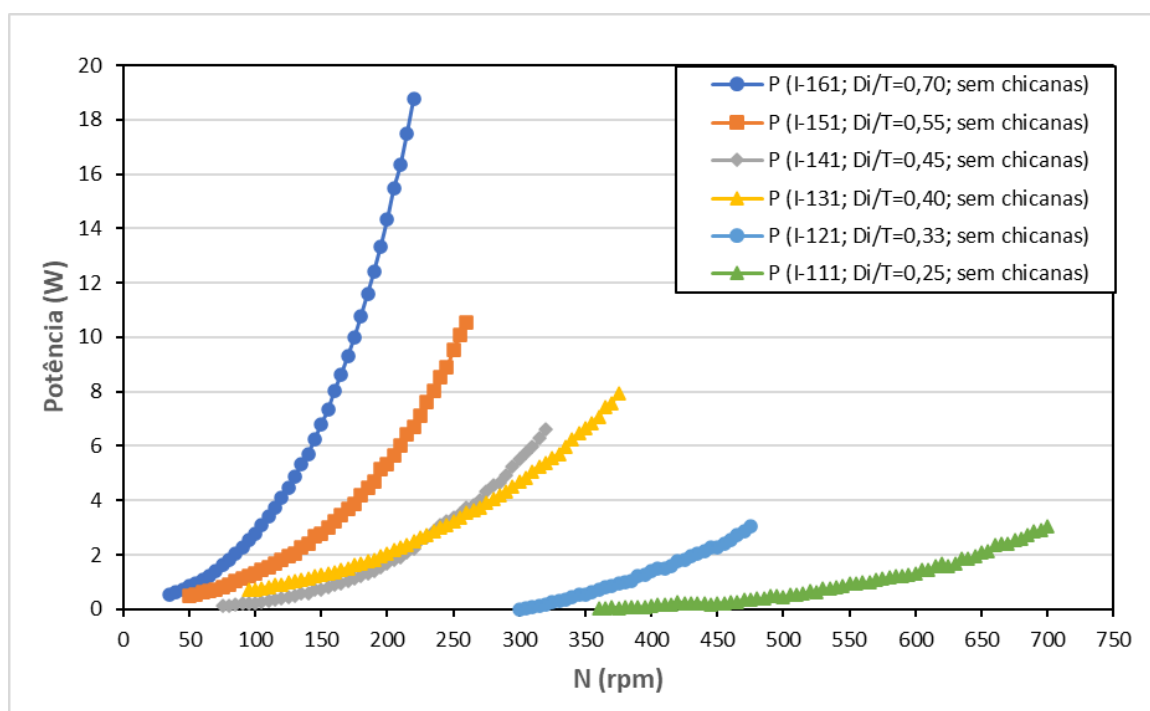


Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Figura 18 que com o crescimento da velocidade rotacional, o consumo de potência aumenta para todos os impelidores. O impelidor I-122 com relação $D_i/T=0,33$ é o que apresentou maior quantidade de pontos no intervalo observado, chegando à velocidade rotacional de 2155 rpm e potência consumida de 1916,7 W. Enquanto que, o impelidor I-112 com relação $D_i/T = 0,25$ foi o que atingiu maior velocidade rotacional permitida, 2500 rpm e potência consumida de 990,7 W. Ao comparar os dois, nota-se que o impelidor I-112 que possui a menor relação D_i/T caracteriza-se por um menor crescimento da potência consumida com o acréscimo da velocidade rotacional. No modelo I-112 para 2.000 rpm, o valor da potência é de 496,7 W e para o modelo I-122 para 2.000 rpm o valor da potência é 1516,5 W, uma diferença de 1019,8 W.

A Figura 19 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque sem chicanas, impelidor pás retas inclinadas 45° , com $w/D_i = 0,14$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 4 \times 10^4$.

Figura 19 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,14$

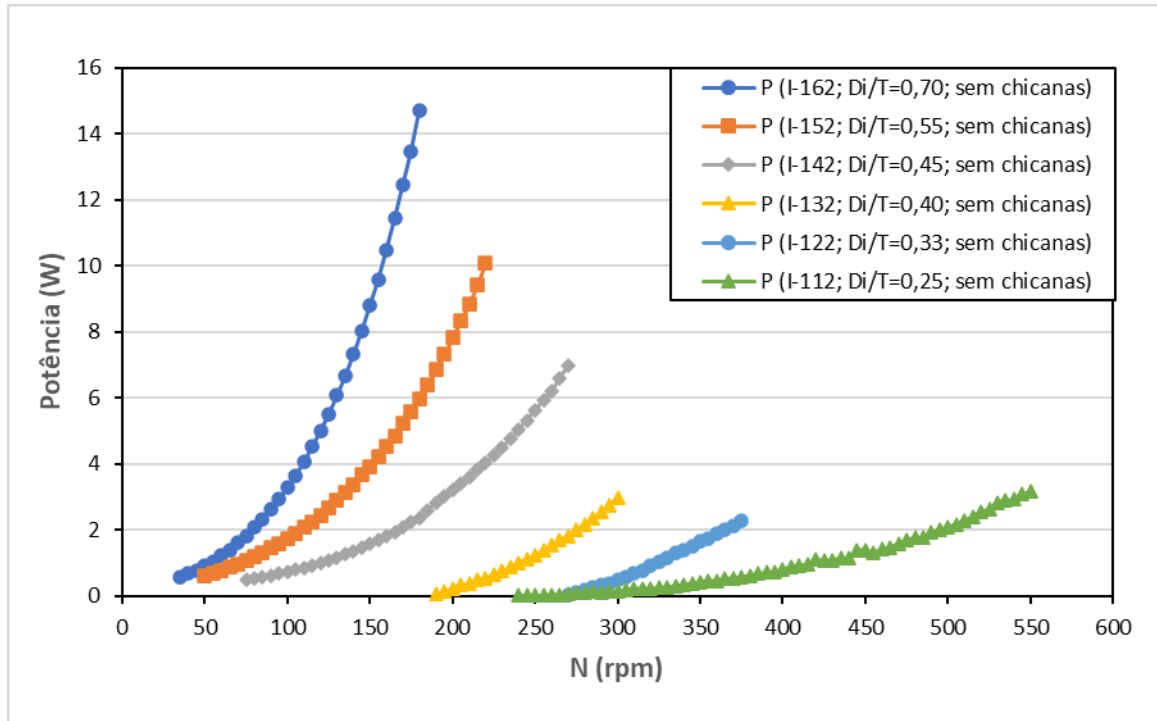


Fonte: Elaboração própria

É possível observar que para tanques sem chicanas a potência consumida é bem menor em comparação com a potência consumida em tanques com 3 chicanas, resultado que está de acordo com a literatura, o consumo de potência de impelidores em um vaso é aumentado pela inserção de chicanas, porque o fluxo tangencial do líquido é impedido, dessa forma, quanto mais chicanas maior a potência consumida. O impelidor I-161, que possui a maior relação geométrica D_i/T , é o que apresenta crescimento da potência de forma mais acentuada com o aumento da velocidade rotacional, chegando a um valor baixo de velocidade rotacional máxima, para 220 rpm possui consumo de potência de 18,7 W. O modelo I-131, com $D_i/T = 0,40$, já possui um crescimento de potência menos acentuado chegando em 7,9 W, contudo, atinge baixos valores de velocidade rotacional chegando ao seu máximo em 375 rpm. Assim como em tanques com chicanas, o modelo I-111 com a menor relação D_i/T , chega a maiores valores de velocidade rotacional (máximo de 700 rpm) em comparação com os outros modelos em tanque sem chicanas, com um baixo consumo de potência (3,03 W).

A Figura 20 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque sem chicanas, impelidor pás retas inclinadas 90° , com $w/D_i = 0,14$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 4 \times 10^4$.

Figura 20 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,14$

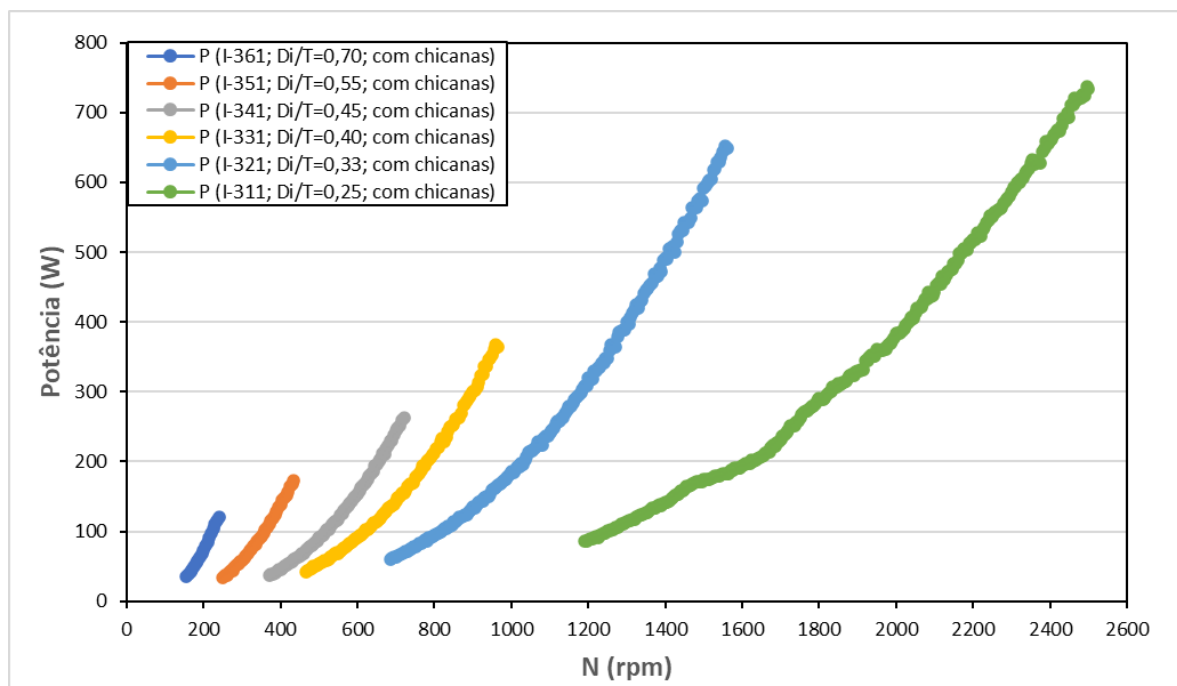


Fonte: Elaboração própria

Torna-se evidente que, para tanques sem chicanas, com o decréscimo da relação D_i/T , há uma considerável diminuição no consumo de potência, as curvas geradas possuem crescimento menos acentuado com o aumento da velocidade rotacional. Da mesma forma que ocorre para impelidores de pás retas inclinadas 45° , para pás retas inclinadas 90° , o modelo I-112 com a menor relação D_i/T , chega a maiores valores de velocidade rotacional (máximo de 550 rpm) em comparação com os outros modelos em tanque sem chicanas, com um baixo consumo de potência (3,16 W).

