UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA ÁREA DE CONCENTRAÇÃO DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS QUÍMICOS

ANÁLISE CRÍTICA DAS CORRELAÇÕES E PARÂMETROS Fundamentais em Sistemas de Agitação

Autor : Jefferson Luiz Grangeiro da Silva Orientador: Prof. Dr. José Roberto Nunhez Co-Orientador: Prof. Dr Efraim Cekinski

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

Campinas - São Paulo

Abril de 2002

UNICAMP BIBLIOTECA CONTRAL UNIDADE <u>B</u> N° CHAMADA <u>TITUNIAMP</u> <u>51380</u> V <u>EX</u> TOMBO 8CI <u>57242</u> PROC <u>16-837/00</u> C <u>D1</u> PRECO <u>728 17,00</u> DATA <u>23140102</u> N° CPD

CM00175035-4

BIBID. 265162

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Si38a	Silva, Jefferson Luiz Grangeiro da Análise crítica das correlações e parâmetros fundamentais em sistemas de agitação / Jefferson Luiz Grangeiro da SilvaCampinas, SP: [s.n.], 2002.
	Orientadores: José Roberto Nunhez e Efraim Cekinski Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química.
	1. Mistura (Química). 2. Séries geométricas. 3. Reynolds, número de. 4. Processos químicos. 5. Dinâmica dos fluidos. I. Nunhez, José Roberto. II. Cekinski, Efraim. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química. IV. Título.

Dissertação de Mestrado defendida pelo Engenheiro Jefferson Luiz Grangeiro da Silva e aprovada em 29 de Abril de 2002 pela banca examinadora constituída pelos doutores:

Prof. Dr. José Roberto Nunhez Prof. Dr. João Sinézio C. Campos dello

Prof. Dr. Reginaldo Guirardello

T926/10000

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SECÃO CIRCULANTE Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Engenharia Química defendida pelo Engenheiro Jefferson Luiz Grangeiro da Silva e aprovada pela Comissão Julgadora em 29 de Abril de 2002.

Prof. Dr. José Roberto Nunhez

Ų

Dedico este trabalho à Dayhanne, por seu apoio, amor, carinho e compreensão em todos os momentos da minha vida;

....

Aos meus pais, Luiz e Regina (*in memoriam*). pela força e dedicação nos meus estudos;

Aos meus irmãos Marcelo, Joana, Laura, Lauricéia, Luciane e José Carlos pela motivação e alegrias compartilhadas;

A todos meus colegas que sempre estiveram ao meu lado durante toda minha vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos a todas as pessoas que influenciaram em mais uma meta alcançada durante toda esta vida acadêmica. Agradecendo e pedindo força para seguir outras jornadas com eficiência, estudos, acertos e vitórias.

À minha namorada Dayhanne, que sempre me incentivou nesta conquista, pelo seu companheirismo, amor, carinho e a certeza nas horas incertas. Aos seus pais, Goretti e Josemar e a sua irmã Minelle pela paciência que tiveram comigo.

Aos meus pais, em especial a minha mãe que não pode acompanhar este momento, mas que sempre acreditou do que eu era capaz. Aos meus irmãos Marcelo, Joana, Laura, Lauricéia, Luciane e José Carlos por todo o apoio, compreensão e gratidão que tiveram comigo durante todo este trabalho adquirido.

Minha gratidão também a toda minha família, em especial a minha tia Judith, Luciene e ao meu primo Miguel que sempre foram solidários nos momentos difíceis.

À UNICAMP e a faculdade de Engenharia Química pela excelente oportunidade de trabalho e referencial de profissionalismo e competência.

Ao CNPq pelo o apoio financeiro para a realização deste trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Roberto Nunhez, pela autoconfiança depositada em minha pessoa para realização deste trabalho, por tudo que ele me ensinou, representando um referencial de profissionalismo e sabedoria.

Ao meu Co-orientador Prof. Dr. Efraim Cekinski e ao IPT-SP, pela excelente oportunidade de trabalho e contribuição para a realização desta dissertação.

A todos meus colegas e professores por vários momentos compartilhados através de estudos e expectativas no cotidiano, em especial ao Prof. Dr. Nagel Alves.

Aos meus amigos do laboratório de Fluidodinâmica Computacional, Antônio, Adriana, Pastor, Kelerson, Nicolas, Simone, Lucas, Emerson e Toninho.

Obrigado, meu Deus, pelo o mais belo dos dons, a vida e por tudo que ensinastes.

"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".

RESUMO

SILVA, L. G. Jefferson. Análise Crítica das Correlações e Parâmetros Fundamentais em Sistemas de Agitação. Campinas, UNICAMP, 2002. Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

O projeto atual de agitadores químicos é essencialmente dependente de relações empíricas, visto que as leis físicas que regem os fenômenos envolvidos nos processos químicos são expressões cuja solução analítica é ainda desconhecida. Devido a isto, trabalhos experimentais como os compilados por Nagata, (1975), Oldshue, (1983), Sano e Usui, (1985) e Tatterson, (1991) são utilizados como principais referências para o cálculo do consumo de energia destes sistemas de agitação. Este projeto de pesquisa tem por objetivo principal compilar na literatura as principais correlações e trabalhos que são utilizados como base para o cálculo convencional de agitadores utilizados na indústria química, de forma que sejam definidas as melhores correlações através da análise dos parâmetros fundamentais (relações geométricas) no cálculo do Número de Potência, Número de Reynolds, Número de Froude, Número de Fluxo, Número de Mistura e o consumo de Potência de impelidores para os sistemas de agitação. A análise dos parâmetros geométricos será particularmente importante para estágios iniciais de projetos de plantas químicas, quando são necessárias informações da geometria, tanto do tanque como do impelidor (agitador) e, principalmente, do consumo de energia específica destes equipamentos para se estimar o consumo de energia da planta. Os resultados analisados através da utilização das correlações empíricas serão comparados com o Software comercial VISIMIX. Adicionalmente o L-CFD, laboratório de Fluído Dinâmica Computacional, já desenvolveu diversos projetos que analisam a otimização de projeto de reatores de mistura utilizando a Fluido Dinâmica Computacional e este projeto contribui por complementar o conhecimento deste grupo de pesquisa sobre o projeto de agitadores através de cálculos convencionais.

Palavras chave: Impelidores, Tanques de mistura, Correlações Empíricas, Número de Potência, Relações Geométricas, Consumo de Potência.

ABSTRACT

SILVA, L. G. Jefferson. Critical Analysis of the Fundamental Correlations and Parameters in Agitation Systems. Campinas, UNICAMP, 2002. Dissertation presented for obtaining of Master's title in Chemical Engineering.

The design of impellers to date depends on empirical relations, since the physical laws that describe the phenomena involved in the chemical processes are expressions whose analytical solution is still unknown. Experimental works as those compiled by Nagata, (1975), Oldshue, (1983), Sano and Usui, (1985) and Tatterson, (1991) are used as references for energy consumption estimation in these systems. The compilation of the main correlations and the works in the literature that are used as a base to the conventional way to calculate the main impellers used in the chemical industry is the main objective of this research; which will allow one to select the better correlations it is carried on by the analysis of fundamental parametters (geometric relations) for the calculation of Power Number, Reynolds Number, Froude Number, Flow Number, Mixing Number and the Power consumption of impellers in these systems. The analysis of the geometrical parameters will be particularly important to the early stages in the design of chemical plants, when informations of the tank and of the impeller (agitator) geometries and, mainly, about the specific energy consumption of these equipments are needed. The results are analysed using empirical correlations in the literature and are compared with the commercial software VISIMIX. Additionaly the L-CFD, Computational Fluid Dynamics laboratory, has already developed several projects to analyse the optimization project of mixing tanks, through the use of Computational Fluid Dynamics. This project contributes to complement the knowledge of this group of research on the design of mixing impellers, through the use of conventional methods.

Words key: Impellers, Mixing tanks, Empirical correlations, Power Number, Geometric relations, Power consumption.

SUMÁRIO

~

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação do Projeto	1
1.2 Objetivo	3
1.3 Organização desta dissertação	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Introdução	5
2.2 Primeiros estudos	5
2.3 Estudos mais recentes	11
2.4 Trabalhos que influenciaram na realização desta dissertação	14
3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE AGITAÇÃO	17
3.1 Agitação e Mistura	17
3.2 Equipamentos utilizados no Sistema de Agitação	18
3.2.1 Tanque Agitado	19
3.2.2 Tipos de Impelidores da Indústria Química	23
3.3 Relações Geométricas dos Impelidores	27
4 CÁLCULO CONVENCIONAL DE IMPELIDORES	29
4.1 Variáveis de Projeto	29
4.1.1 Potência	30
4.1.2 Torque	32
4.2 NÚMEROS ADIMENSIONAIS	33
4.2.1 Número de Reynolds (N _{Re})	33
4.2.2 Número de Froude (N _{Fr})	34
4.2.3 Número de Fluxo (N _Q)	34
4.2.4 Número de Mistura (N _I)	35
4.2.5 Número de Potência (N _{P)}	35
4.3 Equações Empíricas para o Cálculo de Impelidores	38
4.3.1 Equações Empíricas para o Impelidor tipo Pás Retas e Inclinadas	38
4.3.2 Equações Empíricas para o Impelidor tipo Turbina Rushton	43

4.3.3 Equações Empíricas para o Impelidor tipo Âncora
5 METODOLOGIA PARA O CÁLCULO CONVENCIONAL DE
IMPELIDORES
5.1 Procedimentos dada o Cárculo Convencional de Imperidores 47
5.1 1 Exemple Instructive para o Cálculo do Potência do Impelibores
5.1.1 Exemplo litusirativo para o Calculo da Potencia do Impeliaor
5.2 CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA O CALCULO DA POTENCIA DO IMPELIDOR
TIPO PAS RETAS
5.3 CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA O CALCULO DA POTENCIA DO IMPELIDOR
TIPO PAS INCLINADAS
5.4 Condições Operacionais para o Cálculo da Potência do Impelidor
TIPO TURBINA RUSHTON
5.5 Condições Operacionais para o Cálculo da Potência do Impelidor
TIPO ÂNCORA
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO71
6.1 Análises das Curvas de Potência71
6.1.1 Análises das curvas de Potência para o Impelidor tipo Pás Retas e Pás
Inclinadas71
6.1.2 Análises das curvas de Potência para o Impelidor tipo Turbina Rushton
de pás retas
6.1.3 Análises das curvas de Potência para o Impelidor tipo Âncora
6.1.4 Comparação das curvas de Potência80
6.2 Estudos da Influência das Relações Geométricas
6.2.1 Efeito da taxa D/T sobre o Número de Potência, o Número de Froude, o
Número de Fluxo, o Número de Mistura e a Potência do Impelidor82
6.2.2 Efeito da taxa w/D sobre o Número de Potência, o Número de Fluxo, o
Número de Mistura e a Potência do Impelidor100
6.2.3 Efeito da taxa H/T sobre o Número de Potência e a Potência do
Impelidor
- 6.2.4 Efeito da taxa B_w/T e nb sobre a Potência do Impelidor e o Número de
Potência

6.2.5 Efeito da taxa C/T e h/t sobre Número de Potência e a	
Potência para o Impelidor tipo Âncora1	24
6.2.6 Efeito do ângulo da Pá sobre o Número de Potência e a Potência para	а
o Impelidor tipo Pás Inclinadas1	28
6.2.7 Efeito do número de pás sobre o Número de Potência, Número de	
Fluxo, Número de Mistura e a Potência no Impelidor1	30
6.2.8 Efeito da Velocidade Rotacional do impelidor sobre a Potência do	
Impelidor1	34
6.3 Comparação dos Resultados das Correlações Empíricas com o	
SOFTWARE VISIMIX1	40
6.3.1 Faixa de Aplicação das Relações Geométricas nas Correlações	
Empíricas para o Cálculo do Número de Potência e Consumo de Potência a	los
Impelidores analisados1	62
7 CONCLUSÕES1	65
7.1 Sugestões1	68
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS1	71

1

xxi

...

