



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Química

JEFFERSON LUIZ GRANGEIRO DA SILVA

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO NÚMERO DE POTÊNCIA DE
IMPELIDORES DE PÁS RETAS**

CAMPINAS
2019

JEFFERSON LUIZ GRANGEIRO DA SILVA

**DETERMINAÇÃO EXPERIMENTAL DO NÚMERO DE POTÊNCIA DE
IMPELIDORES DE PÁS RETAS**

*Tese apresentada à Faculdade de Engenharia
Química da Universidade Estadual de Campinas,
como parte dos requisitos exigidos para a
obtenção de título de Doutor em Engenharia
Química, na Área de Engenharia de Processos.*

Orientador: Prof. Dr. José Roberto Nunhez

**ESTE TRABALHO CORRESPONDE À
VERSÃO FINAL DA TESE DEFENDIDA
PELO ALUNO JEFFERSON LUIZ
GRANGEIRO DA SILVA E ORIENTADA
PELO(A) PROF(A). DR(A). JOSÉ ROBERTO
NUNHEZ**

CAMPINAS
2019

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): FAPESP, 2003/08640-7; CNPq, 141232/2002-1

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

Si38d Silva, Jefferson Luiz Grangeiro da, 1976-
Determinação experimental do número de potência de impelidores de pás retas / Jefferson Luiz Grangeiro da Silva. – Campinas, SP : [s.n.], 2019.

Orientador: José Roberto Nunhez.
Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Tanques. 2. Reynolds, Numero de. 3. Modelos geométricos. 4. Operações unitarias (Engenharia quimica). 5. Torque. 6. Processos Químicos. I. Nunhez, José Roberto, 1961-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: Experimental determination of the power number of straight-blade impellers

Palavras-chave em inglês:

Tanks

Reynolds number

Geometric models

Unit operations (Chemical engineering)

Torque

Chemical processes

Área de concentração: Engenharia Química

Titulação: Doutor em Engenharia Química

Banca examinadora:

José Roberto Nunhez [Orientador]

Antônio Carlos Luz Lisbôa

Guilherme José de Castilho

Edimilson Souza

Nicolas Spogis

Data de defesa: 22-01-2019

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Tese de Doutorado defendida por Jefferson Luiz Grangeiro da Silva e aprovada em 22 de Janeiro de 2019 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. José Roberto Nunhez, Presidente.
DEPro/FEQ/ UNICAMP

Prof. Dr. Antônio Carlos Luz Lisboa
DEPro/FEQ/ UNICAMP

Prof. Dr. Guilherme José de Castilho
DEPro/FEQ/ UNICAMP

Prof. Dr. Edimilson Souza
Cérebro Engenharia e Tecnologia da Informação S.A..

Prof. Dr. Nicolas Spogis
PUC-CAMPINAS

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Tese e na Secretaria do Programa da Unidade

DEDICATÓRIA

Aos meus pais: Regina Costa da Silva (*in memoriam*) e Luiz Grangeiro da Silva (*in memoriam*);

Aos meus irmãos: Luciane, Joana D'arc, Laura Neuma, Lauricéia Marta, Marcelo Cássio e José Carlos;

E aos meus sobrinhos queridos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus, por tudo: Fé, o acreditar, a motivação, pelos caminhos traçados, pelo dom de ensinar e fazer com que os alunos tenham motivação e vivência. A Deus, por mais uma realização acadêmica e profissional na minha vida. Só tenho a agradecer por tudo.

Gostaria de agradecer imensamente ao meu orientador, Prof. Dr. Jose Roberto Nunhez, pela oportunidade de trabalhar no Lab-CFD, pelo término do meu Doutorado, pela amizade, pelo carinho respeito para com os seus trabalhos e dedicação para com seus alunos.

Aos meus pais (*in memoriam*) Luiz Grangeiro e Regina Costa, lutadores por suas histórias de vida e superação. Exemplos de humildade e simplicidade. Nordestinos de garra, onde foram referenciais para seus filhos com boa educação e respeito ao próximo. Saudades eternas.

Aos meus irmãos Luciane, Joana D'arc. Laura Neuma, Lauricéia Marta, Marcelo Cássio e José Carlos, por todo o apoio e como referência e suas conquistas profissionais e familiares. Ao meu cunhado Marcos Gomes Pequeno pela preocupação e incentivo com o Doutorado.

Aos meus sobrinhos queridos: Elísnia Kelly, Elayne Keylla, Elitonn Raufy, Maria Luíza, Lucas, Patrícia, Carlos Eduardo e Marcus Vinícius.

Ao Dr. Edimilson Souza, por ter aprendido muito com ele em Sistemas de Agitação. O qual sem ele não seria possível a realização desta bancada piloto, pois o mesmo foi responsável por toda parte do projeto do piloto de agitação de 50 L. Gostaria de agradecer também a toda sua equipe da empresa CEREBRO S.A: Eng. Fernando Torsani, Eng. Antônio Carlos e sua esposa (Rosana) pela oportunidade de trabalhar por um ano na empresa e vivenciar um pouco o trabalho de vocês. Obrigado por todo conhecimento adquirido, Dr Edimilson.

A EQUIPAR em nome do Sr. Pedro Barbieri pelo aquisição e confecção do sistema de agitação de 50 L.

Aos Professores da Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP que lecionaram disciplinas na grade da Pós-Graduação, pela oportunidade de dividirem seus conhecimentos. Aos professores que fizeram parte banca de defesas de toda jornada, desde o Mestrado, qualificação I e II de Doutorado até atual na defesa de Tese de Doutorado.

Aos professores Dr. Martìn Aznar (*in memoriam*) e Dr. Edson Tomaz pela oportunidade em atuar em estágio docência (PED I) e Dra. Kátia Tannous em estágio docência (PED II). Momento de grande oportunidade de aprendizado acadêmico.

Aos amigos do laboratório de Fluido Dinâmica Computacional que trabalhei nos anos de Mestrado e Doutorado: Márcio Bezerra Machado, Nicolas Spogis, Antônio Bezerra, Antônio Rundinger. A todos por compartilhar conhecimentos e outros colegas de outros laboratórios e disciplinas que fiz amizade.

Aos amigos de Campinas, em especial aos amigos Emerson Marques e Emerson Ramos, onde esta amizade estende por muitos anos. Obrigado por tudo, amizade é fundamental.

Aos amigos de Manaus que me acolheram de braços abertos nesta nova jornada da minha vida profissional, em especial aos amigos: Ivan Moreira, Elioney Oliveira, André Amorin e Márcio (*in memoriam*) grande amigo que carregou para sempre em meu coração.

Aos colegas de trabalho da Universidade do Estado do Amazonas – UEA, professores: Kiki, Érica, Regina, Janaína, Dânia (Cuba) e Margarita (Cuba). Outros professores Cubanos: Leiva, Margarita, Ronaldo que me receberam muito bem e de grande respeito e troca de conhecimentos e material de apoio.

Ao aluno Paulo Henrique França de Lima/graduando do curso de Eng. Química da UEA-EST, que me ajudou na formatação da tese, meu muito obrigado.

À grande amiga. Profa. Dra. Consuelo Gomes, pelo total apoio e incentivo para o término de Doutorado. Amizade que já se vão 10 anos.

À amiga Mary France por acolhimento na sua casa, quando comecei a carreira acadêmica. As amigas de Dija e Iara.

Ao meu querido Henrique de Oliveira, pelas palavras de confiança, apoio e gratidão.

Gostaria de agradecer às universidades por onde passei e dividi meus conhecimentos com os alunos: UEFS-BA, UNIJORGE-BA, UNIFACS-BA, ULBRA-Manaus. Em especial, a todos os alunos que me apoiaram nesta fase final do Doutorado. Em especial, à Coordenadora do curso de Eng. Química da ULBRA-Manaus, Prof. M.Sc. Fátima Teixeira, pelo total apoio e uma profissional de grande respeito, dedicação e por todo carinho que tenho por ela.

Aos colegas de trabalho: Coordenador de qualidade da EST-UEA, Higino e à vice coordenadora de qualidade, Andréa Fragata por total amparo e sempre me apoiar pelo término do Doutorado.

Gostaria de agradecer à UEA /EST– Universidade do Estado do Amazonas por aceitar (aprovar) o meu pedido de afastamento (licenciamento) no período de cinco meses (Outubro/18 a Fevereiro/19) para término do doutorado. Em especial, em nome do Reitor Dr. Cleinaldo Costa.

Mais uma vez, agradeço à UEA-EST por fazer parte do corpo docente atual e na certeza de que com o Doutorado venho a enriquecer os estudos, a pesquisa e o desenvolvimento de trabalhos por meios de conhecimentos para com esta instituição.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida pelo programa de pós-graduação integrada (mestrado ao doutorado).

À FAPESP, pela verba concedida ao projeto 2003/08640-7, no qual foi possível a realização do projeto, construção e realização dos experimentos, no qual, rende frutos acadêmicos em Sistemas de Agitação até os dias atuais.

Aos professores membros presente da Banca Examinadora deste trabalho.

Enfim, à UNICAMP, à FEQ e à secretaria de Pós-Graduação pela oportunidade ao reingresso para finalização do Doutorado.

A DEUS por tudo e a continuação de novos projetos.

*“O sonho é que leva a gente para a frente. Se a gente
for seguir a razão, fica aquietado, acomodado.”*

Ariano Suassuna

*“A preocupação com o próprio homem e seu destino
deve ser sempre o principal interesse de todo o
esforço técnico, para que as criações de nossas
mentes sejam uma benção, e não uma maldição para
a humanidade. Nunca se esqueçam disso em meio a
seus diagramas e equações...”*

*“A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará
ao seu tamanho original.”*

Albert Einstein

*A educação é a fonte criadora, transformadora e
inovadora que nutre o ser humano. A necessidade da
educação deve estar no topo das prioridades de
qualquer nação, além de ser a base para a
sustentabilidade dos progressos científicos e
tecnológicos...*

Prof. Dr. Marco Aurélio Cremasco

RESUMO

O projeto atual de agitadores industriais é essencialmente dependente de relações empíricas, visto que as leis físicas que regem os fenômenos envolvidos nos processos químicos são expressões cuja solução analítica ainda é desconhecida. Devido a isso, trabalhos experimentais são utilizados como principais referências para o cálculo do consumo de potência dos sistemas de agitação. Dessa forma, este projeto de pesquisa tem por objetivo principal a obtenção de dados de potência (Número de potência em função do Número de Reynolds) dos impelidores tipo pás retas inclinadas utilizando métodos experimentais em regime turbulento. Posteriormente foi analisado o comportamento do número de potência em função da variação dos parâmetros geométricos (relações D_i/T e w/D_i) e a potência consumida do impelidor em função da velocidade rotacional do impelidor. Ademais, foram utilizados dois métodos para medição do torque (cálculo do consumo de potência) na unidade piloto de 50 L: 1 - transdutor de torque e 2 - parâmetros elétricos. Foram obtidos dados para configurações do sistema de agitação com e sem chicanas. Os resultados do número de potência em cento e vinte impelidores ensaiados analisaram: seis variações do diâmetro do impelidor (relações $D_i/T = 0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55$ e $0,70$), cinco variações da largura da pá do impelidor (relações $w/D_i = 0,14; 0,17; 0,20; 0,25$ e $0,30$) e quatro variações de ângulos das pás ($30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ e 90°) para cada tipo de configuração adotada. As principais contribuições deste trabalho são a comparação dos dados de potência com os impulsos elétricos, de muita importância para a indústria química, pois transdutores de torque confiáveis são caros e não são comuns em instalações industriais e, também, o desenvolvimento de uma equação única para um impelidor baseado em suas relações geométricas (relação diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque, comprimento da pá e ângulo de ataque). Isto foi sugerido por Nagata, mas em seu livro ele não conseguiu um ajuste realístico para os pontos. Este trabalho mostra que essa idéia funciona e pode ser utilizada para a estimativa de potência.

Palavras Chave: 1-Número de Potência. 2-Número de Reynolds. 3-Sistema de Agitação. 4-Impelidores. 5-Chicanas. 6-Parâmetros geométricos. 7-Curvas de Potência.

ABSTRACT

The current project of industrial mixing systems is essentially dependent on empirical correlations, since the physical laws governing the phenomena involved in chemical processes are expressions whose analytical solution is still unknown. Due to this factor, experimental works are used as main references for the estimation of the power consumption of the agitation systems. Thus, this research project has as main objective the acquisition of power data (Power Number as a function of Reynolds Number) of inclined straight-blade impellers using experimental methods in turbulent flow. At a later stage the power number behavior was analyzed as a function of the variation of the geometric parameters (D_i/T and w/D_i ratios) and the power consumed by the impeller as a function of the rotational speed of the impeller. In addition, two methods were used to measure the torque (power consumption calculation) in the 50 L pilot unit: torque transducer and electrical parameters. Data was obtained for configurations with and without baffles in the agitation system. The results of the power number for one hundred twenty impellers were analyzed. The data comprised six variations for the impeller diameter (D_i/T ratios = 0.25, 0.33, 0.40, 0.45, 0.55 and 0, 70), five variations of impeller blade width (ratios w/D_i = 0.14, 0.17, 0.20, 0.25 and 0.30) and four blade angular variations (30° , 45° , 60° and 90°) for each type of configuration adopted. The main contributions of this work are the comparison of the transducer results with the electric impulses of a frequency inverter. This is important for chemical industries. Reliable torque transducers are expensive and not common in industrial plants. The other novelty of this work is the development of an equation able to fit the power consumption as a function of the impeller relations (diameter ratio, blade width, and angle of attack). This was first suggested by Nagata. Even though the idea was good, he failed to fit the data and this work shows this equation works and can be used to estimate power consumption of a given impeller.

Keywords: 1-Power Number. 2-Reynolds Number. 3-Agitation Systems. 4-Impellers. 5-Baffles. 6-Geometric Parameters. 7-Power Curves.

LISTA DE FIGURAS

3.1 – Escoamento laminar (a) e escoamento turbulento (b).....	32
3.2 – Parâmetros geométricos em um sistema de agitação.....	37
3.3 – Fundos de tanque: (a) plano, (b) toro esférico, (c) difusor e (d) ideal.....	38
3.4 – Esquema da formação do vórtice central.....	40
3.5 – Formação de vórtice	40
3.6 – Formação de vórtice com impelidores descentralizados e centralizados	42
3.7 – Posição centrada e fora do centro	43
3.8 – Posição centrados, pás retas e turbina	44
3.9 – Posicionamento do impelidor condições a, b, c, d, e, f e g.....	45
3.10 – Tipos de fluxos: (a) axial; (b) radial; (c) tangencial	46
3.11 – Impelidor tipo quatro pás inclinadas	48
3.12 – Impelidor tipo turbina Rushton	50
3.13 – Impelidor âncora tubular/raspadores	52
3.14 – Característica geral da curva de potência (número de potência versus número de reynolds) em tanques sem e com chicanas.	55
3.15 – Relação entre o número de potência e o número de reynolds para fluidos newtonianos, para diversos projetos de impelidores em tanque sem e com chicanas	56
3.16 – Vórtice combinado de rankine.....	60
3.17 – $N_{pm\acute{a}x}$. Versus número de reynolds crítico	63
3.18 – Número de potência turbulento versus ângulo das pás	66
3.19 – Medição por parâmetros elétricos	70
3.20 – Equipamento piloto com medição de torque produzido no acionamento	71
3.21 – Esquema de medição do torque produzido no tanque	72
3.22 – Transdutor de torque.....	74
4.1 – Desenho em duas dimensões da unidade piloto de 50 L.....	76
4.2 – Desenho em três dimensões da unidade piloto de 50 L.....	77
4.3 – Fotografia da unidade piloto de 50 L e o sistema de aquisição de dados para leitura da velocidade rotacional e medidas de torque.....	78
4.4 – Tanque do piloto de 50 L.....	79

4.5 – Dimensões principais do tanque piloto de 50 L	80
4.6 – Estrutura móvel da unidade piloto de 50 L	81
4.7 – Sistema de elevação do agitador da unidade piloto de 50 L.....	82
4.8 – Conjunto de agitação do piloto de 50 L.....	83
4.9 – Acoplamentos utilizados no piloto de 50 L.....	83
4.10 – Parte frontal e interna do painel elétrico do piloto de 50 L.....	84
4.11 – Tomadas de alimentação do painel elétrico do piloto de 50 L.....	85
4.12 – Esquema de medição de torque por torquímetro do piloto de 50 L	86
4.13 – Torquímetro tm 307 fornecido pela magtrol	86
4.14 – Parte frontal do <i>hardware</i> modelo 3410 fornecido pela magtrol.....	87
4.15 – Parte traseira do <i>hardware</i> modelo 3410 fornecido pela magtrol	88
5.1 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 90°, $D_i/T = 0,25$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (240 rpm).....	116
5.2 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 90°, $D_i/T = 0,45$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (75 rpm).....	117
5.3 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 60°, $D_i/T = 0,45$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (75 rpm).....	118
5.4 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas inclinadas 45°, $D_i/T = 0,55$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (50 rpm).....	120
5.5 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas com $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,25$, para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ rpm).....	120
5.6 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas com $D_i/T = 0,55$ e $w/D_i = 0,14$, para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (50 rpm).....	121
5.7 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas com $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,30$, para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (75 rpm).....	122

5.8 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas inclinadas 45°, $w/D_i = 0,25$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	123
5.9 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 90°, $w/D_i = 0,30$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	124
5.10 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem e com chicanas para o impelidor pás retas inclinadas 45°, $w/D_i = 0,20$ e $D_i/t = 0,45$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	125
5.11 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem e com chicanas para o impelidor pás retas 90°, $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,55$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	126
5.12 – Consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque com três chicanas para as relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	128
5.13 – Consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque com quatro chicanas para as relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$	129
5.14 – Consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque sem chicanas para as relações geométricas: $w/D_i = 0,14$; $D_i/T = 0,55$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$	130
5.15 – Comparação do consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque sem e com chicanas para pás retas inclinadas 45°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$	131
5.16 – Comparação do consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque sem e com chicanas para pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$	132
5.17 – Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com três chicanas, pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$	136

5.18 – Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com quatro chicanas, pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$	139
--	-----

LISTA DE TABELAS

3.1 – Classificação dos processos de mistura.....	35
3.2 – Relações geométricas do impelidor de 4 pás retas inclinadas	49
3.3 – Relações geométricas da turbina radial de 6 pás retas.....	50
3.4 – Números adimensionais na agitação	59
3.5 – Número de potência em regime turbulento do impelidor de 4 pás retas	66
4.1 – Dimensões do tanque de 50 L e chicanas	80
4.2 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/D_i = 0,14$	89
4.3 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/D_i = 0,17$	90
4.4 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/D_i = 0,20$	91
4.5 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/D_i = 0,25$	92
4.6 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $w/D_i = 0,30$	93
5.1 – Número de potência em tanques com três chicanas para a relação $w/D_i = 0,14$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	100
5.2 – Número de potência em tanques com três chicanas para a relação $w/D_i = 0,17$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	101
5.3 – Número de potência em tanques com três chicanas para a relação $w/D_i = 0,20$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	102
5.4 – Número de potência em tanques com três chicanas para a relação $w/D_i = 0,25$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	103
5.5 – Número de potência em tanques com três chicanas para a relação $w/D_i = 0,30$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	104
5.6 – Número de potência em tanques com quatro chicanas para a relação $w/D_i = 0,20$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	106
5.7 – Comparação do número de potência em tanques com três e quatro chicanas para a relação $w/D_i = 0,20$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$, utilizando dados do torquímetro do impelidor.....	108
5.8 – Número de potência em função dos parâmetros geométricos (w/D_i e D_i/T) do impelidor pás retas inclinadas 30° em tanques com três chicanas para $NRe \geq 2 \times 10^5$	109

5.9 – Número de potência em função dos parâmetros geométricos (w/D_i e D_i/T) do impelidor pás retas inclinadas 45° em tanques com três chicanas para $NRe \geq 2 \times 10^5$	110
5.10 – Número de potência em função dos parâmetros geométricos (w/D_i e D_i/T) do impelidor pás retas inclinadas 60° em tanques com três chicanas para $NRe \geq 2 \times 10^5$	110
5.11 – Número de potência em função dos parâmetros geométricos (w/D_i e D_i/T) do impelidor pás retas 90° em tanques com três chicanas para $NRe \geq 2 \times 10^5$	111
5.12 – Número de potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas para $D_i/T = 0,25$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	112
5.13 – Número de potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas para $D_i/T = 0,33$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	113
5.14 – Número de potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas para $D_i/T = 0,40$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	113
5.15 – Número de potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas para $D_i/T = 0,45$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	114
5.16 – Número de potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas para $D_i/T = 0,55$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	114
5.17 – Número de potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas para $D_i/T = 0,70$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	115
5.18 – Comparação do Número de Potência utilizando dados do torquímetro do impelidor com alguns dados da literatura para Tanques com Quatro Chicanas para a relação $w/D_i = 0,20$ e $NRe \geq 2 \times 10^5$	133
5.19 – Resultados do Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com três chicanas, pás retas 90° , com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$	135
5.20 – Resultados do Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com quatro chicanas, pás retas 90° , com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$	138

NOMENCLATURA

Letras Latinas

A	Constante de correlação empírica de Nagata (1975)	[m]
B	Constante de correlação empírica de Nagata (1975)	[m]
C	Distância do fundo do tanque ao centro do impelidor	[m]
C_α	Fator de correção do ângulo -Dickey (2003)	
C_{np}	Fator de correção do número de pás - Dickey (2003)	
C_w	Fator de correção da largura das pás -Dickey (2003)	
C_c	Fator de correção da posição vertical do impelidor - Dickey (2003)	
C_{Di}	Fator de correção do diâmetro do impelidor - Dickey (2003)	
D_i	Diâmetro do impelidor	[m]
D_i/T	Diâmetro do impelidor em relação ao diâmetro do tanque	
D_d	Diâmetro do disco do impelidor tipo Rushton e outros discos	[m]
D_d/D_i	Diâmetro do disco em relação ao diâmetro do impelidor	
g	Aceleração gravitacional (9,8066 m/s ²)	[m/s ²]
H	Altura total do líquido	[m]
L_p	Comprimento efetivo da pá de turbina	[m]
k	Constante	
n_p	Número de pás	
n_B	Número de chicanas	
N	Rotação do impelidor [rps]	[s ⁻¹]
N_{Fr}	Número de Froude	
N_m	Número de mistura	
N_P	Número de potência	
N_{PB}	Número de potência máximo para chicanas parciais	
N_{Pmáx}	Número de potência máxima	
N_Q	Número de bombeamento	
N_{Re}	Número de Reynolds	

N_{REC}	Número de Reynolds crítico para impelidor de pás retas	
P	Potência do impelidor	[W]
p	Expoente – Nagata (1975)	
Q	Fluxo ou capacidade de bombeamento	[m ³ /s]
T	Diâmetro do tanque	[m]
t	Espessura das pás de impelidores	[m]
t_d	Espessura do disco turbina	[m]
T_q	Torque	[J]
r₁	Raio externo do impelidor	[m]
r_c	Raio que delimita a zona central (vórtice forçado) e a zona externa (vórtice livre) definido por Nagata (1975)	[m]
w_B	Largura da chicana ou defletor	[m]
w_B/T	Largura da chicana em relação ao diâmetro do tanque	
W_P	Largura projetada da pá do impelidor	[m]
w	Largura da pá do impelidor	[m]
Z	Altura (nível) do líquido contido em um tanque	[m]

Letras Gregas

α	Constante empírica - Nagata (1975)	
θ	Ângulo de inclinação das pás	[°]
φ	Fator de correção entre dois fluidos	
ρ	Densidade do fluido	[kg/m ³]
ξ	Constante empírica - Nagata (1975)	
π	Constante: 3,1415926.....	
ΔP	Variação de Potência ou diferencial de Potência	[W]
μ	Viscosidade dinâmica do fluido	[kg/m.s]
ν	Viscosidade cinemática do fluido	[m ² /s]

SIGLAS

CEREBROMIX	Software de Agitação de Fluidos e Vasos de Pressão
DEPro	Departamento de Engenharia de Processos
FEQ	Faculdade de Engenharia Química
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas

AT1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,14$
AT2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,17$
AT3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,20$
AT4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,25$
AT5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,30$
BT1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,14$
BT2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,17$
BT3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,20$
BT4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,25$
BT5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,30$
CT1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,14$
CT2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,17$
CT3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,20$
CT4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,25$
CT5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,30$
DT1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,14$
DT2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,17$
DT3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,20$
DT4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,25$
DT5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,30$
ET1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,14$
ET2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,17$
ET3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,20$

ET4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,25$
ET5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,30$
FT1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,14$
FT2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,17$
FT3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,20$
FT4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,25$
FT5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 30 graus e $w/D_i = 0,30$
AQ1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,14$
AQ2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,17$
AQ3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,20$
AQ4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,25$
AQ5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,30$
BQ1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,14$
BQ2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,17$
BQ3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,20$
BQ4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,25$
BQ5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,30$
CQ1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,14$
CQ2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,17$
CQ3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,20$
CQ4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,25$
CQ5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,30$
DQ1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,14$
DQ2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,17$
DQ3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,20$
DQ4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,25$
DQ5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,30$
EQ1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,14$
EQ2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,17$
EQ3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,20$

EQ4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,25$
EQ5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,30$
FQ1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,14$
FQ2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,17$
FQ3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,20$
FQ4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,25$
FQ5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 45 graus e $w/D_i = 0,30$
AS1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,14$
AS2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,17$
AS3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,20$
AS4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,25$
AS5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,30$
BS1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,14$
BS2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,17$
BS3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,20$
BS4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,25$
BS5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,30$
CS1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,14$
CS2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,17$
CS3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,20$
CS4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,25$
CS5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,30$
DS1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,14$
DS2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,17$
DS3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,20$
DS4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,25$
DS5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,30$
ES1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,14$
ES2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,17$
ES3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,20$

ES4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,25$
ES5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,30$
FS1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,14$
FS2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,17$
FS3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,20$
FS4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,25$
FS5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 60 graus e $w/D_i = 0,30$
AN1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,14$
AN2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,17$
AN3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,20$
AN4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,25$
AN5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,25$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,30$
BN1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,14$
BN2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,17$
BN3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,20$
BN4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,25$
BN5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,33$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,30$
CN1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,14$
CN2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,17$
CN3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,20$
CN4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,25$
CN5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,40$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,30$
DN1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,14$
DN2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,17$
DN3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,20$
DN4	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,25$
DN5	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,45$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,30$
EN1	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,14$
EN2	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,17$
EN3	Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,20$

- EN4** Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,25$
- EN5** Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,55$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,30$
- FN1** Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,14$
- FN2** Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,17$
- FN3** Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,20$
- FN4** Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,25$
- FN5** Impelidor Pás Retas com $D_i/T = 0,70$, ângulo da pá 90 graus e $w/D_i = 0,30$

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	28
2 OBJETIVOS	30
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
3.1 REGIMES DE ESCOAMENTO EM TANQUES AGITADO	33
3.2 PROCESSOS DE AGITAÇÃO E MISTURA.....	35
3.2.1 Classificação dos Processos	35
3.3 GEOMETRIA DO TANQUE (SISTEMA DE AGITAÇÃO).....	36
3.3.1 Tanque Agitado	37
3.3.2 Chicanas	39
3.3.3 Posição dos Impelidores	42
3.3.4 Tipos de Fluxos Gerados pelos Impelidores.....	45
3.4 TIPOS DE IMPELIDORES.....	47
3.4.1 Impelidor tipo Pás Retas Inclínadas	47
3.4.2 Impelidor tipo Turbina de Pás Retas (Rushton)	49
3.4.3 Impelidor tipo Âncora	51
3.5 CONSUMO DE POTÊNCIA DE IMPELIDORES	52
3.6 NÚMEROS ADIMENSIONAIS NA AGITAÇÃO	56
3.6.1 Número de Bombeamento	56
3.6.2 Número de Froude	57
3.6.3 Número de Mistura.....	58
3.6.4 Número de Reynolds	58
3.6.5 Número de Potência.....	59
3.7 NÚMERO DE POTÊNCIA (N_P) DETERMINADO POR NAGATA (1975).....	60
3.8 NÚMERO DE POTÊNCIA (N_P) DETERMINADO POR DICKEY (2003).....	64
3.9 PASSOS PARA PROJETO DE UM SISTEMA DE AGITAÇÃO	67
3.9.1 Dimensionamento do Processo.....	67
3.9.2 Dimensionamento do Equipamento.....	68
3.10 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA EM UNIDADES PILOTOS DE AGITAÇÃO.....	69

3.10.1	Medição por Parâmetros Elétricos.....	69
3.10.2	Medição Do Torque Produzido No Conjunto De Acionamento.	70
3.10.3	Medição Do Torque Produzido No Tanque.	71
3.10.4	Medição Com Transdutores De Torque (Torquímetro).	72
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	75
4.1	MATERIAIS	75
4.1.1	Unidade Piloto De Agitação Com 50 L.....	75
4.1.1.1	<i>Tanque de mistura e chicanas do piloto de 50 L.....</i>	<i>79</i>
4.1.1.2	<i>Estrutura de sustentação do piloto de 50 L.....</i>	<i>81</i>
4.1.1.3	<i>Conjunto de agitação do piloto de 50 L: motor e castelo com acessórios.....</i>	<i>82</i>
4.1.1.4	<i>Painel elétrico de proteção e comando do piloto de 50 L.....</i>	<i>84</i>
4.1.1.5	<i>Torquímetro com acessórios do piloto de 50 L.....</i>	<i>86</i>
4.1.2	Impelidores de Quatro Pás Retas Inclínadas	88
4.1.3	Softwares Utilizados	94
4.1.4	Fluido De Ensaio, Instrumentos e Ferramentas.....	94
4.2	MÉTODOS (MEDIÇÕES DE TORQUE).....	94
4.2.1	Obtenção Dos Dados Pelos Parâmetros Elétricos - SEW	94
4.2.2	Obtenção Dos Dados Pelo Transdutor De Torque (Torquímetro) - MAGTROL.	95
4.2.3	Metodologia Adotada Para Projeto Da Unidade Piloto De 50 L.....	95
4.2.3.1	<i>Dimensionamento do processo.....</i>	<i>95</i>
4.2.3.2	<i>Dimensionamento da unidade piloto.....</i>	<i>96</i>
4.2.4	Metodologia Para Análise Dos Dados Experimentais.....	97
5	RESULTADOS.....	99
5.1	NÚMERO DE POTÊNCIA PARA TANQUES COM CHICANAS	99
5.2	NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS	109
5.3	NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DA PÁ DO IMPELIDOR	112
5.4	NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE REYNOLDS EM TANQUES SEM CHICANAS.....	115

5.5 COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA EM TANQUES SEM E COM CHICANAS.....	124
5.6 CONSUMO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ROTACIONAL.....	126
5.7 COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA COM DADOS DA LITERATURA.....	132
5.8 ELABORAÇÃO DA EQUAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA.....	134
6 CONCLUSÕES.....	141
7 SUGESTÕES PARA OUTROS TRABALHOS.....	145
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
ANEXO A - METODOLOGIA PARA ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS	149
ANEXO B – RESULTADOS UTILIZANDO O TRANSDUTOR DE TORQUE – TORQUÍMETRO (MAGTROL). SAÍDA DE DADOS: VELOCIDADE ROTACIONAL (RPM), TORQUE (mW), POTÊNCIA (W) E TEMPO (S) COM OS CÁLCULOS DO NÚMERO DE REYNOLDS E NÚMERO DE POTÊNCIA.....	152
ANEXO C – FOTOS DA EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS.....	163

1. INTRODUÇÃO

A operação de Agitação ou Mistura é fundamental na maioria dos processos industriais, cuja finalidade é a obtenção de matérias primas ou produtos uniformes, destinados ao mercado de um modo em geral. A necessidade de processos cada vez mais inteligentes, eficientes, rápidos e controlados, vem propiciando, aos estudiosos da área, grandes oportunidades na geração de trabalhos científico sem função do volume de produtos e processos disponíveis para estudos, além do grande número de variáveis a serem observadas nas operações de agitação ou mistura.

A operação de agitação se caracteriza por gerar movimentos ou fluxos em um só produto basicamente empregado 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 processo de mistura é a operação de gerar movimentos ou fluxos em dois ou mais produtos, com a finalidade de obtenção de um produto final, largamente utilizado em tanques de processos.

Nesse sentido, operações de agitação e misturas são caracterizadas pela utilização de equipamentos ou componentes denominados Agitadores, Homogeneizadores, Misturadores Estáticos, etc. Os agitadores, por sua vez, são utilizados em larga escala, sendo caracterizados pela geometria de seus impelidores, cujos objetivos nas operações de agitação e misturas são:

- a) dispersão de gases em líquidos com subsequente transferência de massa;
- b) suspensão e distribuição de sólidos em líquidos;
- c) dispersão de líquidos em líquidos;
- d) transferência de calor; e
- e) reações químicas.

Uma grande variação de impelidores é disponibilizada pelos fabricantes de agitadores ou estão presentes nas instalações industriais, seja de uma maneira apropriada ou não. Todo impelidor produz três componentes de velocidades, denominadas axial, radial e tangencial, em que a caracterização principal do impelidor será em função da predominância de um componente de velocidade em relação às outras.

Desta forma, a geometria do impelidor é determinante no processo de agitação e mistura, em decorrência disso deve ser estudada e adequada para cada processo a ser aplicado, uma vez que a sua geometria determinará a eficiência do processo, assim como o consumo de potência do sistema. Assim, para produzir agitação ou mistura é necessário fornecer energia por unidade de tempo, que é a potência transferida pela rotação de um impelidor para o fluido. Esse fator, portanto, é uma quantidade integral fundamental para os processos de mistura e também necessária por causar a movimentação do fluido em tanques de agitação.

O cálculo da potência dissipada no sistema de agitação não só depende do tipo de impelidor utilizado, mas também das características físicas do fluido, do projeto do tanque e do regime de mistura. No entanto, o fluxo em tanque agitado é tão complicado que qualquer estudo matemático se torna difícil e, conseqüentemente, os resultados experimentais têm sido correlacionados por uso de análise adimensional e medidas experimentais de torque. A análise adimensional representa um princípio alternativo para o cálculo da potência e prevê uma base fundamental necessária para o entendimento dos resultados. A análise adimensional é baseada sobre o fato de que as leis naturais são independentes das unidades. O grupo adimensional para fluxo turbulento é tipicamente $P/\rho N^3 D^5$ e é chamado de número de potência, em que P é a potência de agitação dada em (W ou $\text{kg.m}^2/\text{s}^3$), ρ é a massa específica do fluido dada em kg/m^3 , N é a velocidade rotacional dada em rps e D o diâmetro do impelidor dado em m.

Várias fontes de dados e estudos sobre o cálculo de potência em tanques agitados foram desenvolvidas ao longo de todos esses anos. O objetivo de várias informações dos estudos de potência foi estabelecer uma relação necessária para se calcular a potência dissipada do impelidor e os efeitos da geometria sobre a mesma.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho tem como principais objetivos:

- a) analisar o número de potência de impelidores do tipo pás retas inclinadas em tanques com chicanas através dos resultados dos parâmetros elétricos (SEW) e do torquímetro (MAGTROL);
- b) analisar o número de potência de impelidores do tipo pás retas inclinadas em tanques com chicanas em função dos parâmetros geométricos w/D_i e D_i/T , através dos resultados do torquímetro (MAGTROL);
- c) analisar o número de potência de impelidores do tipo pás retas inclinadas em tanques com chicanas em função do ângulo da pá do impelidor, através dos resultados do torquímetro (MAGTROL);
- d) elaborar curvas de número de potência em função do Número de Reynolds para tanques sem chicanas;
- e) comparar curvas de número de potência em função do Número de Reynolds para tanques sem e com chicanas;
- f) elaborar curvas de potência em função da velocidade rotacional para tanques com chicanas;
- g) comparar curvas de potência em função da velocidade rotacional em tanques com e sem chicanas;
- h) elaborar uma equação única para a estimativa do número de potência em função de suas relações geométricas, seguindo a sugestão de Nagata (1975).

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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. Enquanto a agitação pode envolver o movimento de uma única fase, a mistura está associada à presença de mais de uma fase para reduzir a heterogeneidade entre fases e/ou características físico-químicas (CREMASCO, 2014).

Em seu aspecto tecnológico, a agitação que consiste em produzir movimentos turbulentos em um fluido, por meio de dispositivos mecânicos, conforme citado por FOUST et al. (1982), é uma das operações mais antigas e mais comuns na indústria química. Esses autores, embora sabendo que a eficiência e o consumo de energia na agitação dependem dos princípios básicos da mecânica dos fluidos, reconhecem que as configurações do escoamento nos tanques com agitação são tão complicadas que a aplicação rigorosa dos referidos princípios básicos é impossível. Assim, é preciso utilizar aproximações empíricas. Devido a essas circunstâncias, os trabalhos experimentais relatados por NAGATA (1975) são utilizados como principais referências para o cálculo do consumo de energia destes sistemas de agitação. Dessa maneira, esses cálculos são baseados em números adimensionais.

A agitação é o coração de um grande número de processos industriais em diversas áreas, tais como: mineração, alimentos, petróleo, produtos químicos e farmacêuticos, tratamento de efluentes, entre outros.

A operação de agitação deve ser analisada em diversos ângulos e em cada caso deve-se verificar qual é a etapa crítica do processo em estudo. Por exemplo, em algumas operações unitárias da Engenharia Química como em um cristalizador, os parâmetros importantes são o nível de supersaturação, o calor transferido associado ao controle de temperatura e a suspensão de cristais. Nos fermentadores, outros parâmetros merecem mais 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 (JUNIOR et al., 2012).

Muitas operações industriais dependem do grande sucesso de uma efetiva agitação e mistura de fluidos. Geralmente, a agitação ou a mistura de líquidos são realizadas em tanques cilíndricos

com agitação mecânica promovida por um eixo com movimento rotativo acoplado a um impelidor. As proporções do tanque variam bastante, dependendo dos objetivos pretendidos com cada processo (McCABE,2005).

Grande parte do que hoje é utilizado baseia-se em trabalhos experimentais desenvolvidos a partir da década de 1950. Ao utilizar os recursos disponíveis na época e trabalhando matematicamente os resultados obtidos em laboratório, estes profissionais desenvolveram modelos simplificados para análise de sistemas de agitação. Parte do que está sendo exposto pauta-se nesses modelos, criteriosamente analisados, testados e, quando necessário, atualizados com a tecnologia do momento (SOUZA, 2011).

Para ODSHUE (1983), a experiência de campo é fator fundamental e determinante para os pesquisadores da área. Projetar um sistema de agitação e mistura é muito mais do que obter dados experimentais em unidades pilotos, devido à diversidade dos processos, além do grande número de variáveis a serem estudadas.

WHITE et al. (1934) foram os primeiros a divulgarem a possibilidade e as vantagens da análise dimensional nas correlações do consumo de potência em agitadores, originando o coeficiente de arraste, denominado, atualmente, como número de potência. Alicerçados nos conhecimentos estudados há décadas, pesquisadores passaram a desenvolver equações de potência aprimorando a influência de cada variável envolvida. A partir desta etapa, nota-se a necessidade de estudar as condições dos fluxos, a geometria das pás dos impelidores, assim como outras variáveis importantes, como o ângulo da pá, a presença ou não de chicanas, que se tornam eficientes na decisão de um projeto nos dias atuais.

De acordo com Paul et al. (2003), a importância de se estudar os fenômenos ligados a agitação e a mistura foi compreendida e se fortificou a partir de 1950. Dessa maneira, esse interesse culminou em trabalhos que despertaram os interesses dos pesquisadores e usuários de agitadores, como as publicações de UHL & GRAY (1966), consagrando os clássicos publicados por NAGATA (1975), baseadas em sólidas pesquisas experimentais. Sendo assim, essas pesquisas fortalecem o desenvolvimento de novos trabalhos acadêmicos e industriais, aos quais possibilitam o aperfeiçoamento de novas técnicas e maneiras de experimentar novos desafios, dando importância aos processos de agitação e mistura das indústrias químicas atuais.

Ao demonstrar a importância dos estudos mencionados, recentemente, PAUL et al. (2003) editaram o denominado “*Handbook of Industrial Mixing – Science and Practice*” com a participação de dezenas de pesquisadores, destacando centenas de referências bibliográficas e disponibilizando contribuições importantes para os pesquisadores atuais, projetistas e usuários dos processos de agitação e mistura.

3.1 REGIMES DE ESCOAMENTO EM TANQUES AGITADOS

Em agitação, como em qualquer outra operação em que ocorre a movimentação de fluidos, a forma como esses fluidos se deslocam é um dos fatores determinantes sob vários aspectos:

- a) determinará a potência necessária para impulsionar o fluido;
- b) poderá induzir vibrações e ruídos durante o processo;
- c) poderá provocar a aeração (intencional ou não) do fluido;
- d) influenciará a eficiência ou não no processo de agitação.