A Figura 21 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, impelidor pás retas inclinadas 45° , com $w/D_i = 0,20$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 21 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,20$

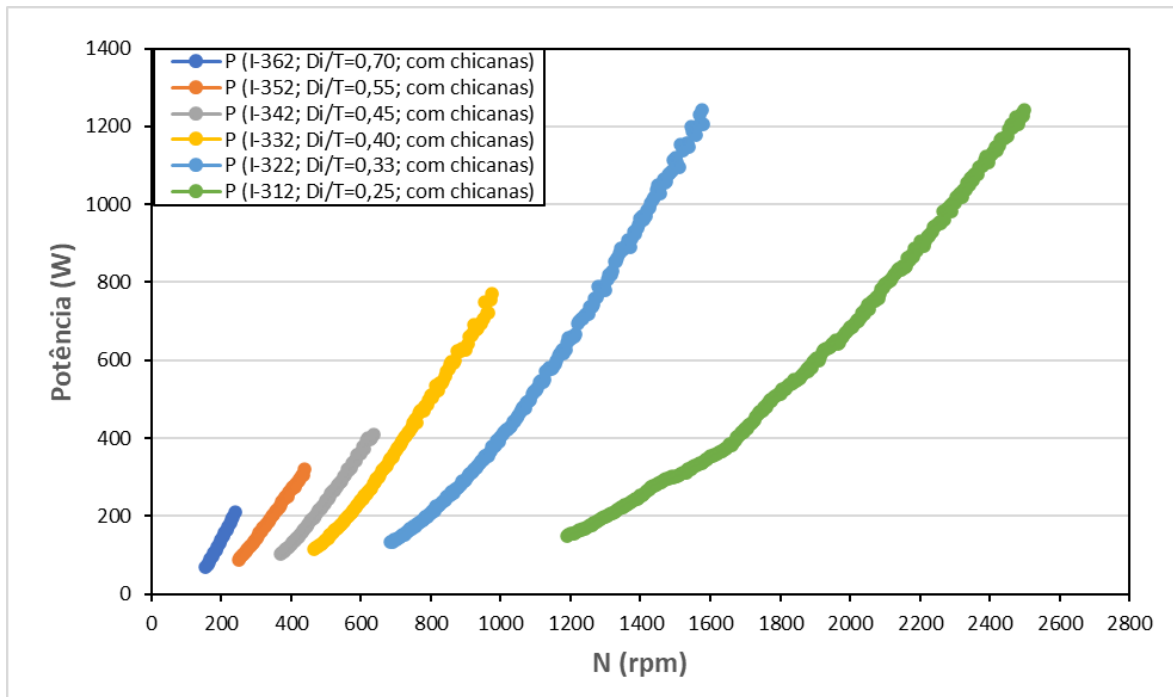


Fonte: Elaboração própria

A partir da Figura 21 observa-se que com a mudança da relação geométrica $w/D_i = 0,20$ ocorrem algumas mudanças no comportamento das curvas de potência. O modelo I-311, com $D_i/T = 0,25$, apresenta maior quantidade de pontos no intervalo observado, chegando à velocidade rotacional de 2500 rpm e potência consumida de 734,2 W. Com o aumento da velocidade rotacional há um crescimento do consumo de potência e nota-se a mesma tendência das análises anteriores, com o aumento da relação D_i/T , os impelidores atingem o regime totalmente turbulento mais rapidamente e em velocidades rotacionais mais baixas, possuindo também a velocidade rotacional máxima reduzida. Com o aumento no diâmetro do impelidor, o mesmo atinge um estado em que a partir de determinada velocidade rotacional não é possível evitar instabilidades e formação de vórtice central que atinge a pá do impelidor. Ao comparar o modelo I-311 com o I-321, os quais possuem maior intervalo de velocidade rotacional no regime turbulento, para 1500 rpm o consumo de potência do I-311 é de 174,3 W e para o I-321 o consumo de potência é de 591,6 W, uma diferença de 417,3 W.

A Figura 22 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, impelidor pás retas inclinadas 90°, com $w/D_i = 0,20$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 22 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,20$

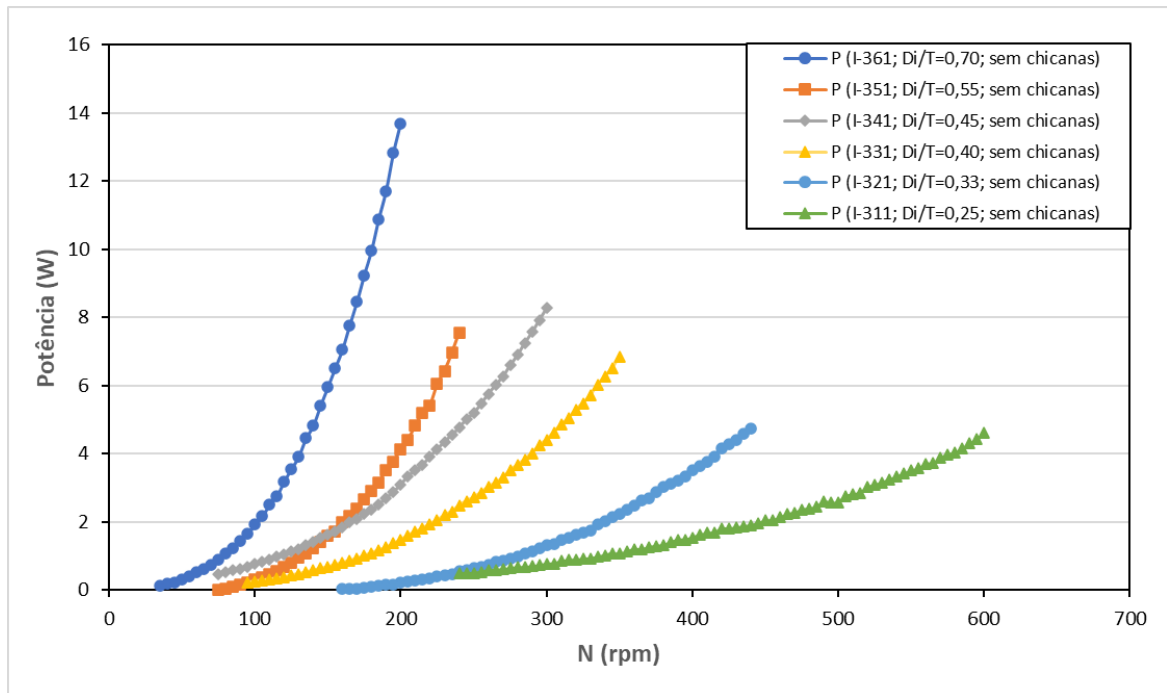


Fonte: Elaboração própria

Analisando a Figura 22, nota-se um comportamento do consumo de potência similar a Figura 21, porém impelidores com pás retas inclinadas a 90° atingem valores maiores de potência conforme a velocidade rotacional aumenta. O modelo I-312, com $D_i/T = 0,25$, apresenta maior quantidade de pontos no intervalo observado, chegando à velocidade rotacional de 2500 rpm e potência consumida de 1243,2 W. Ao comparar o modelo I-312 com o I-322, os quais possuem maior intervalo de velocidade rotacional no regime turbulento, para 1500 rpm o consumo de potência do I-312 é de 303,6 W e para o I-322 o consumo de potência é de 1119,8 W, uma diferença de 816,2 W, consideravelmente mais acentuada do que na comparação dos modelos equivalentes utilizando impelidor axial.

A Figura 23 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque sem chicanas, impelidor pás retas inclinadas 45° , com $w/D_i = 0,20$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 4 \times 10^4$.