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Ilustração de um tanque agitado convencional.	20
Figura 3.2 – Esquema da formação do vórtice central.	22
Figura 3.3 – Padrão de fluxo para o Impelidor de fluxo axial.	24
Figura 3.4 – Padrão de fluxo para o Impelidor de fluxo radial.	24
Figura 3.5 – Padrão de fluxo para o Impelidor de fluxo tangencial.	25
Figura 3.6 – Principais tipos de impelidores utilizados na indústria química.	27
Figura 4.1 – Característica geral da curva do Número de Potência em função do Número de	e Reynolds
para tanques sem e com chicanas.	37
Figura 4.2 – Relação entre o Número de Potência e o Número de Reynolds para fluidos Ne	wtonianos,
para diversos tipos de impelidores (<i>Oldshue, 1983</i>).	38
Figura 5.1 – Esquema do método empregado no desenvolvimento do programa computacio cálculo convencional de impelidores.	nal para o 49
Figura 6.1 – Número de Potência sobre o Número de Reynolds para o Impelidor tipo aplicado a tanques sem Chicanas.	Pás Retas 72
Figura 6.2 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo aplicado a tanques sem e com chicanas, [<i>Nagata,1975</i>].	Pás Retas 73
Figura 6.3 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelido	r tipo Pás
Inclinadas (45°) aplicado a tanques sem e com chicanas, [<i>Nagata</i> , 1975].	74
Figura 6.4 – Perfis do Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Imp	elidor tipo
Pás Retas e Inclinadas (45°) aplicado a tanques sem e com chicanas, [<i>Nagata, 1975</i>].	75
Figura 6.5 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tip	o Turbina
Rushton de pás retas aplicado a tanques sem chicanas, [<i>Nagata</i> , 1975].	76
Figura 6.6 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tip	o Turbina
Rushton de pás retas em tanques com chicanas, [<i>O'Connell et al. 1950</i>].	77
Figura 6.7 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tip	o Turbina
Rushton de pás retas aplicado a tanques sem e com chicanas.	78
Figura 6.8 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tip	o Âncora,
[<i>Takahashi et al., 1980</i>] e [<i>Edwards et al., 1989</i>].	79
Figura 6.9 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para os tipos de impeli	dores: Pás
Retas com chicanas, Pás Inclinadas (45°) com chicanas, Turbina Rushton de 6 pás retas com	chicanas e
o Âncora de fundo chato.	80

xxiii

Figura 6.10 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, [*Nagata*, 1975].

Figura 6.11 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas em tanques sem chicanas.

Figura 6.12 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas em tanques sem e com chicanas. 84

Figura 6.13 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas em tanques sem e com chicanas. 85

Figura 6.14 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor com o efeito do número de pás do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas, [O'Connell et al., 1950]. 86

Figura 6.15 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor com o efeito do número de pás do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas, [*Sano e Usui, 1985*]. 87

Figura 6.16 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Âncora no regime laminar e no regime turbulento, [*Edwards et al., 1989*]. 88

Figura 6.17 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas. 89

Figura 6.18 – Número de Froude em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, [*Nagata, 1975*]. 90

Figura 6.19 – Número de Fluxo em função da taxa D/T do impelidor impelidor aplicado para tanques com chicanas, [Sano e Usui, 1985]. 91

Figura 6.20 – Número de Mistura em função da taxa D/T do impelidor aplicado para tanques com chicanas, [Sano e Usui, 1985]. 92

Figura 6.21 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas,.[Nagata, 1975]. 93

Figura 6.22 – Potência máxima em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques com chicanas, [Nagata, 1975]. 94

Figura 6.23 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas em tanques sem e com chicanas, [Nagata, 1975]. 95

Figura 6.24 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas em tanques sem chicanas. 96

Figura 6.25 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas em tanques com chicanas. 97

Figura 6.26 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques sem e com chicanas. 98

Figura 6.27 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas. 99

Figura 6.28 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, .[*Nagata, 1975*]. 100

82

Figura 6.29 – Número de Potência em função da taxa w/D com o efeito da inclinação da pá do impelidor tipo Pás Inclinadas (10°, 30°, 45 °e 60°) em tanques com chicanas, [*Nagata, 1975*]. 101

Figura 6.30 - Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor de Pás Retas em tanques sem chicanas. 102

Figura 6.31 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor de Pás Retas em tanques sem e com chicanas, [Nagata, 1975]. 103

Figura 6.32 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas. 104

Figura 6.33 – Número de Potência sobre o efeito da largura da pá do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas. 105

Figura 6.34 – Comportamento do Número de Potência em função da taxa w/D com o efeito do número de pás do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas, [O'Connell et al., 1950].

Figura 6.35 – Comportamento do Número de Potência em função da taxa w/D com o efeito do número de pás do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas, [Sano e Usui, 1985].

107

Figura 6.36 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas. 108

Figura 6.37 – Número de Fluxo em função da taxa w/D do impelidor aplicado para tanques com chicanas, [Sano e Usui, 1985]. 109

Figura 6.38 – Número de Mistura em função da taxa w/D do impelidor aplicado para tanques com chicanas, [Sano e Usui, 1985]. 110

Figura 6.39 – Potência em função da taxa w/D do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, [Nagata, 1975].

Figura 6.40 – Potência em função da taxa w/D do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques com chicanas, [Nagata, 1975]. 112

Figura 6.41 – Potência em função da taxa w/D do impelidor de Pás Retas em tanques sem e com chicanas, [Nagata, 1975]. 113

Figura 6.42 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas.

114

Figura 6.43 – Comparação do Consumo de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas. 115

Figura 6.44 – Potência em função da taxa w/D do impelidor Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas 116

Figura 6.45 – Potência em função da taxa w/D tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas. 117

Figura 6.46 – Número de Potência em função da taxa de H/T para o impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, [*Nagata*, 1975]. 118

Retas em tanques sem e com chicanas, [Nagata, 1975].
Figura 6.48 – Potência em função da taxa de H/T para o impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas,.[<i>Nagata, 1975</i>]. 120
Figura 6.49 – Potência em função da taxa de H/T para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem o com chicanas,.[<i>Nagata, 1975</i>]. 121
Figura 6.50 – Efeito do número de chicanas sobre a taxa da Potência versus o efeito da taxa B _w /T para o impelidor tipo Pás Retas, [<i>Nagata, 1975</i>]. 122
Figura 6.51 – Efeito da taxa NPb/Npmáx sobre o efeito do número de chicanas e largura das chicanas para o impelidor tipo Pás Retas,.[<i>Nagata, 1975</i>]. 123
Figura 6.52 – Número de Potência em função da taxa C/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas. 124
Figura 6.53 – Potência em função da taxa C/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sen chicanas. 125
Figura 6.54 – Número de Potência em função da taxa h/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas. 126
Figura 6.55 – Potência em função da taxa h/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sen chicanas. 127
Figura 6.56 – Número de Potência em função do ângulo da pá do impelidor tipo Pás Inclinadas en tanques sem e com chicanas, [<i>Nagata, 1975</i>]. 128
Figura 6.57 – Potência em função do ângulo da pá do impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques sem o com chicanas,.[<i>Nagata, 1975</i>]. 129
Figura 6.58 – Número de Potência em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas e Turbin: Rushton em tanques com chicanas, [<i>Sano e Usui, 1985</i>]. 130
Figura 6.59 – Número de Fluxo em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas, [<i>Sano e Usui, 1985</i>]. 131
Figura 6.60 – Número de Mistura em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas,.[<i>Sano e Usui, 1985</i>]. 132
Figura 6.61 – Potência em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushtor em tanques com chicanas,. [<i>Sano e Usui, 1985</i>]. 133
Figura 6.62 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Pás Retas e tipo Pá Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, [<i>Nagata</i> , 1975]. 134
Figura 6.63 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Pás Retas em tanques sen chicanas.
Figura 6.64 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Pás Retas em tanques sen e com chicanas, [<i>Nagata, 1975</i>]. 136

Figura 6.47 - Número de Potência em função da taxa de H/T para o impelidor tipo Pás

Figura 6.65 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas. 137

Figura 6.66 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Turbina Rushton de pás petas em tanques com chicanas.	138
Figura 6.67 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Âncora.	139
Figura 6.68 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques	sem
Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX.	140
Figura 6.69 – Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem Chica	anas,
utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX.	141
Figura 6.70 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques	sem
Chicanas, utilizando correlações empíricas e ouso do Software VISIMIX.	142
Figura 6.71 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem Chica	anas,
utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX.	143
Figura 6.72 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45° tanques sem Chicanas, utilizando a correlação de <i>Nagata</i> (1975) e o uso do Software VISIMIX.	') em 144
Figura 6.73 – Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques	sem
Chicanas, utilizando a correlação de <i>Nagata</i> (1975) e o uso do Software VISIMIX.	145
Figura 6.74 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45° tanques sem Chicanas, utilizando a correlação de <i>Nagata</i> (1975) e o uso do Software VISIMIX.	') em 146
Figura 6.75 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques	sem
Chicanas, utilizando a correlação de <i>Nagata</i> (1975) e o uso do Software VISIMIX.	147
Figura 6.76 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45° tanques com Chicanas, utilizando a correlação de <i>Nagata</i> (1975) e o uso do Software VISIMIX.	') em 148
Figura 6.77 – Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques	com
Chicanas, utilizando a correlação de <i>Nagata</i> (1975) e o uso do Software VISIMIX.	149
Figura 6.78 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45° tanques com Chicanas, utilizando a correlação de <i>Nagata</i> (1975) e o uso do Software VISIMIX.	') em 150
Figura 6.79 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques	com
Chicanas, utilizando a correlação de <i>Nagata</i> (1975) e o uso do Software VISIMIX.	151
Figura 6.80 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques	com
Chicanas, utilizando correlações empíricas e ouso do Software VISIMIX.	152
Figura 6.81 – Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chica utilizando correlações empíricas e ouso do Software VISIMIX.	anas, 153
Figura 6.82 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques	com
Chicanas, utilizando correlações empíricas e ouso do Software VISIMIX.	154
Figura 6.83 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chica	anas,
utilizando correlações empíricas e ouso do Software VISIMIX.	155
Figura 6.84 – Número de Potência em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas tanques com Chicanas, utilizando correlação de <i>Sano e Usui</i> (1985) e ouso do Software VISIMIX.	s em 156

xxxi

Figura 6.85 – Potência em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chicanas, utilizando correlação de *Sano e Usui* (1985) e o uso do Software VISIMIX. 157

Figura 6.86 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX. 158

Figura 6.87 – Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX. 159

Figura 6.88 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX. 160

Figura 6.89 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX. 161

LISTA DE TABELAS

•--

Tabela 1.1- Aplicações nos Processos de Agitação (Nagata, 1975).1
Tabela 4.1 Efeito do número de pás sobre as constantes k e b, dado por O'Connell et al (1950).44
Tabela 5.1 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Sem Chicanas, Nagata (1975). 55
Tabela 5.2 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Sem Chicanas, <i>Hiraoka et al (1995)</i> . 57
Tabela 5.3 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Com Chicanas, Nagata (1975). 58
Tabela 5.4 – Condições Operacionais do Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Com Chicanas, Nishikawa et al. (1979). 59
Tabela 5.5 – Condições operacionais para o Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Com Chicanas, <i>Sano e Usui (1985)</i> . 60
Tabela 5.6 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Inclinadas (45 graus) aplicado à Tanques Sem Chicanas, <i>Nagata (1975)</i> . 62
Tabela 5.7 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Inclinadas (45 graus) aplicado à Tanques Com Chicanas, <i>Nagata (1975)</i> . 63
Tabela 5.8 – Condições operacionais do Impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas aplicado a tanques sem chicanas, <i>Nagata (1975)</i> . 64
Tabela 5.9 – Condições operacionais do Impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas aplicado a tanques com chicanas, O'Connell et al. (1950).65
Tabela 5.10 – Condições Operacionais do Impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas aplicado a Tanques Com Chicanas, <i>Sano e Usui (1985)</i> . 66
Tabela 5.11 – Condições operacionais do Impelidor tipo Âncora aplicado a tanques de fundo abaulado, <i>Edwards et al (1989)</i> . 68
Tabela 5.12 Condições operacionais do Impelidor tipo Âncora aplicado a tanques de fundo chato, Takahashi et al. (1980). 69
Tabela 6.1 - Faixa de Aplicação das Relações Geométricas em cada tipo de Impelidor estudado para o Cálculo do Número de Potência. 162
Tabela 6.2 - Faixa de Aplicação das Relações Geométricas em cada tipo de Impelidor estudado para o Cálculo do Consumo de Potência. 163