Por essas e outras razões é importante conhecer a maneira como o fluido se comporta em determinadas condições de temperatura e de pressão. Assim, 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.

MACINTYRE (1983), definiu, inicialmente, duas formas ou regimes distintos de escoamento de um fluido: o regime laminar e o regime turbulento. No regime laminar, considerando uma partícula de fluido, ela se deslocará através de um caminho aproximadamente linear, conforme representação da Figura 3.1 (A), na direção do fluxo. Em linhas gerais, é como se o escoamento fosse formado por lâminas paralelas deslocando-se com velocidades diferentes. Essa forma de escoamento dissipa menos energia, pois se trata de um escoamento bem-comportado, ocorrendo, normalmente, a baixas velocidades.

Já no regime turbulento, acompanhando a mesma "partícula" do mesmo fluido, verifica-se que ela se deslocará em movimentos não lineares aleatórios, demonstrados na Figura 3.1 (B). Assim, nesse tipo de escoamento haverá uma maior dissipação de energia em virtude do atrito entre as “partículas” de fluidos, a formação de vórtices e as áreas de recirculação bem como a ocorrência

de fluxos em direções diferentes da desejada. O escoamento turbulento ocorre normalmente em velocidades mais elevadas e tem um comportamento difícil de prever e mensurar.

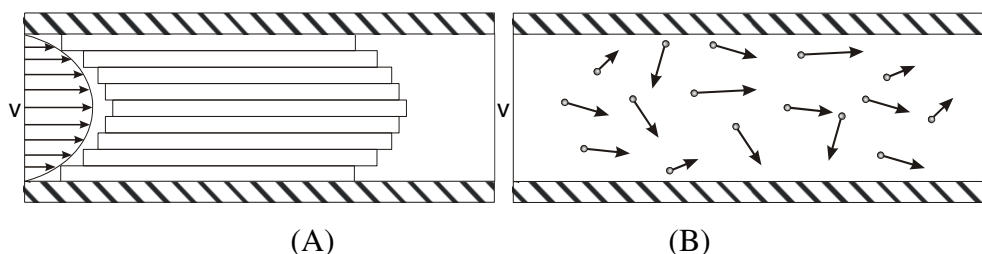


Figura 3.1 – Escoamento laminar (A) e turbulento (B). Fonte: Macintyre (1983).

Entre os regimes laminar e turbulento existe um regime de transição, em que o escoamento não é bem definido. A extensão desta zona de transição, e até mesmo dos limites entre os regimes laminar, de transição e turbulento, não são claros, sendo definidos diferentemente por diversos autores. Além de não ser consenso, a definição dos limites entre os regimes de escoamento depende de muitos fatores: a velocidade rotacional, a viscosidade e a densidade do fluido, as características do local onde ocorrem o escoamento como suas dimensões características e rugosidade.

Tais fatores são representados pelo número de Reynolds, um grupo adimensional que exprime a razão entre as forças inerciais e as forças viscosas, como $N_{Re} = \rho N D_i / \mu$. Esta taxa determina se o fluxo (regime de escoamento) é laminar, de transição ou turbulento. De um modo geral, o escoamento é considerado laminar quando o valor do número de Reynolds é menor do que 10 e turbulento para valores acima de 1×10^4 . Entre esses valores, o regime é de transição (LENG & CALABRESE, 2003).

OLDSHUE (1983), descreve que a classificação do regime de escoamento em agitação de fluidos pela faixa de número de Reynolds varia de impelidor para impelidor, dependendo de suas características geométricas. Para um determinado impelidor, o regime turbulento pode iniciar-se em uma ampla faixa que estará compreendida entre $10^3 < N_{Re} < 10^5$. E o regime será totalmente turbulento independentemente do tipo de impelidor quando o $N_{Re} > 10^5$.

3.2 PROCESSOS DE AGITAÇÃO E MISTURA

Os processos a serem realizados em um tanque pelo sistema de agitação são determinantes em sua escolha. HARBNY et al. (1992) apresentam as operações de agitação com a função de realizar muitas tarefas. Porém, sempre haverá tarefas mais críticas que serão preponderantes na escolha do agitador, na definição de sua geometria e no tamanho e na escolha dos parâmetros de agitação como tempo e rotação.

A importância de um projeto inicial do processo fica clara em OLDSHUE (1983), ao colocar este como o primeiro ponto a ser analisado, entendendo como projeto de processo a fluidomecânica dos impelidores, a definição dos regimes de escoamento requeridos pelo processo e a similaridade desses parâmetros nos diversos tamanhos de vaso, ou seja, a extrapolação (*scale-up*).

3.2.1 Classificação dos Processos

Os processos relacionados à agitação podem ser classificados em cinco tipos de aplicação conforme mostrados na Tabela 3.1, como as definidas por NAGATA (1975).

Tabela 3.1 – Classificação dos processos de mistura

Aplicação	Processo Físico	Processo Químico
Líquido-Sólido	Suspensão	Dissolução
Líquido-Gás	Dispersão	Absorção
Líquidos Imiscíveis	Emulsão	Extração
Líquidos Miscíveis	Mistura	Reação
Movimentação de Fluidos	Bombeamento	Transferência de Calor

Fonte: Oldshue (1983).

A primeira coluna (aplicação) mostra as cinco classes de aplicações primárias no processo. 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.

No caso da aplicação líquido-gás, a dispersão é caracterizada pela distribuição física do gás no líquido, enquanto a absorção é um processo de transferência de massa, como, por exemplo: a fermentação do oxigênio do ar para o líquido. Nos líquidos imiscíveis, um exemplo de processamento físico é a produção de xampus, que são emulsões estáveis, enquanto o processo de extração líquido-líquido produz emulsões instáveis apenas para processar a transferência de massa de um líquido a outro.

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.

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).

3.3 GEOMETRIA DO TANQUE (SISTEMA DE AGITAÇÃO)

A geometria (parâmetros geométricos do tanque-impelidor) do sistema de agitação é de suma importância, pois determinará qual será o perfil de velocidades, tipo de fluxo formado e consumo de potência fornecido no interior do tanque, especificamente sobre a pá do impelidor. Dessa maneira, esses perfis característicos, por sua vez, determinarão a interação entre os fluidos do sistema, a existência e a intensidade da turbulência, o comportamento da superfície, enfim, todos os fatores que levarão ao sucesso ou ao fracasso do processo (sistema de agitação) (SOUZA, 2011).

Para o projeto dos agitadores, basicamente de seus impelidores, os autores trabalham com relações geométricas a partir da dimensão do tanque agitado. A Figura 3.2 demonstra a maioria dos parâmetros geométricos relacionados ao sistema de agitação em que o diâmetro do impelidor (D_i) será ligado ao diâmetro do tanque (T ou D_T). A largura do impelidor (w) será associada ao diâmetro

do impelidor (D_i), o nível do líquido (Z) será relacionado com diâmetro do tanque (T ou D_T) e sua posição em relação ao fundo do tanque até ao centro do impelidor (C), será relacionada com o diâmetro do tanque (T ou D_T).

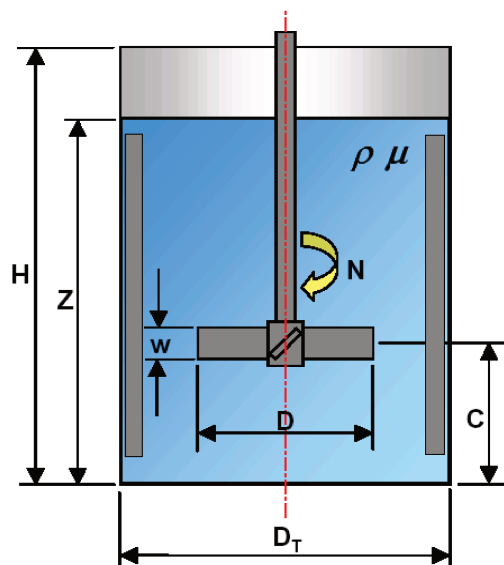


Figura 3.2 – Parâmetros geométrico em um Sistema de Agitação. Fonte: baseada em Cheremisinoff (2000).

3.3.1 Tanque Agitado

Tanque é o recipiente que conterá o produto e onde todo o processo será realizado. Preferencialmente, o tanque deverá ser cilíndrico e vertical. Além disso, o fundo deve ter uma geometria capaz de favorecer o fluxo gerado pelo impelidor, de acordo com RAZUK (1992).

Quando a relação entre a altura do líquido e do diâmetro do tanque for 1, a geometria tem se mostrado economicamente mais viável para a utilização de um único impelidor de acordo com Souza et al. (2003). Outras relações poderão ser usadas, conforme as exigências do processo, porém, ao se usar relações menores, ou seja, em tanques com diâmetro menores, um número maior de impelidores deverá ser utilizado, normalmente um para cada porção da altura igual ao diâmetro. A utilização de um número maior de impelidores também é útil para a agitação de produtos viscosos de forma a minimizar o aparecimento de zonas estagnadas ou zonas de baixa velocidade.

No que diz respeito aos Tanques com fundos planos, é comum a formação de zonas mais estagnadas próximas às bordas do fundo e embaixo do impelidor, ilustrado na Figura 3.3 (A). Essas zonas são responsáveis pela não homogeneidade do produto e devem, portanto, ser evitadas em certos processos. A utilização de fundos com raio de rebordeamento acentuado nos tanques, como mostrada na Figura 3.3 (B) favorece a eliminação de parte destas zonas enquanto a presença de um cone difusor abaixo do impelidor conforme ilustrado na Figura 3.3 (C), eliminaria o restante das zonas de estagnação ou recirculação, assim, o fundo ideal para processos de agitação seria o representado pela Figura 3.3 (D) como citado por (SOUZA, 2011).

A geometria considerada “ideal” é relativamente complexa, de difícil fabricação, além de apresentar inconvenientes quanto ao escoamento do produto após o fim do processo. Assim, utilizam-se tampos toro esféricos ou elípticos que apresentam uma melhor relação custo-benefício.

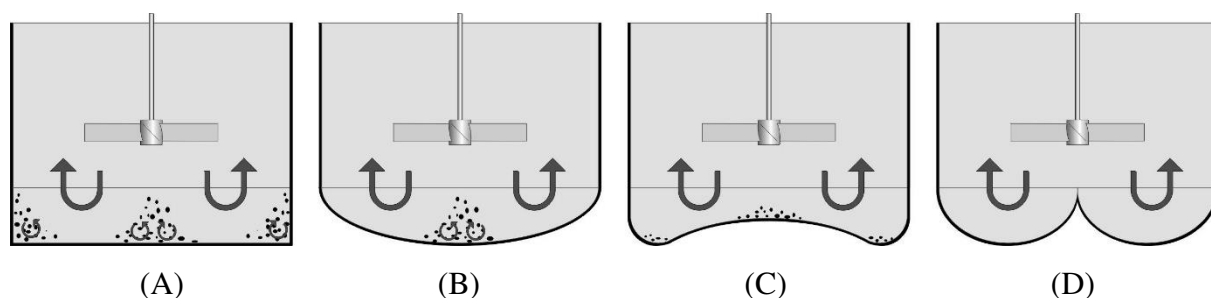


Figura 3.3 – Fundos de tanques: (A) Plano, (B) Toro esférico, (C) Difusor e (D) Ideal. Fonte: Souza (2011).

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 (SOUZA, 2011).

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, de acordo com (SOUZA & RAZUK, 1996).

Embora sob um ponto de vista geométrico, o tanque agitado, na maior parte das vezes, seja relativamente simples quando comparado a outras operações unitárias, como a destilação, a

absorção etc., existem alguns fatores que podem aumentar o nível de complexidade para a elaboração de um bom projeto (JUNIOR et al., 2012). Tais fatores são:

- a) existência de múltiplas fases e frações volumétricas no processo;
- b) utilização de fluidos não-newtonianos;
- c) regime de escoamento estar localizado em uma faixa de transição entre laminar e turbulento;
- d) existência de condições iniciais complexas como um processo contendo suspensão de sólidos em que todo o material sólido encontra-se inicialmente decantado.

3.3.2 Chicanas

As chicanas são denominados também de *baffles*, defletores ou, ainda, quebra ondas, componentes fundamentais adicionados aos tanques de mistura com a finalidade de transformar fluxos tangenciais em axiais, propiciando maior eficiência aos processos de mistura.

Usualmente, as chicanas são chapas metálicas montadas verticalmente nas paredes do tanque. As chicanas promovem uma maior ação de mistura, dispersão e, geralmente, transporte; maximizam a transferência de potência para o fluido; provocam a formação de uma superfície líquida livre mais ou menos plana; previnem a formação de um vórtice central (redemoinho); e evitam a entrada de ar no sistema de mistura causada pelo vórtice na superfície, quando ele alcança o impelidor. Na ausência das chicanas, com o agitador centrado e as velocidades elevadas, forma-se um vórtice causado em virtude da ação da força centrífuga sobre o líquido e da superfície livre que pode responder à força. A Figura 3.4 mostra a formação do vórtice (TATTERSON, 1991).

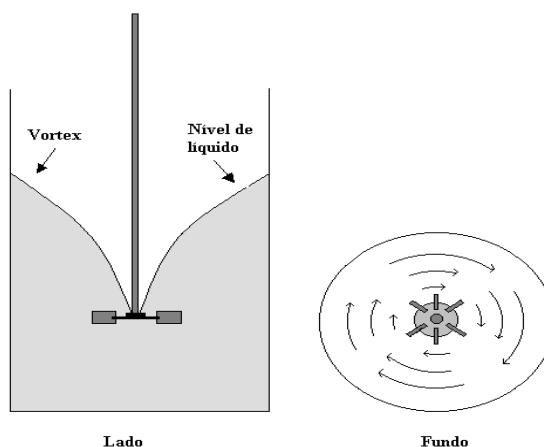


Figura 3.4 – Esquema da formação do vórtice central. Fonte: Tatterson (1991).

Se considerarmos um tanque com e sem a colocação de chicanas com agitador de quatro pás inclinadas a 45° graus girando a 280 rpm e mantendo o mesmo agitador com a mesma rotação visualizado na Figura 3.5, podemos chegar as mesmas conclusões de SOUZA et al. (2003): a suspensão de sólidos é totalmente comprometida com a falta das chicanas, uma vez que o produto gira no tanque em função da forte presença da componente de velocidade tangencial (tanque da esquerda). Ainda conforme as conclusões de SOUZA et al. (2003), com a falta das chicanas o vórtice atinge o impelidor provocando a instabilidade do sistema; já para o tanque da direita, a distribuição dos sólidos é perfeita e completa, ou, simplesmente, adicionar as chicanas, uma vez que elas transformam as velocidades tangenciais em axiais.

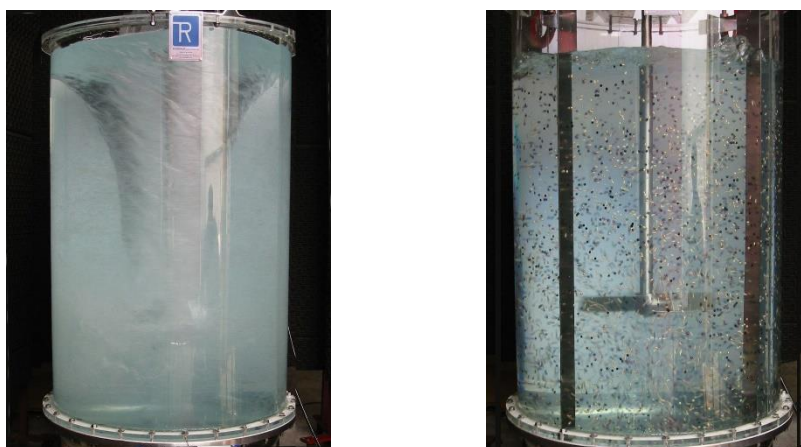


Figura 3.5 – Formação de Vórtice. Fonte: Souza et al.(2003).

A função principal das chicanas é evitar os fluxos tangenciais do fluido, transformando-os em fluxo radial e/ou axial, aumentando a eficiência da agitação e com rotações menores do impelidor alcança-se um nível de agitação mais elevado. 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, havendo um aumento da estabilidade dinâmica do conjunto.

O padrão para utilização de chicanas é: quatro chicanas espaçadas de 90° ou três chicanas espaçadas de 120°, 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. Assim, a distância para fixação da chicana é, geralmente, de 1/4 da largura da chicana entre a base do defletor e a base do tanque. A utilização de apenas duas chicanas causa instabilidade mecânica no sistema de agitação que são empregados alta intensidade de agitação, devendo evitar a colocação de apenas duas chicanas (SOUZA et al., 2003).

Existem diversas controvérsias em relação ao número ideal de chicanas a ser instalado em tanques agitados. Normalmente, varia de dois a quatro chicanas, quando dispostas no costado do tanque. A técnica preferencial e mais convincente é a de utilizar-se três chicanas com impelidores de quatro pás ou quatro chicanas quando trabalharmos com impelidores de três pás, dessa forma, não haverá a coincidência de todas as pás com as chicanas na passagem das pás pelos mesmos (SOUZA, 2011).

A utilização de 1/10 ou 1/12 do diâmetro do tanque para fixar a largura da chicana, informado por PostMixing (2004) não é uma diferença muito considerada para o sistema, justifica-se, ainda, que esta diferença vem em função de ser adotado 1/10 quando trabalha-se em unidades métricas e 1/12 em unidades inglesas.

De acordo com HAYWARD (2005), a distância ideal da chicana à parede do tanque deve ser de 1/6 da largura, sendo que, para tanques grandes deve-se utilizar 1/4. Para fluidos de baixa viscosidade (1 a 5000 cP), as chicanas podem ser montadas diretamente na parede do tanque, no entanto, para aplicações envolvendo transferência de calor, elas devem ser montadas afastadas da parede do tanque. Em caso de fluidos de alta viscosidade (acima de 10.000 cP), a distância entre a chicana e a parede do tanque deve ser de uma a duas polegadas. A utilização de chicanas em tanques agitados é, geralmente, adotada para fluidos de baixa viscosidade.

3.3.3 Posição dos Impelidores

A posição do impelidor no tanque de mistura é um dos principais fatores que afetam a eficiência do processo. Para chegarmos a um posicionamento ideal do impelidor temos que analisar vários aspectos; agitador como um todo, a reologia do produto (viscosidade e densidade), processo de mistura a ser realizado (líquido-líquido, líquido-sólido, líquido-gás ou líquido-sólido-gás), volume da batelada ou do vaso, formas de vedações do eixo, flexibilidade no processo, aplicação de mais de um sistema de agitação (sistemas combinados), etc.

Em um estudo de análise de potência e de velocidades de agitação, FREITAS (1993), ilustrou a diferença da formação dos vórtices em sistemas agitados utilizando o impelidor de pás retas, destacando a situação de maior vórtice à centrada sem a colocação de chicanas no tanque, conforme ilustração da Figura 3.6, onde a esquerda demonstra a formação do vórtice na posição fora de centro e a direita, a posição do agitador centrado.

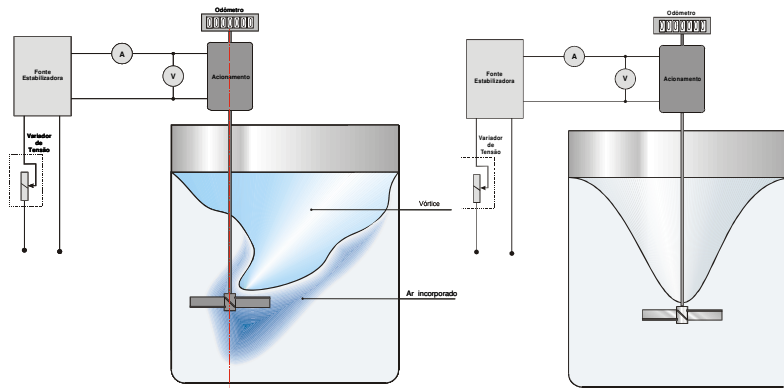


Figura 3.6 – Formação de vórtice com impelidores descentralizados e centralizados.
Fonte: Freitas (1993).

Agitadores laterais fixados no costado dos tanques são muito utilizados para tanques de grandes capacidades, principalmente quando se requer baixo nível de agitação, apenas para que o produto já processado não fique estagnado e não haja qualquer princípio de separação. Esses recursos são muito empregados para grandes tanques isotérmicos, para estocagem de leite, sucos naturais, óleos, matérias primas para indústrias químicas, etc.

Durante uma longa pesquisa na indústria cítrica, SOUZA, et al. (2003), comprovaram que a distância entre os impelidores durante a padronização de suco concentrado é fundamental para a

eficiência do processo, chegando à conclusão que, ao distanciar em mais do que 50% do diâmetro do impelidor, um impelidor do outro, acabaria ocorrendo zonas de estagnação entre eles. Vários impelidores, portanto, são colocados em um mesmo eixo árvore, posicionando o agitador fora do centro com a finalidade de se evitar a colocação de chicanas nos tanques, o que seria prejudicial no processo de limpeza.

Para DICKEY & SOUZA (2003), pode-se fazer a troca de um sistema de agitação âncora, operando em produtos viscosos, por um agitador de pás retas a 45°, de muito mais eficiência e de baixo consumo de potência, desde que seja determinado corretamente o número de impelidores, assim como o posicionamento dos mesmos.

Com a finalidade de demonstrar a importância do posicionamento do agitador, SOUZA (2003) construiu uma unidade piloto de agitação de mil litros em acrílico transparente, demonstrando como ocorre a formação do vórtice em várias situações de posicionamento do agitador. Na Figura 3.7, ilustra-se o mesmo agitador alterando apenas o posicionamento e a colocação de chicanas, mais precisamente, um agitador de pás retas a 45 graus, com D_i/T igual a 40%, girando a uma rotação de 200 rpm. Da esquerda para a direita: agitador centrado sem chicanas, agitador centrado com quatro chicanas e agitador fora de centro.

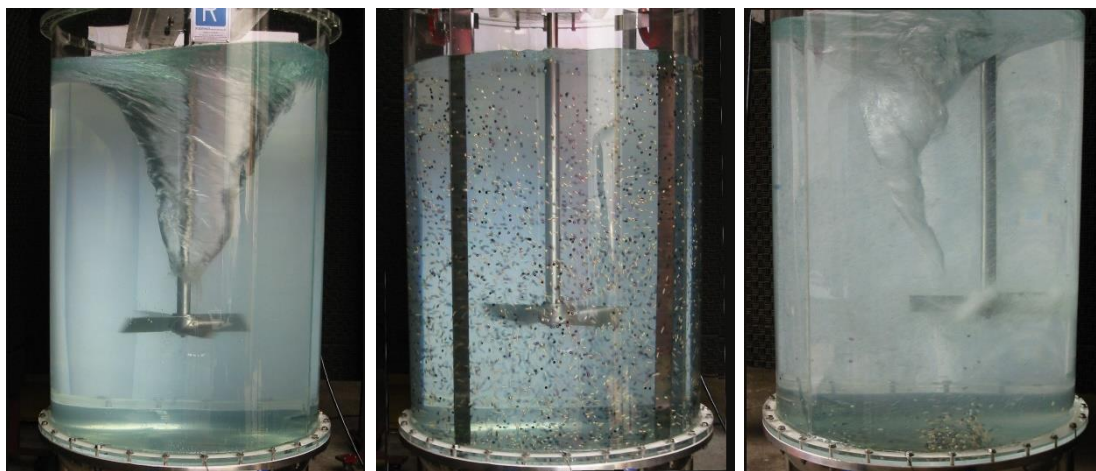


Figura 3.7 – Posição centrada e fora de centro. Fonte: Souza(2003).

A Figura 3.8, apresenta dois impelidores diferentes com o mesmo diâmetro girando na mesma rotação, sendo que, da direita para a esquerda temos um agitador de quatro pás retas a 45 graus com fluxo predominante na axial e, a seguir, um agitador do tipo turbina Rushton com fluxo

predominante na radial. A partir disso, nota-se que a formação do vórtice praticamente impede o bom desempenho dos fluxos desejados, uma vez que sua formação é evidente até para baixas rotações, que, neste caso, não passou de 200 rpm (SOUZA, 2003).

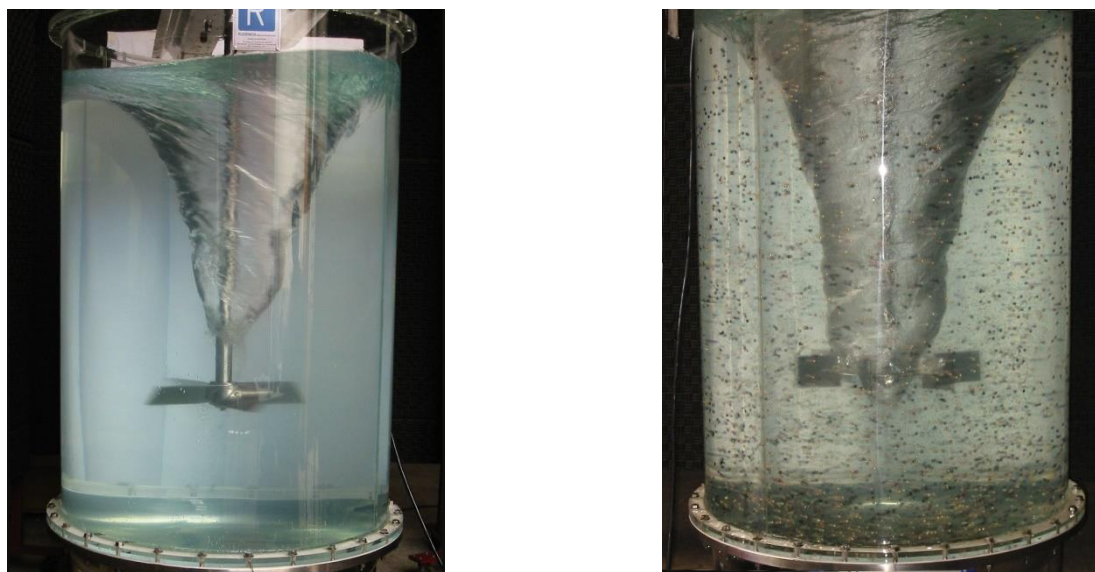


Figura 3.8 – Posição centrada, pás retas e turbina. Fonte: Souza (2003).

FASANO et al. (1995) fizeram importantes considerações em relação ao projeto mecânico de agitadores, ilustrando a importância da consideração do posicionamento do agitador. Quando mais de um sistema de agitação é adicionado ao tanque de processo, algumas formas construtivas em relação ao posicionamento dos impelidores são fundamentais. Um exemplo típico são reatores para produção de cremes na indústria de cosméticos. Nesses casos, podemos ter uma âncora centrada para promover a raspagem do produto, que pode aderir nas paredes do vaso, combinada com um agitador secundário de fluxo axial colocado fora de centro, entre o eixo e o raspador da âncora e ainda um sistema terciário disposto no fundo do tanque, como é o caso dos homogeneizadores (rotor-estator). Indo mais longe, pode-se, ainda, colocar uma chicana fixa na outra extremidade da âncora, sendo várias as configurações possíveis, dependendo dos produtos a serem processados e do volume do tanque.

Desta forma, a Figura 3.9 destaca as posições mais utilizadas, podendo ser vertical centrado sem chicanas (A), vertical centrado com chicanas (B), afixado no costado pela lateral do tanque

sem chicanas (C), inclinado sem quebra ondas (D), afixado e centrado ao fundo do tanque com chicanas (E), afixado centrado no fundo do tanque sem chicanas (F), vertical fora de centro, sem quebra ondas (G) (SOUZA, 2011).

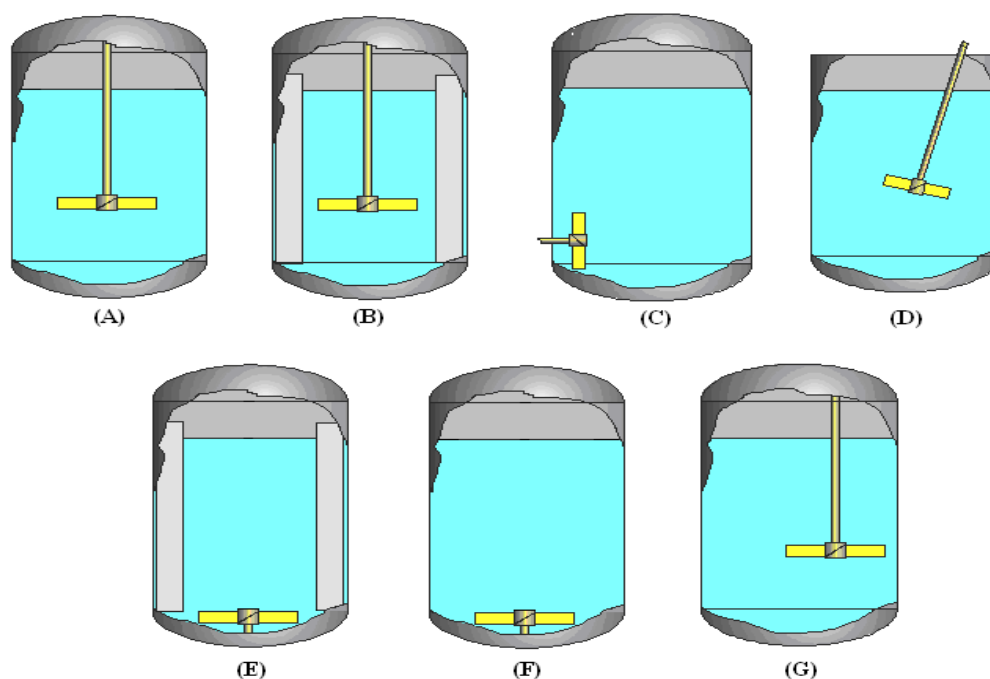


Figura 3.9 – Posicionamento do impelidor, condições A, B, C, D, E, F e G. Fonte: Souza (2011).

3.3.4 Tipos de Fluxos Gerados pelos Impelidores

Os impelidores são classificados por OLDSHUE (1983), 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 formam um fluxo horizontal em direção às paredes do vaso, ou seja, na direção radial. 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. Esses últimos efeitos são usualmente indesejáveis para a grande parte dos processos, pois não contribuem de forma efetiva para a agitação do fluido e promovem a oxigenação do fluido.

Os impelidores de fluxo axiais ilustrados na Figura 3.10 (a) produzem fluxo paralelo ao eixo do impelidor. Nessa perspectiva, os impelidores radiais demonstrados na Figura 3.10 (b), se instalados em vasos sem chicanas, podem produzir vórtices e fluxos tangenciais com todos os seus inconvenientes. Impelidores de fluxo axial, entretanto, são mais eficientes do que os impelidores radiais, produzindo um fluxo maior com a mesma potência.

Além dos fluxos axial e radial, HARBONY et al. (1992) cita o fluxo gerado por impelidores do tipo âncora, predominantemente tangencial, ilustrado na Figura 3.10 (c). Estes impelidores geram um fluxo maior próximo à parede do vaso enquanto perto do centro o fluxo é quase nulo, sendo que, na maioria das vezes, os fluxos tangenciais são prejudiciais à mistura.

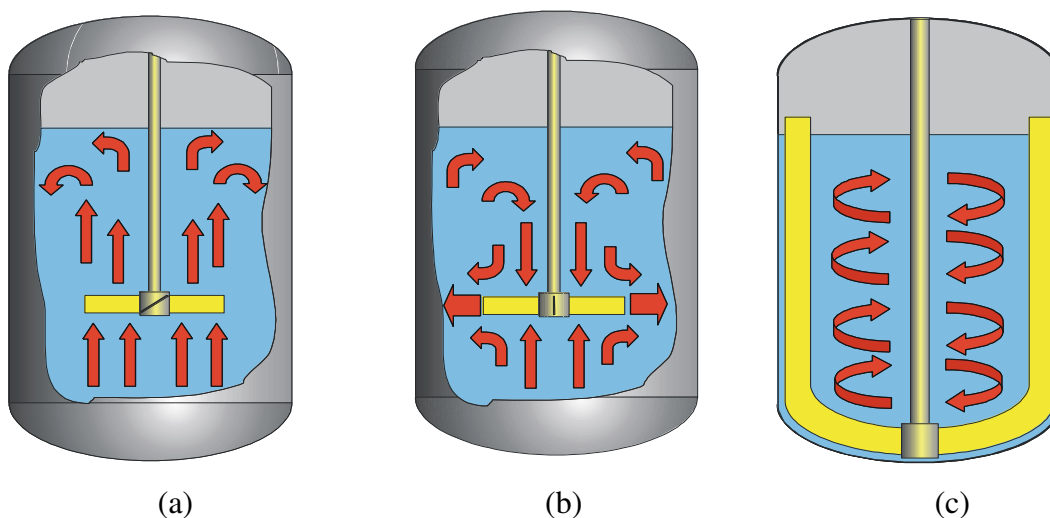


Figura 3.10 – Tipos de fluxos: (a) Axial; (b) Radial; (c) Tangencial. Fonte: Souza (2011).

Outra classificação que pode ser usada é baseada de acordo com o regime de mistura laminar ou turbulento. Para o escoamento laminar, o diâmetro do impelidor se aproxima do diâmetro do tanque, uma vez que o transporte de quantidade de movimento no escoamento laminar é baixo. Sendo assim, devido a essa característica, chicanas não são normalmente utilizadas em escoamento laminar.

Ademais, os impelidores largos próximos ao diâmetro do tanque não são necessários quando existe o escoamento turbulento, pois, neste caso, a transferência de quantidade de movimento é eficiente. Nestas condições, o diâmetro do impelidor varia de um quarto à metade do diâmetro do tanque (JUNIOR et al.2012).

No caso do regime turbulento, os impelidores são classificados como impelidores de fluxo axial e fluxo radial (JUNIOR et al 2012).

3.4 TIPOS DE IMPELIDORES

Os impelidores podem ser definidos como dispositivos responsáveis por imprimir velocidade ao fluido no interior de um vaso. Geralmente, eles são dispositivos rotativos e sua geometria e rotações são definidas a partir das necessidades do processo. Na agitação de fluidos, os impelidores são os elementos chave e o conhecimento de seu comportamento é essencial para a eficiente realização do processo desejado (SOUZA 2011).

3.4.1 Impelidor tipo Pás Retas Inclínadas

Segundo SOUZA & RAZUK (1996), os impelidores de quatro pás retas inclinadas a 45° são, praticamente de uso universal, pois, de maneira geral, possuem uma ação suave que, com frequência, é desejada para a maioria dos produtos. Assim, observa-se como este equipamento atende a quase todas as aplicações pelo fato de poder trabalhar com líquidos de 1 a 1.000.000 cP de viscosidade, criando alta ou baixa turbulência dependendo da velocidade de operação. Além disso, esses mecanismos são bastante úteis, tanto nas operações de mistura envolvendo líquidos miscíveis como na dissolução de sólidos. O consumo é de moderado a alto.

A colocação descentrada no tanque minimiza a formação das correntes tangenciais, consumindo menos potência, situação análoga ao impelidor centrado em duas chicanas, com a vantagem de ser mais sanitário, ideal para o processamento de produtos alimentícios e farmacêuticos. A posição do impelidor, quando descentrado, é definida pelo seu diâmetro e eventuais restrições impostas pela presença de acessórios sobre o tampo superior do tanque,

É recomendável o uso de, no mínimo, um elemento impulsor, conforme ilustrado na Figura 3.11 para cada altura cilíndrica em relação ao diâmetro interno. No entanto, tratando-se de misturas com controle em que a exigência de qualidade é rigorosa ou ainda, na presença de produtos viscosos, em que a propagação do movimento é mais lenta, é prudente considerar a presença de um número maior de impelidores (SOUZA, 2011).

Os valores típicos para a relação entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro interno do tanque (D_i/T) estão na faixa de 0,2 a 0,7. Abaixo de 0,2 não se produz adequada movimentação do produto, a menos que a rotação seja muito alta. Acima de 0,7 podem-se gerar correntes radiais suficientemente fortes para bloquear as longitudinais, dividindo o conteúdo do tanque e prejudicando a ação da mistura.

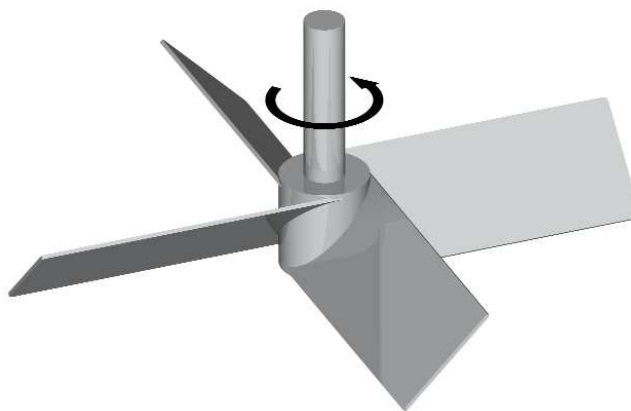


Figura 3.11 – Impelidor tipo quatro pás Inclinadas. Fonte: CerebroMix (2004).

Não há dúvida que, quanto menor o ângulo das pás mostrado na Figura 3.11, menor é o consumo de potência. Contudo, o grau de redução depende da viscosidade do líquido ou, para expressar mais corretamente, do número de Reynolds. Com a redução no número de Reynolds, a diferença na potência resultante da diferença em θ começa a diminuir e, finalmente, fica desprezível. Este resultado pode ser explicado pelo fato da resistência de atrito agindo nas superfícies das pás se tornar um fator controlado na região laminar.

O efeito da profundidade do líquido é também significativo na faixa dos altos números de Reynolds e se torna menos significativo conforme o número de Reynolds decresce. Quando o número de Reynolds é baixo, correspondendo a faixa de fluxo laminar, a profundidade do líquido não tem efeito no consumo de potência. Na Tabela 3.2, destacamos as relações geométricas do impelidor de 4 pás retas inclinadas (SOUZA, 2011).

Tabela 3.2– Relações Geométricas do Impelidor de 4 Pás Retas Inclinadas.

Relação geométrica	Valores Usuais	Faixa de Variação
D_i/T	0,33 ~ 0,39	0,2 - 0,7
W/D_i	0,20	0,14 - 0,30
θ	45°	30° - 90°
C/H	1/3	1/5 - 1/2

Fonte: Elaboração própria.

3.4.2 Impelidor tipo Turbina de Pás Retas (Rushton)

A turbina de pás planas foi desenvolvida na década de 1950 e, até a década de 1980, foi o impelidor mais utilizado para a dispersão de gases em líquidos, sendo, então, substituída por outras turbinas mais eficientes. Como descrito por OLSDHUE (1983), ela é composta por um disco vertical ao qual são fixadas pás planas, usualmente seis, equidistantes, ocupando apenas uma porção externa do diâmetro total do impelidor, ilustrada na Figura 3.12. Para a dispersão de gases, eles são injetados no líquido por meio de um anel dispersor localizado logo abaixo do impelidor e com diâmetro entre $1/2 D_i$ a $3/4 D_i$.

NAGATA (1975) afirma que o número de potência da turbina de pás retas pode ser calculado da mesma forma que um impelidor de pás retas com elas dispostas a 90°. Para regimes turbulentos, a zona de rotação cilíndrica (CRZ) corresponde, justamente, à zona central do impelidor, onde o fluido gira, basicamente, com a mesma rotação do impelidor. Portanto, a ausência das pás nessa região não tem reflexos significativos no consumo de potência.

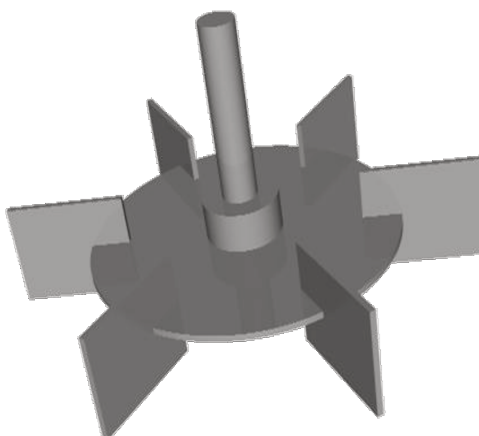


Figura 3.12 – Impelidor do tipo turbina *Rushton*. Fonte: CerebroMix (2004).

A Tabela 3.3, destacamos as relações geométricas do impelidor Turbina Rushton de 6 pás retas (SOUZA, 2011).

Tabela 3.3 – Relações geométricas da turbina radial de 6 pás retas.

Relação geométrica	Valores Usuais	Faixa de Variação
D_i/T	0,40	0,3 - 0,5 ^(a)
W/D_i	0,20 ^(b)	Sem variação
D_d/D_i	2/3 ^(b)	Sem variação
L_p/D_i	1/4 ^(b)	Sem variação
C/H	1/3	Sem variação

Fonte: (a) Bakker; Smith & Myers (1994), (b) Oldshue (1983).