Figura 23 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,20$

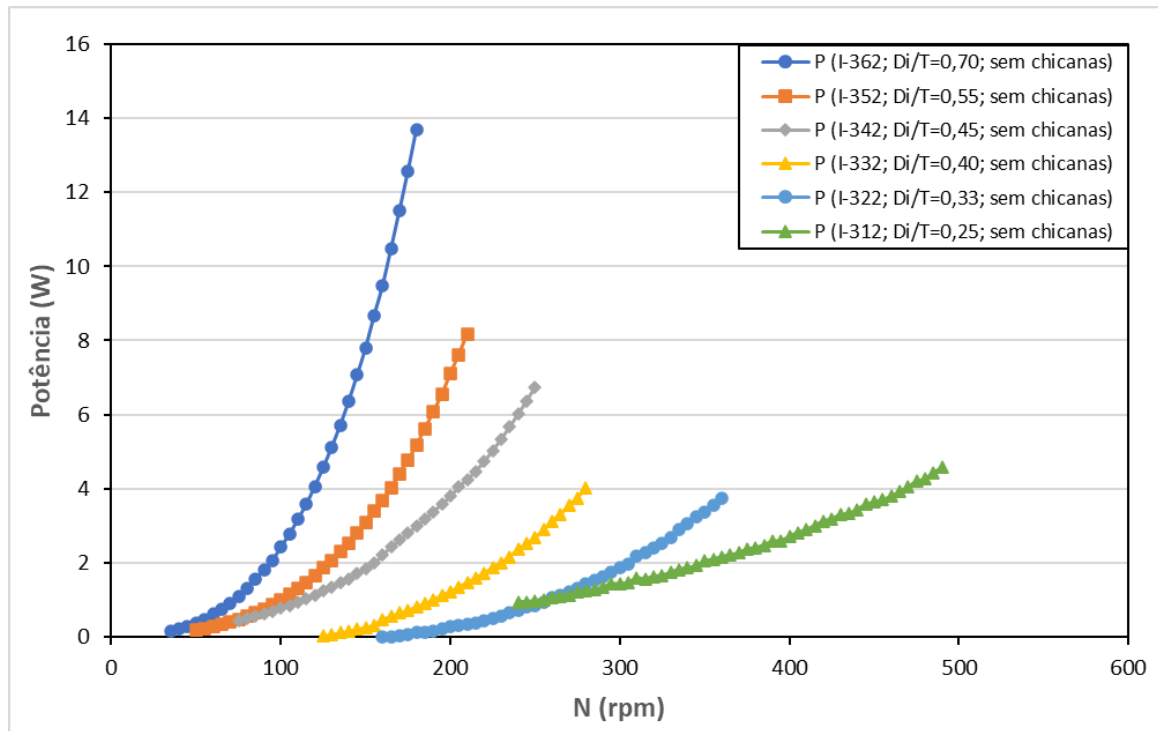


Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Figura 23 que com o decréscimo da relação D_i/T , há uma considerável diminuição no consumo de potência e as curvas geradas possuem crescimento menos acentuado com o aumento da velocidade rotacional. O modelo I-361 com $D_i/T = 0,70$ atinge o maior valor de potência 200 rpm, com consumo de potência de 13,7 W. O impelidor I-311 juntamente com o I-321 atingem as maiores velocidades rotacionais com um menor consumo de potência, em comparação, para 400 rpm o modelo I-311 consome 1,55 W enquanto o modelo I-321 consome 3,52 W, uma diferença de 1,97 W.

A Figura 24 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque sem chicanas, impelidor pás retas inclinadas 90°, com $w/D_i = 0,20$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 4 \times 10^4$.

Figura 24 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,20$

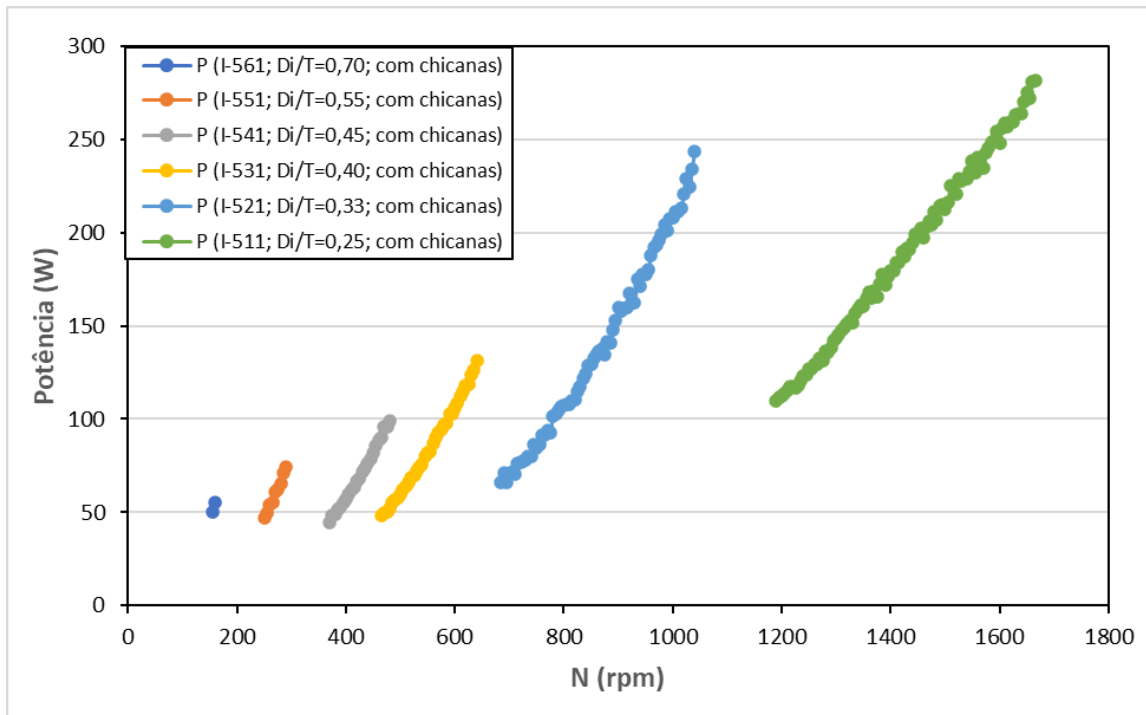


Fonte: Elaboração própria

Analisando a Figura 24, nota-se que novamente o impelidor com maior relação D_i/T , I-362, é o que atinge maior consumo de potência 13,7 W para 180 rpm. O modelo I-312 atinge velocidade rotacional máxima bem maior em comparação com os outros impelidores, com um baixo consumo de potência, chegando ao máximo em 490 rpm com 4,5 W.

A Figura 25 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, impelidor pás retas inclinadas 45°, com $w/D_i = 0,30$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 2 \times 10^5$.

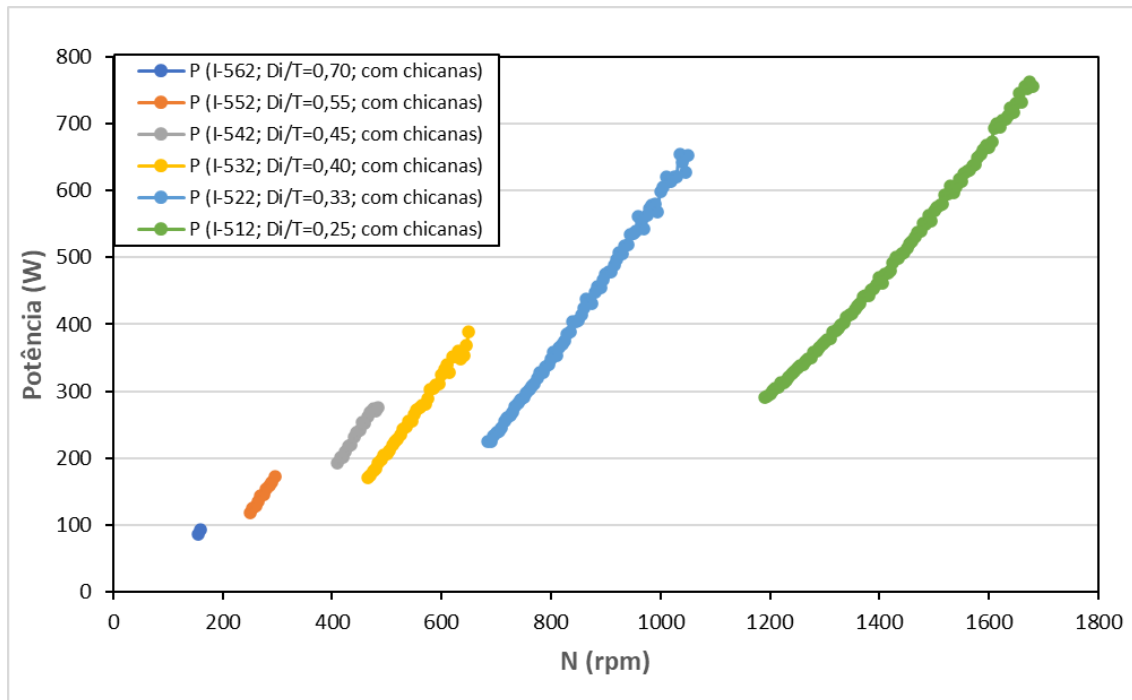
Figura 25 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,30$



Fonte: Elaboração própria

A Figura 26 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, impelidor pás retas inclinadas 90°, com $w/D_i = 0,30$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 26 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,30$

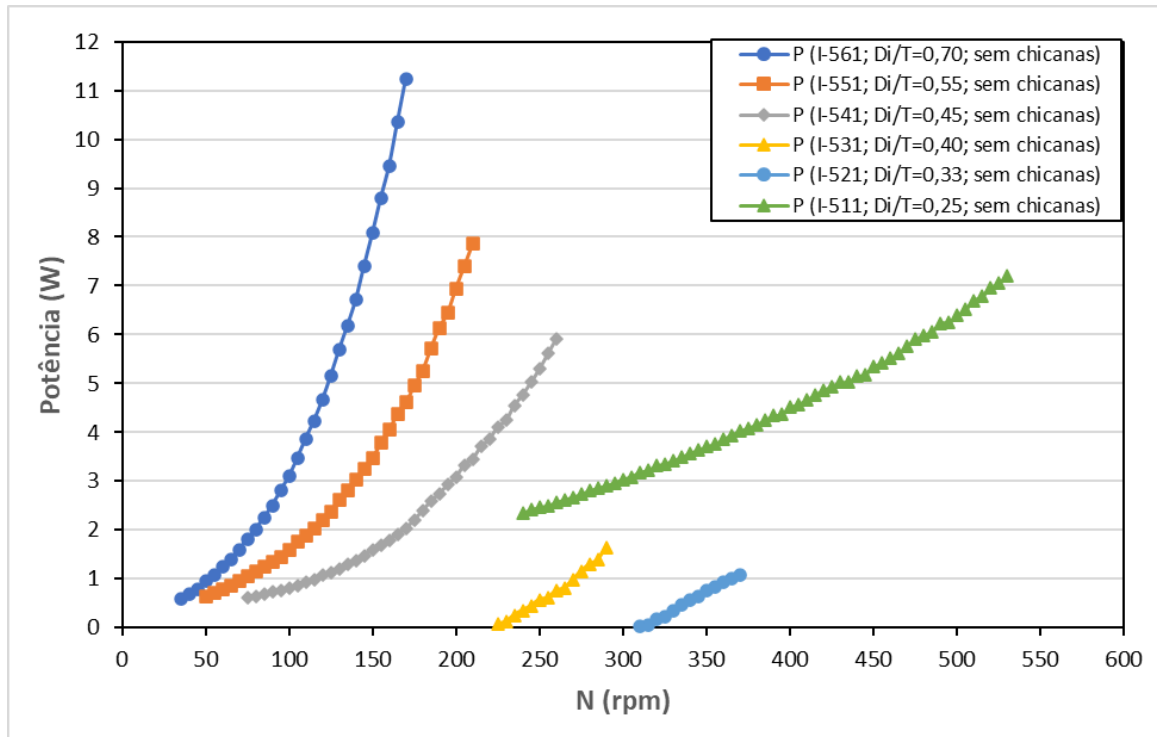


Fonte: Elaboração própria

Analisando a Figura 25 e a Figura 26, observa-se que com o aumento da velocidade rotacional há um crescimento da potência consumida, para $w/D_i = 0,30$, esse crescimento é visto de forma mais acentuada em comparação com as curvas de $w/D_i = 0,14$ e $w/D_i = 0,20$, ocorrendo em intervalos menores de velocidade rotacional. Nota-se também que a velocidade rotacional na qual cada impelidor inicia o regime turbulento ($NRe \geq 2 \times 10^5$) ocorre em intervalos mais afastados entre si. O impelidor I-511 inicia o regime turbulento em 1190 rpm com potência consumida de 109,9 W, chegando à velocidade rotacional máxima de 1665 rpm com potência de 281,4 W. O impelidor I-512 inicia o regime turbulento em 1190 rpm com potência consumida de 291,4 W, chegando à velocidade rotacional máxima de 1680 rpm com potência de 755,8 W.