NOMENCLATURA

Letras Latinas

Α	Constante da correlação empírica de Nagata
b	Constante da correlação empírica de O'Connell et al.
В	Constante da correlação empírica de Nagata
$\mathbf{B}_{\mathbf{w}}$	Largura da chicana, m
С	Distância entre o impelidor e o fundo ou parede do tanque, m
CL	Constante da correlação empírica de Hiraoka et al.
C _t	Constante da correlação empírica de Hiraoka et al.
C _{tr}	Constante da correlação empírica de Hiraoka et al.
D	Diâmetro do impelidor, m
F _b	Força de bombeamento, N
F_g	Força gravitacional, N
Fi	Força inercial, N
F_{v}	Força viscosa, N
\mathbf{f}_{∞}	Constante da correlação empírica de Hiraoka et al.
f	Constante da correlação empírica de Hiraoka et al.
g	Constante gravitacional, m/s ²
h	Altura da do impelidor tipo Âncora, m
Н	Nível do líquido, m

- k Constante da correlação empírica de O'Connell et al.
- m Constante da correlação empírica de *Hiraoka et al.*
- N Velocidade rotacional, r.p.m.
- nb Número de chicanas
- np Número de pás
- N_{Fr} Número de Froude
- N_P Número de Potência
- N_{Pb} Número de Potência específico
- N_{Pmáx} Número de Potência máxima
- N_{∞} Número de Potência para Reynolds infinito
- N_Q Número de Fluxo
- N_{Re} Número de Reynolds do impelidor
- N_T Número de Mistura
- p Constante da correlação empírica de Nagata
- P Potência, W
- Pb Potência específica, W
- Q Fluxo, m^3/s
- Re_G Constante da correlação empírica de *Hiraoka et al.*
- Re Número de Reynolds do impelidor
- R_c Número de Reynolds crítico para pás retas

R_{θ}	Número de Reynolds crítico para pás inclinadas
Tq	Torque, J
Т	Diâmetro do tanque, m
w	Largura da pá, m

Letras Gregas

β	Constante da correlação empírica de Hiraoka et al.
ρ	Densidade, Kg
η	Constante da correlação empírica de Hiraoka et al.
μ	Viscosidade, Kg/m.s
π	Constante: 3,1415926
γ	Constante da correlação empírica de Hiraoka et al.
θ	Tempo de Mistura

Abreviações

SC	Sem Chicanas
CC	Com Chicanas

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

1.1 Motivação do Projeto

A agitação, ou mistura, é uma das operações mais antigas e mais comuns da engenharia química, tendo um importante papel na indústria química. A maioria dos produtos tantos comerciais, como industriais, necessita de algum tipo de agitação durante a sua preparação e/ou aplicação. Produtos da indústria alimentícia, petroquímica, farmacêutica, papel e outras indústrias químicas não seriam possíveis de serem formulados se não houvessem equipamentos que promovessem mistura durante seu processamento. Estações de tratamento de resíduos industriais e água sofreriam se não houvessem misturadores. Além disso, misturadores são essenciais para proteger o meio ambiente (*Oldshue, 1983*).

A agitação é um processo que fornece movimento ao fluido auxiliando-o a realizar os processos químicos e processamentos físicos de diferentes aplicações. Os processos relacionados à agitação são classificados em cinco tipos principais de aplicação:

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

Tabela 1.1- Aplicações nos Processos de Agitação (Nagata, 1975)

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.

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 que a absorção é um processo de transferência de massa como, por exemplo, no caso de uma fermentação do oxigênio do ar para o líquido.

Nos líquidos imiscíveis, um exemplo de processamento físico é a produção de xampus e condicionadores, que são emulsões estáveis, comercializados dessa maneira, enquanto que 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 e tem 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, no qual a descrição da necessidade da agitação é dada em termos da 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. A transferência de calor é dita como um processamento químico, porque geralmente a necessidade de troca de calor se dá quando em sistemas onde ocorrem reações químicas.

1.2 Objetivo

Este projeto de pesquisa tem por objetivo compilar na literatura as principais correlações e trabalhos que são utilizados como base para o cálculo convencional de impelidores utilizados na indústria química.

Para a fase inicial deste projeto pretende-se calcular e projetar os impelidores tipo: Pás retas e Pás inclinadas; Turbina Rushton de pás retas, testados para tanques sem e com chicanas; e o Âncora de fundo chato e abaulado para tanques sem chicanas. Serão analisados os parâmetros geométricos fundamentais do sistema de agitação para obter informações do consumo de Potência dos impelidores, o que particularmente torna-se importante para estágios iniciais de projetos de plantas químicas, quando são necessárias informações do consumo de energia específica destes equipamentos para se saber o consumo de energia da planta.

Na etapa final do projeto as respostas analisadas através das correlações empíricas serão comparadas com o software comercial VISIMIX (provavelmente o melhor software comercial da atualidade para o cálculo de agitadores), de forma que sejam definidas as melhores correlações empíricas para o cálculo convencional de impelidores no sistema de agitação.

1.3 Organização desta dissertação

No <u>Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica</u>, são apresentadas as principais considerações feitas na literatura para a implementação das correlações empíricas no cálculo do Número de Potência, levando-se em conta os efeitos das relações geométricas tanque-impelidor. No final deste capítulo são apresentadas algumas considerações de trabalhos da literatura que tiveram influência nesta dissertação para o cálculo convencional de impelidores.

No <u>Capítulo 3 – Características do Sistema de Agitação</u>, são apresentados alguns conceitos relativos à agitação e mistura, mostrando os equipamentos pertencentes aos sistemas de agitação (tanque cilíndrico, usualmente com chicanas e os tipos de impelidores empregados na indústria química); e as relações geométricas típicas empregadas no cálculo de impelidores.

No <u>Capítulo 4 – Cálculo Convencional de Impelidores</u>, são apresentadas algumas variáveis de projeto (Potência e Torque) e números adimensionais, envolvendo Número de Reynolds, Número de Froude, Número de Fluxo, Número de Mistura e Número de Potência, que tratam de parâmetros importantes no cálculo de agitadores, assim como as principais equações empíricas para os vários tipos de impelidores utilizados neste trabalho.

No <u>Capítulo 5 – Metodologia para o Cálculo Convencional de Impelidores</u>, é apresentado todo o procedimento empregado para o cálculo convencional de impelidores, assim como, as principais condições operacionais que foram implementadas para cada tipo de impelidor no cálculo das equações empíricas utilizadas.

No <u>Capítulo 6 – Resultados e Discussão</u>, são apresentados os resultados obtidos dos grupos adimensionais e o consumo de Potência dos impelidores importantes no sistema de agitação através da utilização do programa de linguagem computacional (*Fortran versão 6.6*), para um estudo das análises das equações empíricas utilizadas na literatura. São avaliadas as influências de algumas variáveis da geometria do impelidor sobre o cálculo do Número de Potência e o respectivo consumo de Potência nos impelidores. No final do capítulo, são comparados os perfis do Número de Potência e consumo de Potência através da utilização das correlações empíricas com o software comercial VISIMIX.

No <u>Capítulo 7 – Conclusões e Sugestões</u>, são apresentadas as principais conclusões a respeito das análises das equações empíricas para cada tipo de impelidor implementadas no programa computacional desenvolvido para o cálculo convencional de impelidores, levando-se em conta os efeitos das relações geométricas. E por final, são apresentadas algumas sugestões para projetos futuros.

CAPÍTULO 2

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Introdução

A Potência dissipada em um processo de mistura dentro de um tanque de mistura é a energia por unidade de tempo que é transferida do impelidor para o fluido. Isto é uma quantidade integral fundamental para os processos de mistura e necessária por causar a movimentação do fluido. O cálculo da Potência dissipada pode ser estimada de várias maneiras dependendo do: processo, regime de mistura e tipo de fluido. No entanto, para um fluxo turbulento monofásico, o cálculo da Potência tem sido principalmente aproximado através de análise dimensional e medidas experimentais de Torque.

A análise dimensional representa um princípio alternativo para o cálculo da Potência e provê uma base fundamental necessária para o entendimento dos resultados. A análise dimensional é baseada sobre o fato 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. Para um tanque agitado, uma relação tradicional para a Potência na forma de uma série de leis de Potência pode ser escrita como:

$$N_{P} = K \left(\frac{\rho N D^{2}}{\mu}\right)^{a} \left(\frac{N^{2} D}{g}\right)^{b} \left(\frac{T}{D}\right)^{c} \left(\frac{C}{D}\right)^{d} \left(\frac{H}{D}\right)^{e} \dots$$
(2.1)

2.2 Primeiros estudos

A revisão bibliográfica sobre cálculo de Potência em tanques de mistura é discutida nesta dissertação em ordem cronológica, o qual informa as várias fontes de dados e estudos que foram desenvolvidas em curvas de Potência. 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.

White e Brenner (1934) foram os primeiros a determinar um estudo das correlações empíricas através de uma análise da lei de potência (análise dimensional) usando seus dados e os de Phillips e Morrison (1934). Os dados para a correlação foram obtidos para o estudo em um tanque sem chicanas de 1,3m de diâmetro, com o impelidor tipo Paddle (pás retas) com aproximadamente o diâmetro do tanque, imerso em um líquido de pouca profundidade, H=0,5m, onde sua correlação de Potência foi expressa da seguinte maneira:

$$P = 1,29 * 10^{-4} (N_{\rm Re})^{0.86} D \mu N^2 T(w)^{0.3} (H)^{0.6}$$
(2.2)

Esta equação ajusta os dados experimentais para Número de Reynolds de 10^4 à 10^5 , mas diverge para os Números de Reynolds baixos (N_{Re} < 10). *White et al. (1934)* notaram que a transição do fluxo viscoso para turbulento ocorreu entre 2000 < N_{Re} < 20000.

Hixson e Luedeke (1937) verificaram que o diâmetro do tanque foi usado como comprimento característico no cálculo do Número de Reynolds. Eles estudaram os efeitos da inclinação da pá, distância entre o impelidor e o fundo do tanque e a profundidade do líquido. Os estudos foram feitos em um tanque sem chicanas onde D/T = 0,33 e H = T. Eles encontraram em seus estudos que o Número de Reynolds de transição de laminar para turbulento foi aproximadamente 5×10^5 .

Hixson e Baum (1942) apresentaram medidas de Torque como: $T_q / \rho N^2 D^5$ versos o Número de Reynolds do impelidor, para o impelidor tipo Turbina de pás inclinadas aplicado em tanques sem chicanas, usando água a 40% e solução de 60% de sucrose, glicerol e dois óleos viscosos. Eles perceberam que houve reduções no Torque e no consumo de Potência para um valor no nível do líquido menor que o diâmetro do tanque. Isto ocorreu devido à presença de ar na superfície do fluido. Quando o valor do nível do líquido foi igual ao diâmetro do tanque não foi notada nenhuma presença de ar na superfície do fluido. *Martin (1946)* apresentou uma revisão de curvas de Potência para 13 tipos de impelidores, notando diversas observações importantes a respeito das curvas, como:

- A viscosidade tem pouco efeito sobre o consumo de Potência, exceto para baixo Número de Reynolds dos impelidores;
- O Número de Potência tende para um valor constante para altos Números de Reynolds e é maior para tanques com chicanas;
- O valor constante do Número de Potência foi logo atingido para tanques com chicanas em Número de Reynolds menores em relação aos tanques sem chicanas.