O consumo de potência deste impelidor é bastante semelhante ao impelidor de pás retas a 90° de mesmas dimensões sem o disco central, já que a porção mais interna das pás tem pouca efetividade. Nessa região, o fluido gira com velocidade semelhante à velocidade do impelidor.

Assim, a função do disco é impedir que os gases, injetados logo abaixo, subam diretamente sem serem dispersos pelo impelidor, direcionando-os para o fluxo gerado pelas pás, predominantemente radial. Dessa maneira, os impelidores trabalham apenas em regime turbulento apresentando o número de potência entre 4,5 a 6,2 (SOUZA, 2011).

3.4.3 Impelidor tipo Âncora

As âncoras são impelidores cujo perfil acompanha o perfil interno do tanque. Tem o eixo vertical e concêntrico ao tanque, sendo encontradas âncoras que acompanham somente o fundo do tanque até âncoras que conduzem todo o costado além do fundo. Portanto, apresentam, em sua concepção básica, dois braços ou pás na vertical.

Segundo OLDSHUE (1983), a âncora é empregada na mistura de produtos viscosos sem limitação de tempo e na dissolução lenta de sólidos que não se depositam facilmente. Esse mecanismo também é aconselhável nas operações de aquecimento ou resfriamento para evitar a formação de depósitos de produto nas paredes do tanque sujeitas a troca de calor.

Em geral, a âncora é recomendada para fluidos com viscosidade na faixa de 5000 a 50.000 cP, sendo usada fora desta faixa com outras finalidades, como a troca térmica. Abaixo de 5.000 cP o fluido tende a girar junto com a âncora, devido à baixa força de arraste do fluido com a parede do tanque e acima de 50.000 cP a âncora simplesmente se desloca pelo fluido estagnado.

A faixa de rotação para âncoras está em torno de 5 a 50 rpm, com potências com variação de 0,75 a 190 kW e diâmetro de 600 mm a 3,00 metros. A largura das pás da âncora pode oscilar entre 8% a 12% do seu diâmetro, sem muita influência no consumo de potência. A âncora tem seis concepções básicas, sendo essas variações oriundas das exigências construtivas e de fluxo. São elas:

- a) âncora Plana Básica;
- b) âncora Plana com Raspadores;
- c) âncora Tubular Básica;
- d) âncora Tubular com Quebra-Ondas;
- e) âncora Tubular com Raspadores;
- f) âncora Tubular com Raspadores e Quebra-Ondas;

A âncora tubular com raspadores e chicanas (Figura 3.13) têm as características da âncora tubular com chicanas, ou seja, uma mistura mais eficiente de fluidos newtonianos, com a função

dos raspadores de evitar a estagnação do produto nas paredes do tanque sujeitas à troca de calor (SOUZA, 2011).

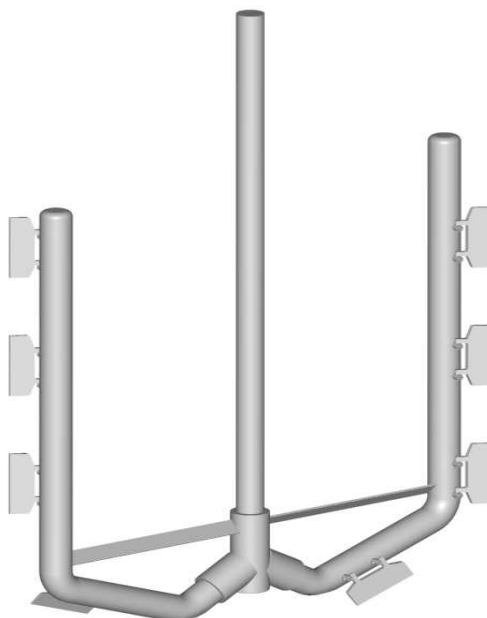


Figura 3.13 – Impelidor tipo âncora tubular/raspadores. Fonte: CerebroMix (2004).

3.5 CONSUMO DE POTÊNCIA DE IMPELIDORES

A estimativa do consumo de potência é de muita importância para o projeto de equipamentos de agitação. No estudo do cálculo da potência do impelidor, são várias as informações necessárias para determinar este cálculo, como: propriedades físicas do fluido (viscosidade e densidade); velocidade de rotação do impelidor; geometria (diâmetro) do tanque e do impelidor; profundidade do líquido; presença ou ausência de chicanas e localização relativa do impelidor em relação ao tanque (SILVA et al., 2008).

Efeito da massa específica do fluido (ρ): para números de Reynolds abaixo de 10, a massa específica do fluido não tem nenhum efeito sobre o consumo de potência dos impelidores. Quando impelidores operam na variação de transição e turbulenta, a massa específica do fluido tem efeito (RUSTHON et al., 1950).

Efeito da viscosidade do fluido (μ): na região turbulenta (número de Reynolds muito alto), o número de potência é essencialmente constante, assim, a viscosidade não tem nenhum efeito

sobre a potência naquela região de número de Reynolds. Atravessando a região de transição para a região laminar, o efeito da viscosidade sobre o consumo de potência torna-se significativo. Para números de Reynolds muito baixo (região laminar), as forças viscosas predominam sobre as forças inerciais, ou seja, o número de potência se altera inversamente com o número de Reynolds (ou diretamente com a viscosidade). Além disso, o efeito da viscosidade sobre o consumo de potência depende também da forma e da presença de chicanas no sistema de agitação (OLDSHUE, 1983).

Efeito da velocidade rotacional (N): 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. A velocidade rotacional também está influenciada na medida experimental de torque, definida pela seguinte relação (SILVA et al., 2008):

$$T_q = \frac{P}{2\pi N} \quad (3.1)$$

A Equação (3.1) será de fundamental importância, pois, dada a velocidade rotacional de operação do sistema e com o torque fornecido, pode-se calcular a potência consumida do impelidor.

O torque influencia acentuadamente o preço de uma unidade de agitação. Além da engrenagem de transmissão, dimensionada de acordo com o torque, o tamanho do eixo e o peso do impelidor também influenciam esse valor (JUNIOR et al., 2012). Como a potência transferida do impelidor para o fluido tem uma variável consideração importante no projeto de um tanque agitado, seu cálculo 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 medidas experimentais do torque e/ou análise dimensional.

A análise dimensional se baseia no fato de que as leis naturais são independentes das unidades, ou seja, as unidades definem as variáveis. Como visto, a potência tem basicamente as mesmas unidades fundamentais do produto entre a massa específica ρ (kg/m^3), o cubo da velocidade de rotação N (s^{-1}) e o diâmetro do impelidor D_i (m) elevado à quinta potência, ou seja,

$\rho N^3 D_i^5$. Portanto, o grupo adimensional $(P/\rho N^3 D_i^5)$, denominado número de potência, é formado e utilizado tipicamente para escoamento turbulento.

A análise dimensional aplicada ao tanque agitado fornece uma relação para o escoamento turbulento do tipo:

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_i^5} = k \left(\frac{\rho N D_i^2}{\mu} \right)^a \left(\frac{N^2 D_i}{g} \right)^b \left(\frac{T}{D_i} \right)^c \left(\frac{C}{D_i} \right)^d \left(\frac{Z}{D_i} \right)^e \dots (3.2)$$

Em que 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, uma vez que cada parâmetro geométrico está dividido pelo diâmetro do impelidor.

Se a similaridade geométrica é mantida, a Equação (3.2) pode ser simplificada para $N_p = k(N_{Re})^n$ e é válida para escoamento turbulento sem a presença de chicanas. Nessas condições, o número de Froude não tem influência no número de potência. Quando o número de Reynolds é elevado, a equação simplifica para $N_p = k'$ e é 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.

A obtenção da curva do consumo de potência em função do número de Reynolds alcançada em laboratório ou escala piloto é bastante utilizada para a estimativa da 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 (JUNIOR et al., 2012).

Apesar de problemas associados ao aumento de escala, pesquisadores publicaram gráficos obtidos em laboratório para casos particulares de geometrias específicas. A concepção básica de uma banca de testes é usualmente um tanque de fundo chato, com altura do líquido Z igual o diâmetro do tanque T e com apenas um impelidor colocado a uma distância C do fundo.

Os dados são apresentados em um gráfico *log-log* que fornece a curva de potência do sistema. Uma curva típica é mostrada na Figura 3.14 onde é possível observar que há números de Reynolds

baixos, geralmente menores de 10. Ademais, existe uma região laminar em que as forças viscosas predominam sobre as forças inerciais.

Para valores de número de Reynolds superiores a 10^4 , o escoamento é turbulento, ou seja, as forças inerciais predominam às forças viscosas. Nessa região, o N_p é praticamente constante. Entre as localidades de regime laminar e turbulento existe uma zona de transição gradual, cuja relação N_p e N_{Re} não é fácil de ser entendida (SILVA, 2002).

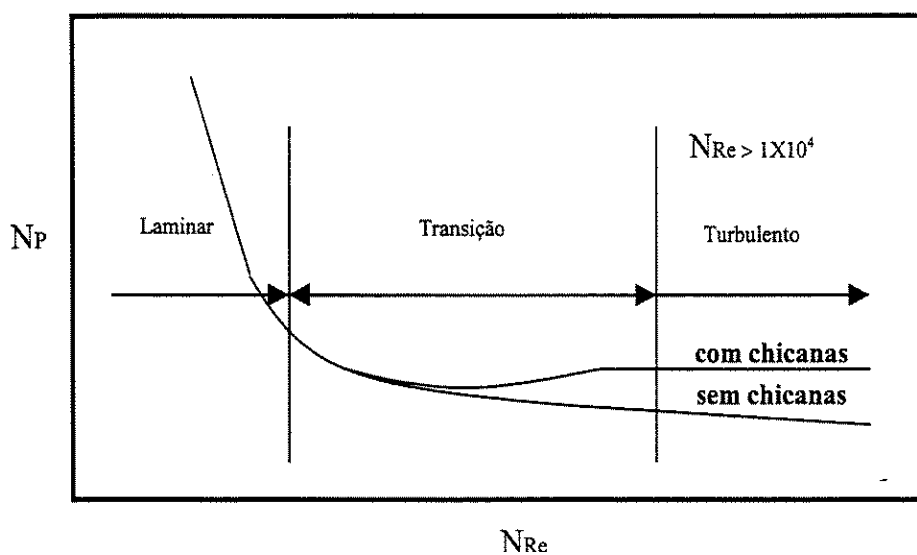


Figura 3.14 – Característica geral da curva de potência (Número de Potência versus Número de Reynolds) em tanques sem e com chicanas. Fonte: Silva (2002).

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 3.15 apresenta um exemplo relatado na dissertação de Silva (2002), mostrando curvas de potência para diferentes impelidores.

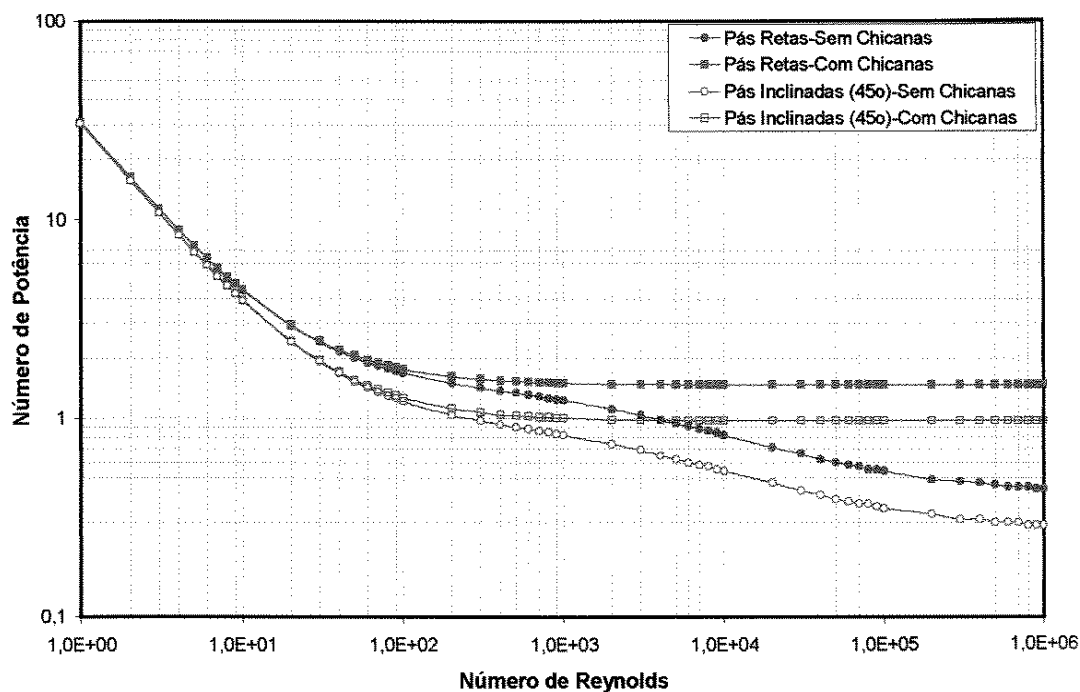


Figura 3.15 – Relação entre o Número de Potência e o Número de Reynolds para fluidos newtonianos, para diversos projetos de impelidores ($D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,2$) em tanques sem e com chicanas. Fonte: Silva (2002).

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 independe da viscosidade.

3.6 NÚMEROS ADIMENSIONAIS NA AGITAÇÃO

Os números adimensionais são utilizados para correlacionar parâmetros de “*scale-up*”. Esses números relacionam a força de inércia (força de movimentação da agitação) com outras forças, como podemos observar a seguir.

3.6.1 Número de Bombeamento

Este número relaciona a taxa de bombeamento do impelidor Q (volume escoado por área do impelidor e por tempo) à velocidade de rotação e tamanho do impelidor. Portanto, correlaciona a

capacidade de bombeamento de diferentes impelidores com diversas geometrias de tanque. O número de bombeamento é dado pela equação 3.3 da seguinte forma:

$$N_Q = \frac{Q}{ND_i^3} \quad (3.3)$$

Em que:

- N_Q = número de bombeamento = ∞ (adimensional);
- Q = taxa de bombeamento = m^3/s ;
- N = velocidade rotacional = s^{-1} ;
- D_i = diâmetro do impelidor = m.

3.6.2 Número de Froude

Este número inclui as forças gravitacionais e é usado para considerar os efeitos da superfície livre (vórtice central) no número de potência. Por isso, esse número é incluído em correlações de N_{Re} e N_p em sistemas sem chicanas. O número de Froude relaciona as forças inerciais com as gravitacionais, como mostra a equação 3.4:

$$N_{Fr} = \frac{N^2 D_i}{g} \quad (3.4)$$

Em que:

- N_{Fr} = número de Froude = ∞ (adimensional);
- N = velocidade rotacional = s^{-1} ;
- D_i = diâmetro do impelidor = m;
- g = aceleração gravitacional = m/s^2 .

3.6.3 Número de Mistura

É o produto da velocidade rotacional (N) e o tempo de mistura (t). O tempo de mistura é uma medida do tempo requerido para misturar líquidos miscíveis ao longo do volume do tanque agitado. O número de mistura é dado pela equação 3.5 a seguir:

$$N_m = Nt \quad (3.5)$$

Em que:

- N_m = número de mistura = ∞ (adimensional);
- N = velocidade rotacional = s^{-1} ;
- t = tempo de mistura = s.

3.6.4 Número de Reynolds

Esta taxa determina se o fluxo é laminar, de transição ou turbulento. De modo geral, o escoamento é considerado laminar quando o valor do número de Reynolds é menor do que 10 e turbulento para valores acima de 1×10^4 . Entre esses valores, o regime é de transição. O número de Reynolds relaciona as forças inerciais sobre as forças viscosas como mostra a equação 3.6:

$$N_{Re} = \frac{\rho N D_i^2}{\mu} \quad (3.6)$$

Em que:

- N_{Re} = número de Reynolds = ∞ (adimensional);
- ρ = massa específica do fluido = kg/m^3 ;
- N = velocidade rotacional = s^{-1} ;
- D_i = diâmetro do impelidor = m;
- μ = viscosidade absoluta do fluido = $kg/m.s$.

3.6.5 Número de Potência

O número de potência representa a relação entre as diferenças de pressão decorrentes do fluxo e as forças inerciais, dado pela equação (3.7):

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \quad (3.7)$$

Em que:

- N_p = número de potência = ∞ (adimensional);
- P = potência consumida na agitação = $\text{kg.m}^2/\text{s}^3 = \text{W}$;
- ρ = massa específica do fluido = kg/m^3 ;
- N = velocidade rotacional = s^{-1} ;
- D_i = diâmetro do impelidor = m.

Como observado, existe uma série de números adimensionais associados aos sistemas de agitação, eles são utilizados para se obterem informações sobre parâmetros importantes tais como o tempo de mistura, consumo de energia, entre outros. Dessa forma, podemos resumir os principais, como listados na tabela 3.4.

Tabela 3.4 –Números adimensionais na agitação.

Denominação	Símbolo	Definição	Comentários
Bombeamento	N_Q	$Q/(ND_i^3)$	Capacidade de bombeamento.
Froude	N_{Fr}	$(N^2 D_i/g)$	Correlaciona N_{Re} e N_p em sistemas sem chicanas.
Mistura	N_m	N_t	Uniformidade da mistura.
Reynolds	N_{Re}	$(\rho N D_i^2/\mu)$	Define se o escoamento é laminar ($N_{Re} < 10$) ou turbulento ($N_{Re} > 1 \times 10^4$).
Potência	N_p	$P/(\rho N^3 D_i^3)$	Constante em sistemas com chicanas ($N_{Re} > 1 \times 10^4$).

Fonte: Junior et al. (2012).

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

NAGATA (1975) desenvolveu um procedimento para o cálculo do número de potência de impelidores de pás retas baseado na teoria do vórtice combinado de Rankine e em observações empíricas. O comportamento de um fluido de baixa viscosidade agitado por um impelidor central e vertical em um vaso cilíndrico é similar ao descrito pelo vórtice combinado de Rankine como ilustrado na Figura 3.16. Próximo ao centro do vaso, o fluido roda com uma velocidade angular aproximadamente igual ao do impelidor.

Esta zona de vórtice forçado, ou zona de rotação cilíndrica (CRZ), comporta-se como um cilindro sólido rodando no centro do vaso, onde todas as partículas têm uma mesma velocidade angular. Externamente a essa zona há uma zona de vórtice livre onde se observa um gradiente radial de velocidade.

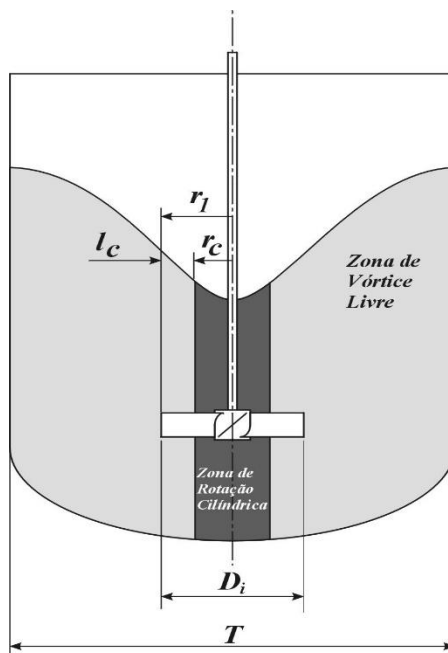


Figura 3.16 –Vórtice Combinado de Rankine. Fonte: descrito por Nagata (1975).

A relação entre o raio da zona de rotação cilíndrica (r_c) e o raio do impelidor (r_1) em função do número de Reynolds (N_{Re}) é dado por:

$$\frac{r_c}{r_1} = \frac{N_{Re}}{10^3 + 1,6N_{Re}} \quad (3.8)$$

E o comprimento efetivamente atuante das pás do impelidor (l_c) é dado por:

$$l_c = r_1 - r_c = \frac{10^3 + 0,6N_{Re}}{10^3 + 1,6N_{Re}} \left(\frac{D_i}{2} \right) \quad (3.9)$$

Integrando o momento devido à força inercial do fluido multiplicado pela velocidade angular do impelidor no comprimento efetivo, Nagata (1975) chega à potência teórica consumida pelo impelidor na forma:

$$P = f(D_i, K, W) \left(\frac{10^3 + 0,6N_{Re}}{10^3 + 1,6N_{Re}} \right)^3 \rho N^3 D_i^5 \quad (3.10)$$

Onde K é o índice de consistência do fluido.

Partindo dessa base teórica, Nagata (1975) ajusta a equação através de constantes empíricas e acrescenta um termo representativo do aumento do consumo de potência em função do acréscimo da viscosidade. Assim, o número de potência (N_p) é definido como:

$$N_p = \frac{A}{N_{Re}} + B \left(\frac{10^3 + 0,6\xi N_{Re}^\alpha}{10^3 + 1,6\xi N_{Re}^\alpha} \right)^p \quad (3.11)$$

Usando um impelidor de 2 pás a 90°, determina-se as constantes A, B, p, α e ξ , além de acrescentar os efeitos da altura do nível do líquido (H) e do ângulo de inclinação das pás (θ), chegando a uma equação geral para os impelidores de pás retas centralizados em vasos sem chicana. Ao inserir, ainda, o efeito número de pás (n_p) temos:

$$N_p = \frac{A}{N_{Re}} + B \left(\frac{10^3 + 1,2N_{Re}^{0,66}}{10^3 + 3,2N_{Re}^{0,66}} \right)^p \left(\frac{H}{T} \right)^{\left(0,35 + \frac{Wn_p}{2T} \right)} (\text{sen } \theta)^{1,2} \quad (3.12)$$

Em que:

$$A = 14 + \left(\frac{Wn_p}{2T} \right) \left[670 \left(\frac{D_i}{T} - 0,6 \right)^2 + 185 \right] \quad (3.13)$$

$$B = 10^{\left[1,3 - 4 \left(\frac{Wn_p}{T} - 0,5 \right)^2 - 1,14 \left(\frac{D_i}{T} \right) \right]} \quad (3.14)$$

$$p = 1,1 + 4 \left(\frac{Wn_p}{T} \right) - 2,5 \left(\frac{D_i}{T} - 0,5 \right)^2 - 7 \left(\frac{Wn_p}{T} \right)^4 \quad (3.15)$$

NAGATA (1975) apresenta, ainda, procedimentos para o cálculo do número de potência máximo (N_{Pmax}) de impelidores em vasos equipados com chicana. Tais processos são ajustes baseados em observações empíricas.

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 3.17.

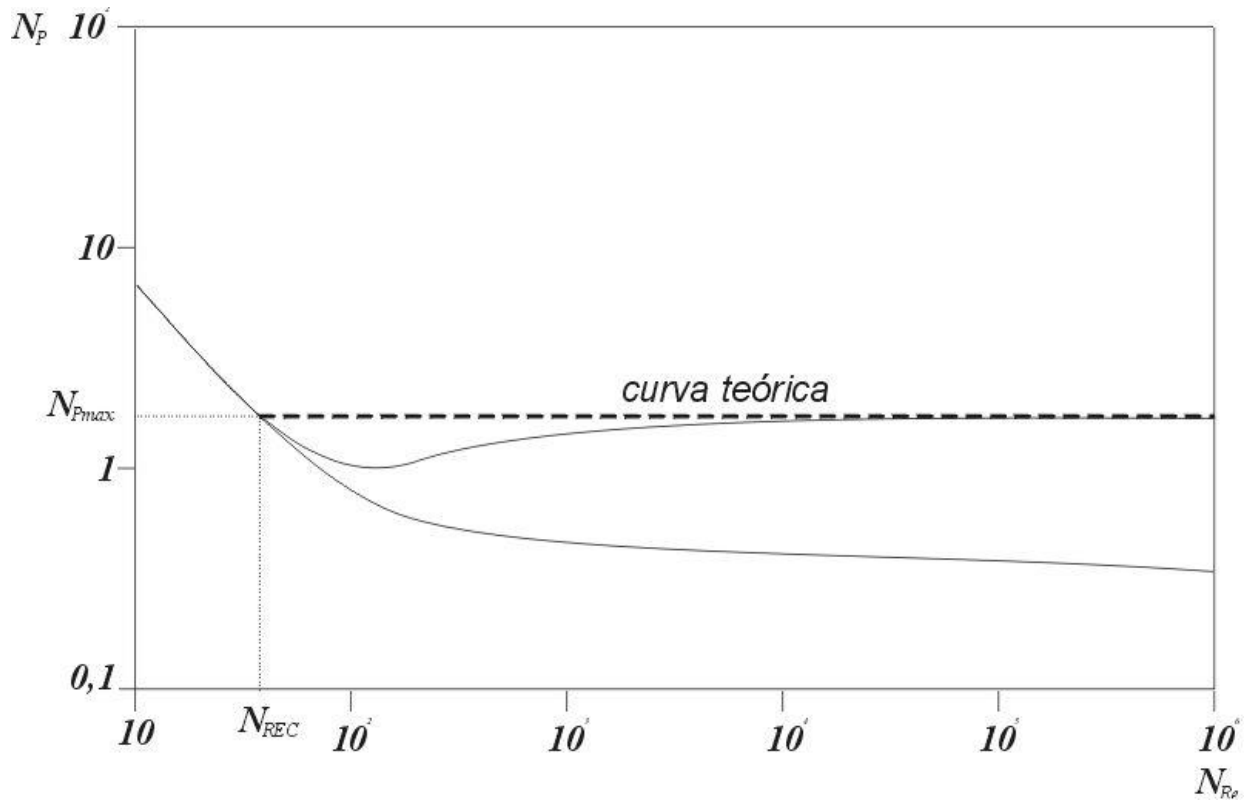


Figura 3.17 – Número de potência máximo *versus* número de Reynolds crítico. Fonte: Nagata (1975).

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

$$N_{ReC} = 10^{4(1-\text{sen}\theta)} \left[\frac{25}{Wn_p/T} \left(\frac{D_i}{T} - 0,4 \right)^2 + \left(\frac{Wn_p/T}{0,11 Wn_p/T - 0,0048} \right) \right] \quad (3.16)$$

O número de potência máximo (N_{Pmax}) pode ser calculado substituindo N_{ReC} no lugar de N_{Re} na equação (3.12).

Este número de potência máximo corresponde à condição em que as chicanas instaladas são as maiores. Chicanas com largura maior ou em número superior do que os nessa condição não influenciam mais o consumo de potência. Assim, essa condição pode ser representada por:

$$\left(\frac{W_B}{T} \right)^{1,2} n_B = 0,35 \quad (3.17)$$

Em que, w_B é a largura das chicanas e n_B o seu número.

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

$$N_{PB} = N_{P_{\max}} - \left[1 - 2,9 \left(\frac{B_w}{T} \right)^{1,2} n_B \right]^2 \left(N_{P_{\max}} - B \left(\frac{0,6}{1,6} \right)^P \right) \quad (3.18)$$

3.8 NÚMERO DE POTÊNCIA (N_P) DETERMINADO POR DICKEY (2003)

DICKEY(1984) define o número de potência (N_P) do impelidor de 4 pás a 45° , em um vaso com 4 chicanas e relações $D_i/T = 0,394$ e $W/D_i = 0,20$, trabalhando no regime turbulento como 1,37. Como já foi visto, o número de potência em regime turbulento é, aproximadamente, constante. Para a análise do número de potência de geometrias diferentes da apresentada, DICKEY (2003) multiplica o número de potência da geometria padrão por fatores de correção na forma:

$$N_P = 1,37 C_\alpha C_{n_p} C_W C_c C_{D_i} \quad (3.19)$$

Em que:

$$C_\alpha = \left(\frac{\text{sen } \theta}{\text{sen } 45^\circ} \right)^{2,5}, \text{ fator de correção do ângulo para: } 25^\circ \leq \theta \leq 70^\circ \quad (3.20)$$

$$C_{n_p} = 1,0 + 1,32 \log \left(\frac{n_p}{4} \right), \text{ fator de correção do n}^\circ \text{ de pás para: } 2 \leq n_p \leq 8 \quad (3.21)$$

$$C_W = \left(\frac{W/D_i}{0,20} \right)^{0,65}, \text{ fator de correção da largura das pás para: } W \geq 5t \text{ e } W/D_i \leq 1 \quad (3.22)$$

$$C_c = \left(\frac{C}{D_i} \right)^{-0,25}, \text{ fator de correção da posição vertical do impelidor } C/D_i \leq 1 \quad (3.23)$$

$$C_{D_i} \approx 1, \text{ fator de correção do diâmetro do impelidor (função variável)}. \quad (3.24)$$

Aplicando os fatores de correção acima chega-se ao número de potência turbulento para uma dada geometria. DICKEY (2003) não apresenta uma correlação para a variação de diâmetro (C_{D_i}), porém, baseado nos gráficos de $N_P \times N_{RE}$ apresentados por FASANO; BAKKER & PENNEY (1994) podemos escrever:

$$C_{D_i} = \left(\frac{D_i/T}{0,394} \right)^{-0,14} \quad (3.25)$$

Para o cálculo do número de potência correspondente a qualquer condição de fluxo, DICKEY (1984) e DICKEY (2003) apresenta um fator de correção de viscosidade em função do número de Reynolds. Para os impelidores de pás inclinadas o número de potência final é dado por:

$$f(N_{Re}) = 1 \text{ para: } N_{Re} = 900 \quad (3.26)$$

$$f(N_{Re}) = \exp(6,41 - 0,96 \ln(N_{Re}) + 0,0675 \ln(N_{Re})^2) \text{ para: } 5 \leq N_{Re} \leq 900 \quad (3.27)$$

$$f(N_{RE}) = \frac{38,4}{N_{Re}} \text{ para: } N_{Re} \leq 5 \quad (3.28)$$

Na confecção das curvas com os valores do número de potência turbulenta em função do ângulo das pás para os dois autores e utilizando o software CEREBROMIX (2004) são obtidas as curvas na figura 3.18. Para ângulos maiores e também impelidores maiores, os valores apresentados por NAGATA (1975) são mais conservativos do que os de DICKEY (2003), lembrando que este último fornece o fator de correção para ângulos até 70°. Já para impelidores menores, o valor de N_p calculado por DICKEY (2003) para ângulos maiores passa a ser mais conservativo.

Algumas simulações demonstraram que o comportamento da curva de NAGATA (1975) em função do ângulo das pás varia conforme são variadas as relações geométricas, principalmente as

dimensões das chicanas. Assim, ora NAGATA (1975) será mais conservativo, ora DICKEY (2003) será mais conservativo.

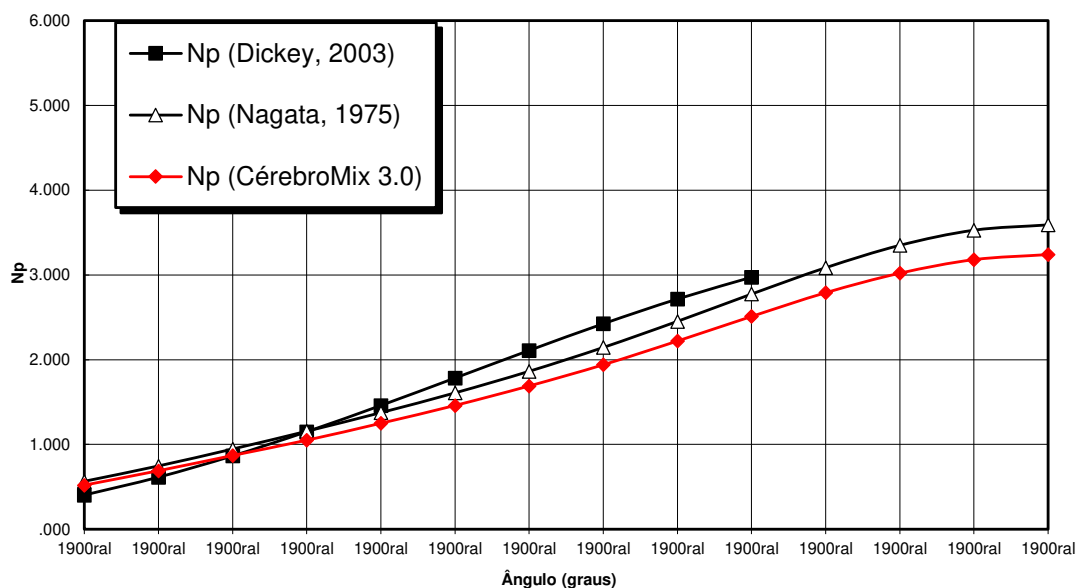


Figura 3.18 – Número de potência turbulento versus ângulo das pás ($D_i/T = 0,25$). Fonte: Souza (2011).

A Tabela 3.5, destacamos o número de potência determinado por NAGATA (1975) e DICKEY (1984) em regime turbulento do impelidor de 4 pás retas inclinadas, nas condições usuais em tanques com 4 chicanas.

Tabela 3.5 – Número de potência em regime turbulento do impelidor de 4 pás retas.

Autor	Número de Potência (N_p)
Nagata (1975)	($\theta = 90^\circ$) 5,23
	($\theta = 45^\circ$) 1,57
	($\theta = 30^\circ$) 0,79
Dickey (1984)	1,37

Fonte: elaboração própria.

3.9 PASSOS PARA PROJETO DE UM SISTEMA DE AGITAÇÃO

A finalidade genérica e principal de um agitador é, basicamente, a operação de produzir movimentos mais ou menos regulares no interior de um fluido, independentemente da finalidade. Para NAGATA (1975), a operação básica de agitação em processos industriais é a mais difícil de se sujeitar a uma análise científica. Não existe uma fórmula verdadeira ou equação generalizada para pré-determinar a velocidade de um agitador sob determinadas condições que resulte em eficiência de processo.

De acordo com SOUZA & RAZUK (1996), o sistema de agitação é, também, integrado à geometria do tanque para propiciar as melhores condições para o processo e a maior economia operacional possível. Por sua vez, a geometria do tanque resulta da otimização do uso de chapas que reduz o custo do equipamento, diminuindo o número de cortes e de soldas e com uma padronização que atende a racionalização da produção e às necessidades do mercado.

O movimento da lâmina do agitador no fluido e o movimento resultante do fluido pelas paredes provocam um atrito característico e um arraste dependentes da velocidade de rotação, do modelo das lâminas e do tanque.

Nesse sentido, o projeto de um sistema de agitação deve levar em consideração vários fatores e seguir determinadas etapas. Basicamente, esse dimensionamento passa por duas fases:

- a) o dimensionamento do processo; e
- b) o dimensionamento do equipamento.

3.9.1 Dimensionamento do Processo

O dimensionamento do processo consiste na identificação do problema a ser resolvido, dos fenômenos envolvidos e das características físico-químicas das substâncias que deverão ser processadas. Nesta fase, devem ser definidos os seguintes tópicos (SOUZA, 2011):

- a) definição do produto a ser agitado e suas características;
- b) volume desejado de produção;
- c) tipo de produção, se por batelada ou contínua;
- d) conhecimento dos componentes a serem utilizados para se chegar ao produto;

- e) características físicas e químicas, quando for o caso, de cada componente do produto;
- f) definição dos processos que tais componentes irão passar para chegar ao produto final;
- g) a duração do tempo de cada etapa do processo e temperaturas de trabalho;
- h) definir a intensidade de agitação ideal para trabalhar em cada fase do processo;
- i) altura máxima de líquido no tanque a ser agitado;
- j) altura mínima de líquido no tanque a ser agitado;
- k) estabelecer e respeitar os limites de agitação para cada fase do processo.

3.9.2 Dimensionamento do Equipamento

Ao detalhar os aspectos de processos, o projetista estará compilando os dados necessários à próxima fase: o dimensionamento do equipamento. Nesta nova fase, já com os dados necessários de processos em mãos, cabe ao projetista avaliar quais as configurações de sistema são viáveis aos processos desejados e, dentre elas, selecionar a que melhor atende aos requisitos anteriormente definidos. Uma nova série de aspectos deverá ser definida em relação ao dimensionamento do equipamento (SOUZA, 2011):

- a) identificar o melhor tipo de impelidor a ser utilizado;
- b) definir as dimensões de ideias do tanque, quando este não estiver pré-determinado;
- c) verificar quantos impelidores serão necessários;
- d) definir as dimensões dos impelidores (geometria);
- e) disposição que será instalada os impelidores;
- f) prever os tempos de misturas;
- g) verificar as condições sanitárias do agitador, partes em contato com o produto;
- h) definir se utilizará eixo bi-apoiado com mancal de fundo ou em balanço; e
- i) informar a potência consumida pelo sistema.

Ao contemplar tais parâmetros, o projetista do equipamento terá um esboço bastante detalhado do sistema, porém, não completamente definido, pois várias configurações poderão atendê-lo durante a fase de seleção dos componentes do agitador, tais como: tipos de acionamentos, vedações, etc. Normalmente, a decisão entre uma ou outra opção será baseada, principalmente em

aspectos econômicos, sejam eles referentes ao processo ou aos investimentos, e só estará totalmente definida após o detalhamento geral do projeto do sistema agitado (SOUZA, 2011).

3. 10 MEDIÇÃO DE POTÊNCIA EM UNIDADES PILOTOS DE AGITAÇÃO

A natureza predominantemente empírica do processo de agitação de fluidos deixa evidente que grande parte dos dados a respeito dos sistemas de agitação disponíveis na literatura são resultados de ensaios em laboratório e da prática industrial de pesquisadores e engenheiros. Desde o princípio do uso desses sistemas 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.

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).

3.10.1 Medição por Parâmetros Elétricos

Conforme informado por BATES, FONDY & FENIC (1966), as características do acionamento de um equipamento piloto são diferentes das características de um acionamento para um equipamento industrial. Enquanto no segundo procura-se minimizar o custo para uma faixa de operação, no primeiro, busca-se um melhor controle da velocidade em uma larga faixa de rotação sob forças variáveis, como as produzidas pela variação nas propriedades do fluido, além da facilidade de montagem e desmontagem dos impelidores e operação do sistema.

Ainda de acordo com BATES, FONDY & FENIC (1966), a utilização dos parâmetros elétricos pode levar em consideração as perdas nos componentes de transmissão, selos e mancais, além das curvas de performance do motor fornecidas pelo fabricante. Para NAGATA (1975), essas perdas são estimativas, sendo difícil a aquisição de valores precisos.

A medição da potência é feita de forma indireta através da medida do torque e rotação do eixo do impelidor ou, ainda, dos parâmetros elétricos do acionamento, ou seja, a corrente e a tensão

consumida pelo motor elétrico como apresentado por FREITAS (1993) e mostrado na Figura 3.19, utilizando acessórios mais avançados do que na época estudada por NAGATA (1975).

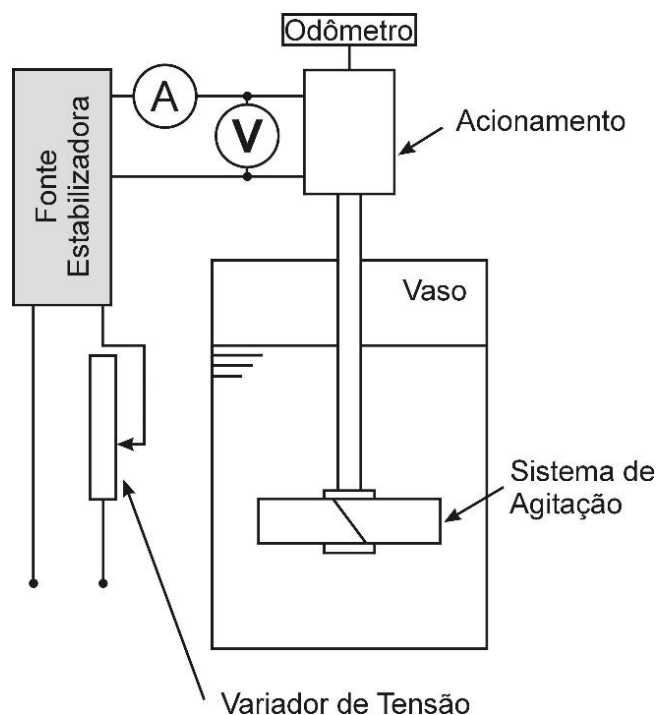


Figura 3.19 – Medição por parâmetros elétricos. Fonte: Freitas (1993).

3.10.2 Medição do torque produzido no conjunto de acionamento

O método utilizado por OLDSHUE (1983) para a medição de cargas pequenas em equipamentos de laboratório consiste na montagem do conjunto de acionamento sobre um mancal de baixo atrito. Assim, todo o conjunto de acionamento gira livremente.