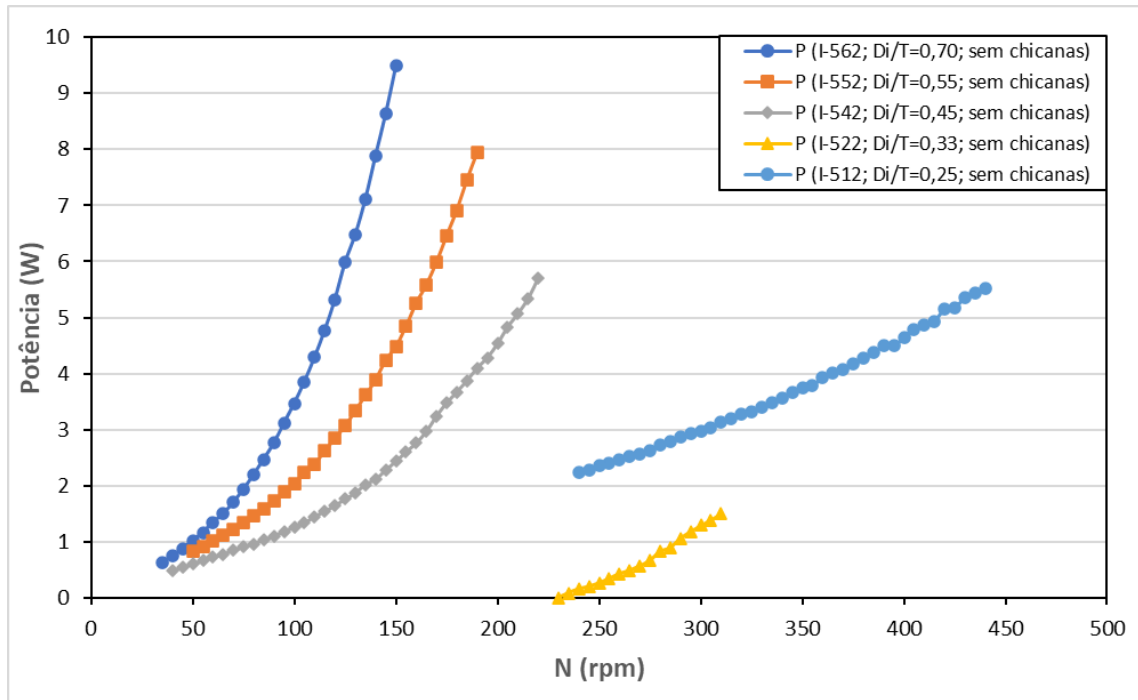
A Figura 27 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque sem chicanas, impelidor pás retas inclinadas 45° , com $w/D_i = 0,30$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 4 \times 10^4$.

Figura 27 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $w/D_i = 0,30$



A Figura 28 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque sem chicanas, impelidor pás retas inclinadas 90° , com $w/D_i = 0,30$ e com análise da variação D_i/T (0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55; 0,70) para $NRe \geq 4 \times 10^4$.

Figura 28 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques sem chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $w/D_i = 0,30$



Fonte: Elaboração própria

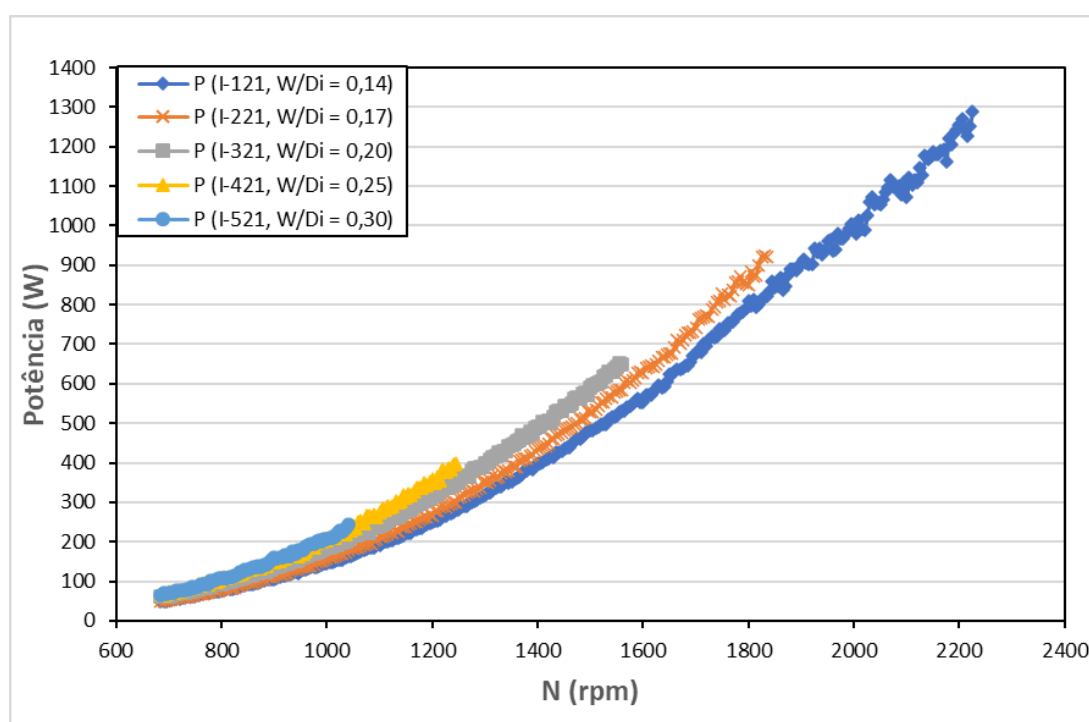
Observa-se na Figura 27 e 28 que de forma semelhante ao comportamento visto anteriormente para impelidores em tanque sem chicanas, o impelidor com menor relação D_i/T é o que apresenta comportamento favorável atingindo maior valor de velocidade rotacional com um consumo de potência moderado. O modelo I-511 inicia o regime turbulento na velocidade 240 rpm com potência de 2,34 W e chega à velocidade máxima de 530 rpm com potência de 7,2 W. O modelo I-512 inicia o regime turbulento na velocidade 240 rpm com potência de 2,23 W e chega à velocidade máxima de 440 rpm com potência de 5,51 W.

Os resultados demonstraram que tanto a velocidade rotacional escolhida quanto o diâmetro do impelidor afetam a potência consumida, porém, o diâmetro do impelidor tem uma influência maior na potência, conforme demonstrado na equação do consumo de potência (Equação 13) onde a velocidade rotacional está elevada ao cubo e o diâmetro do impelidor é elevado a quinta potência. Assim, com uma menor relação D_i/T , tem-se um crescimento menos acentuado da curva de potência quando ocorre aumento da velocidade rotacional do impelidor. Observou-se também que a presença de chicanas é um dos parâmetros que mais influenciam a potência fornecida ao fluido, em tanques com chicanas o fluido sofre mais atrito, com isso a potência consumida pelo impelidor torna-se maior, comprovou-se este fato através dos dados experimentais.

4.1.2. Consumo de potência em função da relação w/D_i

A Figura 29 apresenta resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, inclinação das pás em 45° , relação geométrica $D_i/T = 0,33$ com análise da variação w/D_i (0,14; 0,17; 0,20; 0,25; 0,30) em regime turbulento $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 29 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 45° e relação geométrica $D_i/T = 0,33$