Martin (1946) notou que a presença de chicanas reduziu a tendência favorável de rotação do "corpo sólido" e um aumento na velocidade relativa entre o impelidor e o fluido. Em seus estudos ele observou que o impelidor em tanques com chicanas operou em alta velocidade angular efetiva, altos Números de Reynolds, e um maior Número de Potência comparando aos tanques sem chicanas. Para tanques sem chicanas, o aumento na taxa do diâmetro do tanque para o diâmetro do impelidor T/D, causou um Número de Potência constante para Números de Reynolds menores. Geometrias tanque-impelidor com T/D tendendo para baixos valores, desenvolveram mais facilmente a formação do "corpo sólido" forçando os impelidores a operar com baixos Números de Reynolds menores.

Rushton (1946) forneceu uma comparação com os dados de White et al. (1934) e os dados tirado pela Mixing Equipment Corporation. A comparação justifica essencialmente os trabalhos iniciais de White et al (1934).

Olney e Carlson (1947) fizeram seus estudos para dois tipos de impelidores: um de grande uso nas indústrias e uma Turbina espiral para líquidos de fases simples e bifásico. Eles consideraram os efeitos da velocidade do impelidor, as propriedades e as proporções dos líquidos sobre o consumo de Potência, mantendo o tamanho do equipamento e as formas constantes. Os dados de Potência no sistema bifásico foram correlacionados usando-se viscosidade e densidade média da mistura. O Número de Potência foi dado por: $P/\mu N^2 D^3$ e o mesmo foi plotado com o Número de Reynolds variando de 10^2 à 10^5 :

$$N_P = K(N_{\rm Re}) \tag{2.3}$$

Os dados de Potência mostraram um aumento na Potência dissipada para um aumento da percentagem de volume da fase viscosa. Para o líquido bifásico a densidade foi calculada usando uma média da viscosidade da mistura utilizando a relação abaixo:

$$\mu_m = (\mu_x)^x \ (\mu_y)^y \tag{2.4}$$

Onde x e y referem-se as frações volumétricas da mistura bifásica.

Olney e Carlson (1947) sugeriram as seguintes relações geométricas para serem usadas quando possível, que foi a primeira padronização geométrica de sistemas de mistura encontrado na literatura:

- Taxa diâmetro impelidor-tanque, D/T = 0,33;
- Taxa da largura da pá do impelidor, w/D = 0,25;
- Taxa da altura do líquido, H/T = 1;
- Taxa da distância entre o impelidor e o fundo do tanque, 0,2 < C/T < 0,5;
- Taxa da largura das chicanas, B_w/T = 0,0833.

Mack e Krol (1948) estudaram os efeitos das chicanas sobre o consumo de Potência usando um impelidor tipo "Paddle" (Pás Retas) em água. As configurações com chicanas que maximizam a Potência dissipada foram descritas e limitada para tanques completamente preenchidos com chicanas. De acordo com esta condição o Número de Potência tornou-se independente da altura do líquido, da posição do impelidor e das dimensões do tanque incluindo as geometrias das chicanas. Para geometrias de chicanas (não totalmente preenchidas em tanques), os efeitos dos vários tamanhos de chicanas, posição do impelidor, profundidade do líquido e diâmetro do tanque sobre a Potência dissipada foram determinadas. O ângulo que as chicanas faz com a parede foi verificado como não sendo de grande importância. A condição para tanques com chicanas (completamente preenchidas) foi estabelecida para o sistema chicana e impelidor, onde D/T variou de 1/4 à 1/2 com três ou quatro chicanas e B_w/T entre 1/12 e 1/10. *Mack e Krol* (1948) sempre mostraram que, para fluxos turbulentos em tanques com chicanas (completamente preenchidas nos tanques), o comprimento característico no Número de Potência deve ser o diâmetro do impelidor.

Rushton, Costich, and Everett (1950) resumiram um programa de pesquisa pela Mixing Equipment Corporation que foi conduzido para estabelecer as características do consumo de Potência de agitadores usados comercialmente. Os dados foram mostrados para 5 tipos de impelidores, com diâmetros de 60 mm a 1,2 m, tanques de 0,2 m a 2,5 m em configurações com e sem chicanas, com viscosidade do fluido de 1 à 40.000 cp, medidas de Potência de 0,746 à 6000 W com o Número de Reynolds do impelidor de 1 à 10^6 .

Nagata, Yoshioka e Yokoyama (1955), considerados como clássicos da literatura em sistemas de misturas investigaram a distribuição da velocidade angular do líquido agitado para um impelidor tipo "Paddle" (Pás Retas) em um tanque sem chicanas. Eles verificaram a presença de uma zona de vórtice em um fluxo perto do centro do tanque girando nas mesmas velocidades angulares do impelidor. Esta zona é a rotação do "corpo sólido" que é estabelecido em tanques sem chicanas. Além desta região a velocidade do líquido variou inversamente proporcional à distância do centro do tanque. De acordo com esta condição, o fluxo foi limitado a uma zona de vórtice livre. Perto da parede a velocidade tendeu bruscamente para zero. O tamanho da zona do vórtice foi estabelecida como uma função da viscosidade do líquido, largura e diâmetro da pá do impelidor. Um modelo foi apresentado para explicar o efeito da largura da pá sobre o consumo de Potência.

Estudos de *Nagata (1956)* abrangeram uma variação do Número de Reynolds de $0,1 \ge 10^6$ em tanques de $0,15 \ge 1,17$ m para o impelidor tipo pás retas com duas pás, tendo dimensões: 0,3 < D/T < 0,9 e 0,05 < w/T < 0,9. A equação do Número de Potência para região laminar (N_{Re} < 10 \ge 100) foi encontrada como:

$$N_P = 310 \left(\frac{w}{T}\right) \left(\frac{D}{T}\right)^{1,15}$$
(2.5)

para 0.7 < D/T < 0.9 e 0.4 < w/T < 0.9. A Potência foi diretamente proporcional a largura da pá do impelidor. Sob um diâmetro do impelidor de 0.7T, *Nagata et al. (1956)* encontraram uma mudança do expoente 1,15 e a constante 310 na equação acima para 0,58 e 140, respectivamente.

Para a região intermediária de viscosidade 10 à $100 < N_{Re} < 10^4$ à 10^5 , Nagata et al. (1956) apresentaram a seguinte expressão:

$$N_{P} = A * B * (N_{Re})^{P}$$
(2.6)

Onde:

$$\log_{10}(A) = \frac{w}{0,03T + 0,42w} \tag{2.7}$$

$$\log_{10}(B) = -\frac{w^*D}{0.01T^2 + 0.73w^*T}$$
(2.8)

$$p = -[0,17T/w + 1,37D/T + 1,8]^{-1}$$
(2.9)

Para uma variação de viscosidade baixa $N_{Re} > 10^4$ à 10^6 , Nagata et al (1956) apresentaram a seguinte expressão:

$$N_{P} = \left(\frac{w/T}{0.05 + 1.05w/T}\right) \left(\frac{D}{T}\right)^{-1.23} \left(N_{\text{Re}}\right)^{-0.113}$$
(2.10)

Os Números de Potência para tanques sem chicanas foram independentes do Número de Reynolds dos impelidores para $N_{Re} > 10^4$ à 10^6 . Para pás retas de 0,2T de largura, os Números de Potência foram tipicamente 3,5 e 6,0 para D/T de 0,3 e 0,5m, respectivamente.

Vários outros efeitos foram investigados. Para líquidos de viscosidade baixa (Número de Reynolds alto), a Potência foi proporcional à $(H/T)^{0,4}$ e à $(H/T)^{0,55}$. Para líquidos viscosos (Número de Reynolds baixo) a Potência foi encontrada como sendo independente da altura do líquido. Para uma variação da viscosidade intermediária (Número de Reynolds transicional), *Nagata* forneceu uma relação mais complexa.

Rushton e outros autores citados acima não encontraram efeitos da altura do líquido sobre o Número de Potência. Entretanto as pás usadas por *Nagata* foram bastante extensas comparadas com as usadas por outros autores. *Nagata et al (1956)* não encontraram nenhum efeito em relação a posição do impelidor sobre o consumo de Potência. Foi notada uma influência no número e a largura das pás. Os impelidores podem ter o mesmo consumo de Potência se o produto da largura da pá (w) e o número de pás (np) for igual para uma mesma constante K, ou:

$$w(np) = K \tag{2.11}$$

Para tanques com chicanas de 4 à 6, o consumo de Potência foi até um máximo na variação $0,08 < B_w < 0,15$. A relação entre a largura das chicanas B_w e o número de chicanas nb para a Potência máxima foi aproximado por:

$$\left(\frac{B_{w}}{T}\right)^{1,2}$$
nb = 0,35 (2.12)

Para a obtenção da Potência máxima de acordo com as condições de chicanas totalmente preenchidas no tanque, *Nagata et al. (1956)* encontraram:

$$N_{P} = 23 \left(\frac{w}{T}\right)^{1,27} \left(\frac{D}{T}\right)^{-1}$$
(2.13)

para 0.3 < D/T < 0.8 e 0.05 < w/T < 0.2, e:

$$N_P = 12 \left(\frac{w}{T}\right)^{0.85} \left(\frac{D}{T}\right)^{-1} \tag{2.14}$$

para 0,3 < D/T < 0,7 e 0,2 < w/T < 0,4

2.3 Estudos mais recentes

O'Kane citado por Bates et al (1963) encontrou uma correlação entre o ângulo da pá e o Número de Potência dados como:

$$N_{P} = N_{P/90^{0}} \,(\mathrm{sen}\,\theta)^{2,5} \tag{2.15}$$

Entretanto O'Kane notou que, para a largura da pá constante, a altura da pá projetada variou com θ e que o efeito da altura da pá sobre a Potência teve a seguinte correlação:

$$N_{P} = N_{P/90^{\circ}} \,(\text{sen}\,\theta)^{3,1} \tag{2.16}$$

para Turbinas de pás inclinadas.

Nienow e Miles (1971) estudaram o consumo de Potência de tanques fechados e apresentaram o Número de Potência para um impelidor Turbina de 6 pás, "Paddles" de 2 e 4 pás retas e uma Turbina de pás inclinadas (45°) em um tanque de diâmetro de 0,15 e 0,30m, sendo 10% do valor do diâmetro do tanque o valor correspondente para a largura das chicanas. Seus maiores resultados foram assumidos como:

- O Número de Potência foi máximo quando o impelidor de pás retas ficou no centro do tanque a 50% de distância entre o fundo do tanque e o impelidor;
- Com o aumento da espessura do disco, o Número de Potência caiu;
- Tanques fechados causam um aumento no Número de Potência em relação aos tanques abertos em aproximadamente 5%;
- A Turbina de pás inclinadas teve um Número de Potência mínimo em 33% de distância entre o fundo do tanque e o impelidor;
- Efeitos de D/T foram notados para todos os tipos de impelidores.

Greaves e Kobaccy (1981) sempre têm apresentado dados sobre o efeito do diâmetro do tanque e da distância entre o fundo do tanque e o impelidor para um tanque de diâmetro pequeno. Variações significantes no Número de Potência foi observado. Gray et al.(1982) correlacionaram o efeito da distância entre o fundo do tanque e o impelidor sobre o Número de Potência para um impelidor Turbina de 6 pás como:

$$N_{P} = 5,17 \left(\frac{C}{D}\right)^{0,29}$$
(2.17)

para C/D < 1,0 e:

$$N_P = 5,17$$
 (2.18)

O qual mostra uma redução no Número de potência para pequenas distâncias entre o fundo do tanque e o impelidor tipo Turbina estilo disco.