Esse movimento do conjunto de acionamento é limitado apenas por um dispositivo de medição de força, como um dinamômetro ou uma balança. O esquema desse sistema apresentado por BATES, FONDY & FENIC (1966) é ilustrado pela Figura 3.20. NAGATA (1975) usou esse método para pequenas potências em que o acionamento e o impelidor eram bastante leves e foram suspensos por um pivô ajustado por um mancal de rubi. O atrito estático desse último era desprezível, cerca de dez vezes menor do que o de seu transdutor de torque – que será descrito adiante –, e o ângulo de deslocamento lido por um estroboscópio, entretanto, o limite superior de carregamento era baixo, limitando a sua aplicação.

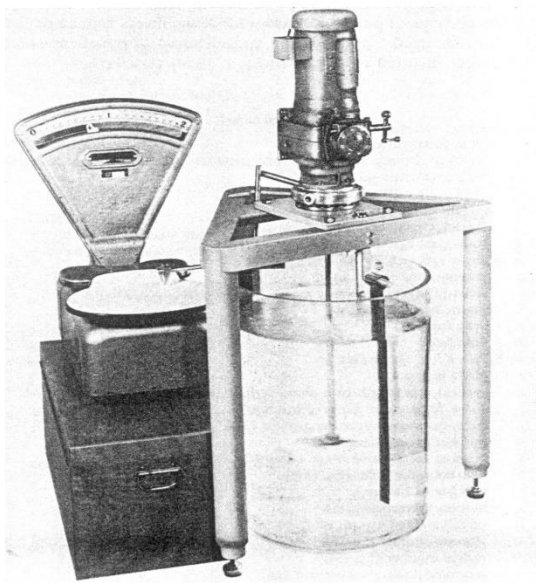


Figura 3.20 – Equipamento piloto com medição de torque produzido no acionamento. Fonte: Bates, Fondy & Fenic (1966).

3. 10. 3 Medição do Torque Produzido no Tanque

Apresentado por NAGATA (1975) e também por BATES, FONDY & FENIC (1966), esse processo é semelhante ao método descrito acima, porém, neste caso, o tanque é montado sobre um mancal de baixo atrito podendo girar livremente. Como citado anteriormente, apenas um dispositivo de medição de torque limita o movimento do vaso segundo mostrado na Figura 3.21. Segundo BATES, FONDY & FENIC (1966), esse método tem a desvantagem de ser aplicável apenas para impelidores de eixos verticais e coincidentes com o eixo do tanque.

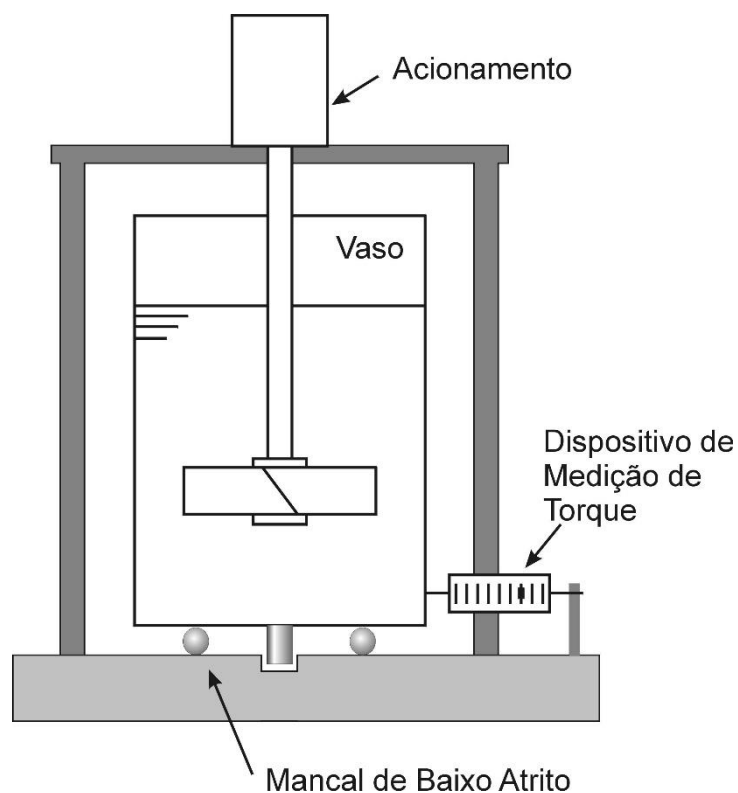


Figura 3.21 – Esquema de medição do torque produzido no tanque. Fonte: Bates, Fondy & Fenic (1966).

3.10.4 Medição com Transdutores de Torque (Torquímetro)

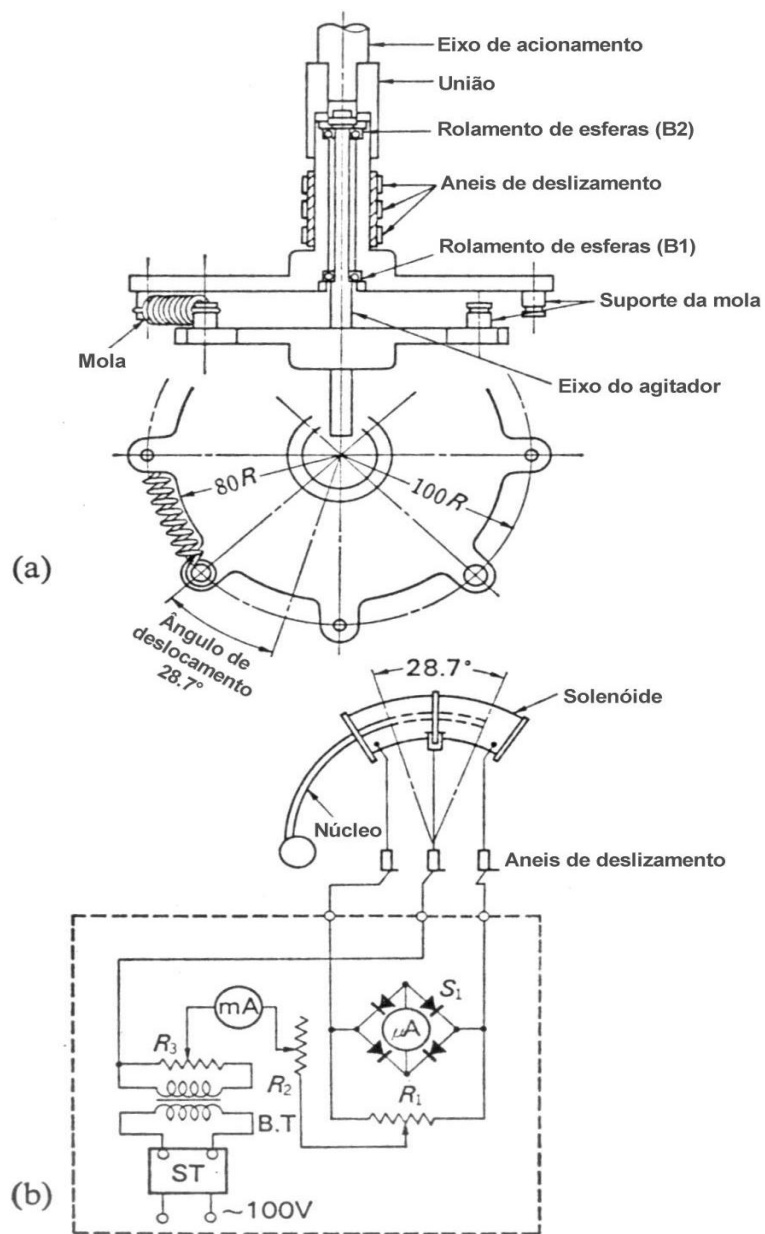
OLDSHUE (1983) indica este método para cargas mais elevadas enquanto NAGATA (1975) utiliza diversos transdutores de torque para diferentes faixas de operação. Os transdutores de torque são basicamente dispositivos instalados no eixo do impelidor, que é seccionado para recebê-lo. O transdutor de torque mede a deflexão angular relativa entre a porção superior e inferior do eixo por meio de dispositivos elétricos como reostatos, indutores ou extensômetros.

Nessa perspectiva, NAGATA (1975) descreve o dinamômetro por ele utilizado conforme a ilustrado na Figura 3.22, como sendo o aparelho que mede a reação ao torque composto por dois discos paralelos, um fixo no eixo do acionamento e outro no do impelidor, conectados por quatro molas helicoidais tangenciais ao eixo e igualmente espaçadas. A medida do torque é dada pelo ângulo de deslocamento entre os dois discos indicado por um medidor por indutância composto por um solenóide fixo ao disco superior e um núcleo de aço fixo no disco inferior. A indutância do conjunto varia de acordo com o ângulo de deslocamento relativo entre os dois discos e é medida

em microamperes. 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. Mesmo considerando que já se passaram mais de quarenta anos ainda é referência para os estudiosos.

Para OLDSHUE (2004), a grande quantidade de ferramentas disponíveis na atualidade, com altos recursos tecnológicos, não foi suficiente para o aparecimento de novos trabalhos em função da necessidade de investimentos de recurso e de tempo que necessitam as referidas pesquisas, trazendo forte atraso tecnológico para o setor em geral.



(a) Dinamômetro No. 2A. (Medidor por indutância).
 (b) Diagrama esquemático mostrando o método de medição do deslocamento angular do dinamômetro No. 2A.

Figura 3.22 – Transdutor de torque. Fonte: Nagata (1975).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

Para realização dos ensaios experimentais foram requeridos elementos que podemos resumir, inicialmente, em:

- a) unidade piloto de agitação de fluidos completa com capacidade para 50 litros;
- b) impelidores tipo pás retas: 30°, 45°, 60° e 90°;
- c) computador para coleta de dados diretamente das unidades pilotos;
- d) *software* SEW - *Movitools* 4.10, ferramenta MD *SCOPE*, para leitura de dados do torque e potência fornecida pelo conversor de frequência;
- e) *software* MAGTROL – “*Motor testing software, torque 1.0, revision 1.0*”, para leitura de dados do torque e potência fornecido pelo torquímetro;
- f) instrumentos de medição: paquímetro, trena, micrômetro, termômetro digital e ferramentas para as unidades piloto; e
- g) fluidos para ensaio: água em temperatura ambiente.

4.1.1 Unidade Piloto de Agitação com 50 L

A unidade piloto de agitação de 50 litros útil é composta, basicamente, de uma estrutura montada em um chassi móvel com tanque de acrílico, agitador fixado por castelo com acoplamentos e mancais, painel elétrico de proteção e comandos com saídas para computador e torquímetro.

Na Figura 4.1, ilustramos a unidade piloto de 50 litros em desenho de duas dimensões na escala da unidade em referência, assim como a Figura 4.2, a unidade é representada em três dimensões e na Figura 4.3 uma fotografia.

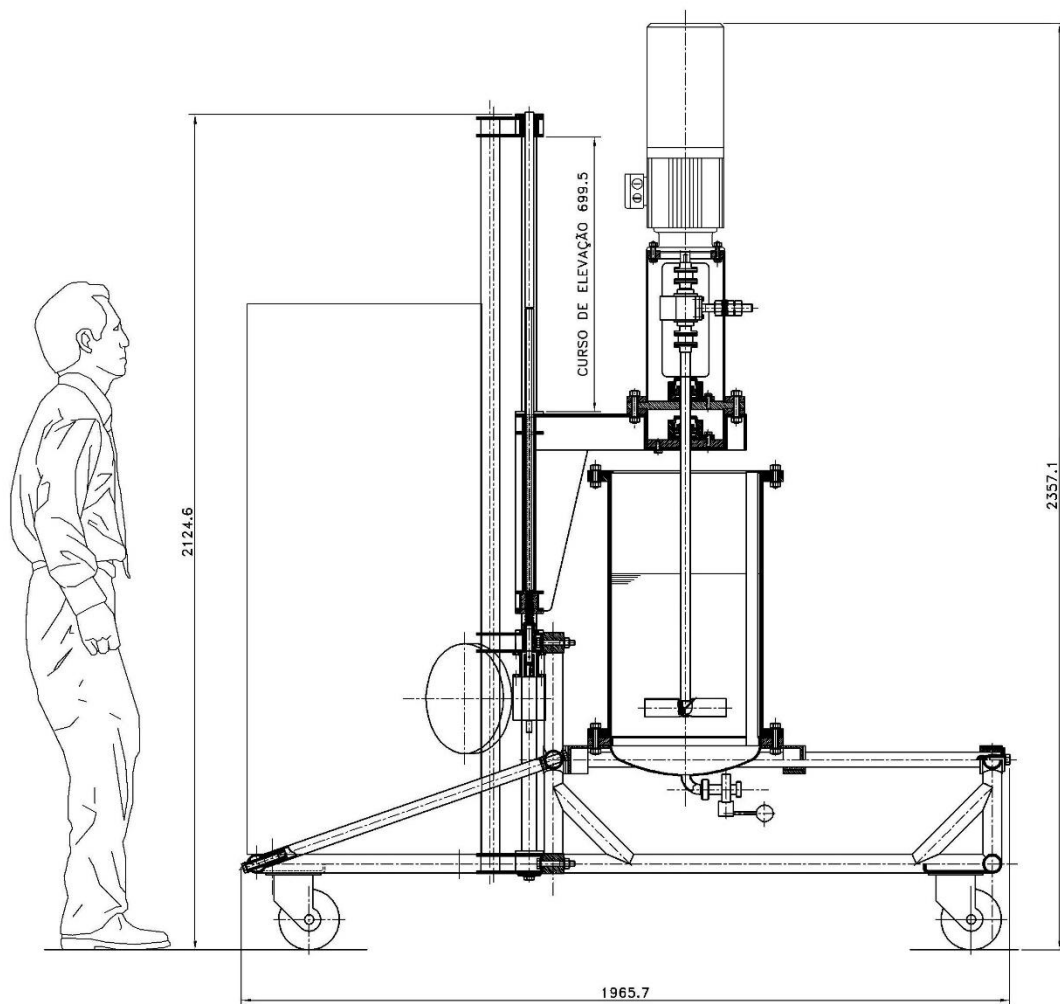


Figura 4.1 – Desenho em duas dimensões da unidade piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).



Figura 4.2 – Desenho em três dimensões da unidade piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).



Figura 4.3 – Fotografia da unidade piloto de 50 L e o sistema de aquisição de dados para leitura da velocidade rotacional e medidas de torque. Fonte: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (arquivo pessoal).

4.1.1.1 Tanque de mistura e chicanas do piloto de 50 L

O tanque da unidade piloto de 50 litros dispõe de fundo toro esférico ASME 10%, com entrada para três chicanas (separadas a 120° graus) ou quatro chicanas (separadas a 90° graus), construída em aço inoxidável 316 L, dotado de flange com parafusos de fixação, acoplado à parte cilíndrica construída em acrílico transparente, conforme Figura 4.4.

Na Figura 4.5, vê-se o tanque da unidade piloto com indicação da simbologia adotada em agitação de fluidos, destacando, na sequência, as dimensões do tanque e dos defletores na Tabela 4.1.

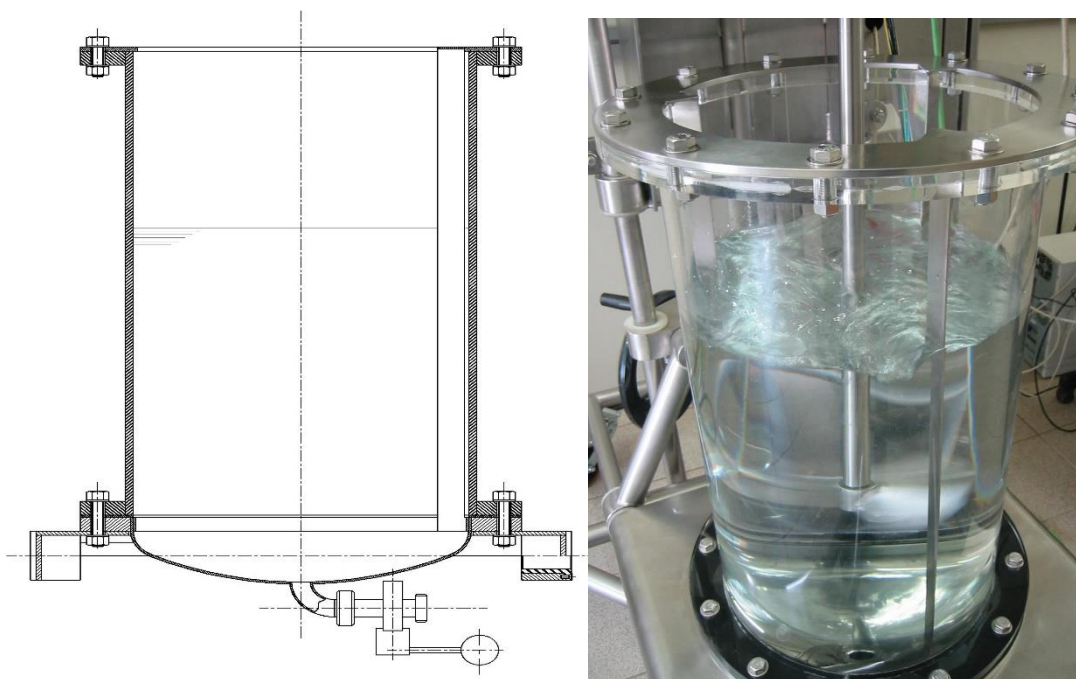


Figura 4.4 – Tanque do piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).

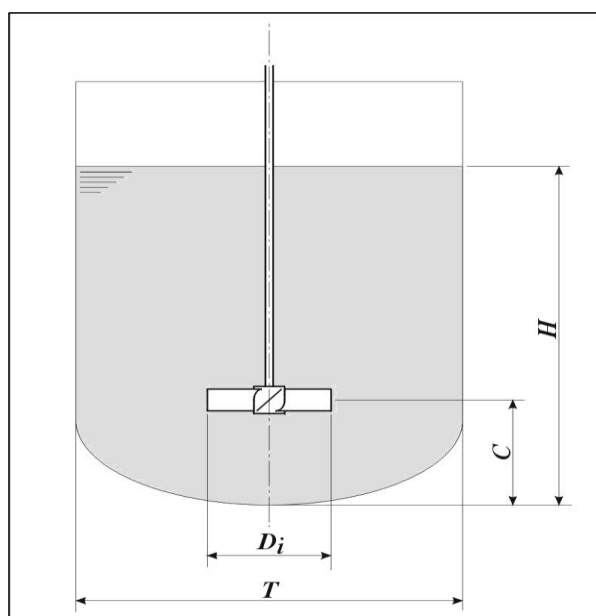


Figura 4.5 – Dimensões principais do tanque piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).

Tabela 4.1– Dimensões do tanque de 50 L e chicanas.

Tanque de 50 litros	
Diâmetro interno (T)	380 mm
Altura do líquido (H = T)	380 mm
Altura cilíndrica (Hc)	693 mm
Distância do impelidor ao fundo (C=1/3 H)	126,7 mm
Chicanas	
Número de chicanas	3 e 4
Largura da chicana (w_B) ($w_B/T = 0,1$)	38 m

Fonte: elaboração própria.

4. 1. 1. 2 Estrutura de sustentação do piloto de 50 L

A estrutura de sustentação de todos os componentes da unidade piloto de agitação foi construída de tubos de aço inoxidável 304, montada sob quatro rodízios, sendo dois fixos e dois giratórios com freio, dimensionada para o peso total do sistema representada pela Figura 4.6.

A estrutura é composta de um sistema manual que permite a elevação de todo o conjunto do agitador através de um eixo sem fim, dotado de redutor com volante, com a finalidade de posicionamento da altura do impelidor em relação ao fundo do vaso, assim como possibilitar a troca dos impelidores de acordo com o desenho representado pela Figura 4.7.

O projeto da estrutura autoriza também posicionar o eixo do agitador na posição descentralizada uma vez que sua mesa pode ser movimentada com todo o tanque no sentido horizontal da base. Desta forma, a estrutura possibilita flexibilidade nos dois sentidos: **Vertical** - deslocar o conjunto de agitação e posicionar o impelidor na altura desejada em relação ao fundo do tanque; **Horizontal** - deslocar a mesa com o tanque e posicionar o eixo do agitador na forma centrada e descentrada em várias distâncias.

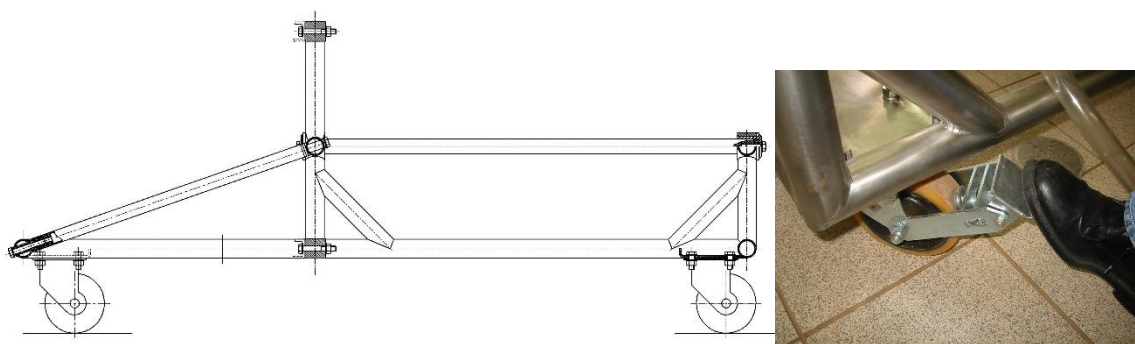


Figura 4.6 – Estrutura móvel da unidade piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).

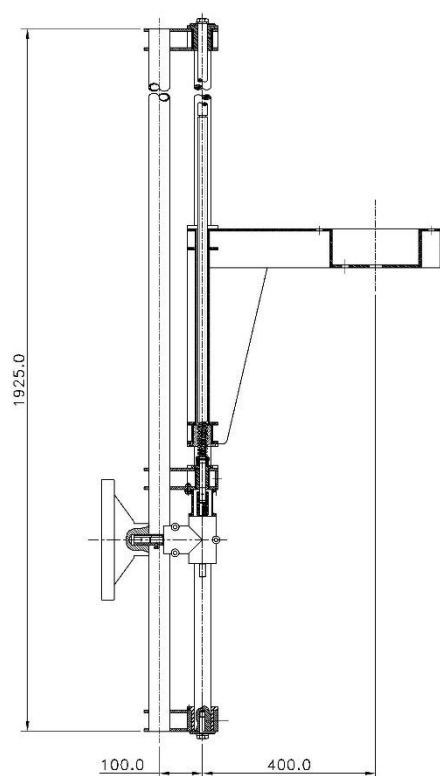


Figura 4.7 – Sistema de elevação do agitador da unidade piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).

4.1.1. 3 Conjunto de agitação do piloto de 50 L: motor e castelo com acessórios

O conjunto de agitação é composto, basicamente, pelo acionamento (motor), 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, conforme ilustrado o conjunto na Figura 4.8. O torquímetro, então, é posicionado entre o motor e a primeira caixa de mancal, de modo que qualquer flexão no eixo não chegue acentuada ao torquímetro.

Utilizamos o acoplamento do tipo mola de fornecimento da empresa Magtrol S.A, sendo um elemento considerado rígido para o torque e flexível na direção de outros movimentos, conforme ilustrado na Figura 4.9.

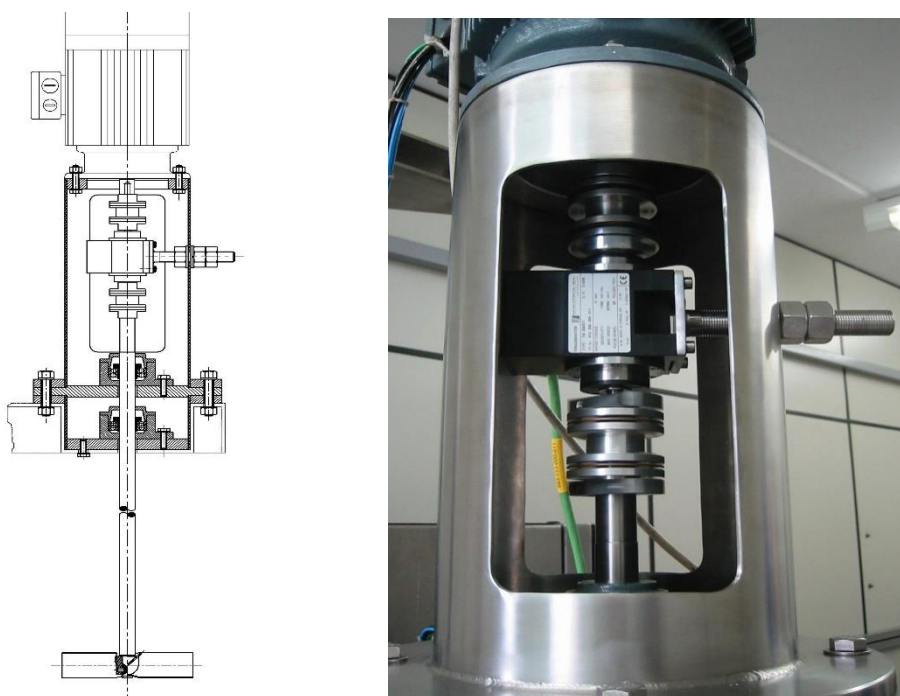


Figura 4.8 – Conjunto de agitação do piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).



Figura 4.9 – Acoplamentos utilizados no piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).

4.1.1.4 Painel elétrico de proteção e comando do piloto de 50 L

Utilizamos um quadro elétrico fabricado pela SEW do Brasil, denominado de autoportante, construído em aço inoxidável, montado sob a estrutura da unidade de agitação, ilustrado na Figura 4.10 com os seguintes equipamentos e acessórios SEW:

- a) conversor de frequência de 3,0 kW, MDV60A0030.5A3-4-00; (0826483x), comunicação através de conector DB9 (fêmea);
- b) interfase expansão DIO11A, (8227268);
- c) resistor de frenagem OH306, (98 6854 2);
- d) interfase serial UWS11A, (822689X);
- e) cabo extensor FKG11A; (8223033);
- f) fonte 24Vcc, UWU51A, (1874411).



Figura 4.10 – Parte frontal e interna do painel elétrico do piloto de 50 L. Fonte: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (arquivo pessoal).

O conversor dispõe de cabo de interface de comunicação serial USS21A para comunicação com o *software* SEW, necessitando utilizar o MD SCOPE conjugado com um programa interno do

Movidrive para mostrar o torque exigido da ponta do eixo do motor, bem como a potência mecânica fornecida pelo motor em um dado momento.

A alimentação do painel e motor é realizada por meio de duas tomadas industriais de quatro polos 3P+T, situadas na lateral do painel (figura 4.11), destacando o espaço na parte superior para alojamento de hardware do torquímetro Magtrol TM 307.

Comando por meio de botões “Liga/Desliga”, “CW/CCW”, “Velocidade e Emergência”, sinaleiro “Falha” e sinais analógicos em bornes. Inclui, circuitos auxiliares para tomada interna (220Vca) e fonte (24Vcc). Alimentação principal 380Vca e comando em 24Vcc / 220Vca.



Figura 4.11 – Tomadas de alimentação do painel elétrico do piloto de 50 L. Fonte: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (arquivo pessoal).

4.1.1.5 Torquímetro com acessórios do piloto de 50 L

O sistema de medição de torque fornecido pela Magtrol é composto por um transdutor de torque, um mostrador digital (*display*) e o *software* de aquisição de dados instalado em um microcomputador, conforme mostrado na Figura 4.12.

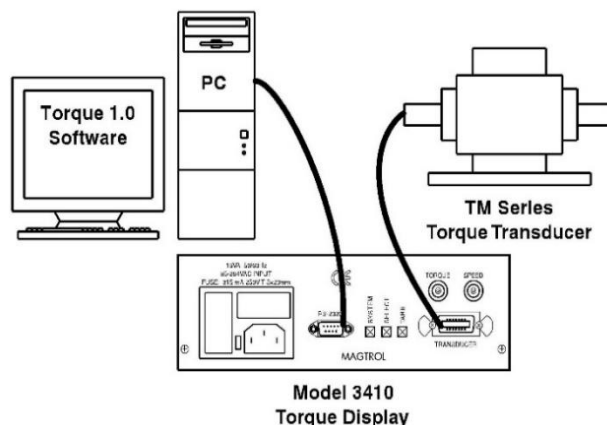


Figura 4.12 – Esquema de medição de torque por torquímetro do piloto de 50 L. Fonte: Souza (2011).

O transdutor de torque Magtrol TM 307 de fornecimento da empresa Magtrol, PN 415-307-000-011, representado pela Figura 4.13, permite uma medição precisa de torque e velocidade.



Figura 4.13 – Torquímetro TM 307 fornecido pela Magtrol. Fonte: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (arquivo pessoal).

O transdutor de torque nada mais é do que um módulo de condicionamento eletrônico com as seguintes características:

Condicionamento integrado de torque e velocidade rotacional:

- a) Torque Nominal: 10 Nm.
- b) Precisão: < 0,1%
- c) Capacidade de sobrecarga: 200%
- d) Aplicações de alta velocidade: até 50.000 rpm.
- e) Alta imunidade a ruídos elétricos.
- f) Alimentação em corrente contínua (20 ou 321 V).
- g) Detecção imediata de velocidade.
- h) Ajuste dos limites de frequência do sinal de torque.
- i) Eixo de aço inoxidável.

O mostrador digital do torquímetro Magtrol 3410 apresenta o torque, velocidade rotacional e potência mecânica. Utiliza cabo modelo ER113/011, para interligação do torquímetro com o mostrador. Na Figura 4.14, destaca-se a parte frontal do mostrador e a Figura 4.15, a parte traseira.

Seus recursos incluem:

- a) seleção de unidades (inglesas, métricas e SI);
- b) grande *display* fluorescente de fácil leitura;
- c) autoteste;
- d) indicação de sobrecarga;
- e) função Tara; e
- f) saídas de velocidade, torque e potência.



Figura 4.14 – Parte Frontal do *hardware* modelo 3410 f fornecido pela Magtrol. Fonte: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (arquivo pessoal).



Figura 4.15– Parte traseira do hardware modelo 3410 fornecido pela Magtrol. Fonte: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (arquivo pessoal).

4.1.2 Impelidores de Quatro Pás Retas Inclinadas

As variáveis utilizadas para os impelidores de pás retas são: largura da pá de 14% a 30% em relação ao diâmetro do impelidor (W/D_i), diâmetro do impelidor de 25% a 70% em relação ao diâmetro do tanque e o número de pás do impelidor (n_p) fixado em quatro pás, conforme ilustração da Tabela 4.2 a 4.6.

Tabela 4.2 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $W/D_i = 0,14$.

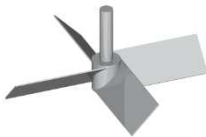
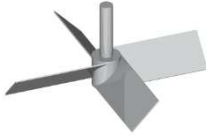
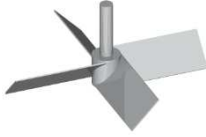
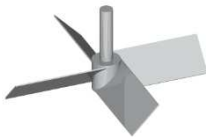

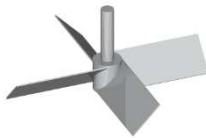
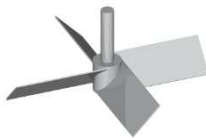
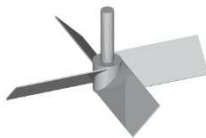
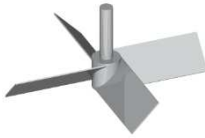
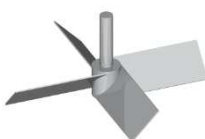
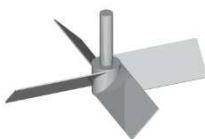
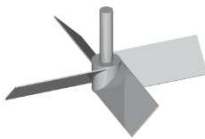
Tipo do impelidor	Parâmetros geométricos			
Piloto de 50 Litros	Modelo	D_i/T	D_i (mm)	W (mm)
 30°	AT1	0,25	95	13,30
	BT1	0,33	125,4	17,56
	CT1	0,40	152	21,28
	DT1	0,45	171	23,94
	ET1	0,55	209	29,26
	FT1	0,70	266	37,24
 45°	AQ1	0,25	95	13,30
	BQ1	0,33	125,4	17,56
	CQ1	0,40	152	21,28
	DQ1	0,45	171	23,94
	EQ1	0,55	209	29,26
	FQ1	0,70	266	37,24
 60°	AS1	0,25	95	13,30
	BS1	0,33	125,4	17,56
	CS1	0,40	152	21,28
	DS1	0,45	171	23,94
	ES1	0,55	209	29,26
	FS1	0,70	266	37,24
 90°	AN1	0,25	95	13,30
	BN1	0,33	125,4	17,56
	CN1	0,40	152	21,28
	DN1	0,45	171	23,94
	EN1	0,55	209	29,26
	FN1	0,70	266	37,24

Tabela 4.3 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $W/D_i = 0,17$.

Tipo do impelidor	Parâmetros geométricos			
Piloto de 50 Litros	Modelo	D_i / T	D_i (mm)	W (mm)
 30°	AT2	0,25	95	16,15
	BT2	0,33	125,4	21,32
	CT2	0,40	152	25,84
	DT2	0,45	171	29,07
	ET2	0,55	209	35,53
	FT2	0,70	266	45,22
 45°	AQ2	0,25	95	16,15
	BQ2	0,33	125,4	21,32
	CQ2	0,40	152	25,84
	DQ2	0,45	171	29,07
	EQ2	0,55	209	35,53
	FQ2	0,70	266	45,22
 60°	AS2	0,25	95	16,15
	BS2	0,33	125,4	21,32
	CS2	0,40	152	25,84
	DS2	0,45	171	29,07
	ES2	0,55	209	35,53
	FS2	0,70	266	45,22
 90°	AN2	0,25	95	16,15
	BN2	0,33	125,4	21,32
	CN2	0,40	152	25,84
	DN2	0,45	171	29,07
	EN2	0,55	209	35,53
	FN2	0,70	266	45,22

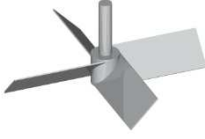

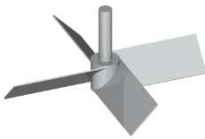
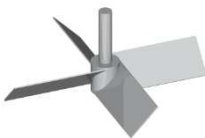
Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.4 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $W/D_i = 0,20$.

Tipo do impelidor	Parâmetros geométricos			
Piloto de 50 Litros	Modelo	D_i / T	D_i (mm)	W (mm)
 30°	AT3	0,25	95	19,00
	BT3	0,33	125,4	25,08
	CT3	0,40	152	30,40
	DT3	0,45	171	34,20
	ET3	0,55	209	41,80
	FT3	0,70	266	53,20
 45°	AQ3	0,25	95	19,00
	BQ3	0,33	125,4	25,08
	CQ3	0,40	152	30,40
	DQ3	0,45	171	34,20
	EQ3	0,55	209	41,80
	FQ3	0,70	266	53,20
 60°	AS3	0,25	95	19,00
	BS3	0,33	125,4	25,08
	CS3	0,40	152	30,40
	DS3	0,45	171	34,20
	ES3	0,55	209	41,80
	FS3	0,70	266	53,20
 90°	AN3	0,25	95	19,00
	BN3	0,33	125,4	25,08
	CN3	0,40	152	30,40
	DN3	0,45	171	34,20
	EN3	0,55	209	41,80
	FN3	0,70	266	53,20


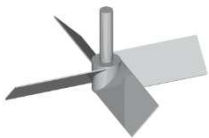
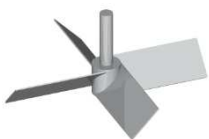
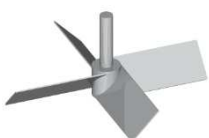
Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.5 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $W/D_i = 0,25$.

Tipo do impelidor	Parâmetros geométricos			
Piloto de 50 Litros	Modelo	D_i / T	D_i (mm)	W (mm)
 30°	AT4	0,25	95	23,75
	BT4	0,33	125,4	31,35
	CT4	0,40	152	38,00
	DT4	0,45	171	42,75
	ET4	0,55	209	52,25
	FT4	0,70	266	66,50
 45°	AQ4	0,25	95	23,75
	BQ4	0,33	125,4	31,35
	CQ4	0,40	152	38,00
	DQ4	0,45	171	42,75
	EQ4	0,55	209	52,25
	FQ4	0,70	266	66,50
 60°	AS4	0,25	95	23,75
	BS4	0,33	125,4	31,35
	CS4	0,40	152	38,00
	DS4	0,45	171	42,75
	ES4	0,55	209	52,25
	FS4	0,70	266	66,50
 90°	AN4	0,25	95	23,75
	BN4	0,33	125,4	31,35
	CN4	0,40	152	38,00
	DN4	0,45	171	42,75
	EN4	0,55	209	52,25
	FN4	0,70	266	66,50

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4.6 – Impelidores de pás retas inclinadas do piloto de 50 L para $W/D_i = 0,30$

Tipo do impelidor	Parâmetros geométricos			
Piloto de 50 Litros	Modelo	D_i / T	D_i (mm)	W (mm)
 30°	AT5	0,25	95	28,50
	BT5	0,33	125,4	37,62
	CT5	0,40	152	45,60
	DT5	0,45	171	51,30
	ET5	0,55	209	62,70
	FT5	0,70	266	79,80
 45°	AQ5	0,25	95	28,50
	BQ5	0,33	125,4	37,62
	CQ5	0,40	152	45,60
	DQ5	0,45	171	51,30
	EQ5	0,55	209	62,70
	FQ5	0,70	266	79,80
 60°	AS5	0,25	95	28,50
	BS5	0,33	125,4	37,62
	CS5	0,40	152	45,60
	DS5	0,45	171	51,30
	ES5	0,55	209	62,70
	FS5	0,70	266	79,80
 90°	AN5	0,25	95	28,50
	BN5	0,33	125,4	37,62
	CN5	0,40	152	45,60
	DN5	0,45	171	51,30
	EN5	0,55	209	62,70
	FN5	0,70	266	79,80

Fonte: elaboração própria.

4. 1.3 *Softwares* Utilizados

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 *Software* é destinado aos parâmetros elétricos da SEW, “Movitools 4.10, ferramenta MD SCOPE”, para leitura de dados do torque e da potência fornecida pelo conversor de frequência instalado no quadro elétrico do equipamento.

4. 1.4 Fluido de Ensaio, Instrumentos e Ferramentas

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. Os instrumentos utilizados são: paquímetro, micrometro, termômetro na escala de 0 a 100°C , trena de $3,0 \text{ m}$ de comprimento, ferramentas em geral para troca de impelidores, manutenção e ajuste da unidade piloto.

4.2 MÉTODOS (MEDIÇÕES DE TORQUE)

O método utilizado para as medições de torque com a finalidade de levantamento da potência consumida é realizado em dupla situação: medição por transdutor de torque (torquímetro) e medição através dos parâmetros elétricos (tensão e amperagem). A intenção de adotar dois métodos é de garantir uma eficiência maior na obtenção dos dados experimentais, uma vez que o método dos parâmetros elétricos tende a considerar a potência consumida por todo o sistema (agitador), enquanto que o método do transdutor de torque levará em conta o consumo de potência do impelidor.

4.2.1 Obtenção Dos Dados Pelos Parâmetros Elétricos – SEW

A medição por tensão e amperagem é obtida através do quadro elétrico da unidade piloto, cujo componente principal é o conversor de frequência. O conversor de frequência dispõe de saída serial para conexão com o computador que, através do *software* desenvolvido pelo fabricante do

conversor denominado de Movitools 4.10, SEW, gera os dados elétricos que são convertidos em torque e potência consumida.

O resultado da potência medida através de parâmetros elétricos leva em consideração todo o consumo de potência da instalação, isto é: motor, acoplamentos e mancais, sendo considerado o torque total do sistema, ou seja, do sistema de agitação.

4.2.2 Obtenção dos Dados pelo Transdutor de Torque (Torquímetro) - MAGTROL.

A medição do torque é obtida diretamente do torquímetro, interligado com seu display digital acoplado no computador que, por meio do *software* desenvolvido pelo fabricante do torquímetro, denominado de Magtrol, são obtidos os dados de torque e convertidos em potência.

4.2.3 Metodologia Adotada para Projeto da Unidade Piloto de 50 L

Para o projeto das unidades pilotos foram consideradas as duas fases que propiciam a eficiência do sistema, sendo elas: o dimensionamento do processo e o dimensionamento do equipamento.