Fonte: Elaboração própria

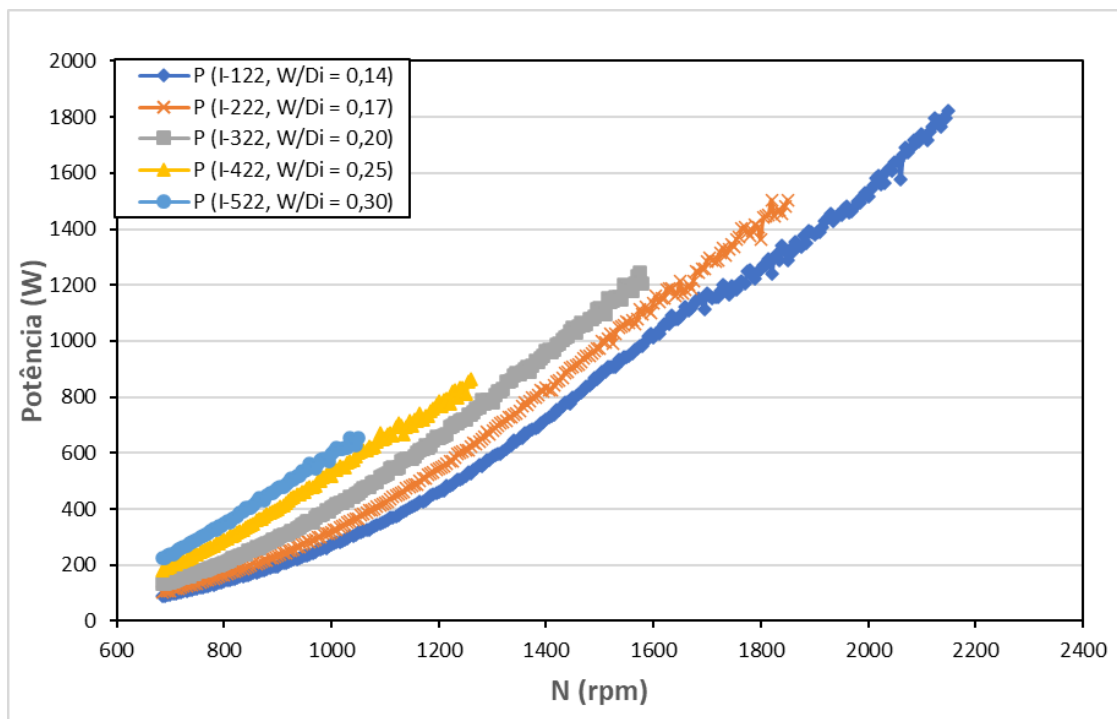
De acordo com Nagata (1975), a potência deve aumentar com o aumento da largura da pá do impelidor (w), devido ao aumento da área da pá sobre o tanque agitado, causando maior resistência de atrito nas superfícies das pás. Analisando a Figura 29, observa-se que o comportamento do consumo de potência está de acordo com a literatura sendo perceptível um pequeno aumento do consumo de potência nas curvas com o crescimento da relação w/D_i . Fixando a velocidade rotacional em 1000 rpm, do menor valor para a relação w/D_i até o maior valor (de 0,14 a 0,30), o modelo I-121 tem um consumo de potência de 146,2 W, para I-221 o consumo de potência é 158 W, para I-321 a potência é de 186,1 W, para o I-421 a potência é de 203,9 W e para o I-521 a potência consumida é de 207,9 W.

Como foi observado anteriormente, quanto maior a largura da pá, menor o intervalo de velocidade rotacional e a velocidade rotacional máxima atingida pelo impelidor, devido ao

mesmo atingir um estado em que a partir dessa velocidade rotacional máxima não é possível controlar as instabilidades geradas pelo aumento da turbulência e formação de vórtice central que atinge a pá do impelidor. É possível observar esse comportamento na Figura 29, onde o modelo I-121 ($w/D_i = 0,14$) inicia o regime turbulento na velocidade 685 rpm e potência de 48,2 W e atinge velocidade máxima em 2225 rpm com potência de 1288,7 W. Já o modelo I-521 ($w/D_i = 0,30$) inicia o regime turbulento na velocidade 685 rpm e potência de 65,8 W e atinge velocidade máxima em 1040 rpm com potência de 243,7 W.

A Figura 30 apresenta resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, inclinação das pás em 90° , relação geométrica $D_i/T = 0,33$ com análise da variação w/D_i (0,14; 0,17; 0,20; 0,25; 0,30).

Figura 30 – Consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional para tanques com 3 chicanas, pás retas inclinadas 90° e relação geométrica $D_i/T = 0,33$



Fonte: Elaboração própria

Observa-se na Figura 30 que é perceptível um aumento considerável do consumo de potência nas curvas com o crescimento da relação w/D_i , maior do que o ocorrido para os impelidores de fluxo axial. Fixando a velocidade rotacional em 1000 rpm, do menor valor para a relação w/D_i até o maior valor (de 0,14 a 0,30), o modelo I-122 tem um consumo de potência de 271,9 W, para I-222 o consumo de potência é 318,4 W, para I-322 a potência é de 404,5 W, para o I-422 a potência é de 519,81 W e para o I-522 a potência consumida é de 598,2 W. Nota-

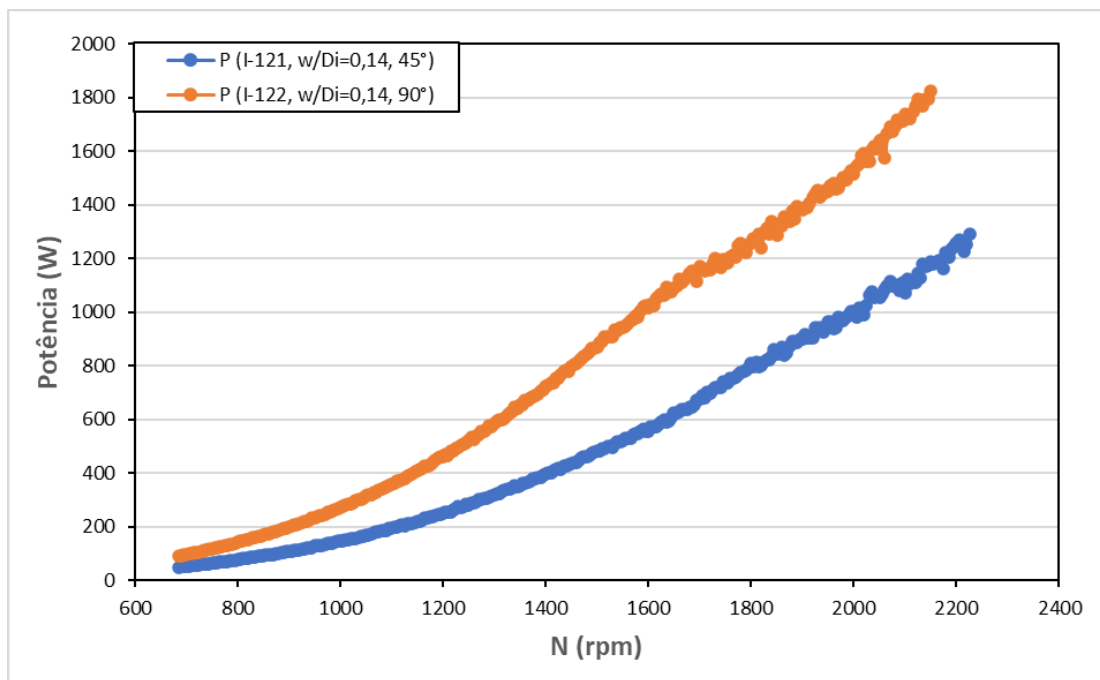
se que quanto maior a largura da pá, menor o intervalo de velocidade rotacional e a velocidade rotacional máxima atingida pelo impelidor; o modelo I-122 ($w/D_i = 0,14$) inicia o regime turbulento na velocidade 685 rpm e potência de 89,6 W e atinge velocidade máxima em 2155 rpm com potência de 1916,7 W. Já o modelo I-522 ($w/D_i = 0,30$) inicia o regime turbulento na velocidade 685 rpm e potência de 224,7 W e atinge velocidade máxima em 1050 rpm com potência de 653,4 W.

4.2. COMPARAÇÃO DO CONSUMO DE POTÊNCIA COM AGITADORES DE FLUXO AXIAL E DE FLUXO RADIAL

Observou-se a influência do ângulo da pá do impelidor em tanques com três chicanas, fixando a relação geométrica $D_i/T = 0,33$ (diâmetro que se encaixa na relação padrão), analisando para 3 valores w/D_i : o menor valor ($w/D_i = 0,14$), o valor do meio ($w/D_i = 0,20$) e o maior valor ($w/D_i = 0,30$).

Na Figura 31 estão representados graficamente os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, fazendo uma comparação em relação ao ângulo de inclinação das pás, para relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,14$ para regime totalmente turbulento $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 31 – Comparação do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanques com 3 chicanas impelidor de pás retas inclinadas 45° e 90° , com relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,14$.



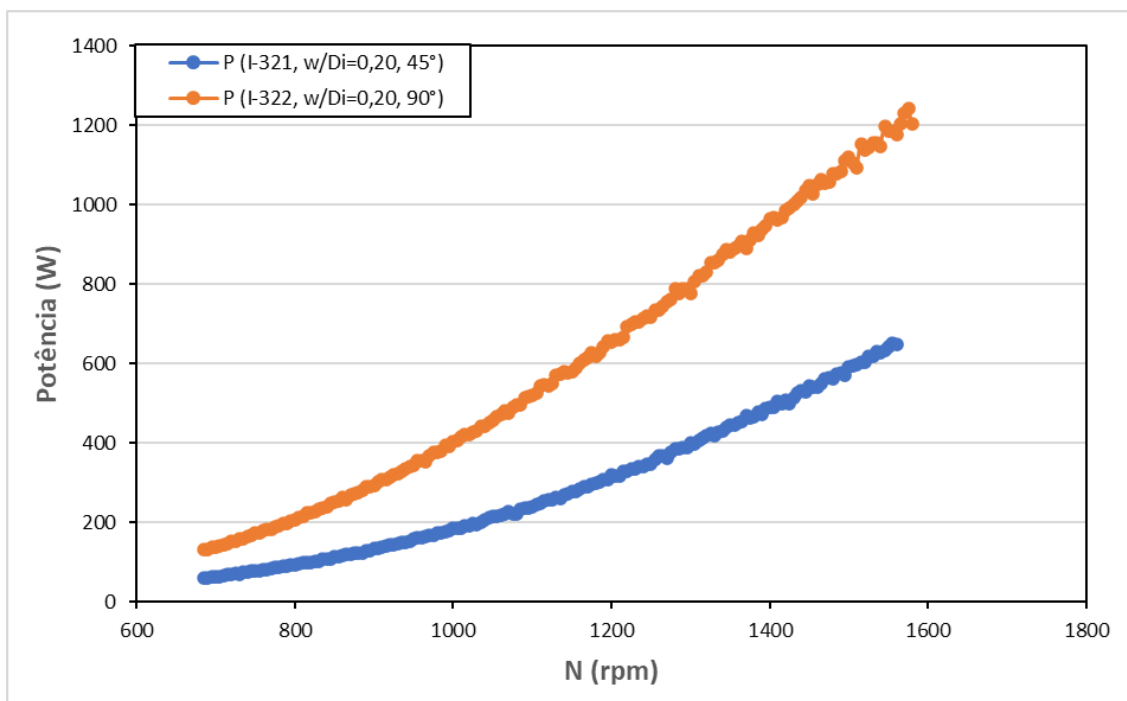
Fonte: Elaboração própria

De acordo com Nagata (1975), não há dúvida de que quanto menor o ângulo da pá, menor será o consumo de potência. Porém, o grau de redução da potência depende de outros fatores, como a viscosidade do líquido e do número de Reynolds. Com o decaimento do número de Reynolds, a diferença da potência causada pela diferença no ângulo da pá fica menor até se tornar negligenciável em um baixo número de Reynolds, o que não é o caso das análises atuais que foram feitas para regime totalmente turbulento com $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Analisando a Figura 31, observa-se que o consumo de potência aumenta com a velocidade rotacional para ambos os impelidores, porém para o impelidor de fluxo radial esse aumento de potência é mais acentuado, indicando maior consumo de potência com o aumento do ângulo da pá, conforme literatura. Fixando a velocidade rotacional em 1600 rpm, tem-se o modelo I-121 com ângulo da pá de 45° com potência igual a 553,1 W, enquanto que para o modelo I-122 com ângulo da pá de 90° o consumo de potência é de 1013,6 W, uma diferença de 460,5 W.