Novak et al. (1982) estudaram a influência da posição do impelidor sobre a Potência dissipada para tanques sem chicanas usando uma Turbina de 3 pás e 6 pás inclinadas. O Número de Potência foi 1,1 e 1,7 respectivamente. Foram usados tanques cilíndricos de diferentes formas de fundo: tanque de fundo reto, tanque de fundo tipo prato e um tanque de fundo cônico. A altura do líquido foi igual ao diâmetro do tanque e a taxa D/T foi variada de 3 para 4. Os impelidores foram posicionados a 0,3 e 1m do fundo tanque. Para estas geometrias foram notados diversos aspectos: a posição do impelidor fora do centro aumentou e a Potência máxima foi quase próxima aos valores para tanques com chicanas; a Potência máxima ocorreu só antes da formação do vórtice central ter alcançado o impelidor. Após esta condição, a Potência diminuiu devido ao arraste superficial; em altos Números de Reynolds, o Número de Potência mostrou ser dependente de sua posição do impelidor fora do eixo de centro do tanque.

Shiue e Wong (1984) apresentaram correlações do Número de Potência para impelidores tipo: Turbina de 6 pás, Turbina de 6 pás curvadas, Turbina de 4 pás curvadas e abertas (sem disco), hélice de 3 pás e Turbina de 2 e 4 pás inclinadas. Em altos Números de Reynolds, o Número de Potência para o impelidor tipo Turbina com disco variou de 4,3 à 5,5 e variou como uma função da distância entre o fundo do tanque e o impelidor e da taxa D/T. A Turbina estilo disco de pás curvadas teve o Número de Potência de 4,1; o impelidor aberto, 1,56; hélice, 0,67; e Turbina de 2 e 4 pás inclinadas, 1,20 e 1,74 respectivamente. Os dados indicam os vários efeitos da curvatura das pás, do número de pás, da distância entre o fundo do tanque e o impelidor, da taxa D/T, do ângulo da pá, das velocidades relativas e dos coeficientes de arrastes sobre a Potência dissipada.

2.4 Trabalhos que influenciaram na realização desta dissertação

O'Connell e Mack (1950) investigaram o consumo de Potência para o impelidor tipo Turbina de pás retas pela variação do número de pás e das dimensões das mesmas para fluxo em regime laminar e turbulento de acordo com a condição de Potência máxima. Foram estudados impelidores com duas, quatro e seis pás retangulares. Para regime turbulento, a correlação de Potência foi:

$$P = K\rho N^3 D^5 \tag{2.19}$$

Para regime laminar:

$$P = K\mu N^2 D^3 \tag{2.20}$$

Para as várias larguras estudadas, as equações (2.19) e (2.20) foram alteradas para incluir os efeitos da largura das pás. Para regime turbulento:

$$N_P = K \left(\frac{w}{D}\right)^b \tag{2.21}$$

Para regime laminar:

$$N_P = K \left(N_{\rm Re} \right)^{-1} \left(\frac{w}{D} \right)^b \tag{2.22}$$

Onde as constantes K e b são dependentes do número de pás.

Nagata et al. (1957) combinaram as equações (2.5) à (2.14) para obter uma equação para o Número de Potência em tanques sem chicanas:
$$N_{P} = \frac{A}{R_{e}} + B \left(\frac{10^{3} + 1.2R_{e}^{0.66}}{10^{3} + 3.2R_{e}^{0.66}} \right)^{P} \left(\frac{H}{T} \right)^{\left(0.35 + \frac{w}{T}\right)} (\operatorname{sen} \theta)^{1.2}$$
(2.23)

Onde A, B e p foram determinados por:

$$A = 14 + \frac{w}{T} \left\{ 670 \left(\frac{D}{T} - 0.6 \right)^2 + 185 \right\}$$
(2.24)

$$B = 10^{\left[1.3 - 4\left(\frac{w}{T} - 0.5\right)^2 - 1.14\left(\frac{D}{T}\right)\right]}$$
(2.25)

$$p = 1.1 + 4\left(\frac{w}{T}\right) - 2.5\left(\frac{D}{T} - 0.5\right)^2 - 7\left(\frac{w}{T}\right)^4$$
(2.26)

Para tanques com chicanas, *Nagata (1975)* obteve uma equação para o Número de Potência em altos Números de Reynolds; 0.3 < D/T < 0.7 e 0.05 < w/T < 0.4:

$$N_{P\max} = \frac{A}{R_c} + B\left(\frac{H}{T}\right)^{\left(0.35 + \frac{w}{T}\right)}$$
(2.27)

Onde:

$$R_{c} = \frac{25}{(w/T)} \left(\frac{D}{T} - 0.4\right)^{2} + \left(\frac{w/T}{0.11(w/T) - 0.0048}\right)$$
(2.28)

Para impelidores com pás inclinadas, R_c é substituído por R_θ mas calculados em termos de R_c como:

$$R_{\theta} = 10^{4(1-\sin\theta)} R_c \tag{2.29}$$

 R_c e R_{θ} são Números de Reynolds de transição já definidos no capítulo 4.

Sano e Usui (1985) apresentaram Números de Potência para impelidores tipos "Paddle" (Pás Retas) e Turbinas em tanques com chicanas numa região turbulenta, para Número de Reynolds maior que 5×10^5 . Os impelidores tipo Pás Retas e tipo Turbinas tiveram várias dimensões: D/T entre 0,3 e 0,7, w/D entre 0,05 e 0,4 e número de pás entre dois e oito. O diâmetro dos tanques são de 0,2 e 0,4m com quatro chicanas, $B_w/T = 0,10$, e o nível do líquido foi igual ao diâmetro do tanque. A Potência foi medida usando um Torquímetro montado sobre o eixo.

Edwards et al (1989) apresentaram medidas de Potência de um impelidor tipo Âncora para tanques de diâmetros 0,15 e 0,40m. Dados para fluidos viscosos Newtonianos são produzidos ao mesmo tempo por uso de um conceito de viscosidade média aparente dada pela equação:

$$k_s = 33 - 172 \left(\frac{C}{T}\right) \tag{2.30}$$

Em uma variação de 0,021 < C/T < 0,133, onde k_s é o termo da taxa cisalhante constante e C é a distância entre o impelidor e a parede do tanque.

Medidas de Potência em regime laminar e turbulento provenientes destes autores e outros trabalhos relevantes são interpretados em termos de um simples modelo físico que é baseado no arraste sobre a superfície de uma pá móvel. O modelo é aplicado adequadamente para o efeito sobre a Potência requerida em função de alguns dos mais importantes parâmetros incluindo: largura do impelidor, altura e número de pás. Através de uma análise das curvas, *Edwards et al. (1989)* notaram um aumento da Potência com a redução de C na região laminar.

CAPÍTULO 3

3 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE AGITAÇÃO

3.1 Agitação e Mistura

A agitação e a mistura de substâncias são procedimentos raramente ausentes nos processos industriais. Como geralmente acontece com idéias comuns, esses dois termos são entendidos como sinônimos. Mas isso não é verdade.

Entende-se por *agitação* a operação de produzir movimentos mais ou menos regulares no interior de um fluido, por meio de dispositivos mecânicos. Quando se trata de uma só substância, a operação é de *agitação* propriamente dita, para duas ou mais substâncias, miscíveis ou imiscíveis entre si, tem-se então, uma *mistura*.

O termo *mistura* deve ser aplicado às operações que tendem a reduzir qualquer não-uniformidade existentes ou gradientes tanto em termos de composição, de propriedades, ou temperatura. Isto geralmente é alcançado pela movimentação do material.

Cabe salientar que um líquido homogêneo como, por exemplo, um tanque de água à temperatura ambiente, pode ser agitado, mas não pode ser misturado até que a ele seja adicionado um outro líquido com características diferentes (óleo, água mais quente, etc.), ou um outro material sólido particulado ou ocorra a dispersão de um gás no seio daquele líquido.

O entendimento sobre agitação, no entanto, é ainda limitado. Embora a eficiência e o consumo de energia na agitação dependem de princípios básicos da mecânica dos fluídos, os fenômenos do escoamento nos vasos típicos com agitação são tão complicados que a resolução rigorosa do equacionamento dos balanços de massa, momento e energia é desconhecida. Em lugar disto, é preciso utilizar aproximações empíricas (Foust et al, 1982) e/ou numéricas.

A mistura de fluidos é o coração na maioria dos sistemas de produção nos processos químicos. Um estudo dos processos de mistura envolve diversas considerações básicas. A primeira refere-se à influência do tanque nos processos de mistura. Sua geometria, dimensão e estrutura podem ditar a seleção do impelidor e seu desempenho de mistura. É comum encontrar tanques mal projetados para um determinado processo em diversas indústrias, visto que alguns processos de mistura têm o seu máximo desempenho para tanques de tamanhos e formas específicas.

A próxima consideração refere-se à escolha do impelidor a ser utilizado em um determinado processo. A seleção do tipo de impelidor depende do tipo de mistura que se pretende obter para o processo. Os impelidores são normalmente projetados em séries homólogas, geometricamente semelhantes (*Oldshue, 1983*).

3.2 Equipamentos utilizados no Sistema de Agitação

Os equipamentos que integram o sistema de agitação consistem de: um tanque agitado (adequado às condições do processo e à maior economia operacional possível), um ou mais impelidores e, usualmente, chicanas. Alguns tanques são providos de serpentinas ou camisas para troca de calor.

Para o projeto de impelidores da indústria química, incluindo o cálculo do consumo de energia gerado pelo equipamento, necessita-se também saber: os elementos referentes ao processo e as características do consumo do impelidor, os quais são descritos abaixo:

• Elementos referentes ao processo:

Tipo do regime (laminar, transicional ou turbulento);

Fluido mecânica do fluxo gerado pelo impelidor;

"Scale-up" do equipamento.

Características do consumo do impelidor:

Velocidade do impelidor;

Relações do diâmetro/consumo de energia do impelidor.

Os elementos referentes ao processo dizem respeito ao tipo de regime associado ao processo (laminar, turbulento ou transicional), o tipo de fluxo gerado pelo impelidor (cizalhante ou não) e a translação para tanques com outras capacidades, chamado de "scaleup".

As características de consumo do impelidor combinam os efeitos das propriedades dos fluidos, a geometria do impelidor e as condições operacionais do mesmo relacionandoas ao consumo de energia.

3.2.1 Tanque Agitado

A agitação, nos casos típicos, efetua-se em um tanque geralmente cilíndrico pela ação de lâminas que giram acopladas a um eixo-árvore que coincide com o eixo vertical do tanque. A Figura 3.1 apresenta uma ilustração de um tanque agitado convencional.

Usualmente um tanque de mistura contém chicanas, ou defletores, que são chapas metálicas montadas verticalmente nas paredes, as quais provocam um distúrbio ou redirecionam o fluxo. As chicanas mais comuns são aquelas em que a largura é expressa como uma porcentagem do diâmetro do tanque (normalmente 1/12 a 1/10 do diâmetro do tanque). Existem outros tipos de chicanas como as de fundo e de superfície, porém o tipo mais utilizado é o tipo chapa vertical.

As chicanas promovem uma maior ação de mistura, dispersão e geralmente transporte; maximizam a transferência de potência para o fluido; minimizam a "rotação sólida" do fluido no tanque; previnem a formação de um vórtice central; provocam a formação de uma superfície líquida livre mais ou menos plana e evitam a entrada de ar no sistema de mistura causada pelo vórtice na superfície, quando o mesmo alcança o impelidor. A rotação sólida ocorre quando o fluido se movimenta como se fosse um corpo sólido e como conseqüência, apresenta um nível de mistura muito pequeno dentro do fluido. Geralmente a rotação sólida ocorre em misturas de regime turbulento. Esse fenômeno pode causar classificação, estratificação e separação do sistema em várias fases, o que é indesejável para a mistura (*Tatterson, 1991*).