4.2.3.1 *Dimensionamento do processo*

O dimensionamento do processo consiste na identificação dos objetivos do estudo, nos fenômenos envolvidos e das características físico-químicas dos fluidos que serão utilizados nos testes. Nessa fase, foram definidos os seguintes tópicos:

- a) produto a ser agitado: água;
- b) volume no processo: 50 litros;
- c) tipo de produção: por batelada;
- d) características físico-químicas do produto de teste: água na temperatura ambiente, com massa específica de 997 Kg/m^3 e viscosidade de $0,8899 \text{ cP}$;
- e) definição do processo: agitação do fluido, rotação do impelidor variável entre a mínima e a máxima, definida para cada impelidor (total de 120 impelidores);

- f) a duração do tempo de cada etapa de coleta de dados e temperatura de trabalho: o tempo para tomada dos valores é de, no mínimo, 10 segundos (suficiente para estabilização da medida após o aumento da rotação) e a temperatura do fluido é ambiente, considerando $22^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$;
- g) altura máxima de líquido no tanque a ser agitado: é sempre um para um com relação ao diâmetro do tanque, sem variação;
- h) limites de agitação para cada fase do processo: respeitada rotação máxima para cada impelidor;
- i) características críticas dos componentes da mistura e do produto final: sem componentes de mistura, objetivando apenas verificação do torque.

4.2.3.2 *Dimensionamento da unidade piloto*

Ao detalhar os aspectos de teste, compilaram-se os dados necessários para a próxima fase: o dimensionamento do equipamento. Nesta nova fase, já com os dados necessários de teste em mãos, coube avaliar quais as configurações de sistemas viáveis desejados e, dentre eles, selecionar as que melhor atendem aos requisitos anteriormente definidos. Por conseguinte, uma nova série de aspectos foi definida em relação ao dimensionamento da unidade piloto:

- a) tipos de impelidores a serem testados: definidos no item materiais;
- b) dimensões ideais do tanque: dimensões adotadas são de, no mínimo, 1,5 vez a altura do costado em relação ao diâmetro do tanque, uma vez que irá trabalhar sempre com relação de 1,0 para 1,0 e não poderá haver o jorro ou derramamento propriamente dito;
- c) número de impelidores serão necessários: o objetivo é a utilização de apenas um impelidor no eixo-árvore em cada teste;
- d) dimensões dos impelidores (geometria): foram definidos no item “materiais”, com base no diâmetro máximo (diâmetro do tanque) da unidade piloto;
- e) disposição de instalação dos impelidores: sempre na posição vertical centrada com chicanas (3 e 4) e sem chicanas;
- f) condições sanitárias do agitador, partes em contato com o produto: totalmente construído em aço inoxidável 316L;

- g) forma de utilização do eixo bi-apoiado com mancal de fundo ou em balanço: construção com eixo em balanço, com a finalidade de não haver consumo de potência por atrito do mancal;
- h) potência consumida pelo sistema: 1,5 KW;
- i) componentes para medição de torque: sistema elétrico definido por conversor e torquímetro.

4.2.4 Metodologia para Análise dos Dados Experimentais

Análise Experimental por Parâmetros Elétricos - SEW:

Primeiramente, são analisados os dados do torque total do sistema de agitação. Os resultados dos parâmetros elétricos (SEW) consideram o consumo de potência do sistema de agitação, ou seja, os dados do torque total, como já citados na seção 4.2.1. Conforme mostrado no anexo A da Tabela A.1, a análise dos dados experimentais dos parâmetros elétricos envolve as seguintes etapas:

- a) coleta de dados da velocidade rotacional em rpm, torque mW e potência em mW através da saída do painel elétrico;
- b) a coleta de dados da velocidade rotacional é feita da seguinte forma:
 - De 5 rpm a 50 rpm (coleta do torque de 5 em 5 rpm);
 - De 50 rpm a 100 rpm (coleta do torque de 10 em 10 rpm);
 - De 100 rpm a 300 rpm (coleta do torque de 20 em 20 rpm);
 - De 300 rpm a 500 rpm (coleta do torque de 25 em 25 rpm);
 - De 500 rpm a 1000 rpm (coleta do torque de 50 em 50 rpm);
 - De 1000 rpm a 1500 rpm (coleta do torque de 100 em 100 rpm).

Obs: para cada tipo de impelidor (modelo proposto) existe uma determinada velocidade de rotação máxima atingida, dependendo também da sua configuração sem e ou com chicanas.

- c) após coleta dos dados (velocidade rotacional, torque e potência), elabora-se uma planilha de dados (uso do EXCEL) para cálculos das variáveis de saída como Número de Reynolds e Número de Potência conforme mostrado na planilha EXCEL do anexo A1. Como exemplo de cálculo, para uma determinada rotação, é calculado o N_{Re} e N_p ;

d) Obtenção do Número de potência em regime turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$), através do cálculo da média de N_p como destacado (cor cinza) em tabela A1.

Obs: Em dados de N_p em tanques com chicana na região de regime turbulento o N_p tende a um valor constante, por isso, a partir de $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$ é levado em consideração o Número de Potência médio, ou seja, $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$ o N_p constante.

Análise Experimental por Torquímetro – MAGTROL:

Conforme mostrado no anexo B, por meio das informações das figuras e tabelas, a análise dos dados experimentais pelo transdutor de torque (torquímetro) envolve as seguintes etapas:

a) entrada de dados: velocidade rotacional inicial em rpm, velocidade rotacional máxima em rpm e intervalo de tempo de 15 em 15 segundos (para cada rotação lida de 5 em 5 rpm) conforme a Figura B1;

b) dados de saída do *software* (painel digital): velocidade rotacional em rpm, do torque em mW e da potência em W (Figura B2);

c) os dados de saída são disponíveis em uma planilha (bloco de notas) conforme tabelas B1, B2 e B3 que contém informações dos resultados da velocidade rotacional em rpm, torque em mW, potência em W e tempo de execução em s;

d) em seguida, os dados de saída são filtrados através do cálculo da média do número de potência de 5 em 5 rpm;

e) com os dados filtrados, cria-se uma tabela contendo as seguintes informações importantes como: número de Reynolds, número de potência (eixo + impelidor), potência consumida só do eixo e número de potência só do impelidor, como mostrado na tabela B4;

f) para finalizar, calcula-se a média do número de potência (eixo + impelidor) e o número de potência (impelidor) para o número de Reynolds no regime totalmente turbulento, ou seja, $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$, de acordo com a tabela B4, cujos resultados destacados estão na cor cinza.

5. RESULTADOS

5.1 NÚMERO DE POTÊNCIA PARA TANQUES COM CHICANAS

Os resultados apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.5 referem-se ao comportamento do número de potência em tanques com três chicanas, com variação do seguintes parâmetros geométricos: D_i/T (relação entre o diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque) 0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55 e 0,70; w/D_i (relação entre a largura da pá e o diâmetro do impelidor) 0,14; 0,17; 0,20; 0,25 e 0,30 e variação do ângulo da pá: 30°, 45°, 60° e 90°, utilizando os métodos de medição por parâmetros elétricos (SEW) e conversor de torque – torquímetro (MAGTROL).

Estes resultados são apresentados para uma região completamente turbulenta ($N_{Re} \geq 200.000$). Sendo assim, para uma melhor visualização, os resultados do número de potência estão disponibilizados em colunas como: dados do SEW (total); MAGTROL (total); SEW (impelidor); MAGTROL (impelidor), respectivamente.

Analisando os resultados das Tabelas 5.1 a 5.5, percebe-se que, de um modo geral, os números de potência são maiores para os dados do SEW (total) comparados aos resultados do MAGTROL, uma vez que os dados do SEW consideram o sistema de agitação como um todo, ou seja, torque total (motor, mancal, eixo e impelidor).

Outra análise interessante é observar a comparação dos dados do MAGTROL (eixo + impelidor) e MAGTROL (impelidor). Assim, compreende-se que os dados do MAGTROL (impelidor), que são dados do torquímetro, apresentam resultados do número de potência menores, de fato, é o que interessa, pois leva em vista apenas os dados do consumo de potência somente do impelidor.

Tabela 5.1 – Número de Potência em Tanques com Três Chicanas para a relação $w/D_i = 0,14$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Modelo	D _i /T	ângulo	w/D _i	N _p (total)		N _p (impelidor)	
				(SEW)	(MAGTROL)	(SEW)	(MAGTROL)
AT1	0.25	30°	0,14	1,06	0,75	0,55	0,65
BT1	0.33	30°	0,14	0,84	0,63	0,55	0,52
CT1	0.40	30°	0,14	0,68	0,48	0,44	0,44
DT1	0.45	30°	0,14	0,55	0,42	0,34	0,39
ET1	0,55	30°	0,14	0,49	0,40	0,34	0,38
FT1	0.70	30°	0,14	0,57	0,53	0,46	0,51
AQ1	0.25	45°	0,14	1,42	1,09	0,93	0,99
BQ1	0.33	45°	0,14	1,18	1,01	0,89	0,97
CQ1	0.40	45°	0,14	1,01	0,88	0,77	0,84
DQ1	0.45	45°	0,14	0,94	0,87	0,74	0,83
EQ1	0,55	45°	0,14	0,96	0,91	0,81	0,88
FQ1	0,70	45°	0,14	1,12	1,10	1,02	1,08
AS1	0.25	60°	0,14	1,98	1,68	1,47	1,58
BS1	0.33	60°	0,14	1,67	1,56	1,37	1,51
CS1	0.40	60°	0,14	1,55	1,42	1,31	1,38
DS1	0.45	60°	0,14	1,33	1,21	1,12	1,17
ES1	0,55	60°	0,14	1,41	1,31	1,25	1,28
FS1	0,70	60°	0,14	1,57	1,53	1,46	1,50
AN1	0.25	90°	0,14	2,16	1,90	1,68	1,81
BN1	0.33	90°	0,14	1,84	1,76	1,55	1,72
CN1	0.40	90°	0,14	1,85	1,60	1,61	1,57
DN1	0.45	90°	0,14	1,73	1,58	1,53	1,54
EN1	0,55	90°	0,14	1,81	1,65	1,66	1,62
FN1	0,70	90°	0,14	1,87	1,82	1,77	1,80

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.2 – Número de Potência em Tanques com Três Chicanas para a relação $w/D_i = 0,17$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Modelo	D _i /T	ângulo	w/D _i	N _p (total)		N _p (impelidor)	
				(SEW)	(MAGTROL)	(SEW)	(MAGTROL)
AT2	0.25	30°	0,17	1,13	0,82	0,60	0,71
BT2	0.33	30°	0,17	0,78	0,60	0,48	0,56
CT2	0.40	30°	0,17	0,65	0,49	0,40	0,45
DT2	0.45	30°	0,17	0,53	0,44	0,32	0,41
ET2	0.55	30°	0,17	0,52	0,43	0,36	0,40
FT2	0.70	30°	0,17	0,63	0,60	0,53	0,58
AQ2	0.25	45°	0,17	1,64	1,29	1,10	1,18
BQ2	0.33	45°	0,17	1,33	1,14	1,00	1,09
CQ2	0.40	45°	0,17	1,16	0,99	0,90	0,94
DQ2	0.45	45°	0,17	1,06	0,97	0,81	0,93
EQ2	0.55	45°	0,17	1,04	1,02	0,88	0,98
FQ2	0.70	45°	0,17	1,31	1,31	1,20	1,29
AS2	0.25	60°	0,17	1,99	1,88	1,46	1,80
BS2	0.33	60°	0,17	1,95	1,80	1,61	1,74
CS2	0.40	60°	0,17	1,70	1,59	1,42	1,55
DS2	0.45	60°	0,17	1,56	1,45	1,32	1,41
ES2	0.55	60°	0,17	1,70	1,72	1,53	1,69
FS2	0.70	60°	0,17	1,84	1,85	1,72	1,82
AN2	0.25	90°	0,17	2,42	2,15	1,91	2,05
BN2	0.33	90°	0,17	2,25	2,14	1,92	2,09
CN2	0.40	90°	0,17	2,28	2,08	2,02	2,04
DN2	0.45	90°	0,17	2,25	2,11	2,02	2,07
EN2	0.55	90°	0,17	2,18	2,10	2,01	2,06
FN2	0.70	90°	0,17	2,25	2,25	2,14	2,22

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.3 – Número de Potência em Tanques com Três Chicanas para a relação $w/D_i = 0,20$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Modelo	D _i /T	ângulo	w/D _i	N _p (total)		N _p (impelidor)	
				(SEW)	(MAGTROL)	(SEW)	(MAGTROL)
AT3	0.25	30°	0,20	1,21	0,92	0,71	0,82
BT3	0.33	30°	0,20	0,87	0,63	0,53	0,58
CT3	0.40	30°	0,20	0,71	0,56	0,43	0,52
DT3	0.45	30°	0,20	0,66	0,48	0,41	0,43
ET3	0,55	30°	0,20	0,61	0,49	0,43	0,45
FT3	0.70	30°	0,20	0,69	0,66	0,57	0,63
AQ3	0.25	45°	0,20	1,78	1,47	1,29	1,37
BQ3	0.33	45°	0,20	1,58	1,33	1,20	1,27
CQ3	0.40	45°	0,20	1,28	1,17	1,00	1,12
DQ3	0.45	45°	0,20	1,24	1,11	0,97	1,06
EQ3	0,55	45°	0,20	1,28	1,22	1,09	1,18
FQ3	0,70	45°	0,20	1,56	1,52	1,43	1,49
AS3	0.25	60°	0,20	2,34	2,07	1,83	1,97
BS3	0.33	60°	0,20	2,04	1,98	1,63	1,86
CS3	0.40	60°	0,20	2,01	1,88	1,71	1,83
DS3	0.45	60°	0,20	1,95	1,81	1,67	1,76
ES3	0,55	60°	0,20	2,12	2,08	1,92	2,04
FS3	0,70	60°	0,20	2,15	2,22	2,02	2,19
AN3	0.25	90°	0,20	2,74	2,52	2,23	2,42
BN3	0.33	90°	0,20	2,93	2,70	2,57	2,64
CN3	0.40	90°	0,20	2,98	2,78	2,69	2,73
DN3	0.45	90°	0,20	2,95	2,67	2,68	2,62
EN3	0,55	90°	0,20	2,71	2,64	2,53	2,60
FN3	0,70	90°	0,20	2,74	2,83	2,62	2,80

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.4 – Número de Potência em Tanques com Três Chicanas para a relação $w/D_i = 0,25$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Modelo	D _i /T	ângulo	w/D _i	N _p (total)		N _p (impelidor)	
				(SEW)	(MAGTROL)	(SEW)	(MAGTROL)
AT4	0.25	30°	0,25	1,03	0,94	0,50	0,85
BT4	0.33	30°	0,25	0,84	0,65	0,43	0,59
CT4	0.40	30°	0,25	0,71	0,54	0,40	0,44
DT4	0.45	30°	0,25	0,69	0,50	0,40	0,44
ET4	0,55	30°	0,25	0,62	0,52	0,41	0,48
FT4	0.70	30°	0,25	0,86	0,85	0,71	0,82
AQ4	0.25	45°	0,25	1,98	1,72	1,42	1,60
BQ4	0.33	45°	0,25	1,74	1,51	1,29	1,44
CQ4	0.40	45°	0,25	1,41	1,24	1,06	1,17
DQ4	0.45	45°	0,25	1,35	1,19	1,04	1,13
EQ4	0,55	45°	0,25	1,55	1,51	1,33	1,46
FQ4	0,70	45°	0,25	1,83	1,86	1,68	1,82
AS4	0.25	60°	0,25	2,77	2,49	2,22	2,37
BS4	0.33	60°	0,25	2,57	2,31	2,08	2,23
CS4	0.40	60°	0,25	2,25	2,14	1,88	2,07
DS4	0.45	60°	0,25	2,31	2,18	1,98	2,12
ES4	0,55	60°	0,25	2,48	2,51	2,25	2,46
FS4	0,70	60°	0,25	2,58	2,66	2,38	2,62
AN4	0.25	90°	0,25	3,91	3,65	3,35	3,53
BN4	0.33	90°	0,25	3,90	3,72	3,46	3,64
CN4	0.40	90°	0,25	3,61	3,57	3,26	3,50
DN4	0.45	90°	0,25	3,57	3,44	3,27	3,38
EN4	0,55	90°	0,25	3,24	3,28	3,02	3,23
FN4	0,70	90°	0,25	3,37	3,42	3,21	3,38

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.5 – Número de Potência em Tanques com Três Chicanas para a relação $w/D_i = 0,30$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Modelo	D_i/T	ângulo	w/D_i	Np (total)		Np (impelidor)	
				(SEW)	(MAGTROL)	(SEW)	(MAGTROL)
AT5	0.25	30°	0,30	1,16	0,99	0,60	0,86
BT5	0.33	30°	0,30	0,99	0,66	0,48	0,60
CT5	0.40	30°	0,30	0,71	0,66	0,48	0,59
DT5	0.45	30°	0,30	0,72	0,56	0,39	0,49
ET5	0,55	30°	0,30	0,68	0,59	0,45	0,54
FT5	0.70	30°	0,30	0,92	0,87	0,76	0,83
AQ5	0.25	45°	0,30	2,27	1,93	1,58	1,79
BQ5	0.33	45°	0,30	1,78	1,54	1,27	1,45
CQ5	0.40	45°	0,30	1,57	1,38	1,15	1,30
DQ5	0.45	45°	0,30	1,57	1,40	1,23	1,33
EQ5	0,55	45°	0,30	1,74	1,70	1,48	1,64
FQ5	0,70	45°	0,30	2,18	2,25	2,00	2,21
AS5	0.25	60°	0,30	3,30	3,15	2,60	3,01
BS5	0.33	60°	0,30	2,97	2,72	2,44	2,63
CS5	0.40	60°	0,30	2,45	2,45	2,03	2,37
DS5	0.45	60°	0,30	2,59	2,57	2,24	2,50
ES5	0,55	60°	0,30	2,92	2,90	2,65	2,84
FS5	0,70	60°	0,30	2,89	3,00	2,68	2,95
AN5	0.25	90°	0,30	4,92	4,84	4,23	4,70
BN5	0.33	90°	0,30	4,84	4,62	4,35	4,53
CN5	0.40	90°	0,30	4,48	4,24	4,06	4,16
DN5	0.45	90°	0,30	4,53	4,08	4,19	4,02
EN5	0,55	90°	0,30	3,90	3,92	3,64	3,87
FN5	0,70	90°	0,30	3,89	3,79	3,72	3,75

Fonte: elaboração própria.

Na Tabela 5.6 estão os resultados do número de potência para tanques com quatro chicanas com relação geométrica de $w/D_i = 0,20$; $D_i/T: 0,25; 0,33; 0,40; 0,45; 0,55$ e $0,70$ em uma região completamente turbulenta ($N_{Re} \geq 200.000$).

Na análise dos resultados da Tabela 5.6, percebe-se o mesmo comportamento já explorado nas Tabelas 5.1 a 5.5, ou seja, o número de potência é maior para os dados do SEW (eixo + impelidor) comparados aos resultados do MAGTROL, uma vez que os dados do SEW consideram o consumo de potência do motor. Todavia, o MAGTROL tem em vista o consumo de potência gerado pelo torquímetro. Assim, comparando aos resultados só do impelidor o número de potência torna-se menor.

Tabela 5.6 – Número de Potência em Tanques com Quatro Chicanas para a relação $w/D_i = 0,20$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$

Modelo	D _i /T	ângulo	w/D _i	N _p (total)		N _p (impelidor)	
				(SEW)	(MAGTROL)	(SEW)	(MAGTROL)
AT3	0.25	30°	0,20	1,17	0,84	0,63	0,70
BT3	0.33	30°	0,20	0,82	0,62	0,44	0,55
CT3	0.40	30°	0,20	0,67	0,52	0,38	0,47
DT3	0.45	30°	0,20	0,67	0,50	0,39	0,46
ET3	0,55	30°	0,20	0,60	0,54	0,41	0,50
FT3	0.70	30°	0,20	0,71	0,69	0,57	0,66
AQ3	0.25	45°	0,20	1,76	1,46	1,27	1,32
BQ3	0.33	45°	0,20	1,69	1,40	1,24	1,32
CQ3	0.40	45°	0,20	1,41	1,20	1,07	1,14
DQ3	0.45	45°	0,20	1,37	1,16	1,06	1,11
EQ3	0,55	45°	0,20	1,38	1,29	1,16	1,25
FQ3	0,70	45°	0,20	1,64	1,69	1,48	1,66
AS3	0.25	60°	0,20	2,37	2,14	1,86	2,00
BS3	0.33	60°	0,20	2,10	1,98	1,63	1,87
CS3	0.40	60°	0,20	2,17	1,93	1,79	1,86
DS3	0.45	60°	0,20	2,02	1,91	1,69	1,85
ES3	0,55	60°	0,20	2,25	2,21	2,01	2,16
FS3	0,70	60°	0,20	2,52	2,53	2,35	2,50
AN3	0.25	90°	0,20	2,78	2,53	2,27	2,38
BN3	0.33	90°	0,20	3,08	2,84	2,63	2,76
CN3	0.40	90°	0,20	3,22	2,92	2,86	2,95
DN3	0.45	90°	0,20	3,32	3,15	3,01	3,09
EN3	0,55	90°	0,20	3,20	3,17	2,97	3,12
FN3	0,70	90°	0,20	3,38	3,33	3,22	3,30

Fonte: elaboração própria.

A Tabela 5.7 tem uma comparação dos resultados do número de potência do impelidor para tanques com três e quatro chicanas em uma região completamente turbulenta. Estes resultados são do torquímetro (MAGTROL).

Na análise dos resultados, observa-se uma pequena diferença nos resultados do número de potência para tanques com quatro chicanas, ou seja, para a maioria dos modelos, os resultados do número de potência para tanques com quatro chicanas são um pouco maiores.

Tabela 5.7 – Comparação do Número de Potência para Tanques com Três e Quatro Chicanas para a relação $w/D_i = 0,20$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$, utilizando dados do torquímetro do impelidor.

Modelo	D/T	ângulo	w/D _i	N _p (impelidor)–troquímetro (MAGTROL)	
				Três chicanas	Quatro chicanas
AT3	0.25	30°	0,20	0,82	0,70
BT3	0.33	30°	0,20	0,58	0,55
CT3	0.40	30°	0,20	0,52	0,47
DT3	0.45	30°	0,20	0,43	0,46
ET3	0,55	30°	0,20	0,45	0,50
FT3	0.70	30°	0,20	0,63	0,66
AQ3	0.25	45°	0,20	1,37	1,32
BQ3	0.33	45°	0,20	1,27	1,32
CQ3	0.40	45°	0,20	1,12	1,14
DQ3	0.45	45°	0,20	1,06	1,11
EQ3	0,55	45°	0,20	1,18	1,25
FQ3	0.70	45°	0,20	1,49	1,66
AS3	0.25	60°	0,20	1,97	2,00
BS3	0.33	60°	0,20	1,86	1,87
CS3	0.40	60°	0,20	1,83	1,86
DS3	0.45	60°	0,20	1,76	1,85
ES3	0,55	60°	0,20	2,04	2,16
FS3	0.70	60°	0,20	2,19	2,50
AN3	0.25	90°	0,20	2,42	2,38
BN3	0.33	90°	0,20	2,64	2,76
CN3	0.40	90°	0,20	2,73	2,95
DN3	0.45	90°	0,20	2,62	3,09
EN3	0,55	90°	0,20	2,60	3,12
FN3	0.70	90°	0,20	2,80	3,30

Fonte: elaboração própria.

5.2 NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DOS PARÂMETROS GEOMÉTRICOS

Para uma melhor análise dos resultados do torquímetro, ou seja, apenas o consumo de potência gerado no impelidor, os dados do número de potência em função da variação dos parâmetros geométricos D_i/T e w/D estão apresentados nas Tabelas 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 para os ângulos de 30° , 45° , 60° e 90° , respectivamente.

Em relação ao parâmetro geométrico w/D_i (largura da pá do impelidor/diâmetro do impelidor), observa-se nas Tabelas 5.8, 5.9, 5.10 e 5.11 que o número de potência expande com o crescimento da relação w/D_i , devido ao aumento da área da pá sobre o tanque agitado.

Tabela 5.8 – Número de Potência para Pás Inclínadas 30° em Tanques com três Chicanas e $N_{Re} \geq 200.000$.

Impelidores Pás Inclínadas 30°					
w/D_i	0,14	0,17	0,20	0,25	0,30
D_i/T					
0,25	0,65	0,71	0,82	0,85	0,86
0,33	0,52	0,56	0,58	0,59	0,60
0,40	0,44	0,45	0,52	0,55	0,59
0,45	0,39	0,41	0,43	0,44	0,49
0,55	0,38	0,40	0,45	0,48	0,54
0,77	0,51	0,58	0,63	0,82	0,83

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.9 – Número de Potência para Pás Inclínadas 45° em Tanques com três Chicanas e $N_{Re} \geq 200.000$.

Impelidores Pás Inclínadas 45°					
w/D_i	0,14	0,17	0,20	0,25	0,30
D_i /T					
0,25	0,99	1,18	1,37	1,60	1,79
0,33	0,97	1,09	1,27	1,44	1,45
0,40	0,84	0,94	1,12	1,17	1,30
0,45	0,83	0,93	1,06	1,13	1,33
0,55	0,88	0,98	1,18	1,46	1,64
0,77	1,08	1,29	1,49	1,82	2,21

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.10 – Número de Potência para Pás Inclínadas 60° em Tanques com três Chicanas e $N_{Re} \geq 200.000$.

Impelidores Pás Inclínadas 60°					
w/D_i	0,14	0,17	0,20	0,25	0,30
D_i /T					
0,25	1,58	1,80	1,97	2,37	3,01
0,33	1,51	1,74	1,86	2,23	2,63
0,40	1,38	1,55	1,83	2,07	2,37
0,45	1,17	1,41	1,76	2,12	2,50
0,55	1,28	1,69	2,04	2,46	2,84
0,77	1,50	1,82	2,19	2,62	2,95

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.11 – Número de Potência para Pás Retas 90° em Tanques com três Chicanas e $N_{Re} \geq 200.000$

Impelidores Pás Retas 90°					
w/D_i	0,14	0,17	0,20	0,25	0,30
D_i /T					
0,25	1,81	2,05	2,42	3,53	4,70
0,33	1,72	2,09	2,64	3,64	4,53
0,40	1,57	2,04	2,73	3,50	4,16
0,45	1,54	2,07	2,62	3,38	4,02
0,55	1,62	2,06	2,60	3,23	3,87
0,77	1,80	2,22	2,80	3,38	3,75

Fonte: elaboração própria.

Em outra análise, o número de potência diminui com o aumento da relação D_i/T até um determinado valor. Por exemplo: na Tabela 5.8 (resultados para pás inclinadas 30 graus), para os modelos de $w/D_i = 0,14$ e $w/D_i = 0,17$, o número de potência diminui até $D_i/T = 0,55$ e para os modelos de $w/D_i = 0,20$; $w/D_i = 0,25$ e $w/D_i = 0,30$, o número de potência diminui até $D_i/T = 0,45$. Na Tabela 5.9 (resultados para pás inclinadas 45 graus) para os modelos de $w/D_i = 0,14$; $w/D_i = 0,17$; $w/D_i = 0,20$ e $w/D_i = 0,25$, o número de potência diminui até $D_i/T = 0,45$ e para o modelo de $w/D_i = 0,30$, o número de potência diminui até $D_i/T = 0,40$. Na Tabela 5.10 (resultados para pás inclinadas 60 graus), para os modelos de $w/D_i = 0,14$; $w/D_i = 0,17$ e $w/D_i = 0,20$, o número de potência diminui até $D_i/T = 0,45$ e para os modelos de $w/D_i = 0,25$ e $w/D_i = 0,30$, o número de potência diminui até $D_i/T = 0,40$. Assim, quanto maior a relação w/D_i , menor será o intervalo de D_i/T onde o número de potência irá diminuir. Outra informação interessante é que os resultados das Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 são para pás inclinadas com ângulos de 30°, 45° e 60° graus respectivamente, cujos resultados mostram um comportamento de fluxo axial.

Em relação à tabela 5.10, o modelo $w/D_i = 0,30$, é o único onde o número de potência diminui com o aumento de todas as relações D_i/T analisadas. Isso se deve ao fato de que o comportamento dos resultados da tabela é para uma configuração de pás que apresentam fluxo radial.

5.3 NÚMERO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DO ÂNGULO DA PÁ DO IMPELIDOR

Foi observada, também, a influência do número de potência em função do ângulo da pá do impelidor através das variações dos parâmetros D_i/T e w/D_i . Como pode-se analisar nas Tabelas 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17, o número de potência aumenta com a ampliação do ângulo da pá do impelidor, desse modo, quanto maior o ângulo sobre o eixo do impelidor, maior será o coeficiente de arraste (N_p) sobre a pá. Conforme a literatura, os impelidores de pás retas 90° (fluxo radial) possuem maiores números de potência em relação aos impelidores de pás retas inclinadas (fluxo axial) com ângulos de 30° , 45° e 60° .

A partir de uma análise geral, pode-se observar nas tabelas 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16 e 5.17 que o número de potência aumenta tanto com o crescimento do ângulo da pá do impelidor, assim como o aumento da relação geométrica w/D_i (relação largura da pá do impelidor sobre o diâmetro do impelidor) para todas as relações D_i/T (relação diâmetro do impelidor sobre o diâmetro do tanque) analisadas.

Tabela 5.12 – Número de Potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas, para $D_i/T = 0,25$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Resultados para $D_i/T = 0,25$				
w/D_i	N_p (30°)	N_p (45°)	N_p (60°)	N_p (90°)
0.14	0,65	0,99	1,58	1,81
0.17	0,71	1,18	1,80	2,05
0.20	0,82	1,37	1,97	2,42
0,25	0,85	1,60	2,37	3,53
0,30	0,86	1,79	3,01	4,70

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.13 – Número de Potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas, para $D_i/T = 0,33$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Resultados para $D_i/T = 0,33$				
w/D_i	N_p (30°)	N_p (45°)	N_p (60°)	N_p (90°)
0.14	0,52	0,97	1,51	1,72
0.17	0,56	1,09	1,74	2,09
0.20	0,58	1,27	1,86	2,64
0,25	0,59	1,44	2,23	3,64
0,30	0,60	1,45	2,63	4,53

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.14 – Número de Potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas, para $D_i/T = 0,40$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Resultados para $D_i/T = 0,40$				
w/D_i	N_p (30°)	N_p (45°)	N_p (60°)	N_p (90°)
0.14	0,44	0,84	1,38	1,57
0.17	0,45	0,94	1,55	2,04
0.20	0,52	1,12	1,83	2,73
0,25	0,55	1,17	2,07	3,50
0,30	0,59	1,30	2,37	4,16

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.15 – Número de Potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas, para $D_i/T = 0,45$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Resultados para $D_i/T = 0,45$				
w/D_i	Np (30°)	Np (45°)	Np (60°)	Np (90°)
0.14	0,39	0,83	1,17	1,54
0.17	0,41	0,93	1,41	2,07
0.20	0,43	1,06	1,76	2,62
0,25	0,44	1,13	2,12	3,38
0,30	0,49	1,33	2,50	4,02

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.16 – Número de Potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas, para $D_i/T = 0,55$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Resultados para $D_i/T = 0,55$				
w/D_i	Np (30°)	Np (45°)	Np (60°)	Np (90°)
0.14	0,38	0,88	1,28	1,62
0.17	0,40	0,98	1,69	2,06
0.20	0,45	1,18	2,04	2,60
0,25	0,48	1,46	2,46	3,23
0,30	0,54	1,64	2,84	3,87

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5.17 – Número de Potência em função do ângulo da pá do impelidor em tanque com três chicanas, para $D_i/T = 0,70$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Resultados para $D_i/T = 0,70$				
w/D_i	N_p (30°)	N_p (45°)	N_p (60°)	N_p (90°)
0.14	0,51	1,08	1,50	1,80
0.17	0,58	1,29	1,82	2,22
0.20	0,63	1,49	2,19	2,80
0,25	0,82	1,82	2,62	3,38
0,30	0,83	2,21	2,95	3,75

Fonte: elaboração própria.

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

Os resultados do número de potência em tanque sem chicanas no piloto de 50 L são representados graficamente, visto que os números de potência não atingem um valor constante no regime turbulento, devido à presença de um vórtice central formado por ação de forças centrífugas capazes de atingir a pá do impelidor. Desta forma, foram feitas análises no controle da velocidade rotacional máxima permitida para cada impelidor testado. Como já esperado, na análise das Figuras 5.1 a 5.9 o número de potência diminui com o aumento do número de Reynolds sem atingir uma estabilidade (valor de N_p constante) devido a não presença de chicanas.

A Figura 5.1 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para pás retas 90°, $D_i/T = 0,25$ com análise da variação w/ D_i (0,17; 0,20; 0,25 e 0,30). Observa-se que a variação do número de potência cresce com o aumento da relação geométrica w/ D_i .

Para cada modelo foi analisada uma variação da velocidade rotacional da seguinte forma: AN2 (w/ $D_i = 0,17$) de 240 rpm a 500 rpm; AN2 (w/ $D_i = 0,20$) de 240 rpm a 490 rpm; AN2 (w/ $D_i = 0,25$) de 240 rpm a 460 rpm e AN2 (w/ $D_i = 0,30$) de 240 rpm a 440 rpm.

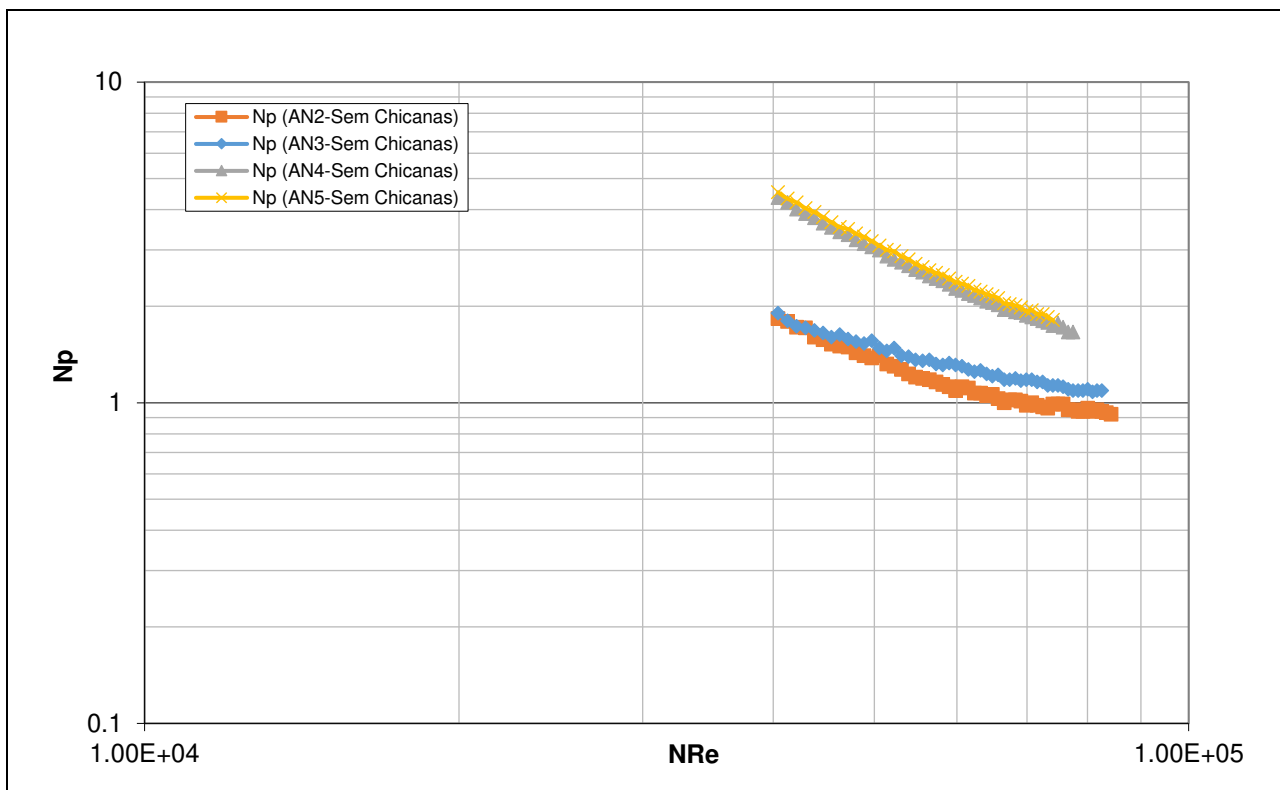


Figura 5.1 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 90° , $D_i/T = 0,25$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (240 rpm). Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.2 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para pás retas 90° , $D_i/T = 0,45$ com análise da variação w/D_i (0,14; 0,20; 0,25 e 0,30). Observa-se que a variação do número de potência expande com o aumento da relação geométrica w/D_i , com uma pequena exceção para os modelos AN2 e AN3 onde essa observação só acontece a partir de $N_{Re} \geq 6 \times 10^4$.

Para esses modelos a variação da velocidade rotacional foi testada nos seguintes intervalos: DN1 ($w/D_i = 0,14$) de 75 rpm a 270 rpm; DN3 ($w/D_i = 0,20$) de 75 rpm a 250 rpm; DN4 ($w/D_i = 0,25$) de 75 rpm a 230 rpm e DN5 ($w/D_i = 0,30$) de 75 rpm a 220 rpm.

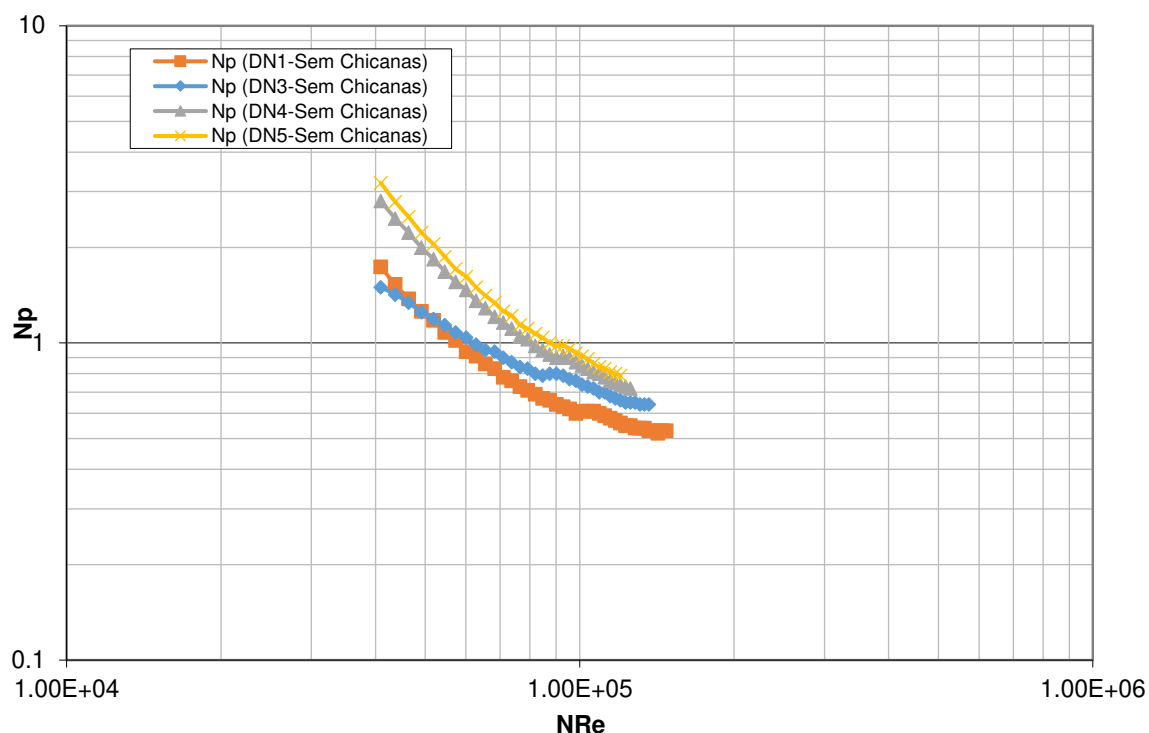


Figura 5.2 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 90° , $D_i/T = 0,45$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (75 rpm). Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.3 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para pás retas inclinadas 60° , $D_i/T = 0,45$ com análise da variação w/D_i (0,17; 0,20 e 0,25). Observa-se que a variação do número de potência cresce com o aumento da relação geométrica w/D_i .

Para esses modelos a variação da velocidade rotacional foi testada nos seguintes intervalos: DS2 ($w/D_i = 0,17$) de 75 rpm a 280 rpm; DS3 ($w/D_i = 0,20$) de 75 rpm a 270 rpm e DS4 ($w/D_i = 0,25$) de 75 rpm a 240 rpm.