Na Figura 32 estão representados graficamente os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, fazendo uma comparação em relação ao ângulo de inclinação das pás, para relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,20$ para regime totalmente turbulento $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 32 – Comparação do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanques com 3 chicanas impelidor de pás retas inclinadas 45° e 90° , com relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,20$.

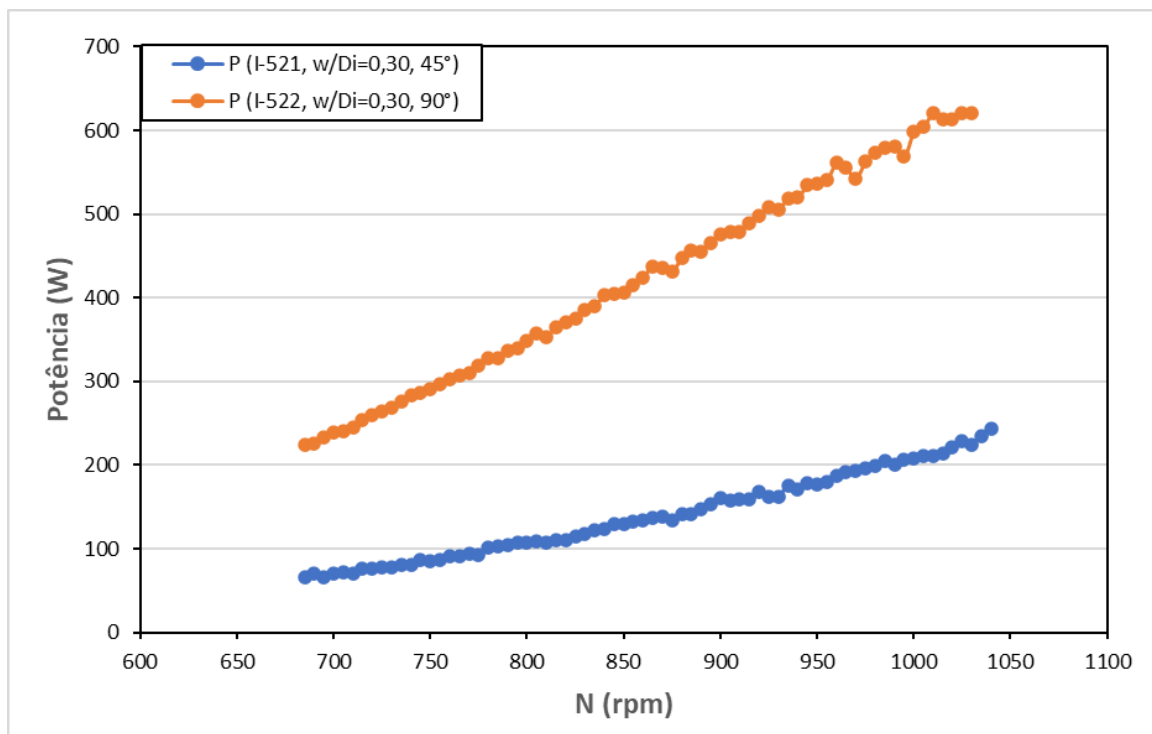


Fonte: Elaboração própria

Na Figura 32 nota-se que o consumo de potência para impelidor de fluxo radial é consideravelmente maior que o consumo de potência do impelidor de fluxo axial. Nota-se ainda que com o aumento da velocidade rotacional, essa diferença entre a potência consumida referente a cada ângulo de impelidor se torna ainda mais acentuada. Fixando a velocidade rotacional em 1400 rpm, tem-se o modelo I-321 com ângulo da pá de 45° com potência igual a 491,4 W, enquanto que para o modelo I-322 com ângulo da pá de 90° o consumo de potência é de 963,9 W, uma diferença de 472,5 W.

Na Figura 33 estão representados graficamente os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanque com 3 chicanas, fazendo uma comparação em relação ao ângulo de inclinação das pás, para relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,30$ para regime totalmente turbulento $NRe \geq 2 \times 10^5$.

Figura 33 – Comparação do consumo de potência em função da velocidade rotacional em tanques com 3 chicanas impelidor de pás retas inclinadas 45° e 90° , com relações geométricas $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,30$.



Fonte: Elaboração própria

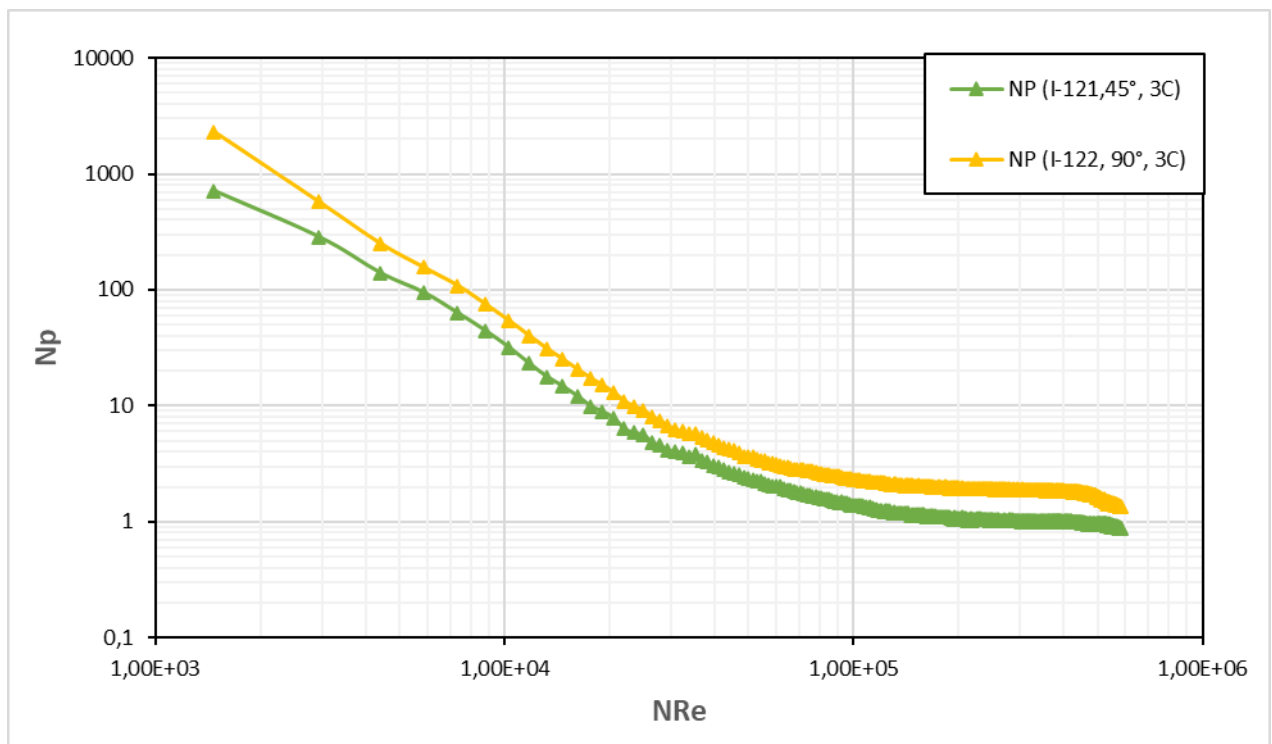
Na Figura 33 nota-se que o consumo de potência para impelidor de fluxo radial também é consideravelmente maior que o consumo de potência do impelidor de fluxo axial para $w/D_i = 0,30$. Nota-se ainda que com o aumento dessa relação, a diferença na potência consumida para o impelidor de fluxo axial e de fluxo radial é ainda mais acentuada. Fixando a velocidade

rotacional em 1000 rpm, tem-se o modelo I-521 com ângulo da pá de 45° com potência igual a 207,9 W, enquanto que para o modelo I-522 com ângulo da pá de 90° o consumo de potência é de 598,2 W, uma diferença de 390,3 W, mostrando que o valor da potência aumenta em mais de 50% com o impelidor radial. Dessa maneira, os resultados mostram uma grande influência do ângulo da pá sobre o consumo de potência em valores maiores de rotação e para valores maiores de w/D_i .

4.3. NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS

A Figura 34 apresenta o comportamento da curva de potência (número de potência em função do número de Reynolds) com uma comparação do impelidor de pás retas inclinadas 45° com o impelidor de pás retas inclinadas 90° , com relações geométricas $w/D_i = 0,14$ e $D_i/T = 0,33$ para tanques com 3 chicanas.

Figura 34 – Número de potência em função do número de Reynolds para tanques com 3 chicanas para os impelidores de pás retas inclinadas 45° e 90° , com relações geométricas $w/D_i = 0,14$ e $D_i/T = 0,33$.