Figura 3.1 - Ilustração de um tanque agitado convencional

Como apresentadas na Figura 3.1, as dimensões características do sistema de agitação são:

- <u>Diâmetro do tanque T</u>: o diâmetro é uma medida adequada ao tamanho do tanque, especificamente o diâmetro interno;
- <u>Diâmetro do impelidor D</u>: o diâmetro é normalmente definido como o máximo diâmetro sobre o eixo de rotação. O diâmetro do impelidor é a dimensão de maior importância para os testes de mistura;
- <u>Largura da pá do impelidor w</u>: a largura da pá projetada é uma importante característica da pá do impelidor, especialmente pás de forma retangular;
- <u>Distância entre o fundo do tanque e o impelidor C</u>: para fluxo de regime turbulento é a distância entre o centro do impelidor e o fundo do tanque. Para misturas laminares na utilização do impelidor tipo Âncora, C é definido como a distância entre extremidade da pá do impelidor e a parede do tanque, sendo uma variável importante que determina a posição do impelidor;
- <u>Altura do nível do líquido H</u>: é usualmente definido como a profundidade do líquido, ou seja, medida entre a superfície do líquido e o fundo do tanque;
- <u>Largura das chicanas B_w</u>: geralmente as chicanas são chapas verticais posicionadas perto da parede do tanque. O valor da largura da chicana é definido em função do diâmetro do tanque.

O número de pás do impelidor e o número de chicanas presentes no tanque são parâmetros geométricos que também influenciam o projeto de tanques agitados.

Na ausência das chicanas, com o impelidor centrado rotacionando a velocidades elevadas, causa à formação de um redemoinho, expulsando o fluido para as paredes do tanque, como mostra a Figura 3.2. O redemoinho forma-se em virtude da ação da força centrífuga sobre o líquido e das tensões na superfície livre do líquido.

Nos tanques sem chicanas, a formação do turbilhão central introduz um mecanismo adicional: o das forças que agem sobre o fluido por efeito da gravidade. No redemoinho, uma parte do conteúdo do tanque é suportada contra a aceleração gravitacional da terra e, por isso, as forças do fluído devem garantir a carga hidrodinâmica que constitui o turbilhão central (*Foust et al, 1982*).



Figura 3.2 - Esquema da formação do vórtice central

3.2.2 Tipos de Impelidores da Indústria Química

Os impelidores são classificados de acordo com o regime de mistura: laminar, turbulento ou transicional. Para o escoamento laminar o diâmetro do impelidor se aproxima do diâmetro do tanque, uma vez que o transporte de quantidade de movimento do escoamento laminar é baixo. Devido a essa característica, em escoamentos laminares geralmente não se utilizam chicanas.

Impelidores largos próximos ao diâmetro do tanque não são necessários quando existe o escoamento turbulento. Nesse caso a transferência da quantidade de movimento é eficiente e o diâmetro do impelidor varia de um quarto à metade do diâmetro do tanque *(Tatterson, 1991)*.

Os impelidores são classificados de três maneiras:

<u>Impelidores de fluxo axial</u>: a principal direção da descarga do fluido do impelidor coincide com a direção do eixo do agitador, como mostra a Figura 3.3. São geralmente utilizados nas aplicações de fluxo controlado, suspensão de sólidos e transferência de calor que requer alta eficiência de bombeamento.

<u>Impelidores de fluxo radial</u>: a principal direção da descarga do fluido do agitador coincide com a direção normal ao eixo de rotação. Se chicanas são fornecidas, o impelidor radial produzirá correntes fortes do topo ao fundo do tanque para descarga radial. A Figura 3.4 mostra o comportamento deste tipo de fluxo. São mais utilizados para transferência de massa líquido-líquido e um gás-líquido.

<u>Impelidores de fluxo tangencial</u>: a direção de descarga do líquido atua próximo e paralelo ao círculo de rotação do eixo-impelidor, como mostra a Figura 3.5, os quais são aplicados para agitar líquidos de altas viscosidades (*Oldshue, 1983*).

O conhecimento dessa informação é importante para verificar a existência de zonas mortas no tanque.



Figura 3.3 - Padrão de fluxo para o Impelidor de fluxo axial.



Figura 3.4 - Padrão de fluxo para o Impelidor de fluxo radial.



Figura 3.5 - Padrão de fluxo para o Impelidor de fluxo tangencial.

A escolha do tipo de impelidor a ser adotado é função dos requisitos específicos de cada processo. Os fluxos gerados determinam diferentes relações entre bombeamento e cisalhamento. A escolha com a relação mais adequada e com melhor padrão de descarga de fluxo é determinante no desempenho do sistema. O padrão de fluxo é também diretamente afetado pela disposição do impelidor.

E importante ressaltar que nenhum impelidor gera apenas um padrão de fluxo, podendo, no entanto, determinar a predominância de um deles.

As lâminas do impelidor podem assumir formas diferentes dependendo do serviço a ser realizado. Alguns tipos mais comuns de impelidores utilizados na indústria química são:

Pás Retas e Pás Inclinadas (Paddle), são os mais utilizados nas industrias químicas, devido a sua simplicidade de seu projeto e construção. Os mesmos são apropriados para reações em regime laminar e turbulento (este impelidor engloba mais da metade das aplicações industriais). Os impelidores de pás retas são os que melhor desenvolvem um fluxo radial, onde são típicos de aplicações em mistura de líquidos miscíveis. Estes impelidores normalmente operam à baixa velocidade de rotação porque é uma condição usualmente necessária para o processo. Os impelidores de 2 pás são os menos utilizados por serem mecanicamente mais instáveis do que os impelidores mais comuns como os de 4 à 8 pás. Os impelidores de pás inclinadas caracterizam por um fluxo axial e são principalmente utilizados nas operações de mistura envolvendo líquidos miscíveis ou na preparação de dissoluções de produtos sólidos.

<u>Turbina Rushton</u>, é apropriado para reações com alta turbulência, com o custo de elevadas exigências de potência. O impelidor Turbina Rushton geralmente é composto de 6 pás e é caracterizado pela presença de fluxo radial, o qual é aplicado na transferência de massa entre uma fase gasosa e uma fase líquida.

<u>Âncora</u>, o impelidor tipo âncora por sua vez é usado onde se requer um baixo nível de turbulência num fluido viscoso. Este impelidor produz uma forte componente tangencial. Normalmente possuem 2 pás com largura na ordem de T/10, sendo utilizado como raspador (minimizar a formação de depósitos) e em algumas reações específicas de polimerização, mas é especialmente eficiente para usar-se num vaso com aquecimento ou resfriamento efetuado por um encamisamento apropriado. Algumas operações como preparação de condicionadores exigem a utilização deste tipo de impelidor que possui elevado consumo de potência. Geralmente a velocidade típica de rotação é relativamente baixa, entre 5 à 50 r.p.m. (*Oldshue, 1983*).

Portanto, o tipo específico de impelidor varia de relativamente baixa energia (para agitação simples de fluidos) para alta energia, quando o meio reacional necessita de altos índices de turbulência e/ou altas tensões de cisalhamento.

A Figura 3.6 mostra os principais tipos de impelidores utilizados na indústria química para escoamento turbulento e laminar.



Impelidor tipo Pás Retas



Impelidor tipo Pás Inclinadas



Impelidor tipo Turbina Rushton de 6 pás retas

Impelidor tipo Âncora de fundo abaulado

Figura 3.6 - Principais tipos de impelidores utilizados na indústria química

3.3 Relações Geométricas dos Impelidores

As relações geométricas entre as várias partes do tanque variam muito em função da aplicação desejada e das características dos fluidos envolvidos. Normalmente as relações geométricas consideradas padrão são:

• $D/T = 1/4 a 1/2 (1/3 \acute{e} o mais comum);$

- H/T = 1;
- C/T = 1/6 a 1/2 (1/3 é o mais comum);
- $B_w/T = 1/12 a 1/10;$
- w/D = 1/6 a 1/4 (1/5 e o mais comum).

Essas relações geométricas não são as melhores para todos os tipos de processos que ocorrem nos tanques de mistura. As diferentes geometrias causam diferentes formas de fluxo em volta dos impelidores, e estas formas de fluxos causam variações na velocidade relativa fluido-impelidor e nos coeficientes locais de resistência. Cada tipo de impelidor demanda uma relação particular que fornece a maior eficiência para o processo desejado.

CAPÍTULO 4

4 CÁLCULO CONVENCIONAL DE IMPELIDORES

O projeto atual de reatores químicos é essencialmente dependente de relações empíricas, visto que as leis físicas que regem os fenômenos envolvidos nos processos químicos são expressões cuja solução analítica é ainda desconhecida. Devido a isto, trabalhos experimentais como os relatados por: *Tatterson (1991); Edwards et al. (1989);* Sano e Usui (1985); Oldshue (1983) e Nagata (1975) são utilizados como principais referências para o cálculo do consumo de energia destes sistemas reacionais. A estimativa do consumo de potência é de muita importância para o projeto de equipamentos de mistura.

4.1 Variáveis de Projeto

Os cálculos fundamentais são recomendados para ajudar na avaliação operacional e no desempenho de sistemas de mistura.

No estudo do cálculo da Potência do impelidor, várias são as informações necessárias para determinar este cálculo, como:

- Propriedades físicas do fluido (viscosidade μ e densidade ρ);
- Velocidade de rotação do impelidor;
- A geometria do impelidor e do tanque;
- Presença ou ausência de chicanas, seu projeto e localização;
- Localização relativa do impelidor em relação ao tanque.

Essas informações são muito importantes para calcular a Potência do impelidor P e o Torque T_q .

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL SECÃO CIRCULANTE

4.1.1 Potência

MATERO

O principal custo operacional em uma unidade de agitação é o custo da energia. O custo desta energia é estimado através do cálculo da potência no sistema de agitação, que leva em conta o consumo de energia total durante o tempo necessário para a realização do efeito de mistura requerido. Isto é o tempo mínimo necessário para uma mistura completa, definido como tempo de mistura θ . Neste consumo de energia total, os parâmetros somados ao cálculo da Potência total são: a perda da potência referente ao motor propulsor da haste, o fator referente a presença de chicanas e o fator de serviço que leva em consideração as condições operacionais do equipamento. Estes parâmetros influenciam diretamente a economia do equipamento de mistura (*Sterbacek, 1965*).

Neste projeto, está sendo apenas levado em conta o cálculo da Potência transferida do impelidor para o fluido, que é considerado como a energia por unidade de tempo necessária para superar as forças de resistência atuantes sobre a pá do impelidor. O consumo total deve levar em conta o gasto de energia do sistema mecânico.

Usualmente o cálculo da Potência é determinado experimentalmente através de medidas de Torque utilizando-se de dinâmometros e/ou através de análise dimensional. Uma equação geral para a Potência do impelidor pode ser definida como função da geometria do impelidor e do tanque, das propriedades do fluido, da rotação do impelidor e da força gravitacional. O teorema pi de Buckingham define esta relação de variáveis através da seguinte equação adimensional *(Uhl e Gray, 1966)*:

$$f\left(\frac{\rho ND^2}{\mu}, \frac{N^2 D}{g}, \frac{P}{\rho N^3 D^5}, \frac{D}{T}, \frac{D}{H}, \frac{D}{C}, \frac{D}{p}, \frac{D}{w}, \frac{D}{1}, \frac{np_2}{np_1}\right) = 0$$
(4.1)

Para que a equação (4.1) seja adimensional todas as unidades devem ser coerentes. A igualdade de todos os grupos nesta equação assume similaridade entre sistemas de diferentes tamanhos. Os tipos de similaridade presentes no sistema de agitação são: geométrico, cinemático e dinâmico.

30

Similaridade Geométrica: os sete últimos termos da equação (4.1) representam uma condição de similaridade geométrica, o qual requer que todas as dimensões correspondentes nos sistemas de diferentes tamanhos suporte as mesmas taxas para um outro, ou seja, de um modelo para um protótipo. A dimensão de referência usada neste caso é o diâmetro do impelidor, e o último termo da equação (4.1) não é uma dimensão linear, mas sim uma relação requerida para relacionar a variação no número de pás do impelidor.

A equação (4.1) está definida para um simples impelidor centrado sobre o eixo de um tanque cilíndrico vertical de fundo chato. Para uma análise completa esta equação pode ser expandida para incluir:

- posição do impelidor fora do centro;
- múltiplos impelidores;
- largura das chicanas e número de chicanas;
- forma do tanque.