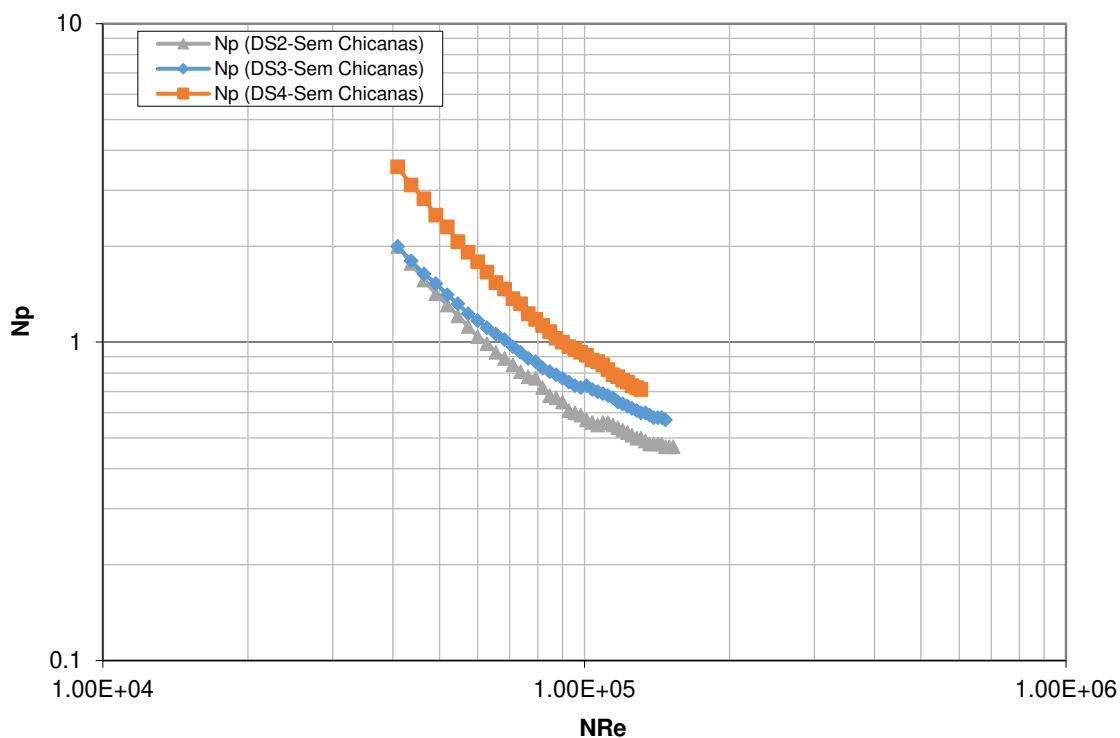


Figura 5.3 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 60°, $D_i/T = 0,45$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (75 rpm). Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.4 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para pás retas inclinadas 45°, $D_i/T = 0,55$ com análise da variação w/D_i (0,14; 0,17 e 0,25). Observa-se que a variação do número de potência amplia com o aumento da relação geométrica w/D_i .

Para esses modelos a variação da velocidade rotacional foi testada nos seguintes intervalos: EQ1 ($w/D_i = 0,14$) de 50 rpm a 260 rpm; EQ2 ($w/D_i = 0,17$) de 50 rpm a 240 rpm e EQ4 ($w/D_i = 0,25$) de 50 rpm a 220 rpm.

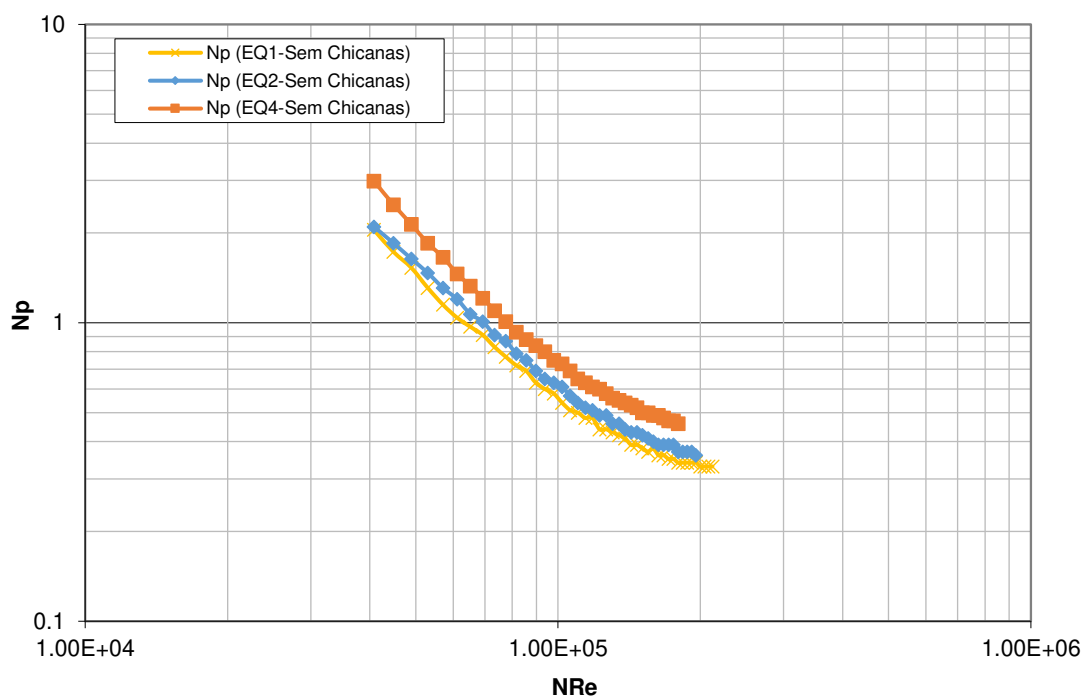


Figura 5.4 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 45° , $D_i/T = 0,55$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (50 rpm). Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.5 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para relações geométricas: $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,25$. Percebe-se que a variação do número de potência amplia com o aumento do ângulo da pá, ou seja, os números de potência para o impelidor de pás retas 90° são maiores que os valores de número de potência do impelidor de pás retas inclinadas 45° . Sendo assim, isso comprova os resultados mostrados na literatura.

Para esses modelos a variação da velocidade rotacional foi testada nos seguintes intervalos: DQ4 ($\theta = 45^\circ$) de 75 rpm a 270 rpm e DN4 ($\theta = 90^\circ$) de 75 rpm a 230 rpm.

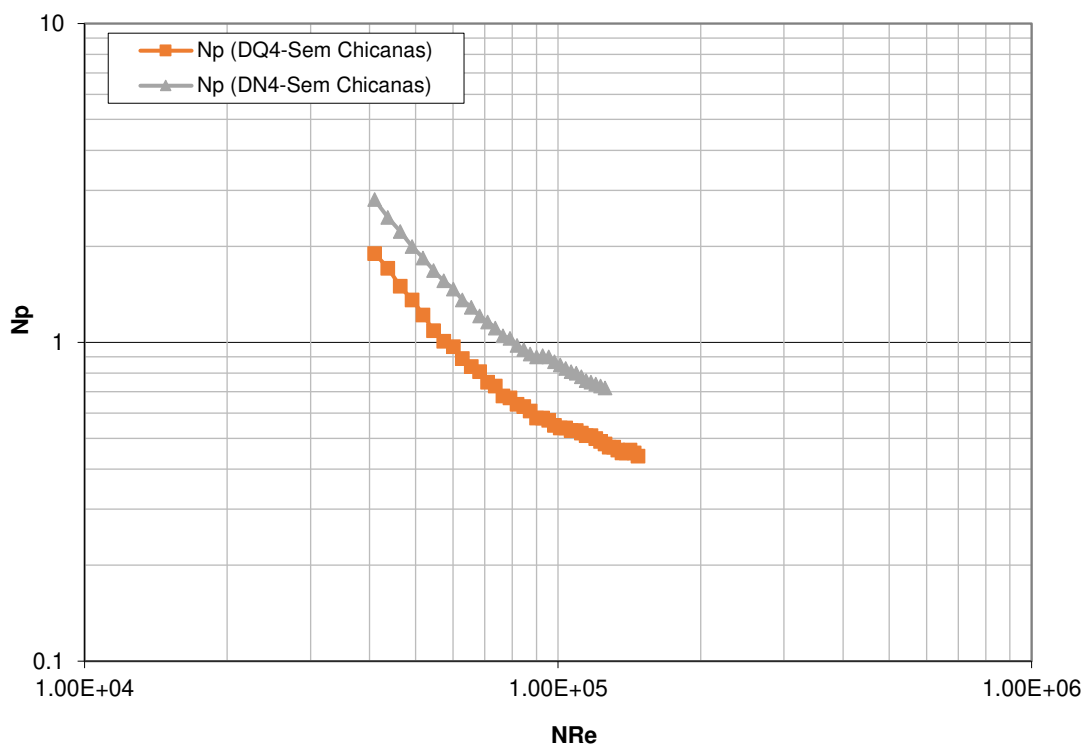


Figura 5.5 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas com $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,25$, para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (75 rpm). Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.6 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para relações geométricas: $D_i/T = 0,55$ e $w/D_i = 0,14$. Assim, observa-se que a variação do número de potência aumenta com a expansão do ângulo da pá.

Para esses modelos a variação da velocidade rotacional foi testada nos seguintes intervalos: ET1 ($\theta = 30^\circ$) de 50 rpm a 325 rpm; EQ1 ($\theta = 45^\circ$) de 50 rpm a 260 rpm; ES1 ($\theta = 60^\circ$) de 50 rpm a 230 rpm e EN1 ($\theta = 90^\circ$) de 50 rpm a 220 rpm.

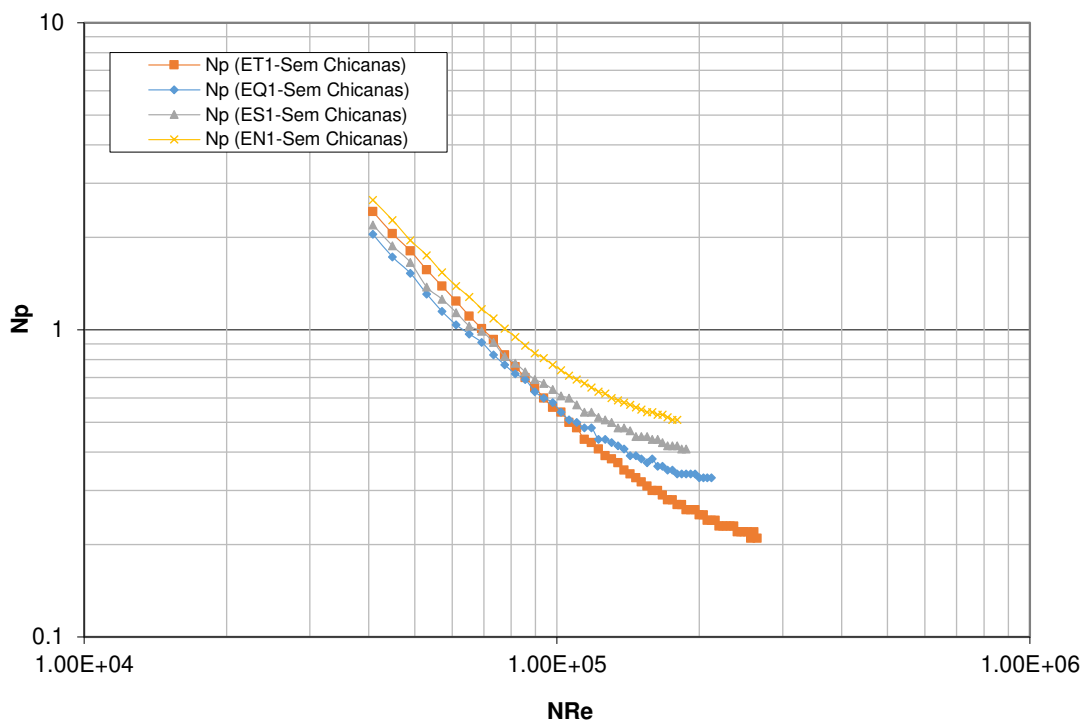


Figura 5.6 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas com $D_i/T = 0,55$ e $w/D_i = 0,14$, para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (50 rpm). Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.7 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para relações geométricas: $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,30$. Observa-se que a variação do número de potência cresce com o aumento do ângulo da pá.

Para esses modelos a variação da velocidade rotacional foi testada nos seguintes intervalos: DQ5 ($\theta = 45^\circ$) de 75 rpm a 260 rpm; DS5 ($\theta = 60^\circ$) de 75 rpm a 230 rpm e DN5 ($\theta = 90^\circ$) de 75 rpm a 220 rpm.

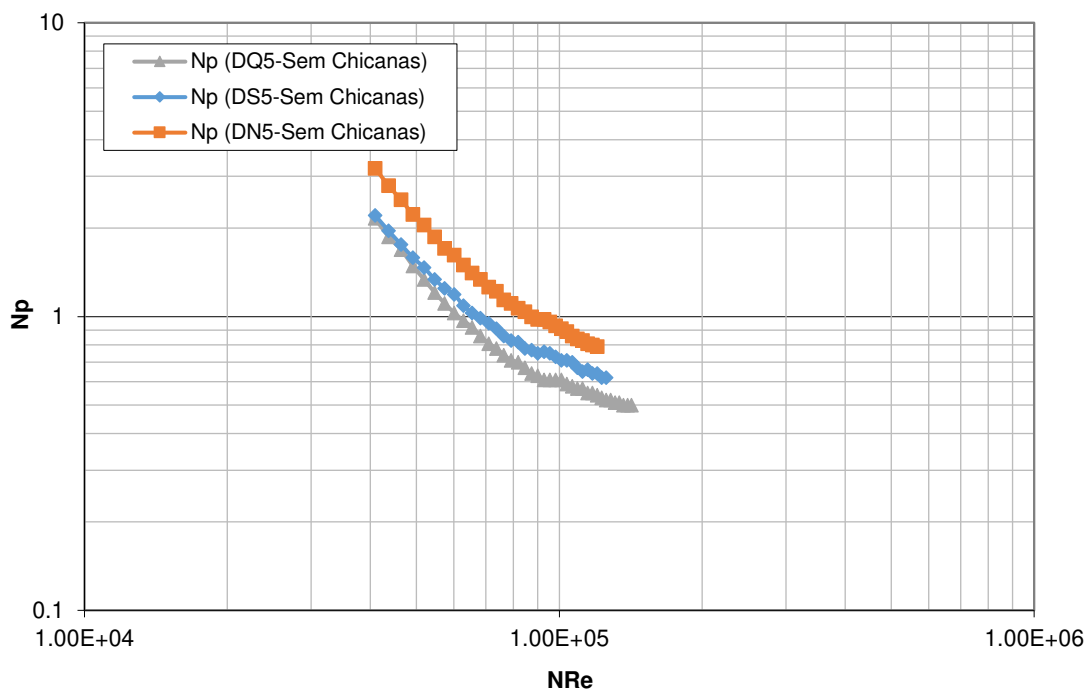


Figura 5.7 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas com $D_i/T = 0,45$ e $w/D_i = 0,30$, para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (75 rpm). Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.8 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para pás retas inclinadas 45° , $w/D_i = 0,25$ com análise da variação D_i/T (0,25 e 0,40). Observa-se que a variação do número de potência diminui com o aumento da relação geométrica D_i/T .

Para esses modelos a variação da velocidade rotacional foi testada nos seguintes intervalos: AQ4 ($D_i/T = 0,25$) de 240 rpm a 570 rpm e CQ4 ($D_i/T = 0,40$) de 95 rpm a 310 rpm. Neste caso, para uma análise da variação de D_i/T quando $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ com o aumento do diâmetro do impelidor o início de teste da velocidade rotacional diminui.

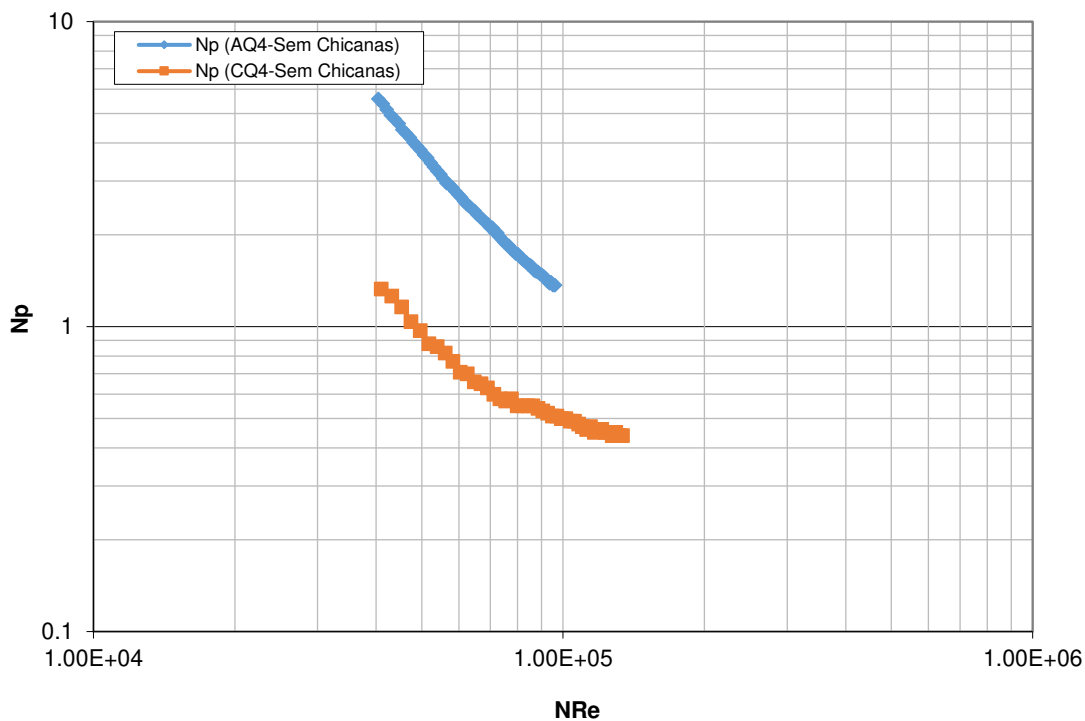


Figura 5.8 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas inclinadas 45° , $w/D_i = 0,25$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$. Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.9 apresenta resultados do número de potência em função do número de Reynolds ($N_{Re} \geq 4 \times 10^4$) em tanques sem chicanas para pás retas 90° , $w/D_i = 0,20$ com análise da variação D_i/T (0,25; 0,45; 0,55 e 0,70). Observa-se que a variação do número de potência diminui com o aumento da relação geométrica D_i/T .

Para esses modelos a variação da velocidade rotacional foi testada nos seguintes intervalos: AN3 ($D_i/T = 0,25$) de 240 rpm a 490 rpm; DN3 ($D_i/T = 0,45$) de 75 rpm a 230 rpm; EN3 ($D_i/T = 0,55$) de 50 rpm a 210 rpm e FN3 ($D_i/T = 0,70$) de 35 rpm a 180 rpm.

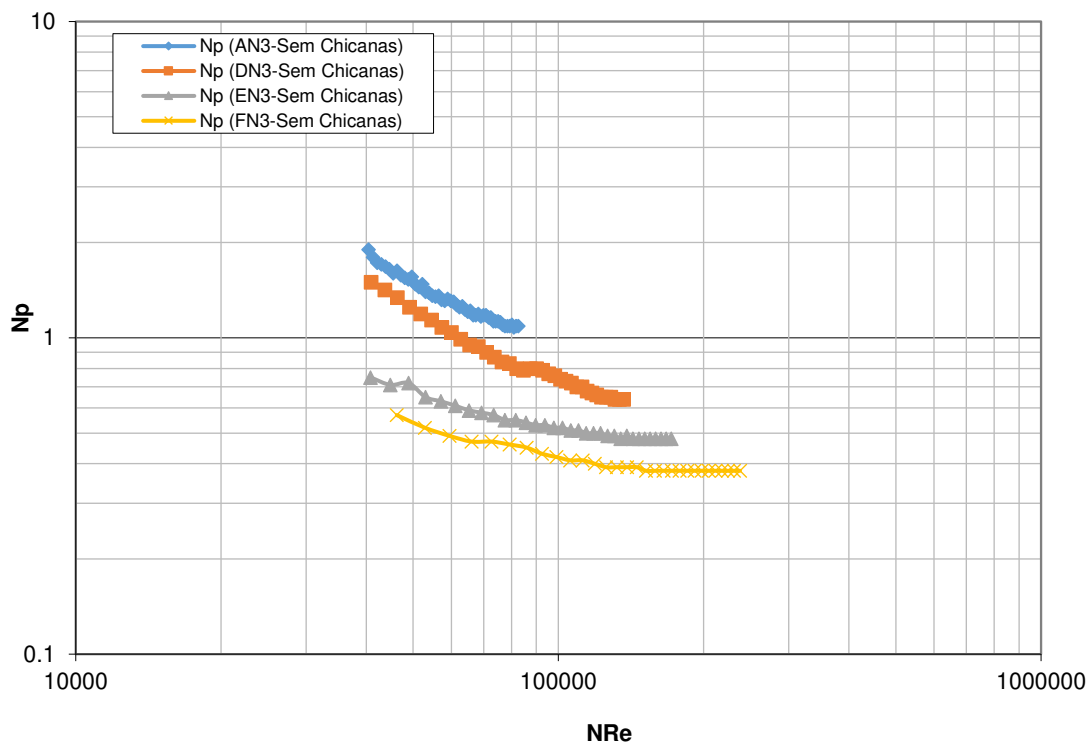


Figura 5.9 – Número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem chicanas para o impelidor pás retas 90° , $w/D_i = 0,30$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$. Fonte: elaboração própria.

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

A Figura 5.10 apresenta uma comparação dos resultados do número de potência em função do número de Reynolds para tanque sem e com chicanas (3 e 4 chicanas) para um impelidor pás retas inclinadas 45° , $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$. Os resultados foram analisados em uma faixa de velocidade rotacional de operação de 75 rpm a 300 rpm, ou seja, $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$.

Pode-se observar nesta faixa de velocidade rotacional que a variação do número de potência em tanques com chicanas é maior do que em tanques sem chicanas, onde, a partir de $N_{Re} = 1 \times 10^5$ em tanques com chicanas, o número de potência tende a estabilizar (N_p constante) a um valor N_p aproximadamente igual a 1,1. Enquanto em tanques sem chicanas ainda não atinge um valor constante, ou seja, o número de potência continua diminuindo com o aumento do número de Reynolds que, para esse caso, onde $N_{Re} = 1 \times 10^5$ o N_p está em torno de 0,6.

Outra observação interessante vista na Figura 5.10 é que o número de potência aumenta com o crescimento do número de chicanas presentes no tanque, ou seja, os valores do número de potência em tanques com 4 chicanas são um pouco maiores do que os números de potência em tanques com 3 chicanas. Esta diferença tende a diminuir e estabilizar para $N_{Re} \geq 1 \times 10^5$ como observado na Figura 5.10. Vale ressaltar que esta análise nos resultados é para um impelidor do tipo de fluxo axial predominante.

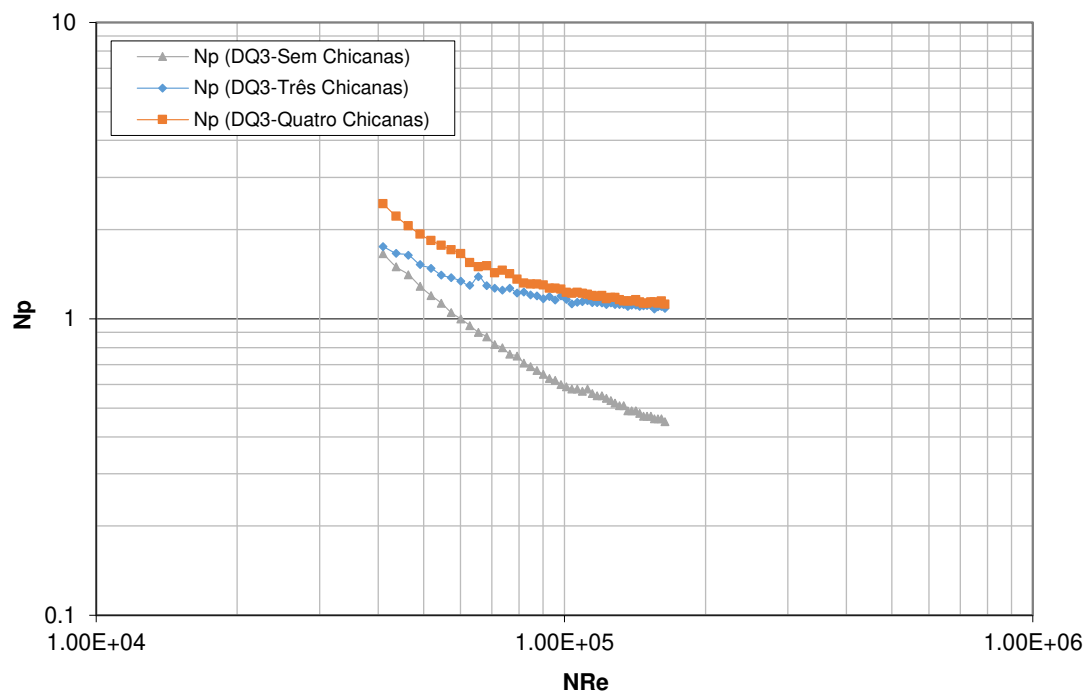


Figura 5.10 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem e com chicanas para o impelidor pás retas inclinadas 45° , $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$. Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.11 apresenta uma comparação dos resultados do número de potência em função do número de Reynolds para tanque sem e com chicanas (3 e 4 chicanas) para um impelidor pás retas 90° , $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,55$. Os resultados foram analisados em uma faixa de velocidade rotacional de operação de 50 rpm a 210 rpm, ou seja, $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$.

Pode-se observar nesta faixa de velocidade rotacional que a variação do número de potência em tanques com chicanas é maior do que em tanques sem chicanas, em que a partir de $N_{Re} = 1 \times 10^5$ em tanques com chicanas o número de potência tende a estabilizar (N_p constante) a um valor N_p

aproximadamente igual a 3,1 para tanque com três chicanas e 3,3 para tanques com quatro chicanas. Enquanto em tanques sem chicanas o número de potência continua diminuindo com o aumento do número de Reynolds, chegando a um valor de N_p igual a 0,5 para $N_{Re} = 1 \times 10^5$.

Outra observação da Figura 5.10 é que esta análise dos resultados do número de potência trata-se de um implididor pás retas 90° , ou seja, impelidor do tipo de fluxo radial. Desta forma, o para $N_{Re} = 1 \times 10^5$ o número de potência para tanque com chicanas gira em torno de 3,5 e para tanque sem chicanas $N_p = 0,5$. Para o uso de chicanas em pás retas 90° o N_p é 7 vezes maior do que em um tanque sem chicanas na região turbulenta ($N_{Re} \geq 1 \times 10^5$) conforme ilustra a Figura 5,11.

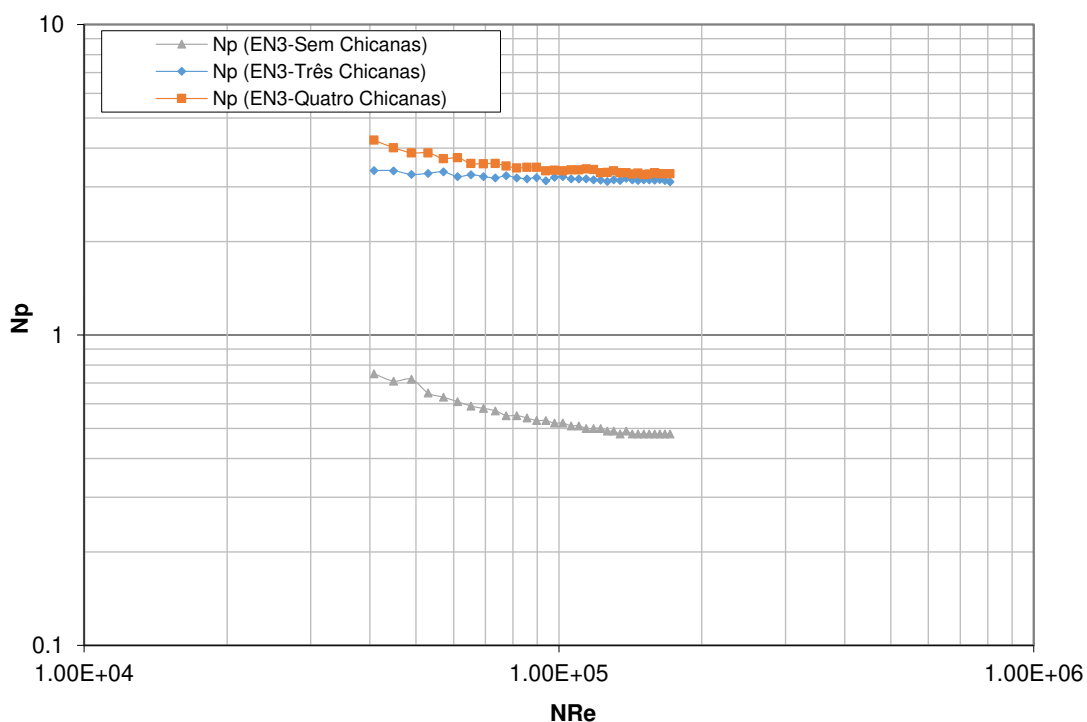


Figura 5.11 – Comparação do número de potência em função do número de Reynolds em tanques sem e com chicanas para o implididor pás retas 90° , $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,55$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$. Fonte: elaboração própria.

5.6 CONSUMO DE POTÊNCIA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE ROTACIONAL

O consumo de potência do impelidor é uma variável de estudo muito importante no sistema de agitação, o qual, fornece informações de projeto e eficiência de um determinado impelidor, porque, a partir do momento em que se controla a velocidade de rotação do impelidor, estará

controlando a existência de possíveis instabilidades e não permitindo que o vórtice central atinja a pá do impelidor.

A Figura 5.12 apresenta resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional do impelidor em tanque com três chicanas com $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$ (variação da velocidade rotacional de 685 rpm a 1450 rpm).

Observa-se que o consumo de potência aumenta com o crescimento da velocidade rotacional e também com o aumento do ângulo da pá do impelidor, conforme os resultados da Figura 5.12. Ao fazer uma comparação dos resultados obtém-se que à medida em que velocidade rotacional vai aumentando, a diferença na potência consumida cresce cada vez mais, como pode ser observado nos impelidores BT3 e BQ3. No impelidor do modelo BT3 para 685 rpm, o valor da potência é de 29,0 W e no modelo BQ3 para 685 rpm o valor da potência é de 60,4 W, uma diferença de 31,4. Enquanto que, no final da rotação para 1450 rpm, no impelidor modelo BT3, o valor da potência é de 251,9 W e para o impelidor modelo BQ3 o valor da potência é de 543,1 W, uma diferença de 291,2 W, quase 10 vezes maior na diferença comparada ao início da rotação analisada no regime turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$). Dessa maneira, os resultados mostram uma grande influência do consumo de potência sobre o ângulo da pá do impelidor em valores maiores de rotação, conforme expostos na Figura 5.12.

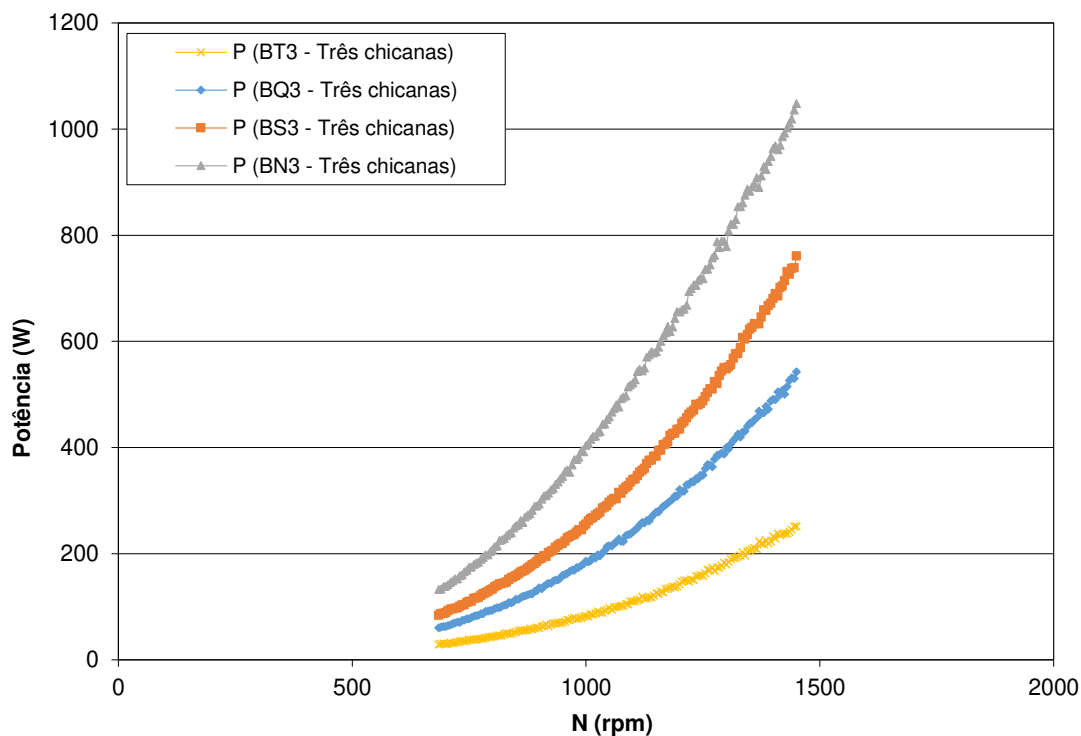


Figura 5.12 – Consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque com três chicanas para as relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$. Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.13 são apresentados resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional do impelidor em tanque com quatro chicanas com $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ para $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$ (variação da velocidade rotacional de 685 rpm a 1280 rpm).

Observa-se que o consumo de potência cresce com o aumento da velocidade rotacional e também com o aumento do ângulo da pá do impelidor, fazendo uma comparação dos resultados entre impelidores é possível verificar que a medida em que a velocidade rotacional vai aumentando, a diferença na potência consumida entre um impelidor e outro aumenta cada vez mais, como pode-se constatar nos impelidores BT3 e BQ3. No impelidor modelo BT3 para 685 rpm, o valor da potência é de 26,4 W e no modelo BQ3 para 685 rpm o valor da potência é de 62,3 W, resultando em uma diferença de 35,9. Enquanto, no final da rotação para 1280 rpm no impelidor modelo BT3 o valor da potência é de 168,3 W e para o impelidor modelo BQ3, o valor da potência é de 389,2 W, verifica-se uma diferença de 220,9 W, 6 vezes maior na diferença quando comparada ao início da rotação analisada no regime turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$).

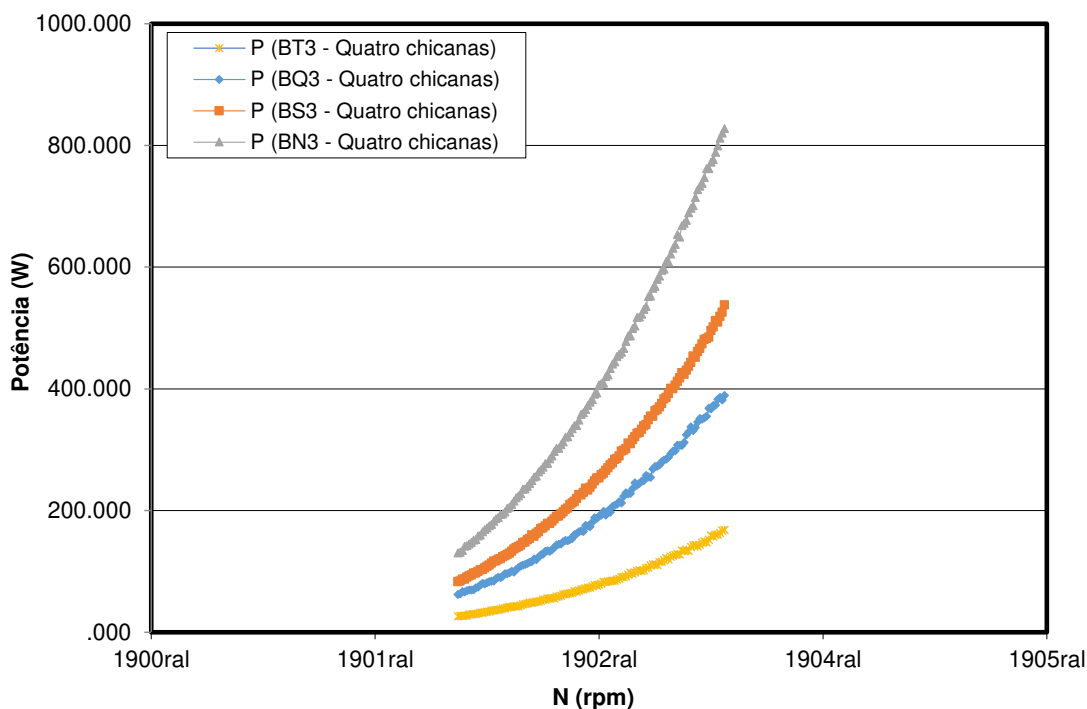


Figura 5.13 – Consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque com quatro chicanas para as relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$. Fonte: elaboração própria.

A Figura 5.14 apresenta os resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional do impelidor em tanque sem chicanas com $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$ para $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$ (variação da velocidade rotacional de 50 rpm a 220 rpm).

Nesse contexto, observa-se que o consumo de potência expande com o aumento da velocidade rotacional e também com o aumento do ângulo da pá do impelidor, fazendo uma comparação dos resultados constata-se que no início da rotação entre 50 rpm e 100 rpm os resultados são praticamente iguais, principalmente para os impelidores de fluxo axial como os modelos ET1, EQ1 E ES1. Enquanto no final da rotação as diferenças de potência entre os impelidores de fluxo axial estão em torno de 1,5 W e 2,0 W para o de fluxo radial EN1 e com o de fluxo axial ES1.

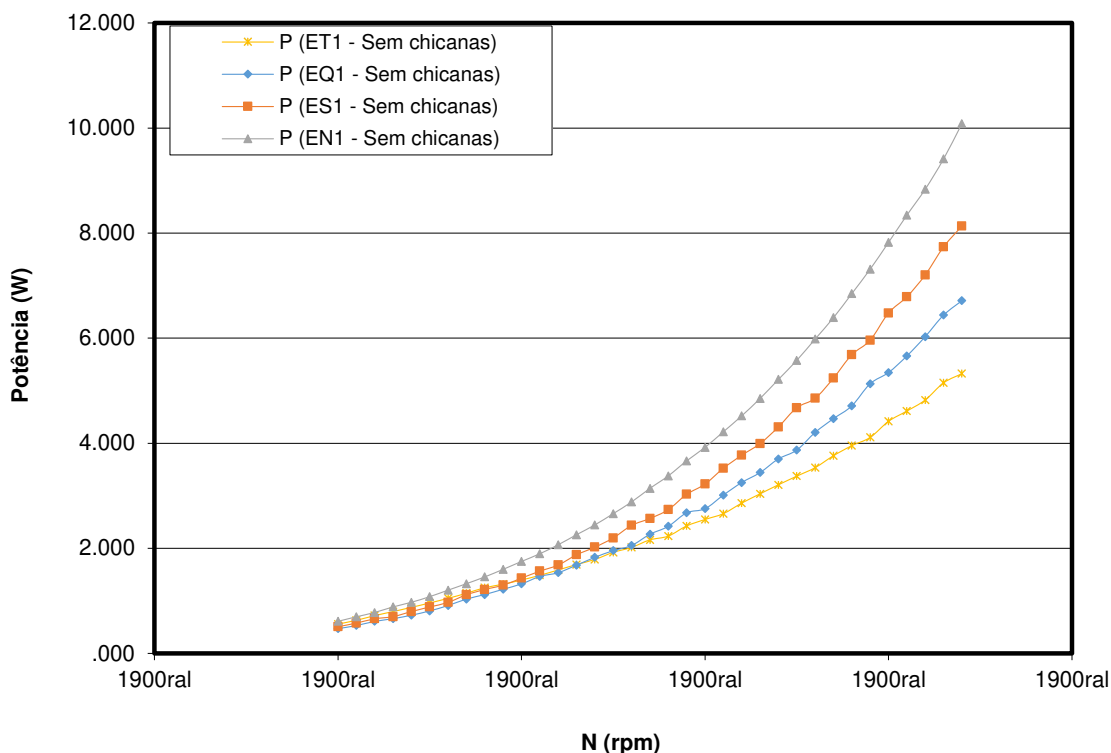


Figura 5.14 – Consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque sem chicanas para as relações geométricas: $w/D_i = 0,14$; $D_i/T = 0,55$ e $N_{Re} \geq 4 \times 10^4$. Fonte: elaboração própria.

Nas Figuras 5.15 e 5.16 apresenta-se a comparação dos resultados do consumo de potência em função da velocidade rotacional do impelidor para tanque sem e com chicanas em impelidores de pás retas inclinadas 45° e pás retas 90° , respectivamente. Os parâmetros geométricos utilizados são: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$.