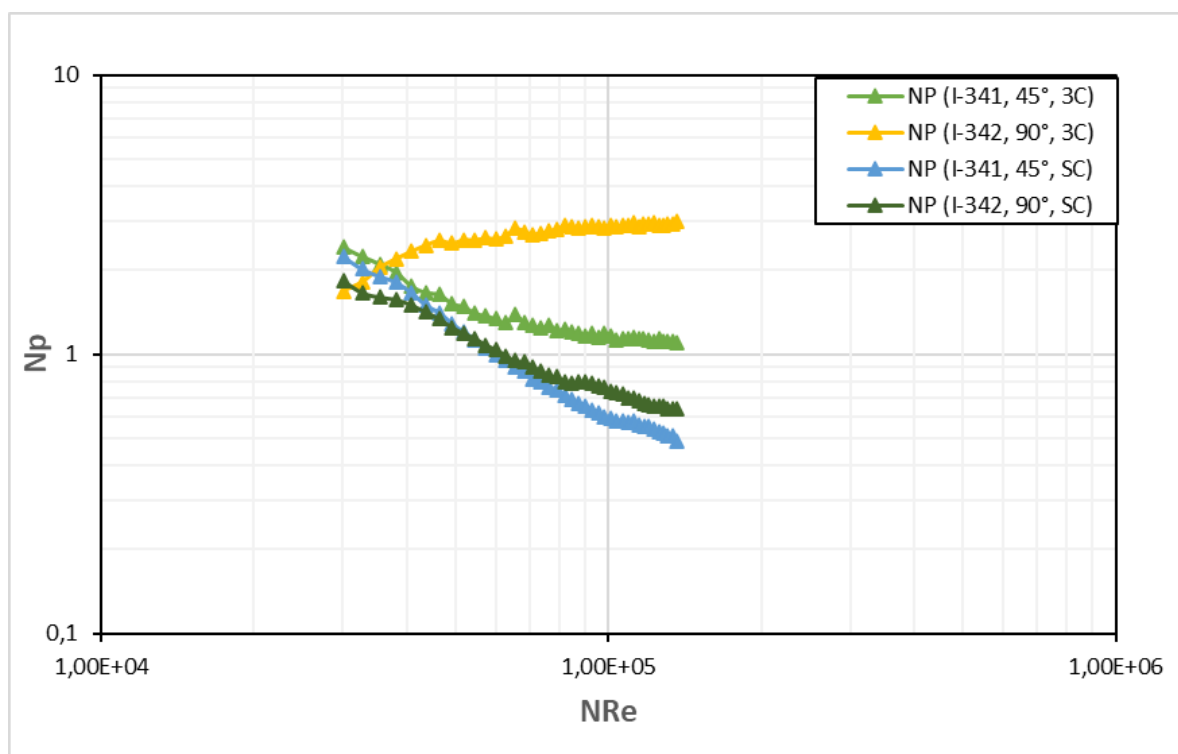
Fonte: Elaboração própria

É possível observar a partir da Figura 34 que os impelidores observados possuem um comportamento parecido com as características gerais de uma curva de potência para líquidos newtonianos da literatura. Antes de atingir o regime totalmente turbulento ($NRe \geq 2 \times 10^5$), a

curva passa de uma variação linear do regime laminar, onde o N_p é inversamente proporcional ao número de Reynolds, para uma variação de forma quadrática no regime de transição até atingir o regime totalmente turbulento, onde o N_p tende a se tornar constante.

A Figura 35 apresenta uma comparação da curva do número de potência em função do número de Reynolds para tanques com chicanas e sem chicanas, utilizando impelidores de pás inclinadas 45° e 90° , com relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$.

Figura 35 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds para tanques com 3 chicanas e sem chicanas, para os impelidores de pás retas inclinadas 45° e 90° , com relações geométricas $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$.

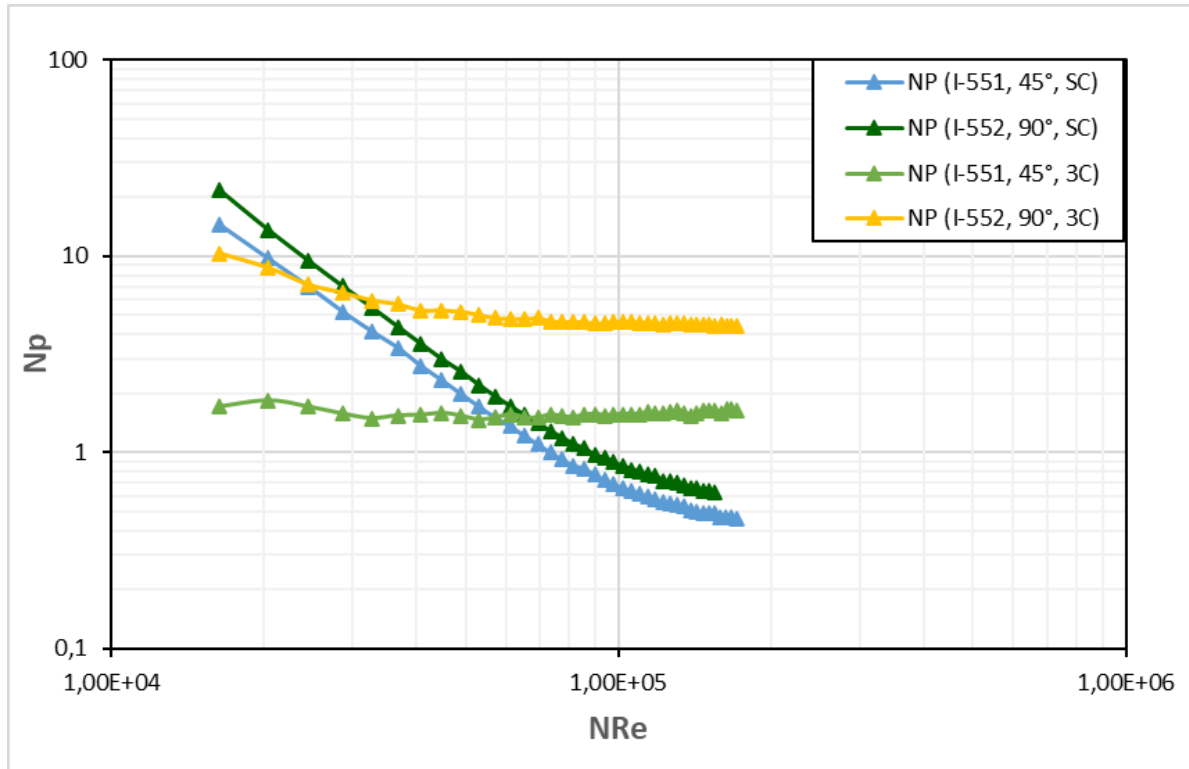


Fonte: Elaboração própria

A partir da Figura 35 é possível constatar que para tanques sem chicanas não se atinge uma constância do número de potência no regime turbulento, isso se deve a falta de estabilidade característica desse tipo de sistema onde a presença de um vórtice central formado por ação de forças centrífugas atinge a pá do impelido, portanto, o número de potência diminui com o aumento do número de Reynolds sem atingir uma estabilidade devido a falta de chicanas. Constata-se também que, conforme a literatura, o número de potência aumenta com a ampliação do ângulo da pá do impelidor, quanto maior o ângulo da pá, maior será o coeficiente de arraste (N_p). Dessa forma, os impelidores de fluxo radial (pás retas 90°) apresentam maiores valores de número de potência em relação aos impelidores de fluxo axial (pás retas 45°).

A Figura 36 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds fazendo comparação com tanque sem e com chicanas, para impelidores de pás retas 45° e 90°, com relações geométricas $w/D_i = 0,30$ e $D_i/T = 0,55$.

Figura 36 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds para tanques com 3 chicanas e sem chicanas, para os impelidores de pás retas inclinadas 45° e 90°, com relações geométricas $w/D_i = 0,30$ e $D_i/T = 0,55$



Fonte: Elaboração própria

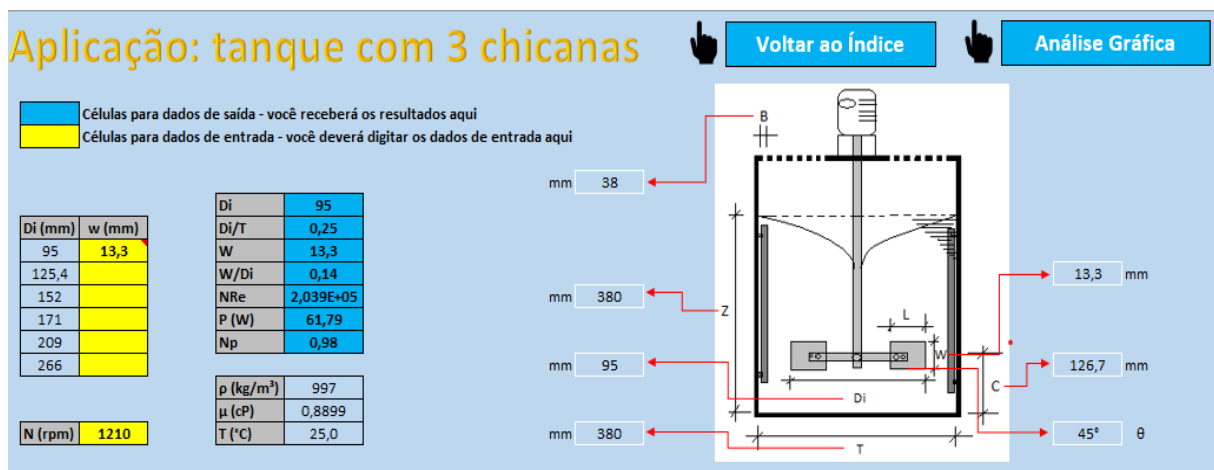
Na Figura 36 observa-se que, novamente para tanques com chicanas, o número de potência tende a atingir um valor constante ao se aproximar do regime turbulento. Enquanto que, para tanques sem chicanas, o número de potência diminui com o aumento do número de Reynolds sem atingir a estabilidade devido a ausência de chicanas. Percebe-se que, além do número de potência do impelidor de pás retas 90° ser maior que os valores de número de potência do impelidor de pás retas 45°, essa diferença se torna mais evidente ao comparar as curvas do tanque com chicanas. Desta forma, para $NRe \geq 1 \times 10^5$ o número de potência para o impelidor de 45° I-551 com chicanas fica em torno de 1,57 e para o impelidor de 90° I-552 com chicanas $Np = 4,61$, valor aproximadamente 3 vezes maior. Ao comparar o número de potência para tanques com e sem chicanas para $NRe \geq 1 \times 10^5$, o modelo I-551 sem chicanas possui $Np = 0,66$ enquanto o modelo I-551 com chicanas possui $Np = 1,57$, valor 2,37 vezes maior.