<u>Similaridade Cinemática e Dinâmica:</u> dado a similaridade geométrica, dois sistemas são dinamicamente similares quando as taxas de todas as forças atuantes no sistema de agitação são iguais. A Similaridade Cinemática requer que as velocidades dos pontos correspondentes estejam na mesma taxa. Estes dois critérios de similaridades estão presentes juntos desde que eles estejam interrelacionados em um sistema de fluido.

Confinando a discussão para os sistemas de similaridade geométrica, a equação (4.1) pode ser declarada como:

$$f\left(\frac{\rho ND^2}{\mu}, \frac{N^2 D}{g}, \frac{P}{\rho N^3 D^5}\right) = 0$$
(4.2)

De outra forma, o caminho mais prático para se estimar a Potência do impelidor é utilizando as curvas que relacionam o Número de Reynolds com o Número de Potência. O Número de Potência relaciona a densidade ρ (kg/m³), o cubo da velocidade de rotação N (s⁻¹) e o diâmetro do impelidor D (m) elevado à quinta potência, como denominado na equação (4.3).

$$P = N_P \rho N^3 D^5 \tag{4.3}$$

4.1.2 Torque

O Torque é definido como o produto da força aplicada sobre o fluido da mistura e o momento do braço, ou seja, a distância da pá do impelidor. Essa força se distribui ao longo do impelidor, a qual, produz uma torção e, ao mesmo tempo, uma flexão no eixo do impelidor. Para os sistemas de agitação o Torque está relacionado com a Potência e a velocidade rotacional do Impelidor, como definida na equação (4.4).

$$T_q = \frac{P}{2\pi N} \tag{4.4}$$

O Torque tarnsmitido é uma medida importante que influencia acentuadamente o custo e o desempenho do equipamento de uma unidade de agitação, desta forma, para o cálculo do Torque são levados em conta o diâmetro do impelidor e a densidade do fluido, assim como o tamanho do eixo e o peso do impelidor que também dependem deste valor.

Para a maioria das aplicações de processos de mistura, o Torque por Volume é considerado ser uma melhor indicação para medidas de intensidade na agitação. Como o torque é proporcional à relação entre a potência e a velocidade de rotação, o parâmetro T_q/V é proporcional à relação D/T à terceira potência, assim com a relação Potência-Volume. A quantidade D/T é constante quando a similaridade geométrica é mantida. Isso enfatiza a importância da semelhança geométrica no "scale-up".

4.2 Números Adimensionais

Uma das grandes dificuldades no projeto de agitadores é encontrar os melhores números adimensionais para a representação dos sistemas de mistura, visto que muitos parâmetros e variáveis que são importantes para um determinado projeto, podem ser não tão relevantes para outros (*Gouvea et al., 1999*).

No projeto convencional de reatores, os números adimensionais são utilizados para correlacionar parâmetros de "scale-up". Estes números relacionam a força de inércia (força de movimentação da agitação) com outras forças proporcionando as seguintes razões:

4.2.1 <u>Número de Reynolds (N_{Re})</u>

O Número de Reynolds relaciona a razão das forças inerciais (F_i) com as forças viscosas (F_v):

$$N_{\rm Re} = \frac{F_i}{F_v} = \frac{\rho N D^2}{\mu} \tag{4.5}$$

Esta taxa determina se o fluxo 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, muito embora alguns autores chegam a considerar como laminar valores de Reynolds até 300 (*Edwards et al., 1972*) e turbulento para valores acima de 1×10^4 . Entre esses valores, o regime é de transição.

No caso da agitação, o comprimento característico é o diâmetro do impelidor D e a velocidade característica é a velocidade na borda π ND. Define-se, portanto, em agitação o Número de Reynolds conforme a equação (4.5).

4.2.2 Número de Froude (N_{Fr})

O Número de Froude relaciona a taxa das forças inerciais (F_i) com as forças gravitacionais (F_g):

$$N_{Fr} = \frac{F_i}{F_g} = \frac{ND^2}{g}$$
(4.6)

Pelos princípios quantitativos, o número de Froude sofre uma influência das forças gravitacionais e é usado para considerar os efeitos da superficie livre no Número de Potência, que resulta na formação do vórtice central. Geralmente estes efeitos são visíveis em tanques sem chicanas e a formação deste vórtice representa o balanceamento das forças gravitacionais e inerciais (*Uhl e Gray, 1966*).

O número de Froude aumenta com o aumento da velocidade rotacional, com o aumento do diâmetro do impelidor e consequentemente a Potência consumida diminui. Por isso, este número é incluído em correlações de Número de Reynolds e Número de Potência em sistemas sem chicanas (*Sterbacek, 1965*).

4.2.3 Número de Fluxo (No)

O Número de Fluxo representa a taxa das forças de bombeamento (F_b) sobre as forças inerciais (F_i) :

$$N_{\mathcal{Q}} = \frac{F_b}{F_i} = \frac{Q}{ND^3} \tag{4.7}$$

O número de fluxo relaciona a taxa de bombeamento do impelidor Q (volume escoado por área do impelidor e por tempo) com a velocidade e tamanho do impelidor. Portanto, correlaciona a capacidade de bombeamento de diferentes impelidores com diferentes geometrias do tanque.

4.2.4 Número de Mistura (N_T)

O Número de Mistura relaciona o produto da velocidade de rotação N e o tempo de mistura θ :

$$N_r = N\theta \tag{4.8}$$

O tempo de mistura é uma medida de tempo requerido para misturar líquidos miscíveis uniformemente ao longo do volume do tanque agitado. Se o número de mistura for constante, o tempo de mistura é proporcional ao inverso da velocidade de rotação do impelidor.

4.2.5 Número de Potência (N_{P)}

O Número de potência é o coeficiente de arraste nos sistemas com agitação:

$$N_P = \frac{P}{\rho N^3 D^5} \tag{4.9}$$

Este número adimensional é utilizado tipicamente para o escoamento turbulento. No caso de regime laminar a seguinte relação é válida:

$$N_P = \frac{P}{\mu N^2 D^3} \tag{4.10}$$

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

$$N_{P} = \frac{P}{\rho N^{3} D^{5}} K \left(\frac{\rho N D^{2}}{\mu}\right)^{a} \left(\frac{N^{2} D}{g}\right)^{b} \left(\frac{T}{D}\right)^{c} \left(\frac{C}{D}\right)^{d} \left(\frac{H}{D}\right)^{e}$$
(4.11)

Onde 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 medida, a equação acima pode ser simplificada para: $N_P = K(N_{Re})^a (N_{Fr})^b$, válida para escoamento turbulento e tanques sem chicanas. Sem a presença de um vórtice central a equação acima é simplificada para: $N_P = K(N_{Re})^a$. Nessas condições o Número de Froude não tem influência no Numero de Potência. Quando o Número de Reynolds é elevado, a equação se simplifica para $N_P = K'$, válido para tanques com chicanas. Para tanques sem chicanas, mesmo para altos Números de Reynolds, pode existir uma influência desse número no Número de Potência.

O processo de se efetuar um "scale-up" a partir da relação entre o Número de Potência e o Número de Reynolds obtidos em laboratório ou escala piloto para tanques maiores, mas geometricamente similares, é bastante utilizada. A desvantagem do procedimento é que não há um entendimento claro dos fenômenos físicos que ocorrem no processo. Nem sempre os valores obtidos em laboratório fornecem bons resultados em uma escala maior, porque outros fatores que não são levados em conta podem influenciar na agitação. Além disso, a equação fica limitada a uma correlação que depende de sua lei de potência. Não é sempre que os fenômenos físicos podem ser simulados a partir desse tipo de correlação (*Tatterson, 1991*).

Vários pesquisadores publicaram equações e gráficos obtidos em laboratório para casos particulares de determinadas geometrias. Usualmente a geometria básica é um tanque cilíndrico de fundo chato, com altura do líquido H igual ao diâmetro do tanque T, apenas um impelidor colocado a uma distância C do fundo.

Geralmente, os dados para uma correlação do Número de Potência versus o Número de Reynolds é colocado em um gráfico log-log, como mostra a Figura 4.1.



NRe

Figura 4.1 - Característica geral da curva do Número de Potência em função do Número de Reynolds para tanques sem e com chicanas.

Para baixos Números de Reynolds, geralmente menores que 10, existe uma região laminar em que dominam as forças viscosas. O coeficiente angular da curva de potência neste caso é igual a -1, indicando que o Número de Potência é inversamente proporcional ao Número de Reynolds.

Para altos Números de Reynolds, superiores à 1×10^4 , o escoamento é turbulento e a mistura é rápida devido ao movimento dos vórtices turbulentos. Nessa região o Número de Potência é essencialmente constante. Entre as regiões de regime laminar e turbulento, existe uma zona de transição gradual onde a relação entre o Número de Potência e Número de Reynolds não é trivial e evita-se trabalhar.

As curvas de potência para diferentes impelidores podem ser encontrados na literatura, mas é preciso ressaltar que tais curvas são aplicáveis a líquidos Newtonianos e para uma geometria do tanque especificada. A Figura 4.2 apresenta um exemplo de um desses trabalhos publicados mostrando a curva de Potência para diversos impelidores.



Figura 4.2 – Relação entre o Número de Potência e o Número de Reynolds para fluidos Newtonianos, para diversos tipos de impelidores (*Oldshue, 1983*).

4.3 Equações Empíricas para o Cálculo de Impelidores

Alguns autores, tais como: Hiraoka et al (1995), Tatterson (1991), Edwards et al (1989), Sano e Usui (1985), Oldshue (1983), Takahashi et al (1980), Nishikawa et al (1979), Nagata (1975) e O'Connell et al (1950) desenvolveram correlações empíricas para o cálculo do Número de Potência aplicadas em diversos tipos de impelidores no sistema de agitação e para relações geométricas padrão.

4.3.1 Equações Empíricas para o Impelidor tipo Pás Retas e Inclinadas

Impelidores tipo Pás Retas e Inclinadas são freqüentemente usados em indústrias químicas para atender a grande parte das necessidades das indústrias e, também, devido à simplicidade de seu projeto e construção. Em sua forma básica consiste usualmente de 2 pás ou 4 pás, horizontal ou inclinada, funcionando para tanques com presença ou ausência de chicanas. Geralmente em seu projeto são especificados a taxa D/T (relação entre o

diâmetro do impelidor e o diâmetro do tanque), taxa w/T (relação entre a largura da pá do impelidor e o diâmetro do tanque) e altura do nível do líquido, H (*Nagata*, 1975).