Observa-se, portanto, que o consumo de potência aumenta com o crescimento da velocidade rotacional. Na Figura 5.15, para a velocidade rotacional de 300 rpm, o consumo de potência sem chicanas fica em torno de 8 W, enquanto, ao se utilizar chicanas é de, aproximadamente, 20 W, ou seja, maior do que duas vezes a influência das chicanas no piloto de 50 L. Em relação à Figura 5.16, para a velocidade rotacional de 250 rpm, o consumo de potência sem chicanas é de cerca de 7 W e, na utilização das chicanas, fica em torno de 34 W, ou seja, quase cinco vezes maior a influência das chicanas. Assim, quanto maior o ângulo da pá do impelidor sobre o uso de chicanas, maior torna-se o consumo de potência sobre o mesmo.

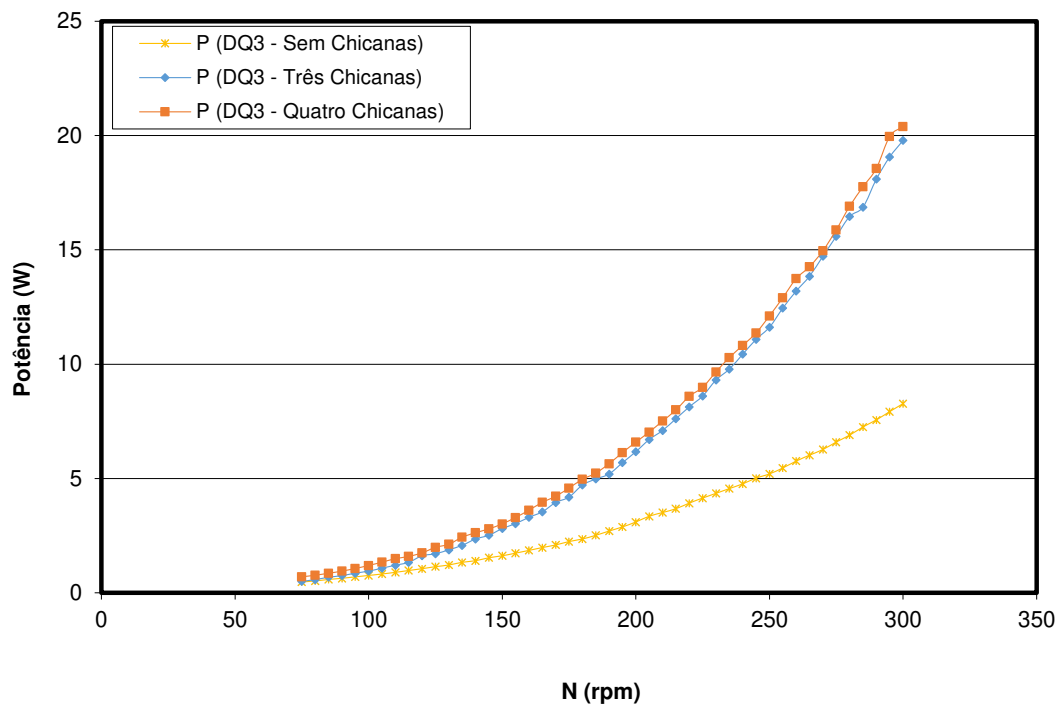


Figura 5.15 – Comparação do consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque sem e com chicanas para pás retas inclinadas 45° , com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$. Fonte: elaboração própria.

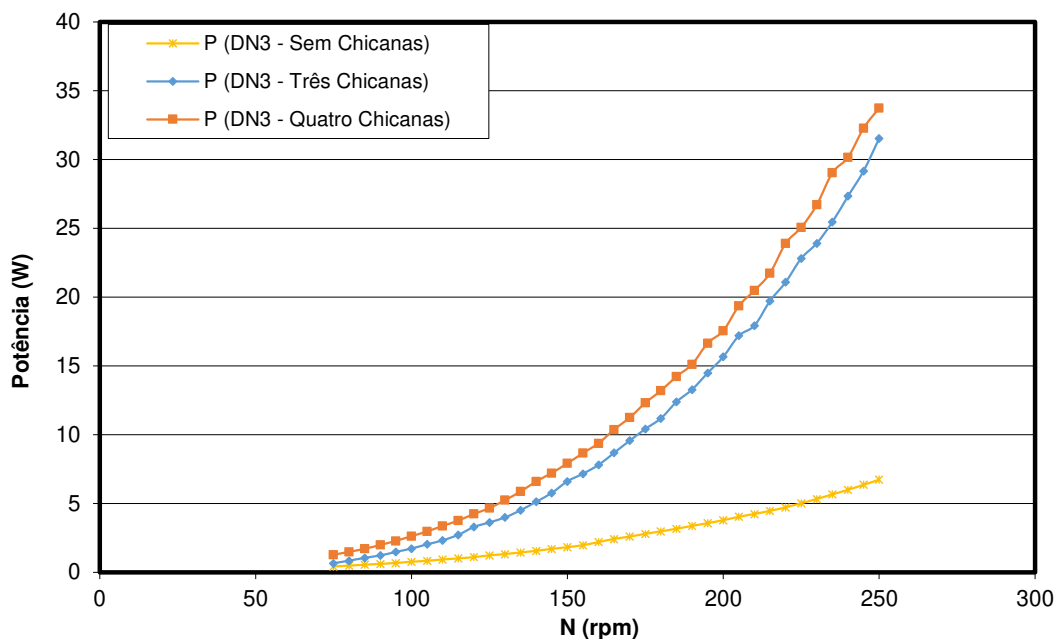


Figura 5.16 – Comparação do consumo de potência do impelidor em função velocidade rotacional em tanque sem e com chicanas para pás retas 90° , com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,45$. Fonte: elaboração própria.

5.7 COMPARAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA COM DADOS DA LITERATURA

É importante destacar a comparação dos dados do número de potência obtidos pela medição do torquímetro com alguns dados obtido na literatura para verificar o quão estes dados estão satisfatórios e eficientes para este processo do sistema de Agitação. Os resultados são comparados para uma configuração com quatro chicanas, $w/D_i = 0,20$, $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$ e com variação do ângulo de pá e da relação D_i/T .

De acordo com os dados mostrados na Tabela 5.18, verifica-se que os dados de número de potência obtidos pelo torquímetro estão próximos dos obtidos pelos resultados de SOUZA (2011) porém com valores menores. Isto torna-se os valores confiáveis e para uma região totalmente turbulenta é de se garantir resultados de número de potência menores e constantes, já que o número de potência define o coeficiente de arraste, ou seja, representa o efeito do atrito do fluido sobre as paredes do tanque em decorrência do nível de agitação do fluido, CREMASCO (2014).

Tabela 5.18 – Comparação do Número de Potência utilizando dados do torquímetro do impelidor com alguns dados da literatura para Tanques com Quatro Chicanas para a relação $w/D_i = 0,20$ e $N_{Re} \geq 2 \times 10^5$.

Modelo	D _i /T	ângulo	N _p (Número de Potência)				
			N _p (torquímetro)	N _p (Souza, 2011)	N _p (Dickey, 2003)	N _p (Nagata, 1975)	N _p (Cerebromix, 2004)
AT3	0.25	30°	0,70	0,90	0,61	0,74	0,58
BT3	0.33	30°	0,55	0,68	0,59	0,75	0,58
CT3	0.40	30°	0,47	0,56	0,58	0,74	0,58
DT3	0.45	30°	0,46	0,54	0,62	0,72	0,55
ET3	0,55	30°	0,50	0,56	0,65	0,65	0,62
AQ3	0.25	45°	1,32	1,55	1,45	1,35	1,37
BQ3	0.33	45°	1,32	1,46	1,40	1,42	1,37
CQ3	0.40	45°	1,14	1,24	1,37	1,44	1,37
DQ3	0.45	45°	1,11	1,19	1,48	1,43	1,40
EQ3	0,55	45°	1,25	1,31	1,55	1,35	1,48
AS3	0.25	60°	2,00	2,23	2,41	2,09	2,27
BS3	0.33	60°	1,87	1,91	2,32	2,38	2,27
CS3	0.40	60°	1,86	1,95	2,27	2,54	2,27
DS3	0.45	60°	1,85	1,93	2,45	2,56	2,34
ES3	0,55	60°	2,16	2,22	2,58	2,45	2,46
AN3	0.25	90°	2,38	2,68	NA	3,48	3,60
BN3	0.33	90°	2,76	2,93	NA	4,45	3,60
CN3	0.40	90°	2,95	3,10	NA	5,04	3,60
DN3	0.45	90°	3,09	3,21	NA	5,18	3,70
EN3	0,55	90°	3,12	3,29	NA	5,02	3,89

Fonte: elaboração própria.

5.8 ELABORAÇÃO DA EQUAÇÃO DO NÚMERO DE POTÊNCIA

Seguindo o modelo de NAGATA (1975) foi elaborada uma equação do número de potência para tanques com três e quatro chicanas, através dos ajustes de alguns parâmetros. Estes ajustes foram obtidos através do programa Solver da ferramenta de planilha de dados do EXCEL.

Os ajustes foram feitos partindo da equação 3.18 e transformando na seguinte equação:

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

Onde:

$B = 10^{\left[1,3 - 4 \left(\frac{Wn_p}{T} - 0,5 \right)^2 - 1,14 \left(\frac{D_i}{T} \right) \right]}$, ajustando os valores: 1,3; 4; 0,5 e 1,14, conforme as letras: d; e; g e h da equação abaixo:

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

E:

$p = 1,1 + 4 \left(\frac{Wn_p}{T} \right) - 2,5 \left(\frac{D_i}{T} - 0,5 \right)^2 - 7 \left(\frac{Wn_p}{T} \right)^4$, ajustando os valores: 1,1; 4; 2,5; 0,5 e 7, conforme as letras: i; j; k; g e l da equação abaixo:

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

Desta forma, para um modelo de um tanque com 3 chicanas pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$, têm-se os resultados das Tabela 5.19 e Figura 5.17:

Tabela 5.19 – Resultados do Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com três chicanas, pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$.

N_{Re}	N_p (Experimental)	N_p (Ajustado)	Erro
2,01E+05	2,49	2,57	7,33E-03
2,01E+05	2,48	2,57	7,69E-03
2,02E+05	2,51	2,57	4,02E-03
2,03E+05	2,48	2,57	6,77E-03
2,04E+05	2,47	2,57	1,01E-02
2,05E+05	2,47	2,56	8,07E-03
2,06E+05	2,48	2,56	6,16E-03
2,06E+05	2,50	2,56	4,20E-03
2,07E+05	2,47	2,56	7,35E-03
2,08E+05	2,50	2,56	3,44E-03
2,09E+05	2,48	2,56	6,14E-03
2,10E+05	2,48	2,56	6,39E-03
2,11E+05	2,48	2,55	6,31E-03
2,11E+05	2,51	2,55	1,71E-03
2,12E+05	2,49	2,55	3,55E-03
2,13E+05	2,51	2,55	1,77E-03
2,14E+05	2,49	2,55	3,18E-03
2,15E+05	2,50	2,55	2,06E-03
2,16E+05	2,52	2,55	8,43E-04
2,17E+05	2,53	2,55	2,79E-04
2,17E+05	2,54	2,54	1,50E-06
2,18E+05	2,54	2,54	2,96E-05
2,19E+05	2,53	2,54	7,41E-05
2,20E+05	2,53	2,54	1,59E-04
2,21E+05	2,53	2,54	1,36E-04
2,22E+05	2,54	2,54	2,62E-05
2,22E+05	2,54	2,54	3,66E-05
2,23E+05	2,55	2,53	1,26E-04
2,24E+05	2,54	2,53	3,12E-05

A Tabela 5.19 mostra os resultados do número de potência experimental, número de potência ajustado e do erro para cada número de Reynolds na região totalmente turbulenta para tanque com três chicanas. E através da Figura 5.17 percebe-se o quanto os valores se ajustaram bem para o perfil do número de potência na região de agitação totalmente turbulenta.

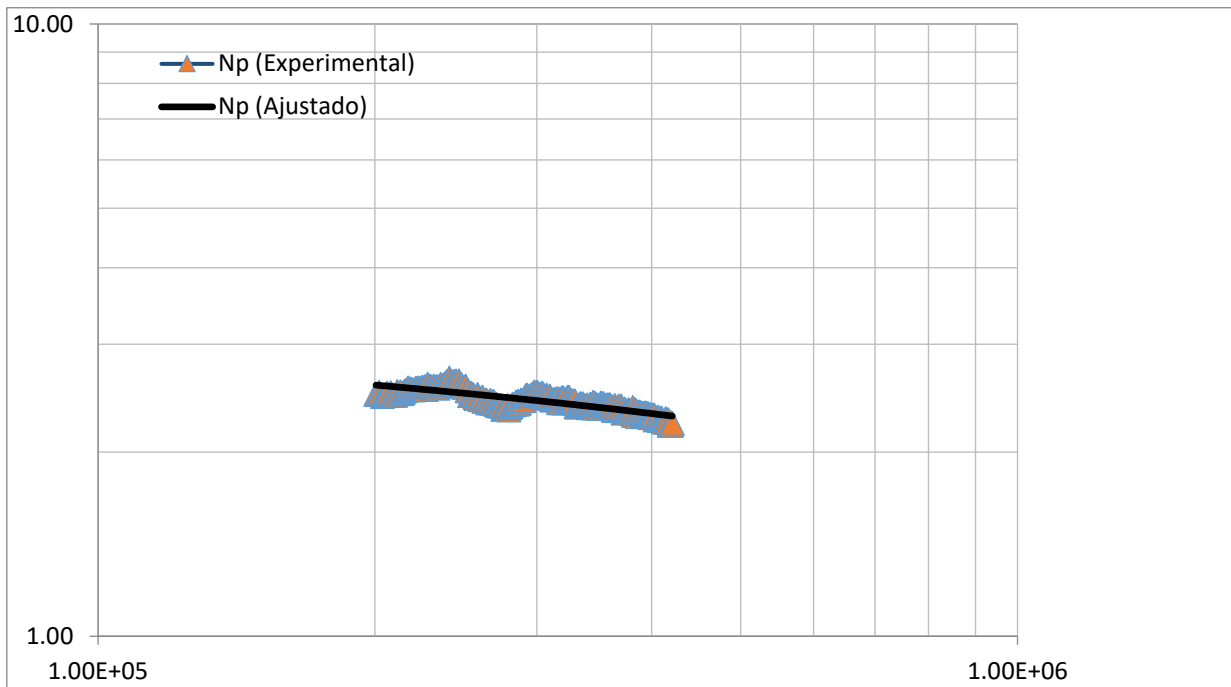


Figura 5.17 – Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com três chicanas, pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$.

De acordo com os ajustes analisados conforme resultados da Tabela 5.19 e Figura 5.17, as variáveis ajustadas obtiveram os seguintes valores:

$$f = 0,094 - \text{alfa} = 0,589 - a = 1,2 - b = 0,210 - c = 3,328 - d = 1,309$$

$$e = 3,974 - g = 0,495 - h = 1,138 - i = 1,085 - j = 3,961 - k = 2,503$$

$$l = 7,001$$

Obtendo desta forma os valores de B e p conforme equações abaixo:

$$B = 10^{\left[d - e \left(\frac{W n_p - g}{T} \right)^2 - h \left(\frac{D_i}{T} \right) \right]}$$

$$B = 10^{\left[1,309 - 3,974(0,2 - 0,495)^2 - 1,138(0,25) \right]}$$

$$B = 3,871$$

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

$$p = 1,085 + 3,961(0,2) - 2,503(0,25 - 0,495)^2 - 7,001(0,2)^4$$

$$p = 1,798$$

De acordo com os parâmetros ajustados, a seguinte equação foi obtida:

$$N_{PB} = 3,871 \left(\frac{10^3 + 0,0564 \cdot N_{Re}^{0,589}}{10^3 + 0,1504 \cdot N_{Re}^{0,589}} \right)^{1,798} (\text{sen}90)^{1,2} - [0,210 - 3,328(0,1)^{1,2} - 3] \left[3,871 \left(\frac{10^3 + 0,0564 \cdot N_{Re}^{0,589}}{10^3 + 0,1504 \cdot N_{Re}^{0,589}} \right)^{1,798} (\text{sen}90)^{1,2} - 3,871 \left(\frac{0,6}{1,6} \right)^{1,798} \right]$$

Esta equação é válida para: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,33$, ângulo = 90 graus e tanque com 3 chicanas.

Para um modelo de um tanque com 4 chicanas pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$, têm-se os resultados das Tabela 5.20 e Figura 5.18:

Tabela 5.20 – Resultados do Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com quatro chicanas, pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$.

Re	Np (Experimental)	Np (Ajustado)	Erro
2,01E+05	2,78	2,80	3,74E-04
2,03E+05	2,78	2,80	3,37E-04
2,04E+05	2,74	2,80	3,35E-03
2,06E+05	2,75	2,80	2,20E-03
2,07E+05	2,82	2,80	5,56E-04
2,08E+05	2,79	2,80	3,51E-05
2,10E+05	2,78	2,79	2,24E-04
2,11E+05	2,77	2,79	5,99E-04
2,13E+05	2,78	2,79	1,83E-04
2,14E+05	2,74	2,79	2,81E-03
2,16E+05	2,79	2,79	4,41E-06
2,17E+05	2,76	2,79	1,00E-03
2,19E+05	2,79	2,79	4,74E-07
2,20E+05	2,8	2,79	9,56E-05
2,22E+05	2,79	2,79	5,07E-07
2,23E+05	2,79	2,79	1,38E-06
2,25E+05	2,77	2,79	3,20E-04
2,26E+05	2,8	2,79	1,58E-04
2,28E+05	2,8	2,79	1,82E-04
2,29E+05	2,78	2,79	3,68E-05
2,30E+05	2,8	2,79	2,07E-04
2,32E+05	2,76	2,78	6,10E-04
2,33E+05	2,75	2,78	1,17E-03
2,35E+05	2,78	2,78	1,12E-05
2,36E+05	2,76	2,78	5,25E-04
2,38E+05	2,77	2,78	1,44E-04
2,39E+05	2,78	2,78	2,46E-06
2,41E+05	2,8	2,78	3,73E-04
2,42E+05	2,79	2,78	9,52E-05

A Tabela 5.20 mostra os resultados do número de potência experimental, número de potência ajustado e do erro para cada número de Reynolds na região totalmente turbulenta para tanque com quatro chicanas. E através da Figura 5.18 percebe-se o quanto os valores se ajustaram bem para o perfil do número de potência na região de agitação totalmente turbulenta.

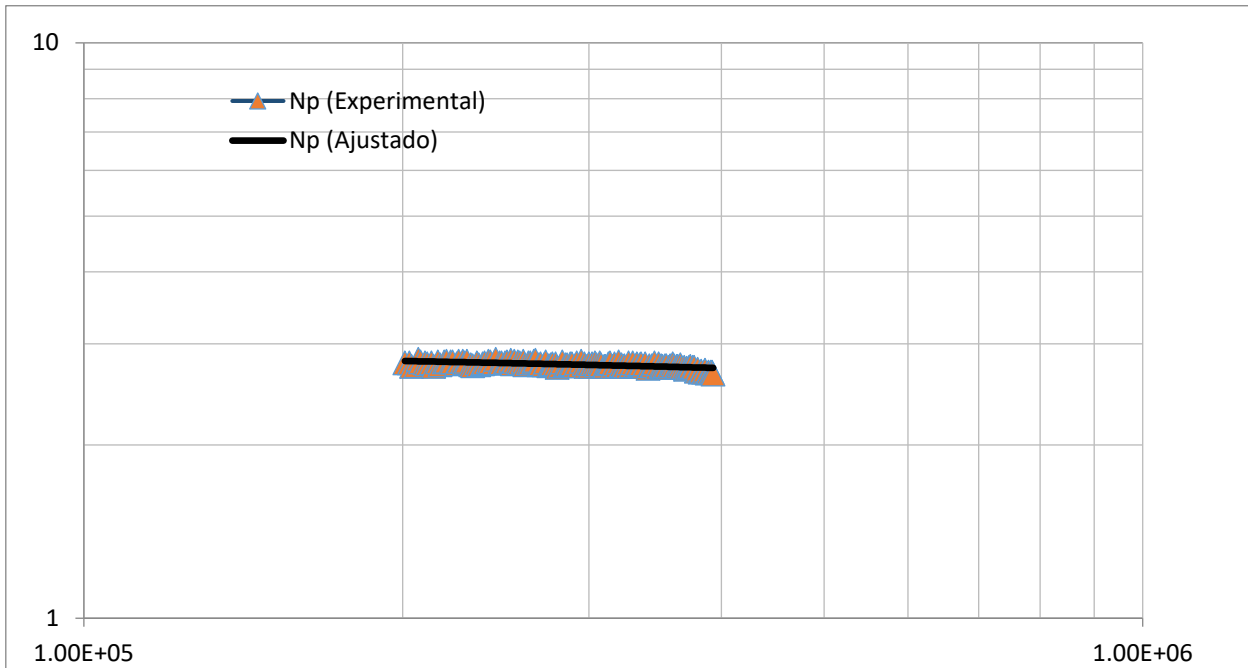


Figura 5.18 – Número de Potência Experimental e ajustado para tanques com quatro chicanas, pás retas 90°, com relações geométricas: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$.

De acordo com os ajustes analisados conforme resultados da Tabela 5.20 e Figura 5.18, as variáveis ajustadas obtiveram os seguintes valores:

$$\begin{aligned}
 f &= 0,157 - \text{alfa} = 0,448 - a = 1,244 - b = 0,096 - c = 3,062 - d = 1,311 \\
 e &= 5,074 - g = 0,467 - h = 1,121 - i = 1,125 - j = 4,066 - k = 2,510 \\
 l &= 6,998
 \end{aligned}$$

Obtendo desta forma os valores de B e p conforme equações abaixo:

$$B = 10^{[1,311 - 5,074(0,2 - 0,467)^2 - 1,121(0,25)]}$$

$$B = 3,797$$

$$p = 1,125 + 4,066(0,2) - 2,510(0,25 - 0,467)^2 - 6,998(0,2)^4$$

$$p = 1,880$$

De acordo com os parâmetros ajustados, a seguinte equação foi obtida:

$$N_{PB} = 3,797 \left(\frac{10^3 + 0,0942 \cdot N_{Re}^{0,448}}{10^3 + 0,2512 \cdot N_{Re}^{0,448}} \right)^{1,880} (\text{sen}90)^{1,244} - [0,0960 - 3,062(0,1)^{1,244} 4] \left[3,797 \left(\frac{10^3 + 0,0942 \cdot N_{Re}^{0,448}}{10^3 + 0,2512 \cdot N_{Re}^{0,448}} \right)^{1,880} (\text{sen}90)^{1,244} - 3,797 \left(\frac{0,6}{1,6} \right)^{1,880} \right]$$

Esta equação é válida para: $w/D_i = 0,20$ e $D_i/T = 0,25$, ângulo = 90 graus e tanque com 4 chicanas.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta uma vasta disponibilidade de informações de variáveis de projeto no sistema de agitação que possa contribuir na eficiência dos cálculos do número de potência de vários tipos de impelidores estudados e nos efeitos dos parâmetros geométricos como w/D_i , D_i/T , Inclinação da pá do impelidor (ângulo) e na influência da presença ou ausência de chicanas sobre o cálculo do consumo de potência do impelidor no sistema de agitação do piloto de 50 L.

Para uma análise dos números de potência dos impelidores estudados em tanque com três e quatro chicanas, os resultados utilizando a metodologia por medição de parâmetros elétricos (SEW) e torquímetro (MAGTROL) apresentaram resultados satisfatórios e significativos em relação aos parâmetros geométricos, comprovando a eficiência dos dois métodos empregados. De um modo geral, os valores dos números de potência utilizando a medição por parâmetros elétricos (SEW) foram maiores comparados aos valores do torquímetro para o conjunto eixo mais impelidor. Isso, realmente acontece devido ao conversor de frequência utilizar informações do motor, eixo, mancal e impelidor. Algumas exceções para esse fato aconteceram, mais precisamente, onde o número de potência foi igual ou um pouco menor, principalmente para o diâmetros do impelidor de valores maiores ($D_i/T = 0,55$ e $0,70$), como os modelos indicados aqui: ES2, EN4, ES4, EN5, FQ2, FN2, FS2, FS3, FN3, FQ4, FN4, FQ5, FS5 para tanque com três chicanas e, FQ3 e FS3 para tanque com quatro chicanas.

Ao analisar os resultados do número de potência pela medição do torquímetro (MAGTROL) aplicados só no impelidor (sem considerar o eixo), pode-se observar que os seus valores são menores quando comparados aos resultados do número de potência do conjunto eixo mais impelidor. Assim, o coeficiente de arraste (número de potência) levando em consideração apenas o impelidor é sempre inferior devido a menor potência consumida sobre o impelidor no fluido. Essa observação é válida e comprovada em todos os modelos testados para tanques com três e quatro chicanas conforme as Tabelas 5.1 a 5.6 e em tanques sem chicanas de acordo com as Figuras de 5.1 a 5.9.

Ao utilizar chicanas no sistema de agitação de 50 L, pode-se observar que os números de potência são constantes na região de regime totalmente turbulento ($N_{Re} \geq 2 \times 10^5$), garantindo, então, uma estabilidade e melhorias de eficiência no projeto de sistema de agitação. Desta forma,

segundo os resultados da Tabela 5.7, foi realizada uma comparação dos valores de número de potência por medições do torquímetro só no impelidor na utilização de três e quatro chicanas no tanque de agitação. Conclui-se que, o uso de quatro chicanas apresenta valores de números de potência um pouco maiores se comparados aos resultados dos números de potência ao se utilizar três chicanas, principalmente para D_i/T entre 0,33 e 0,7.

Em relação aos parâmetros geométricos D_i/T e w/D_i analisados pela medição do torquímetro só no impelidor, verifica-se o quanto as variáveis de estudo são importantes para interpretar o comportamento do número de potência, principalmente na região de regime totalmente turbulento. Sendo assim, em concordância com os resultados das Tabelas 5.8 a 5.11, constata-se que, para o aumento da relação geométrica w/D_i o número de potência também cresce e, para o aumento da relação geométrica D_i/T , o número de potência diminui até um determinado valor de D_i/T . Observe-se nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10 que, para o impelidor de pás retas inclinadas (fluxo axial predominante) de 30° , 45° e 60° , respectivamente, o número de potência diminui até o valor de $D_i/T = 0,45$ para a maioria dos modelos testados. Além disso, verifica-se que, quanto maior é o valor da relação geométrica w/D_i menor é o intervalo de D_i/T onde o número de potência diminui, conforme visto nas Tabelas 5.8, 5.9 e 5.10.

Já em relação à tabela 5.11, os resultados são referentes ao impelidor de pás retas 90° com formação predominante de fluxo radial. Desta maneira, é possível empreender que, nessa tabela, os resultados do número de potência em função do aumento da relação geométrica D_i/T apresentam um comportamento um pouco diferente dos apresentados para fluxo axial, ou seja, em determinadas regiões de D_i/T o número de potência aumenta e em outras regiões de D_i/T o número de potência diminui, como mostrado na Tabela 5.11.

Outra variável muito importante na análise deste projeto é o efeito do ângulo da pá do impelidor sobre o número de potência, nesse contexto, as Tabelas 5.12 a 5.17 mostram resultados do número de potência por medição do torquímetro só no impelidor em função da variação do ângulo da pá do impelidor. Logo, é possível depreender que, o número de potência aumenta com o crescimento do ângulo da pá do impelidor, como ilustrado nos resultados mostrados para cada configuração de modelo adotado com variações dos parâmetros geométricos. Esse aumento do número de potência, conforme aumentado o ângulo da pá em relação ao eixo de impelidor, é

provocado em virtude do aumento da área de arraste da pá do impelidor, aumentando, assim, a potência consumida do impelidor.

No que diz respeito aos dados do número de potência sem o uso de chicanas, os resultados são apresentados em forma de gráficos, conforme os resultados das figuras 5.1 a 5.9. Conclui-se que, os resultados sem chicanas não apresentam uma estabilidade do número de potência quando se atinge a região turbulenta, ou seja, o número de potência diminui com o aumento do número de Reynolds sem atingir um valor constante do número de potência (sem estabilidade do valor de N_p), isso se deve ao fato de que o tanque sem chicanas apresentara presença de vórtices centrais, provocando aeração no sistema e formação de corpo sólido no fundo do recipiente. As figuras 5.1 a 5.4 destacam esse comportamento com variação da relação geométrica w/D_i , então, com o aumento da relação w/D_i o número de potência aumenta.

As Figuras 5.5 a 5.7 mostram o comportamento com variação do ângulo da pá do impelidor, assim, com o aumento do ângulo da pá do impelidor o número de potência também aumenta. No que diz respeito às Figuras 5.8 e 5.9, destaca-se o comportamento com variação da relação geométrica D_i/T , sendo assim, com o aumento da relação D_i/T o número de potência diminui.

As Figuras 5.10 e 5.11 expõem a comparação dos resultados do número de potência em tanques sem e com chicanas para os ângulos de 45° e 90° , respectivamente. Observa-se, portanto, uma estabilidade do número de potência na região turbulenta ($N_{Re} \geq 1 \times 10^5$) quando chicanas são utilizadas, sem o uso de chicanas o número de potência é instável em função do número de Reynolds. Comparando os resultados, percebe-se que o uso de chicanas em pás retas inclinadas a 45° , o número de potência aumenta em torno de 2,7 vezes mais em relação aos resultados de número de potência sem chicanas, como mostra a Figura 5.10. E em pás retas de 90° o número de potência aumenta em torno de 6.5 vezes mais do que quando utilizadas chicanas para uma região totalmente turbulenta como ilustra a Figura 5.11.

Em referência ao consumo de potência do impelidor, os resultados são mostrados nas figuras 5.12 a 5.16. As Figuras 5.12, 5.13 e 5.14 apresentam resultados do consumo de potência do impelidor em função da velocidade rotacional no tanque com três chicanas, quatro chicanas e sem chicanas, respectivamente. Então, conclui-se que a potência consumida cresce com o aumento da velocidade rotacional. As Figuras 5.15 e 5.16 expõem comparações dos resultados do consumo de potência em tanque sem e com chicanas para os impelidores de pás com ângulos de 45° e 90° ,

respectivamente. Assim, observa-se que fixando uma determinada velocidade rotacional, pode-se fazer uma análise dos resultados. Por exemplo: para a velocidade rotacional de 250 rpm, os resultados do impelidor pás retas inclinadas a 45° mostram o consumo de potência do impelidor no tanque sem chicanas em torno de 5 W e no tanque com chicanas em torno de 12,5 W. Enquanto para a velocidade rotacional de 250 rpm, os resultados do impelidor de pás retas 90° mostram o consumo de potência do impelidor no tanque sem chicanas em torno de 7 W e no tanque com chicanas em torno de 32 W e 34 W, para três e quatro chicanas, respectivamente. Ou seja, constata-se que quando o ângulo da pá do impelidor passa de 45° para 90° o consumo de potência praticamente triplica quando as chicanas são utilizadas a uma velocidade de 250 rpm, como os resultados evidenciados nas Figuras 5.15 e 5.16.

De um modo geral este trabalho destaca-se a importância da análise por meio experimental do números adimensionais como: número de potência e número de Reynolds sobre as variações de algumas relações geométricas importantes no sistema de agitação, assim como a influência do ângulo da pá do impelidor e o destaque ao se utilizar chicanas no sistema de agitação, que neste caso, mostra-se o quanto é eficiente no processo a utilização de chicanas, já que em regimes turbulentos obtém-se números de potência constante, atingindo a sua estabilidade no sistema operacional.

A análise dos resultados do torquímetro magtrol com os impulsos elétricos do inversor de frequência mostram que o inversor apresenta uma boa estimativa para o consumo de potência, especialmente em elevados números de Reynolds, em que ocorrem a maioria das operações industriais.

Uma importante contribuição deste trabalho foi o desenvolvimento de uma equação única para o consumo de potência em função dos parâmetros geométricos do impelidor (relação diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque, relação largura da pá/diâmetro do impelidor e ângulo de ataque do impelidor). NAGATA (1975) foi o primeiro a sugerir essa equação, mas devido à época na qual a equação foi sugerida, ele não conseguiu ajustar adequadamente seus dados. Este trabalho mostra que esta equação pode ser utilizada fornecendo uma boa estimativa para o consumo de potência.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Em função do grande número de variáveis envolvidas no sistema de agitação, os estudos devem ser realizados por etapas ou por um grupo de pesquisadores, de modo a analisar novas variáveis que não foram levadas em consideração em termos de análise neste projeto. Assim, como, por exemplo, a variação no nível do líquido, a posição descentralizada do impelidor, os testes com outros tipos de impelidores de fluxo axial e radial, a variação do número de pás do impelidor (2, 3, 6 e 8), o número de impelidores no eixo árvore em 1 e 2, a aplicações de outros tipos de fluidos e a variação da altura do centro do impelidor ao fundo do tanque. Dessa forma, pesquisadores aproveitam ao máximo a unidade piloto construída com a finalidade de geração de material técnico capaz de aprimorar os processos de agitação e mistura, levando ao desenvolvimento tecnológico de nosso parque industrial e otimizando os custos de processo.
- Criar parcerias de trabalhos como empresas que atuam com sistemas de agitação e vínculos de trabalhos com outras universidades, aprimorando mais conhecimento e descobrindo soluções para problemas pertinentes.
- Comparação dos resultados experimentais deste trabalho com alguns *softwares* comerciais e com correlações empíricas obtidas da literatura.
- Criar um sistema de aquisição de dados (planilha de dados) para uso de ferramenta didática em sala de aula na disciplina de operações unitárias por separação mecânica, visando um aprendizado mais elaborado e dinâmico.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAKKER, A.; SMITH, J.M.; MEYERS, K.J.; How to Disperse Gases in Liquids. **Chemical Engineering**. v.97, n.04, p.51-159, abr.1990.
- BATES, R.L.; FONDY, P.L.; FENIC, J.G.; Impeller Characteristics and Power. In: UHL, V.W.; GRAY, J.B.; **Mixing: Theory and Practice**. cap.3, p.111-178, 1966.
- CEREBROMIX (2004); **Software de Seleção e Cálculo de Agitadores e Vasos de Pressão**. Campinas: Cérebro – Engenharia e Tecnologia da Informação S.A: <http://www.cerebromix.com>; Versão 2.0.45,2004.
- CHEREMISIOFF, N. P.; **Handbook of Chemical Processing Equipment**. Woburn Butterworth-Heinemann, 2000.
- CREMASCO, M.A.; **Operações Unitárias em Sistemas Particulados e Fluidomecânicos** Segunda edição – São Paulo: Editora Blucher, 2014, p. 97.
- DICKEY, D.S.; Program Chooses Agitator. **Chemical Engineering**. v.91, n.01, p.73-81, Jan. 1984.
- DICKEY, D. S., **Agitation & Mixing Technology Seminar**, Dayton, Ohio - MixTech, Inc, 2003.
- DICKEY, D.S.; SOUZA, E.; Take Mixing to the Max. **Chemical Processing**. v.66, n.6, p.48-51, June 2003.
- FASANO, J.B.; BAKKER, A.; PENNEY, W.R.; Advanced Impeller – Geometry Boots Liquid Agitation. **Chemical Engineering**, v.101, n.8, p.110-116, Aug.1994.
- FASANO, J.B.; MILLER, J.L.; PASLEY, S.A.; Consider Mechanical Design of Agitators. **Chemical Engineering**, n.8, p.60-71, Aug.1995.
- FREITAS, P.; **Análises de Relações Potência / Velocidade para Projeto de Agitadores com Respostas Dinâmicas Desejadas**. 109p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1993.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, W. M.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC, 1982.
- HAYWARD, LTD., **Hayward Gordon Ltd. Mixing Fundamentals**. Disponível em: <http://www.haywardgordon.com>. Acesso em: 04 jul. 2005.
- HARBY N., EDWARDS M. F. and NIENOW A. W. **Mixing in the Process Industries** 2nd ed. Butterworth Heinemann, 1992.

JUNIOR C. F. J., CEKINSKI E., NUNHEZ J. R. e URENHA L. C. **Agitação e Mistura na Indústria** vol 1- Rio de Janeiro –LTC, p. 3-20, 2012.

LENG, D.E.; CALABRESE, R.V.; Immiscible Liquid-Liquid Systems. In: PAUL, E.L.; ATIEMO-OBENG, V.A.; KRESTA, S.M.; (Eds.). **Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice**, 1nd ed., New Jersey: Hoboken, 2003, cap. 12, p. 639,753.

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

MAGTROL: **Software para medição de torque do motor**. Switzerland: Magtrol S.A: <http://www.magtrol.com>; Versão SW-TM-3400-WE. 2006.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit Operations of Chemical Engineering**, 7^oed., McGraw-Hill, 1140p, 2005.

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

OLDSHUE, J.Y.; **Fluid Mixing Technology**. New York: McGraw-Hill Publications, 1983, 574p.

OLDSHUE, J.Y.; **Mistura de Fluidos: Teoria Prática e Nova Fronteiras**. São Paulo 7 e 8 de out. 2004. Palestra ministrada na disciplina de extensão. Faculdade de Engenharia Química da Universidade Estadual de Campinas. 2004.

PAUL, E.L.; ATIEMO-OBENG, V.A.; KRESTA, S.M.; (Eds.). **Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice**. 1nd ed. New Jersey: Hoboken, p. 1377.2003.

POST, T.: **Optimization and solutions, Impellers**. Disponível em: <http://www.postmixing.com/mixing_forum/impellers/impellers.htm>. Acesso em: 04 jul. 2005.

POSTMIXING; 2005 Post mixing: Optimization and solutions, Impellers. Disponível em: <http://www.postmixing.com/mixing_forum/impellers/impellers.htm>. Acesso em: 04 jul. 2005.

RAZUK, P.C.; **Um Estudo Sobre as Operações Unitárias de Agitação, Troca de Calor em Tanques e Mistura de Pós**. 50p. 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, p. 395-404, 1950.

SEW: **Movitools - Software para visualização da corrente ativa consumida pelo motor**. Guarulhos: SEW Eurodrive Brasil Ltda.: <http://www.sew.com.br>; Versão 4.10. 2006.

SILVA, J. L. G. **Análise Crítica das Correlações e Parâmetros Fundamentais em Sistemas de Agitação**. 193p. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas/UNICAMP. Campinas. Abril. 2002.

SILVA, J. L. G.; SOUZA, E e NUNHEZ, J. R.; **Determinação das Curvas de Potência de Impelidores Tipo Pás Retas Inclinadas Utilizando Métodos Experimentais**. XVII COBEQ 14 a 18 setembro 2008. Recife-PE, 8p. 2008.

SOUZA, E.; LEAL, A.C.B.C; TORSANI, F.L.; HORY, I.R.; Improved agitators applied to high viscosity fluids in concentrated juices. In: **Transactions of the 2003 Citrus Engineering Conference**, Mar. 2003, Lake Alfred, FL, American Society of Mechanical Engineering, Florida Section, v.49, p. 81-98. 2003.

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

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

TATTERSON, G. B.; **Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks**. McGraw-Hill, Inc., 547p. 1991.

UHL, V.W.; GRAY, J.B.; (Eds.). **Mixing – Theory and Practice**. London: Academic Press, v.1, 340p, 1966.

WHITE, A.M.; BRENER, E.; PHILLIPS, G.A.; MORRISON, M.S.; **Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs. (A.I.Ch.E.)**. v.30, p.570, 1934.

ANEXO A - METODOLOGIA PARA ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Resultados utilizando os Parâmetros Elétricos (SEW). Saída de dados: Velocidade Rotacional (rpm), Torque (mW) e Potência (mW) com os cálculos do Número de Reynolds e Número de Potência.

Tabela A1 – Resultados utilizando parâmetros elétricos (SEW) com informações do Número de Potência em tanque com três chicanas, $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,20$ em pás retas inclinadas 45° .