4.4. ELABORAÇÃO DA PLANILHA

Utilizando como base os dados experimentais de Silva (2019), o conteúdo teórico de sistemas de agitação e as análises de consumo de potência e número de potência realizadas neste trabalho, desenvolveu-se uma planilha didática para uso como ferramenta de ensino de sistemas de agitação em sala de aula na disciplina de Operações Unitárias.

A planilha possui seções que demonstram a fundamentação teórica dos sistemas de agitação, conceitos e aplicações, componentes do tanque agitado, tipos de impelidores e o cálculo da potência de agitação, em seguida demonstra a aplicação prática dos conceitos estudados, como é demonstrado na Figura 37, permitindo o input de dados como o diâmetro do impelidor, largura da pá, ângulo de inclinação da pá (45° e 90°), velocidade rotacional e tendo como saída o número de Reynolds, potência consumida e número de potência do respectivo impelidor, além das opções de analisar graficamente a influência dessas variáveis no consumo de potência do impelidor escolhido.

Figura 37 – Planilha didática de ensino e simulação de sistemas de agitação utilizando os dados experimentais de Silva (2019)



Fonte: Elaboração própria. Planilha disponível para download em:

<https://docs.google.com/spreadsheets/d/1r2ucTkqrq1qb2yOugpN0Lk5oN1C911iHh/edit?usp=sharing&oid=103054195502312305903&rtpof=true&sd=true>

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta as análises de variáveis de grande importância no projeto de sistemas de agitação e a influência das mesmas no consumo de potência, que por sua vez, é um fator determinante para a avaliação dos custos e eficiência do processo de agitação ou mistura, o qual se faz presente em diversas áreas da indústria.

Ao analisar os dados gerados experimentalmente por Silva (2019), observou-se que com o aumento dos parâmetros geométricos D_i/T e w/D_i a velocidade rotacional máxima atingida pelo impelidor se torna reduzida, fazendo com que o sistema atinja o regime turbulento em velocidades rotacionais menores. Este comportamento é exemplificado através da Tabela 8, o fato ocorre tanto para tanques com chicanas quanto para tanques sem chicanas, no entanto, para este último os valores de velocidade rotacional atingida são bem menores devido a falta de estabilidade característica desse sistema, onde há a formação de vórtice central que atinge a pá do impelidor, com o aumento da turbulência no fluido.

Observa-se que o consumo de potência, de forma geral, aumenta com o crescimento da velocidade rotacional, contudo, para impelidores com menor relação D_i/T esse aumento do consumo de potência ocorre de forma menos acentuada e gradualmente, permitindo que o impelidor alcance maiores velocidades rotacionais, como se observa no impelidor de menor relação $D_i/T = 0,25$. Conclui-se que tanto a velocidade rotacional quanto o diâmetro do impelidor escolhido afetam a potência consumida, contudo, o diâmetro do impelidor tem mais influência no consumo de potência, resultado que está de acordo com a equação de potência (Equação 13). Além disso, constatou-se que a presença de chicanas aumenta consideravelmente a potência do sistema, pois o fluido sofre mais atrito, no entanto, as chicanas são indispensáveis para manter a estabilidade do sistema.

Analisou-se o consumo de potência em função da velocidade rotacional para uma variação da relação geométrica w/D_i , fixando $D_i/T = 0,33$. Os resultados apresentados estão de acordo com a literatura, com o crescimento da relação w/D_i há o aumento do consumo de potência do impelidor. Ficou claro através dos gráficos o comportamento citado anteriormente, com o aumento das dimensões do impelidor, como o diâmetro do impelidor e largura da pá, se torna mais difícil controlar as instabilidades geradas pelo aumento da turbulência, sendo necessário o controle da velocidade rotacional máxima para os impelidores de maiores dimensões.

Por meio da análise dos gráficos comparativos do consumo de potência para impelidores de fluxo axial e radial, conclui-se que, quanto maior o ângulo da pá do impelidor, maior será o

consumo de potência. Os resultados demonstraram grande influência do ângulo da pá sobre o consumo de potência, principalmente em velocidades rotacionais mais altas e para maiores relações de w/D_i .

Analisou-se a variação do número de potência em relação ao número de Reynolds para tanques sem e com chicanas. Conclui-se que, para tanques com chicanas, o número de potência atinge uma estabilidade na região turbulenta ($NRe \geq 1 \times 10^5$) e sem o uso de chicanas o número de potência se torna instável em função do número de Reynolds, devido ao vórtice central formado por ação de forças centrífugas. Verificou-se também que o número de potência é maior para impelidores de fluxo radial (90°) do que para impelidores de fluxo axial (45°). Comparando os resultados, nota-se que para tanques com chicanas e pás retas inclinadas 45° , o número de potência aumenta em torno de 2,37 vezes mais em relação aos resultados de número de potência sem chicanas. E em pás retas 90° com chicanas, o número de potência aumenta em torno de 3 vezes mais do que quando não se utiliza chicanas.

Uma importante contribuição desse trabalho foi o desenvolvimento de uma planilha que simula o consumo de potência e comportamento dos impelidores de fluxo axial e radial, elaborada a partir dos dados experimentais de Silva (2019), para ser utilizada como ferramenta didática no ensino de sistemas de agitação na disciplina de Operações Unitárias.

6 PERSPECTIVAS

- Complementar as análises com outros ângulos de impelidores de fluxo axial (30° e 60°) presentes nos dados experimentais de Silva (2019) que não foram utilizadas neste trabalho.
- Incluir na planilha didática para ensino de sistemas de agitação, as análises referentes a aplicação de impelidores com ângulo da pá de 30° e 60° .
- Devido a grande quantidade de variáveis envolvidas no sistema de agitação, a mesma análise de influência no consumo de potência poderia ser aplicada para variáveis que não foram levadas em consideração neste trabalho. A aplicação de diferentes fluidos analisando a massa específica, a variação da distância entre o fundo do tanque e o impelidor e a altura do líquido no tanque são alguns exemplos de variáveis presentes na análise dimensional aplicada a um tanque agitado, que poderiam ter sua influência estudada. Além destas, o número de pás, variável presente na correlação empírica de Nagata (1975) para determinação do número de potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARROS, A. A. C., LEITE, A. B., BERTOLI, S. V. **Absorção química de dióxido de nitrogênio (NO₂).** *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 10, n. 1, 2005.
- BARBOSA, E. J. **Dimensionamento do eixo do impelidor em sistemas de agitação e mistura para processos industriais.** Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.
- CACHONI, M. A. **Análise da influência da geometria e das condições de operação de um reator piloto agitado aplicado a processos de esterificação e polimerização com uso de CFD.** Dissertação de mestrado - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. São Paulo, 2018.
- CREMASCO, M.A. **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos.** Segunda edição – São Paulo: Editora Blucher, 2014.
- GARAVITO, A. M. T. **Determinação experimental do consumo de potência para impelidores âncora e helicoidal usando fluidos pseudoplásticos de alta viscosidade.** Dissertação de mestrado - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2013.
- GONZALEZ, G. S. **Principais operações unitárias da indústria química: agitação e mistura.** São Paulo: Faculdades Oswaldo Cruz, 2015.
- HARNBY, N., EDWARDS, M. F., NIENOW, A. W. **Mixing in the Process Industries,** Butterworths, 1985.
- JOAQUIM JUNIOR C. F., CEKINSKI E., NUNHEZ J. R., URENHA L. C. **Agitação e Mistura na Indústria** vol 1- Rio de Janeiro –LTC, 2012.
- MACINTYRE, A. J.; **Máquinas Motrizes Hidráulicas.** 1nd ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.
- MARTINI, T. L. **Influência dos impelidores e condições de mistura na produção de insumos químicos para o setor coureiro.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering,** 7^{ed.}, McGraw-Hill, 2005.
- NAGATA, S; **Mixing – Principles and Applications.** New York: Halsted Press Book, 1975.
- OLDSHUE, J.Y. **Fluid Mixing Technology.** New York: McGraw-Hill Publications, 1983.

PAUL, E. L.; ATIEMO-OBENG, V. A.; KRESTA, SUZANNE M. **Handbook of Industrial Mixing**. Science and Practice: John Wiley & Sons, 2004.

VILLAR ALÉ, J. A. **Mecânica dos fluidos - Curso básico**. Faculdade de Engenharia PUCRS. Porto Alegre, 2011.

RAZUK, P.C.; **Um Estudo Sobre as Operações Unitárias de Agitação, Troca de Calor em Tanques e Mistura de Pós**. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 1992.

RUSHTON, J. H.; COSTICH, E. W.; EVERETT, H. J. **Power characteristics of mixing impellers- part I**. Chemical Engineering Progress, Vol. 46, No. 8, 1950.

SAITO, O. H. **Um modelo matemático para tanques com agitação**. Dissertação de Mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SILVA, J. L. G. **Análise Crítica das Correlações e Parâmetros Fundamentais em Sistemas de Agitação**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

SILVA, J. L. G. **Determinação Experimental do número de potência de impelidores de pás retas**. Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 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 COBEQ. Recife-PE, 2008.

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

SOUZA, E.; RAZUK, P.C.; **Operações Unitárias no Tratamento do Xarope de Açúcar**. São Paulo: Edipro, 260p, 1996.

SPOGIS, N.; **Metodologia para determinação de curvas de potência e fluxos característicos para impelidores axiais, radiais e tangenciais utilizando a fluidodinâmica computacional**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, 2002.

UHL, V. W., GRAY, J. B. **Mixing- Theory and Practice**, Academic Press-New York, volume 1, 1966.