Tanque:	Diâmetro Interno (mm):		T	380
	Altura de Costado (mm):		Hc	693
	Altura da coluna água (mm):		H	380
Fluido:	Produto de Teste:	Viscosidade (cP):	0,8899	
		Densidade (kg/m ³):	997,00	
		Temperatura (°C):	25,00	

Dados para Tanque com 3 Chicanas							
Nº	Código	Di (mm)	W (mm)	θ °	Di/T	w/Di	
38	BQ3-3C	125,4	25,08	45	0,33	0,2	
N (r.p.m)	N (r.p.s)	NRe	Torque(mNm)-SEW	P(mW)-SEW	Np		
5,0	0,083	1,47E+03	60	18	1006,08		
10,0	0,167	2,94E+03	80	72	503,04		
15,0	0,250	4,40E+03	100	120	248,42		
20,0	0,333	5,87E+03	120	216	188,64		
25,0	0,417	7,34E+03	140	350	156,50		
30,0	0,500	8,81E+03	140	499	129,12		
35,0	0,583	1,03E+04	161	547	89,14		
40,0	0,667	1,17E+04	161	644	70,30		
45,0	0,750	1,32E+04	161	756	57,96		
50,0	0,833	1,47E+04	181	905	50,58		
60,0	1,000	1,76E+04	201	1185	38,33		

70,0	1,167	2,06E+04	221	1591	32,41
80,0	1,333	2,35E+04	221	1790	24,43
90,0	1,500	2,64E+04	241	2265	21,71
100,0	1,667	2,94E+04	241	2482	17,34
120,0	2,000	3,52E+04	261	3262	13,19
140,0	2,333	4,11E+04	301	4334	11,04
160,0	2,667	4,70E+04	322	5345	9,12
180,0	3,000	5,29E+04	342	6405	7,67
200,0	3,333	5,87E+04	362	7493	6,54
220,0	3,667	6,46E+04	382	8747	5,74
240,0	4,000	7,05E+04	422	10592	5,35
260,0	4,333	7,63E+04	442	11934	4,74
280,0	4,667	8,22E+04	463	13519	4,30
300,0	5,000	8,81E+04	483	15166	3,92
325,0	5,417	9,54E+04	523	17729	3,61
350,0	5,833	1,03E+05	563	20493	3,34
375,0	6,250	1,10E+05	603	23463	3,11
400,0	6,667	1,17E+05	664	27688	3,02
425,0	7,083	1,25E+05	704	31116	2,83
450,0	7,500	1,32E+05	765	36031	2,76
475,0	7,917	1,39E+05	785	41662	2,72
500,0	8,333	1,47E+05	825	45123	2,52
550,0	9,167	1,61E+05	905	51266	2,15
600,0	10,000	1,76E+05	966	60954	1,97
650,0	10,833	1,91E+05	1127	76825	1,95
700,0	11,667	2,06E+05	1268	92158	1,88
750,0	12,500	2,20E+05	1368	105413	1,75
800,0	13,333	2,35E+05	1489	124331	1,70
850,0	14,167	2,50E+05	1670	148463	1,69
900,0	15,000	2,64E+05	1872	175870	1,69
950,0	15,833	2,79E+05	2053	205094	1,67
1000,0	16,667	2,94E+05	2174	227400	1,59
1100,0	18,333	3,23E+05	2415	277483	1,46
1200,0	20,000	3,52E+05	2858	358107	1,45
1300,0	21,667	3,82E+05	3341	452371	1,44
1400,0	23,333	4,11E+05	3653	532970	1,36

1500,0	25,000	4,40E+05	4147	651079	1,35
				MÉDIA =	1,58

- Cálculos de NRe e Np para N = 1500 rpm:

$$N_{Re} = \frac{\rho N D^2}{\mu} = \frac{997(\text{kg} / \text{m}^3) \cdot 25(\text{s}^{-1}) \cdot 0,1254^2 (\text{m}^2)}{0,8899 \times 10^{-3} (\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s})} = 4,40 \times 10^5$$

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = \frac{651,079 (\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3)}{997 (\text{kg} / \text{m}^3) \cdot 25^3 (\text{s}^3) \cdot 0,1254^5 (\text{m}^5)} = 1,35$$

ANEXO B – RESULTADOS UTILIZANDO O TRANSDUTOR DE TORQUE – TORQUÍMETRO (MAGTROL). SAÍDA DE DADOS: VELOCIDADE ROTACIONAL (RPM), TORQUE (MW), POTÊNCIA (W) E TEMPO (S) COM OS CÁLCULOS DO NÚMERO DE REYNOLDS E NÚMERO DE POTÊNCIA.

Etapas de obtenção dos dados do Torquímetro:



Figura B1 – Dados de Entrada do *software* MAGTROL (TORQUE 1.5) com informações da rotação inicial, rotação máxima (para cada tipo de impelidor estudado) e o passo de tempo (15 em 15 segundos para cada mudança de rotação de 5 em 5 rpm). Fonte: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (arquivo pessoal).

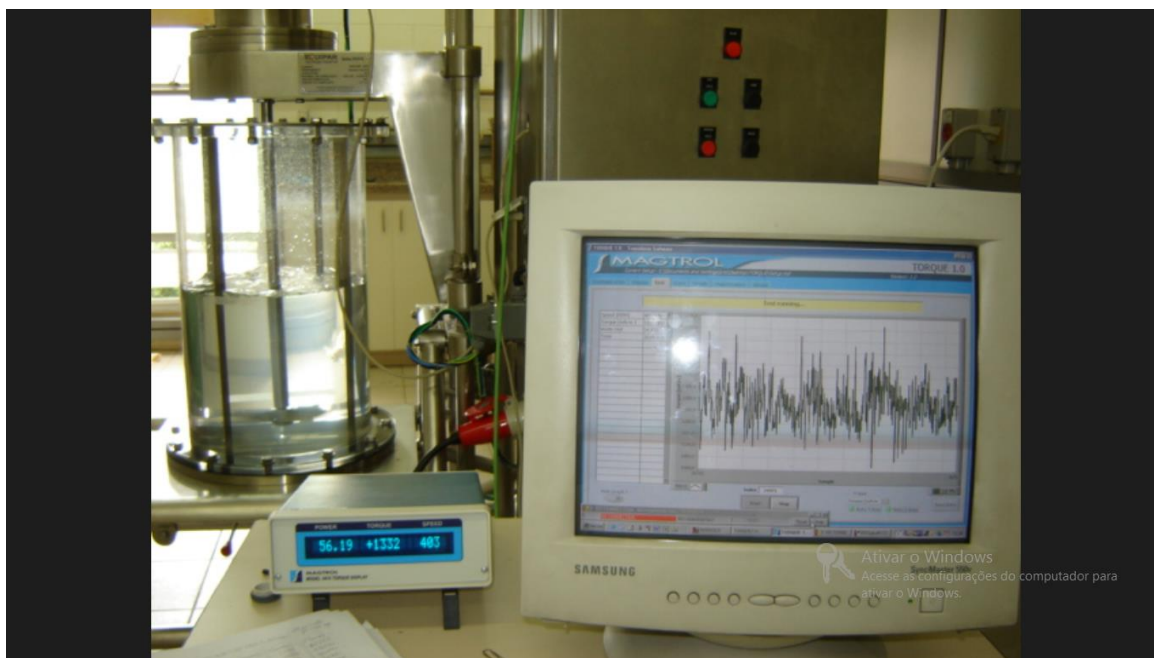


Figura B2 – Dados de Saída do software MAGTROL (TORQUE 1.5) com informações da potência (*power*) em W, torque em mW e rotação do impelidor (*speed*) em rpm. Fonte: Jefferson Luiz Grangeiro da Silva (arquivo pessoal).

Tabela B1 – Dados de saída do Torquímetro para início de teste (estabilizando a rotação) em tanque com três chicanas, $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,20$ em pás retas inclinadas 45° .

Speed [RPM]	Torque [mN.m]	Watts Out	Time
0.000	0.088	0.000	0.090
0.000	0.772	0.000	0.150
0.000	0.319	0.000	0.210
0.000	0.001	0.000	0.270
0.000	1.289	0.000	0.350
0.000	0.978	0.000	0.410
0.000	0.397	0.000	0.480
0.000	0.017	0.000	0.531
0.000	0.463	0.000	0.591
0.000	1.958	0.000	0.671
0.000	0.812	0.000	0.761
0.000	2.317	0.000	0.821
0.000	0.032	0.000	0.901
0.000	1.443	0.000	0.971
0.000	0.779	0.000	1.061
0.000	0.144	0.000	1.121
0.000	0.659	0.000	1.192
0.000	2.421	0.000	1.292
0.000	0.555	0.000	1.372
0.000	0.555	0.000	1.432
0.000	0.147	0.000	1.512
0.000	1.831	0.000	1.612
0.000	0.312	0.000	1.672
0.000	0.952	0.000	1.742

Fonte: elaboração própria.

Tabela B2 – Dados de saída do Torquímetro para 5 rpm (início da rotação) em tanque com três chicanas, $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,20$ em pás retas inclinadas 45°

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
0.000	59.680	0.000	14.300	
0.000	48.530	0.000	14.360	
0.000	42.310	0.000	14.411	
5.000	34.700	0.018	14.851	
5.000	30.680	0.016	14.901	
5.000	31.650	0.017	14.951	
5.000	27.330	0.014	15.001	
5.000	22.350	0.012	15.051	
5.000	22.350	0.012	15.112	
5.000	24.470	0.013	15.162	
0.000	26.720	0.000	15.212	
0.000	44.430	0.000	15.272	
0.000	44.430	0.000	15.322	
0.000	84.050	0.000	15.372	
0.000	87.300	0.000	15.422	
0.000	28.700	0.000	15.482	
0.000	21.750	0.000	15.532	
0.000	21.750	0.000	15.582	
5.000	23.040	0.012	15.642	
5.000	21.900	0.011	15.692	
5.000	17.150	0.009	15.742	
5.000	18.990	0.010	15.803	
5.000	18.990	0.010	15.853	
5.000	16.130	0.008	15.903	
5.000	17.610	0.009	15.963	

Fonte: elaboração própria.

Tabela B3 – Dados de saída do Torquímetro para 1560 rpm (rotação máxima-final de teste) em tanque com três chicanas, $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,20$ em pás retas inclinadas 45° .

Arquivo	Editar	Formatar	Exibir	Ajuda
1559.000	3974.000	648.787	5619.510	
1559.000	4278.000	698.418	5619.660	
1559.000	4215.000	688.133	5619.801	
1560.000	3868.000	631.887	5619.951	
1560.000	3509.000	573.240	5620.091	
1560.000	3967.000	648.060	5620.241	
1559.000	3971.000	648.298	5620.371	
1560.000	3848.000	628.620	5620.522	
1560.000	4053.000	662.109	5620.662	
1559.000	4218.000	688.622	5620.812	
1560.000	3881.000	634.011	5620.962	
1560.000	4177.000	682.366	5621.103	
1559.000	4294.000	701.030	5621.243	
1559.000	4170.000	680.786	5621.393	
1559.000	3793.000	619.238	5621.543	
1560.000	3890.000	635.481	5621.683	
1558.000	4640.000	757.031	5621.814	
1558.000	4444.000	725.053	5621.974	
1560.000	4012.000	655.411	5622.124	
1560.000	4124.000	673.708	5622.254	
1560.000	4185.000	683.673	5622.414	
1559.000	4046.000	660.542	5622.565	
1559.000	4139.000	675.725	5622.705	
1560.000	4030.000	658.352	5622.855	
1560.000	4492.000	733.826	5622.995	

Fonte: elaboração própria

Tabela B4 – Dados filtrados utilizando torquímetro (MAGTROL) com informações do Número de Potência (eixo + impelidor) e Número de Potência (impelidor) em tanque com três chicanas, $D_i/T = 0,33$ e $w/D_i = 0,20$ em pás retas inclinadas 45° .

Amostras	N (rpm)	P (W)	Desvio P (W)	NRe	Np (eixo + impelidor)	P (W) - eixo	diferença de P (W)	Np (BQ3-3C)- Impelidor
140	5	0,013	0,007	1,47E+03	704,91	0,025	-0,012	
289	10	0,022	0,009	2,94E+03	152,73	0,030	-0,009	
278	15	0,040	0,016	4,40E+03	82,27	0,041	-0,002	
266	20	0,063	0,023	5,87E+03	54,59	0,048	0,014	12,41
257	25	0,086	0,027	7,34E+03	38,41	0,061	0,025	11,27
253	30	0,111	0,030	8,81E+03	28,82	0,076	0,035	9,15
248	35	0,146	0,035	1,03E+04	23,72	0,097	0,049	7,95
244	40	0,168	0,036	1,17E+04	18,36	0,123	0,045	4,94
239	45	0,196	0,038	1,32E+04	14,99	0,153	0,043	3,26
238	50	0,234	0,041	1,47E+04	13,09	0,179	0,055	3,09
235	55	0,277	0,045	1,61E+04	11,63	0,206	0,071	2,98
239	60	0,311	0,047	1,76E+04	10,07	0,236	0,075	2,43
241	65	0,364	0,050	1,91E+04	9,27	0,268	0,096	2,45
233	70	0,413	0,055	2,06E+04	8,41	0,299	0,114	2,31
230	75	0,465	0,062	2,20E+04	7,70	0,364	0,101	1,67
227	80	0,512	0,064	2,35E+04	6,99	0,396	0,116	1,59
229	85	0,575	0,066	2,50E+04	6,54	0,408	0,167	1,90
223	90	0,626	0,069	2,64E+04	6,00	0,476	0,150	1,44
218	95	0,687	0,076	2,79E+04	5,60	0,507	0,180	1,47
220	100	0,761	0,078	2,94E+04	5,32	0,562	0,199	1,39
222	105	0,827	0,086	3,08E+04	4,99	0,599	0,228	1,38
226	110	0,905	0,089	3,23E+04	4,75	0,648	0,257	1,35
228	115	0,983	0,098	3,38E+04	4,52	0,683	0,300	1,38
251	120	1,071	0,100	3,52E+04	4,33	0,637	0,434	1,75
305	125	1,163	0,117	3,67E+04	4,16	0,742	0,421	1,51
315	130	1,268	0,106	3,82E+04	4,03	0,786	0,482	1,53
292	135	1,357	0,114	3,96E+04	3,85	0,829	0,528	1,50
321	140	1,463	0,113	4,11E+04	3,73	0,877	0,586	1,49
323	145	1,558	0,123	4,26E+04	3,57	0,921	0,637	1,46
317	150	1,647	0,132	4,40E+04	3,41	0,955	0,692	1,43
313	155	1,766	0,127	4,55E+04	3,31	1,003	0,763	1,43
313	160	1,890	0,142	4,70E+04	3,22	1,038	0,852	1,45
313	165	2,053	0,145	4,84E+04	3,19	1,107	0,946	1,47
305	170	2,136	0,148	4,99E+04	3,04	1,135	1,001	1,42
275	175	2,297	0,159	5,14E+04	2,99	1,165	1,132	1,48
315	180	2,419	0,153	5,29E+04	2,90	1,205	1,214	1,45
310	185	2,579	0,167	5,43E+04	2,85	1,244	1,335	1,47
312	190	2,681	0,184	5,58E+04	2,73	1,281	1,400	1,43
313	195	2,840	0,171	5,73E+04	2,68	1,336	1,504	1,42

311	200	3,004	0,185	5,87E+04	2,62	1,400	1,604	1,40
315	205	3,210	0,183	6,02E+04	2,60	1,402	1,808	1,47
318	210	3,310	0,192	6,17E+04	2,50	1,456	1,854	1,40
310	215	3,541	0,227	6,31E+04	2,49	1,499	2,042	1,44
311	220	3,742	0,219	6,46E+04	2,46	1,550	2,192	1,44
307	225	3,918	0,222	6,61E+04	2,40	1,602	2,316	1,42
306	230	4,164	0,216	6,75E+04	2,39	1,641	2,523	1,45
300	235	4,444	0,234	6,90E+04	2,39	1,698	2,746	1,48
300	240	4,736	0,261	7,05E+04	2,39	1,741	2,995	1,51
298	245	4,848	0,276	7,19E+04	2,30	1,784	3,064	1,46
292	250	5,110	0,270	7,34E+04	2,28	1,829	3,281	1,47
293	255	5,248	0,290	7,49E+04	2,21	1,884	3,364	1,42
287	260	5,512	0,324	7,63E+04	2,19	1,915	3,597	1,43
289	265	5,922	0,298	7,78E+04	2,22	1,990	3,932	1,48
287	270	6,151	0,359	7,93E+04	2,18	2,050	4,101	1,46
289	275	6,348	0,379	8,07E+04	2,13	2,091	4,257	1,43
286	280	6,721	0,360	8,22E+04	2,14	2,124	4,597	1,46
281	285	6,920	0,354	8,37E+04	2,09	2,195	4,725	1,43
287	290	7,230	0,410	8,52E+04	2,07	2,212	5,018	1,44
281	295	7,422	0,401	8,66E+04	2,02	2,290	5,132	1,40
272	300	7,869	0,413	8,81E+04	2,04	2,345	5,524	1,43
281	305	8,172	0,444	8,96E+04	2,01	2,386	5,786	1,42
274	310	8,419	0,427	9,10E+04	1,97	2,456	5,963	1,40
274	315	8,864	0,481	9,25E+04	1,98	2,480	6,384	1,43
268	320	9,079	0,450	9,40E+04	1,94	2,521	6,558	1,40
263	325	9,371	0,510	9,54E+04	1,91	2,573	6,798	1,38
264	330	9,710	0,483	9,69E+04	1,89	2,654	7,056	1,37
262	335	10,365	0,548	9,84E+04	1,93	2,676	7,689	1,43
266	340	10,560	0,563	9,98E+04	1,88	2,732	7,828	1,39
266	345	10,780	0,599	1,01E+05	1,83	2,776	8,004	1,36
258	350	11,487	0,624	1,03E+05	1,87	2,825	8,662	1,41
255	355	11,763	0,613	1,04E+05	1,84	2,851	8,912	1,39
253	360	12,066	0,656	1,06E+05	1,81	2,905	9,161	1,37
249	365	12,565	0,644	1,07E+05	1,81	2,974	9,591	1,38
248	370	13,011	0,687	1,09E+05	1,79	3,026	9,985	1,38
248	375	13,774	0,794	1,10E+05	1,82	3,063	10,711	1,42
248	380	13,807	0,858	1,12E+05	1,76	3,132	10,675	1,36
251	385	14,579	0,828	1,13E+05	1,78	3,162	11,417	1,40
252	390	14,794	0,926	1,15E+05	1,74	3,237	11,557	1,36
244	395	15,207	0,817	1,16E+05	1,72	3,273	11,934	1,35
241	400	16,069	0,883	1,17E+05	1,75	3,318	12,751	1,39
236	405	16,189	0,856	1,19E+05	1,70	3,351	12,838	1,35
240	410	16,892	0,974	1,20E+05	1,71	3,409	13,483	1,37
237	415	17,326	0,942	1,22E+05	1,69	3,441	13,885	1,36
235	420	17,645	0,875	1,23E+05	1,66	3,485	14,160	1,34

234	425	18,606	0,910	1,25E+05	1,69	3,533	15,073	1,37
234	430	19,038	1,082	1,26E+05	1,67	3,647	15,391	1,35
232	435	19,327	1,246	1,28E+05	1,64	3,678	15,649	1,33
230	440	19,845	1,088	1,29E+05	1,63	3,764	16,081	1,32
226	445	20,698	1,260	1,31E+05	1,64	3,771	16,927	1,34
225	450	21,234	1,165	1,32E+05	1,63	3,775	17,459	1,34
227	455	21,458	1,223	1,34E+05	1,59	3,885	17,573	1,30
223	460	22,187	1,269	1,35E+05	1,59	3,968	18,219	1,31
223	465	23,401	1,238	1,37E+05	1,63	3,952	19,449	1,35
226	470	23,481	1,421	1,38E+05	1,58	4,013	19,468	1,31
222	475	24,998	1,294	1,39E+05	1,63	4,077	20,921	1,36
224	480	24,626	1,616	1,41E+05	1,56	4,115	20,511	1,30
222	485	25,654	1,376	1,42E+05	1,57	4,125	21,529	1,32
218	490	26,663	1,327	1,44E+05	1,58	4,199	22,464	1,33
220	495	27,042	1,474	1,45E+05	1,56	4,234	22,808	1,31
219	500	28,217	1,619	1,47E+05	1,58	4,280	23,937	1,34
216	505	28,660	1,730	1,48E+05	1,55	4,317	24,343	1,32
214	510	29,253	1,477	1,50E+05	1,54	4,350	24,903	1,31
213	515	30,510	1,697	1,51E+05	1,56	4,411	26,099	1,33
217	520	31,126	1,911	1,53E+05	1,55	4,479	26,647	1,32
214	525	32,252	1,711	1,54E+05	1,56	4,487	27,765	1,34
212	530	32,013	2,019	1,56E+05	1,50	4,535	27,478	1,29
210	535	33,473	2,224	1,57E+05	1,53	4,587	28,886	1,32
209	540	34,312	1,884	1,59E+05	1,52	4,625	29,687	1,32
210	545	34,851	2,042	1,60E+05	1,50	4,685	30,166	1,30
206	550	36,043	1,932	1,61E+05	1,51	4,705	31,338	1,32
209	555	36,714	2,100	1,63E+05	1,50	4,762	31,952	1,31
208	560	38,404	2,188	1,64E+05	1,53	4,856	33,548	1,33
204	565	38,629	2,285	1,66E+05	1,50	4,871	33,758	1,31
197	570	40,441	1,985	1,67E+05	1,53	4,910	35,531	1,34
194	575	40,729	2,410	1,69E+05	1,50	4,971	35,758	1,31
198	580	41,554	2,536	1,70E+05	1,49	5,032	36,522	1,31
202	585	42,346	2,718	1,72E+05	1,48	5,078	37,268	1,30
200	590	43,543	3,000	1,73E+05	1,48	5,122	38,421	1,31
201	595	44,226	2,552	1,75E+05	1,47	5,178	39,048	1,30
199	600	45,386	2,439	1,76E+05	1,47	5,218	40,168	1,30
200	605	47,473	2,657	1,78E+05	1,50	5,229	42,244	1,33
198	610	47,297	2,544	1,79E+05	1,46	5,275	42,022	1,29
198	615	49,404	2,785	1,81E+05	1,48	5,352	44,052	1,32
197	620	49,550	2,806	1,82E+05	1,45	5,409	44,141	1,29
194	625	51,278	2,683	1,84E+05	1,47	5,442	45,836	1,31
195	630	51,887	3,043	1,85E+05	1,45	5,489	46,398	1,30
193	635	53,802	3,129	1,86E+05	1,47	5,528	48,274	1,32
191	640	55,076	3,031	1,88E+05	1,47	5,561	49,515	1,32
193	645	54,974	3,554	1,89E+05	1,43	5,608	49,366	1,29

188	650	56,549	3,393	1,91E+05	1,44	5,655	50,894	1,29
191	655	59,259	3,130	1,92E+05	1,47	5,747	53,512	1,33
191	660	59,323	3,348	1,94E+05	1,44	5,793	53,530	1,30
190	665	60,208	3,191	1,95E+05	1,43	5,818	54,390	1,29
188	670	62,537	3,271	1,97E+05	1,45	5,892	56,645	1,32
188	675	63,401	3,517	1,98E+05	1,44	5,924	57,477	1,31
190	680	65,665	3,967	2,00E+05	1,46	5,995	59,670	1,33
189	685	66,496	3,596	2,01E+05	1,45	6,051	60,445	1,31
188	690	67,948	3,707	2,03E+05	1,45	6,058	61,890	1,32
187	695	69,254	4,044	2,04E+05	1,44	6,120	63,134	1,31
186	700	69,215	3,655	2,06E+05	1,41	6,192	63,023	1,28
184	705	71,106	3,798	2,07E+05	1,42	6,235	64,871	1,29
183	710	72,590	4,452	2,08E+05	1,42	6,303	66,287	1,29
181	715	75,041	4,307	2,10E+05	1,43	6,353	68,688	1,31
185	720	75,808	4,762	2,11E+05	1,42	6,380	69,428	1,30
183	725	78,001	4,797	2,13E+05	1,43	6,470	71,531	1,31
178	730	77,355	5,076	2,14E+05	1,39	6,471	70,884	1,27
175	735	81,048	4,448	2,16E+05	1,43	6,528	74,520	1,31
179	740	81,500	5,651	2,17E+05	1,41	6,597	74,903	1,29
180	745	84,128	4,536	2,19E+05	1,42	6,632	77,496	1,31
176	750	84,292	5,027	2,20E+05	1,40	6,700	77,592	1,29
180	755	86,656	4,759	2,22E+05	1,41	6,826	79,830	1,30
176	760	89,340	5,806	2,23E+05	1,42	6,818	82,522	1,31
173	765	90,151	5,029	2,25E+05	1,41	6,847	83,304	1,30
179	770	90,951	5,425	2,26E+05	1,39	6,946	84,005	1,29
180	775	94,250	6,057	2,28E+05	1,41	7,008	87,242	1,31
176	780	93,967	5,512	2,29E+05	1,38	7,057	86,910	1,28
179	785	98,577	5,764	2,30E+05	1,42	7,137	91,440	1,32
179	790	99,095	6,323	2,32E+05	1,40	7,183	91,912	1,30
179	795	100,543	5,918	2,33E+05	1,40	7,268	93,275	1,30
173	800	100,975	6,227	2,35E+05	1,38	7,269	93,706	1,28
170	805	103,938	6,403	2,36E+05	1,39	7,370	96,568	1,29
170	810	105,893	6,320	2,38E+05	1,39	7,382	98,511	1,30
168	815	106,199	5,739	2,39E+05	1,37	7,411	98,788	1,27
171	820	108,430	5,851	2,41E+05	1,37	7,488	100,942	1,28
170	825	111,265	6,212	2,42E+05	1,38	7,543	103,722	1,29
163	830	111,654	7,012	2,44E+05	1,36	7,612	104,042	1,27
165	835	115,709	6,945	2,45E+05	1,39	7,692	108,017	1,30
165	840	115,673	5,820	2,47E+05	1,36	7,745	107,928	1,27
167	845	117,761	8,302	2,48E+05	1,36	7,784	109,977	1,27
167	850	121,879	8,451	2,50E+05	1,39	7,881	113,998	1,30
166	855	122,138	7,499	2,51E+05	1,37	7,944	114,194	1,28
165	860	125,066	7,461	2,53E+05	1,37	7,966	117,100	1,29
165	865	127,896	9,017	2,54E+05	1,38	8,020	119,876	1,29
166	870	128,802	7,524	2,55E+05	1,37	8,042	120,760	1,28

164	875	131,122	6,972	2,57E+05	1,37	8,110	123,012	1,28
164	880	132,789	8,271	2,58E+05	1,36	8,120	124,669	1,28
164	885	132,480	8,015	2,60E+05	1,34	8,219	124,261	1,25
165	890	137,471	7,538	2,61E+05	1,36	8,265	129,206	1,28
161	895	138,693	8,603	2,63E+05	1,35	8,236	130,457	1,27
165	900	144,451	9,222	2,64E+05	1,38	8,341	136,110	1,30
164	905	142,866	9,050	2,66E+05	1,35	8,417	134,449	1,27
162	910	146,707	9,447	2,67E+05	1,36	8,481	138,226	1,28
161	915	150,496	9,013	2,69E+05	1,37	8,504	141,992	1,30
163	920	152,907	8,469	2,70E+05	1,37	8,599	144,308	1,29
160	925	152,984	8,786	2,72E+05	1,35	8,624	144,360	1,27
160	930	157,595	8,749	2,73E+05	1,37	8,660	148,935	1,29
159	935	158,931	10,007	2,75E+05	1,36	8,712	150,219	1,28
159	940	159,624	11,178	2,76E+05	1,34	8,756	150,868	1,27
160	945	162,952	10,004	2,77E+05	1,35	8,843	154,109	1,28
159	950	168,443	10,099	2,79E+05	1,37	8,959	159,484	1,30
159	955	170,291	11,283	2,80E+05	1,37	8,976	161,315	1,29
158	960	172,037	9,896	2,82E+05	1,36	8,991	163,046	1,29
158	965	175,534	9,799	2,83E+05	1,36	9,078	166,456	1,29
156	970	177,877	9,735	2,85E+05	1,36	9,009	168,868	1,29
156	975	177,954	11,418	2,86E+05	1,34	9,032	168,922	1,27
154	980	182,837	10,540	2,88E+05	1,36	9,121	173,716	1,29
156	985	183,603	9,242	2,89E+05	1,34	9,186	174,417	1,28
155	990	187,461	12,224	2,91E+05	1,35	9,254	178,207	1,28
155	995	190,352	10,778	2,92E+05	1,35	9,301	181,051	1,28
152	1000	195,475	11,340	2,94E+05	1,37	9,343	186,132	1,30
153	1005	194,406	11,810	2,95E+05	1,34	9,414	184,992	1,27
153	1010	196,942	13,627	2,97E+05	1,34	9,495	187,447	1,27
157	1015	202,601	12,926	2,98E+05	1,35	9,492	193,109	1,29
159	1020	201,612	12,370	3,00E+05	1,33	9,613	191,999	1,26
158	1025	207,585	12,463	3,01E+05	1,35	9,637	197,948	1,28
159	1030	205,829	14,361	3,02E+05	1,32	9,670	196,159	1,25
157	1035	211,422	11,475	3,04E+05	1,33	9,704	201,718	1,27
156	1040	216,420	12,788	3,05E+05	1,34	9,757	206,663	1,28
156	1045	223,778	13,933	3,07E+05	1,37	9,831	213,947	1,31
155	1050	224,693	12,584	3,08E+05	1,36	9,920	214,773	1,30
156	1055	225,004	15,544	3,10E+05	1,34	9,959	215,045	1,28
155	1060	229,376	13,732	3,11E+05	1,35	10,025	219,351	1,29
154	1065	232,183	15,381	3,13E+05	1,34	10,055	222,128	1,28
153	1070	238,221	13,416	3,14E+05	1,36	10,122	228,099	1,30
149	1075	233,455	15,323	3,16E+05	1,31	10,186	223,269	1,26
146	1080	233,406	15,193	3,17E+05	1,29	10,227	223,179	1,24
140	1085	244,513	14,893	3,19E+05	1,34	10,328	234,185	1,28
148	1090	246,638	16,780	3,20E+05	1,33	10,405	236,233	1,27
145	1095	247,884	16,096	3,22E+05	1,32	10,399	237,485	1,26

147	1100	252,010	16,640	3,23E+05	1,32	10,484	241,526	1,27
148	1105	255,784	14,565	3,24E+05	1,32	10,517	245,267	1,27
146	1110	259,071	16,001	3,26E+05	1,32	10,553	248,518	1,27
145	1115	264,976	16,443	3,27E+05	1,34	10,654	254,322	1,28
145	1120	269,538	15,879	3,29E+05	1,34	10,698	258,840	1,29
144	1125	269,382	15,845	3,30E+05	1,32	10,765	258,617	1,27
145	1130	273,662	16,513	3,32E+05	1,33	10,792	262,870	1,27
145	1135	273,095	19,912	3,33E+05	1,30	10,887	262,208	1,25
145	1140	279,941	15,670	3,35E+05	1,32	10,937	269,004	1,27
144	1145	285,161	16,993	3,36E+05	1,33	11,056	274,105	1,28
143	1150	289,954	18,245	3,38E+05	1,33	11,069	278,885	1,28
145	1155	289,764	19,304	3,39E+05	1,31	11,076	278,688	1,26
144	1160	295,435	19,518	3,41E+05	1,32	11,092	284,343	1,27
142	1165	300,873	18,919	3,42E+05	1,33	11,143	289,730	1,28
140	1170	303,369	18,936	3,44E+05	1,32	11,209	292,160	1,27
147	1175	307,306	16,658	3,45E+05	1,32	11,282	296,024	1,27
147	1180	310,792	18,845	3,46E+05	1,32	11,263	299,529	1,27
144	1185	314,507	17,828	3,48E+05	1,32	11,318	303,189	1,27
139	1190	320,274	19,576	3,49E+05	1,33	11,427	308,847	1,28
144	1195	319,632	20,175	3,51E+05	1,31	11,443	308,189	1,26
143	1200	332,468	19,054	3,52E+05	1,34	11,507	320,961	1,30
138	1205	329,023	19,150	3,54E+05	1,31	11,486	317,537	1,27
132	1210	329,712	20,329	3,55E+05	1,30	11,515	318,197	1,25
138	1215	341,287	21,228	3,57E+05	1,33	11,197	330,090	1,29
140	1220	341,886	19,208	3,58E+05	1,32	11,250	330,636	1,27
141	1225	346,667	21,967	3,60E+05	1,32	11,368	335,299	1,27
134	1230	346,855	23,339	3,61E+05	1,30	11,564	335,291	1,26
133	1235	352,874	22,071	3,63E+05	1,31	11,534	341,340	1,27
139	1240	353,191	24,071	3,64E+05	1,29	11,565	341,626	1,25
138	1245	359,761	22,536	3,66E+05	1,30	11,650	348,111	1,26
136	1250	359,816	21,273	3,67E+05	1,29	11,614	348,202	1,25
129	1255	371,631	22,929	3,69E+05	1,31	11,609	360,022	1,27
133	1260	379,652	23,929	3,70E+05	1,33	11,598	368,054	1,29
134	1265	379,371	23,879	3,71E+05	1,31	11,599	367,772	1,27
130	1270	375,179	24,429	3,73E+05	1,28	11,557	363,622	1,24
129	1275	390,092	23,618	3,74E+05	1,31	11,473	378,619	1,28
128	1280	396,985	22,016	3,76E+05	1,32	11,397	385,588	1,28
140	1285	398,433	21,728	3,77E+05	1,31	11,430	387,003	1,27
137	1290	401,073	23,534	3,79E+05	1,31	11,377	389,696	1,27
136	1295	399,725	23,200	3,80E+05	1,29	11,429	388,296	1,25
128	1300	411,480	23,943	3,82E+05	1,31	11,489	399,991	1,27
130	1305	408,995	21,121	3,83E+05	1,29	11,531	397,464	1,25
136	1310	418,765	27,566	3,85E+05	1,30	11,559	407,206	1,27
135	1315	425,356	25,685	3,86E+05	1,31	11,569	413,787	1,27
132	1320	430,045	23,924	3,88E+05	1,31	11,728	418,317	1,27

129	1325	436,889	22,544	3,89E+05	1,31	11,699	425,190	1,28
131	1330	431,872	26,587	3,91E+05	1,28	11,782	420,090	1,25
133	1335	441,295	28,182	3,92E+05	1,30	11,812	429,483	1,26
133	1340	442,692	26,066	3,93E+05	1,29	11,834	430,858	1,25
128	1345	452,475	28,409	3,95E+05	1,30	11,884	440,591	1,27
126	1350	458,173	28,482	3,96E+05	1,30	12,040	446,133	1,27
131	1355	459,099	27,653	3,98E+05	1,29	12,140	446,959	1,26
133	1360	464,986	29,690	3,99E+05	1,29	12,164	452,822	1,26
132	1365	468,324	27,204	4,01E+05	1,29	12,271	456,053	1,25
123	1370	481,080	27,313	4,02E+05	1,31	12,334	468,746	1,27
126	1375	476,904	29,116	4,04E+05	1,28	12,452	464,452	1,25
130	1380	478,330	31,921	4,05E+05	1,27	12,570	465,760	1,24
131	1385	490,563	29,944	4,07E+05	1,29	12,571	477,992	1,26
130	1390	485,050	28,851	4,08E+05	1,26	12,873	472,177	1,23
131	1395	501,378	28,103	4,10E+05	1,29	13,168	488,210	1,26
130	1400	504,631	31,742	4,11E+05	1,28	13,249	491,382	1,25
131	1405	503,492	32,440	4,13E+05	1,27	13,217	490,275	1,24
131	1410	518,273	31,238	4,14E+05	1,29	13,220	505,053	1,26
131	1415	512,823	33,437	4,15E+05	1,26	13,288	499,535	1,23
130	1420	521,119	34,206	4,17E+05	1,27	13,365	507,754	1,24
129	1425	514,353	45,849	4,18E+05	1,24	13,436	500,917	1,21
133	1430	528,705	29,502	4,20E+05	1,26	13,452	515,253	1,23
131	1435	540,577	36,294	4,21E+05	1,28	13,659	526,918	1,25
133	1440	545,168	34,342	4,23E+05	1,28	13,900	531,268	1,24
126	1445	544,596	32,729	4,24E+05	1,26	14,017	530,579	1,23
127	1450	557,275	32,446	4,26E+05	1,28	14,130	543,145	1,24
128	1455	557,189	32,766	4,27E+05	1,26	14,190	542,999	1,23
126	1460	557,311	39,698	4,29E+05	1,25	14,243	543,068	1,22
123	1465	563,441	33,162	4,30E+05	1,25	14,268	549,173	1,22
127	1470	577,665	34,677	4,32E+05	1,27	14,388	563,277	1,24
124	1475	578,724	41,747	4,33E+05	1,26	14,556	564,168	1,23
125	1480	578,157	36,495	4,35E+05	1,25	14,636	563,521	1,21
129	1485	587,999	38,769	4,36E+05	1,25	14,769	573,230	1,22
131	1490	591,517	36,296	4,38E+05	1,25	14,833	576,684	1,22
126	1495	587,849	34,389	4,39E+05	1,23	14,948	572,901	1,20
128	1500	606,861	41,354	4,40E+05	1,26	15,201	591,660	1,22
128	1505	610,354	35,433	4,42E+05	1,25	15,280	595,074	1,22
127	1510	614,473	41,100	4,43E+05	1,25	15,396	599,077	1,22
123	1515	619,152	41,653	4,45E+05	1,24	15,603	603,549	1,21
126	1520	621,088	33,480	4,46E+05	1,24	15,806	605,282	1,20
126	1525	634,682	34,764	4,48E+05	1,25	16,177	618,505	1,22
126	1530	636,392	41,071	4,49E+05	1,24	16,394	619,998	1,21
126	1535	646,153	40,313	4,51E+05	1,25	16,480	629,673	1,22
126	1540	645,824	39,253	4,52E+05	1,24	16,685	629,139	1,20
126	1545	652,500	35,390	4,54E+05	1,24	16,944	635,556	1,20

124	1550	661,120	36,538	4,55E+05	1,24	17,182	643,938	1,21
125	1555	668,984	36,231	4,57E+05	1,24	17,439	651,545	1,21
124	1560	667,490	39,254	4,58E+05	1,23	17,755	649,735	1,20
					média =	1,33		
							média =	1,27

Fonte: elaboração própria.

- Cálculos de NRe e Np para N = 1500 rpm:

$$N_{Re} = \frac{\rho N D^2}{\mu} = \frac{997(\text{kg} / \text{m}^3) \cdot 25(\text{s}^{-1}) \cdot 0,1254^2(\text{m}^2)}{0,8899 \times 10^{-3}(\text{kg} / \text{m} \cdot \text{s})} = 4,40 \times 10^5$$

- Np (eixo + impelidor):

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = \frac{606,861(\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3)}{997(\text{kg} / \text{m}^3) \cdot 25^3(\text{s}^3) \cdot 0,1254^5(\text{m}^5)} = 1,26$$

- Diferença de Potência:

$$\Delta P = \text{potência (eixo + impelidor)} - \text{potência (eixo)}: \Delta P = 606,861 - 15,201 = 591,660 \text{ W}$$

- Np (impelidor):

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D^5} = \frac{591,660(\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^3)}{997(\text{kg} / \text{m}^3) \cdot 25^3(\text{s}^3) \cdot 0,1254^5(\text{m}^5)} = 1,22$$

ANEXO C – FOTOS DA EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

• PÁS RETAS INCLINADAS 30° EM TANQUE COM TRÊS CHICANAS:



(AT1- 300 rpm)

(BT1- 300 rpm)

(CT1- 300 rpm)



(DT1- 300 rpm)

(ET1- 300 rpm)

(FT1- 300 rpm)

Figuras C1 – Experimentos realizados em tanque com três chicanas, $w/D_i = 0,14$ em pás retas inclinadas 30°, com variação do $D_i/T = 0,25$ (AT1), 0,33 (BT1), 0,40 (CT1), 0,45 (DT1), 0,55 (ET1) e 0,70 (FT1) para a rotação de 300 rpm.

- **PÁS RETAS INCLINADAS 30° EM TANQUE COM TRÊS CHICANAS:**



(AT1- 1000 rpm)

(BT1- 1000 rpm)

(CT1- 1000 rpm)



(DT1- 1000 rpm)

Figuras C2 – Experimentos realizados em tanque com três chicanas, $w/D_i = 0,14$ em pás retas inclinadas 30°, com variação do $D_i/T = 0,25$ (AT1), 0,33 (BT1), 0,40 (CT1) e 0,45 (DT1) para a rotação de 1000 rpm.

- **PÁS RETAS INCLINADAS 45° EM TANQUE COM TRÊS CHICANAS:**



(AQ1- 300 rpm)



(BQ1- 300 rpm)



(FQ1- 300 rpm)

Figuras C3 – Experimentos realizados em tanque com três chicanas, $w/D_i = 0,14$ em pás retas inclinadas 45°, com variação do $D_i/T = 0,25$ (AQ1), 0,33 (BQ1) e 0,70 (FQ1), rotação de 300 rpm.



(AQ1- 1200 rpm)



(BQ1- 1200 rpm)



(CQ1- 1200 rpm)

Figuras C4 – Experimentos realizados em tanque com três chicanas, $w/D_i = 0,14$ em pás retas inclinadas 45°, com variação do $D_i/T = 0,25$ (AQ1), 0,33 (BQ1) e 0,40 (CQ1) para a rotação de 1200 rpm.