<u>Para o impelidor tipo Pás Retas para tanques sem chicanas</u>, tem-se a seguinte equação, *Nagata (1975)*:

$$N_{P} = \frac{A}{R_{e}} + B \left(\frac{10^{3} + 1.2R_{e}^{0.66}}{10^{3} + 3.2R_{e}^{0.66}} \right)^{p} \left(\frac{H}{T} \right)^{\left(0.35 + \frac{w}{T} \right)}$$
(4.12)

• <u>Para o impelidor tipo Pás Inclinadas para tanques sem chicanas</u>, tem-se a seguinte equação, *Nagata (1975)*:

$$N_{P} = \frac{A}{R_{e}} + B \left(\frac{10^{3} + 1.2R_{e}^{0.66}}{10^{3} + 3.2R_{e}^{0.66}} \right)^{p} \left(\frac{H}{T} \right)^{\left(0.35 + \frac{W}{T}\right)} (\operatorname{sen} \theta)^{1,2}$$
(4.13)

Onde:

$$A = 14 + \frac{w}{T} \left\{ 670 \left(\frac{D}{T} - 0.6 \right)^2 + 185 \right\}$$
(4.14)

$$B = 10^{\left[1.3 - 4\left(\frac{w}{T} - 0.5\right)^2 - 1.14\left(\frac{D}{T}\right)\right]}$$
(4.15)

$$p = 1.1 + 4\left(\frac{w}{T}\right) - 2.5\left(\frac{D}{T} - 0.5\right)^2 - 7\left(\frac{w}{T}\right)^4$$
(4.16)

Portanto a Potência é calculada da seguinte forma:

$$P = N_P \rho N^3 D^5 \tag{4.17}$$

 Para o impelidor tipo Pás Retas para tanques com chicanas, tem-se a seguinte equação, Nagata (1975):

$$N_{P\max} = \frac{A}{R_c} + B\left(\frac{H}{T}\right)^{\left(0.35 + \frac{w}{T}\right)}$$
(4.18)

Onde:

$$R_{c} = \frac{25}{(w/T)} \left(\frac{D}{T} - 0.4\right)^{2} + \left(\frac{w/T}{0.11(w/T) - 0.0048}\right)$$
(4.19)

<u>Para o impelidor tipo Pás Inclinadas para tanques com chicanas</u>, tem-se a seguinte equação, *Nagata (1975)*:

$$N_{P_{\text{max}}} = \frac{A}{R_{\theta}} + B \left(\frac{10^3 + 1.2R_{\theta}^{0.66}}{10^3 + 3.2R_{\theta}^{0.66}} \right)^p \left(\frac{H}{T} \right)^{\left(0.35 + \frac{w}{T} \right)} (\operatorname{sen} \theta)^{1,2}$$
(4.20)

Onde:

$$R_{\theta} = 10^{4(1-\sin\theta)} R_c \tag{4.21}$$

 R_c e R_{θ} são atualmente Números de Reynolds de transição.

Portanto a Potência é calculada da seguinte forma:

$$P = N_{P\max} \rho N^3 D^5 \tag{4.22}$$

 Para o impelidor tipo Pás Retas para tanques com chicanas (especificação da largura da chicana B_w, e número de chicanas nb), tem-se a seguinte equação, Nagata (1975):

$$N_{PB} = N_{P\max} - (1 - 2.9 \left(\frac{B_{w}}{T}\right)^{1/2} n_b)^2 \left(N_{P\max} - N_{P\infty}\right)$$
(4.23)

Onde:

$$N_{P\infty} = B \left(\frac{0.6}{1.6}\right)^{p}$$
(4.24)

 N_{Pmax} é dado pela equação (4.18) e p é dado pela equação (4.16).

Nishikawa et al., (1979) fizeram uma pequena modificação na equação de Nagata (4.3.12) para verificar o efeito da largura e número de chicanas sobre o consumo de Potência para impelidores de pás retas para tanques com chicanas.

$$N_{PB} = N_{P\max} - (1 - 2.9 \left(\frac{B_w}{T}\right)^{1,2} n_b)^4 \left(N_{P\max} - N_{P\infty}\right)$$
(4.25)

 $N_{Pmáx}$ é dado pela equação (4.18), p é dado pela equação (4.16) e R_c e R_{θ} são utilizados para o cálculo.

Portanto a Potência é calculada da seguinte forma:

$$P_{B} = N_{PB} \rho N^{3} D^{5} \tag{4.26}$$

Correlações empíricas em estudos mais recentes foram analisadas para o cálculo do Número de Potência nos impelidores de Pás Retas. *Hiraoka et al., (1995)* estudaram as correlações para o cálculo do Número de Potência para impelidores de pás retas em tanques cilíndricos sem chicanas:

$$N_{P} = \left(\frac{1,2\pi^{4}\beta^{2}}{8\left(\frac{D^{3}}{T^{2}H}\right)}\right)f$$
(4.27)

Onde:

$$f = \frac{C_L}{\operatorname{Re}_G} + C_t \left(\left(\frac{C_{tr}}{\operatorname{Re}_G} + \operatorname{Re}_G \right)^{-1} + \left(\frac{f_{\infty}}{C_t} \right)^{\frac{1}{m}} \right)^m$$
(4.28)

$$\operatorname{Re}_{G} = \left(\frac{\pi\eta \ln\left(\frac{T}{D}\right)}{4\left(\frac{D}{T\beta}\right)}\right)\operatorname{Re}$$
(4.29)

$$m = \left(\left(0.710 \left(\gamma n p^{0.7} w/T \right)^{0.373} \right)^{-7.8} + \left(0.333 \right)^{-7.8} \right)^{-1/7.8}$$
(4.30)

$$C_L = 0.215\eta np \left(\frac{D}{H}\right) \left(1 - \left(\frac{D}{T}\right)^2\right) + 1.83 \left(\frac{w}{H}\right) \left(\frac{np}{2}\right)^{1/2}$$
(4.31)

$$C_{t} = \left(\left(1.96 \left(mp^{0.7} w/H \right)^{1.19} \right)^{-7.8} + \left(0.25 \right)^{-7.8} \right)^{-1/7.8}$$
(4.32)

$$C_{r} = 23.8 \left(\frac{D}{T}\right)^{-3.24} \left(\frac{w}{T}\right)^{-1.18} \left(\gamma n p^{0.7} w/H\right)^{-0.74}$$
(4.33)

$$f\infty = 7.56 x 10^{-3} (D/T) C_{tr}^{0.308}$$
(4.34)

$$\gamma = \left(\frac{\eta \ln(T/D)}{(\beta T/D)^5}\right)^{1/3}$$
(4.35)

$$\eta = \frac{0.711(0.157 + (np\ln(T/D))^{0.611})}{np^{0.52}(1 - (D/T)^2)}$$
(4.36)

$$\beta = \frac{2\ln(T/D)}{(T/D) - (D/T)}$$
(4.37)

Sano e Usui, 1985 informaram o Número de Potência, o Número de Fluxo e o Número de Mistura para impelidores tipo Pás Retas em tanques com chicanas numa região turbulenta, onde o Número de Reynolds é maior que 5×10^5 . Os impelidores Pás Retas foram estudados para várias dimensões: D/T entre 0,3 e 0,7; w/T entre 0,05 e 0,4; e número de pás entre 2 à 8, com 4 chicanas; $B_w/T = 0,10$ e o nível do líquido igual ao diâmetro do tanque. Como mostra a equação abaixo:

$$N_{P} = 7,3 \left(\frac{D}{T}\right)^{-1,15} \left(\frac{w}{T}\right)^{1,15} n_{p}^{0,80}$$
(4.38)

$$N_{Q} = 1,3 \left(\frac{D}{T}\right)^{-0.86} \left(\frac{w}{T}\right)^{0.82} (np)^{0.6}$$
(4.39)

$$N_T = 2, l \left(\frac{D}{T}\right)^{-1,67} \left(\frac{w}{T}\right)^{-0,74} (np)^{-0,47}$$
(4.40)

4.3.2 Equações Empíricas para o Impelidor tipo Turbina Rushton

As condições de operação do impelidor tipo Turbina são geralmente turbulentos, principalmente na direção radial, exigindo elevadas potências. Em sua forma básica este impelidor é classificado como: "Turbina Rushton" composto de 6 pás retas em tanques com e sem chicanas, funcionando para as mesmas condições geométricas que o impelidor tipo "Paddle" (Pás Retas).

 Para o impelidor tipo Turbina Rushton de 6 Pás Retas para tanques sem chicanas, tem-se a seguinte equação, Nagata (1975):

$$N_P = \frac{11,39X10^4}{\left(N_{\rm Re}\right)^2} + \frac{717}{N_{\rm Re}} + 0.2 \tag{4.41}$$

 Para o impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas para tanques com chicanas em regime laminar e turbulento, tem-se a seguinte equação, O'Connell et al., (1950):

Em Regime Laminar:

$$N_{P} = k \left(\frac{\mu}{\rho N D^{2}}\right) \left(\frac{w}{D}\right)^{b}$$
(4.42)

Em Regime Turbulento:

$$N_P = k \left(\frac{w}{D}\right)^b \tag{4.43}$$

Onde: k e b são funções do número de pás do impelidor, conforme a tabela 4.1 abaixo:

Tabela 4.1 Efeito do número de pás sobre as constantes k e b, dado por O'Connell et al., (1950).

Número de Pás	Regime Laminar		Regime Turbulento	
	k	b	K	b
2	113	0,52	13,8	1,23
4	141	0,45	19,4	1,15
6	161	0,38	23,7	1,09

Correlações empíricas em estudos mais recentes foram analisadas para o cálculo do Número de Potência, Número de Fluxo e Número de Mistura para o impelidor Turbina Rushton. *Sano e Usui (1985)*, informaram o Número de Potência para impelidores tipo Turbina Rushton de Pás Retas em tanques com chicanas em uma região turbulenta, onde o Número de Reynolds é maior que 5×10^5 . Os impelidores Turbina Rushton foram estudados para várias dimensões: D/T entre 0,3 e 0,7; w/T entre 0,05 e 0,4; e número de pás entre 2 à 8, com 4 chicanas; $B_w/T = 0,10$ e o nível do líquido igual ao diâmetro do tanque. Como mostra a equação abaixo:

$$N_P = 3.6 \left(\frac{D}{T}\right)^{-0.95} \left(\frac{w}{T}\right)^{0.75} (np)^{0.80}$$
(4.44)

$$N_{Q} = 0.8 \left(\frac{D}{T}\right)^{-0.70} \left(\frac{w}{T}\right)^{0.65} (np)^{0.6}$$
(4.45)

$$N_T = 3.8 \left(\frac{D}{T}\right)^{-1.8} \left(\frac{w}{T}\right)^{-0.51} (np)^{-0.47}$$
(4.46)

4.3.3 Equações Empíricas para o Impelidor tipo Âncora

As condições de operação do impelidor tipo Âncora requer um baixo nível de turbulência num fluido viscoso e é indicado para processos que envolvem transferência de calor. Geralmente a largura da pá é D/10 e H/T=1,0. O consumo de Potência varia diretamente com a taxa H/T. Os impelidores tipo Âncora são geometricamente de fundo abaulado ou chato.

 Para o impelidor tipo Âncora de Pás Retas com Fundo abaulado, tem-se a seguinte equação, Edwards et al., (1989):

Em Regime Laminar:

$$N_{p} = 8.5\pi^{3} \frac{\left(\frac{h}{D}\right)\left(\frac{w}{D}\right)}{\left(N_{Re}\right)\left(\frac{C}{T}\right)^{0.5}} np$$
(4.47)

Em Regime Turbulento:

$$N_{P} = \left(\frac{\pi^{3}}{8}\right) \left(\frac{w}{D}\right) \left(\frac{h}{D}\right) np$$
(4.48)

• <u>Para o impelidor tipo Âncora de Pás Retas com Fundo Chato</u>, tem-se a seguinte equação, *Takahashi et al., (1980)*:

Em Regime Laminar:

$$N_{p} = \left(\frac{1}{N_{Re}}\right) \left(\frac{16\pi^{3}}{2\ln(4+8C/w)-1}\right) \left(\frac{h}{D}\right) \left(1+0,00735(T/C)^{0,832}\right)$$
(4.49)

CAPÍTULO 5

5 METODOLOGIA PARA O CÁLCULO CONVENCIONAL DE IMPELIDORES

A metodologia empregada para o cálculo convencional de impelidores, de uma maneira geral, é separada em dois tipos distintos de análises:

- Através de correlações gerais obtidas a partir de estudos experimentais com tipos específicos de impelidores e análises das geometrias do impelidor e tanque agitado. O estudo é válido para geometrias que mantenham a relação gêométrica do protótipo (séries homólogas).
- Através de métodos numéricos, com o estudo ponto a ponto de um determinado sistema utilizando modelos de discretização da fluidodinâmica computacional.

Neste projeto é utilizado o primeiro caso (correlações empíricas), através da implementação das equações apresentadas no capítulo anterior, que tem como objetivo prever dados importantes do consumo de energia a partir de dados provenientes de sistemas experimentais que possuem a mesma proporção de medidas que o sistema desejado.

5.1 Procedimentos para o Cálculo Convencional de Impelidores

Para o cálculo da Potência do impelidor, alguns procedimentos são adotados. O primeiro consiste na seleção do tipo de mistura, bem como o tipo de regime associado ao processo de mistura. Em seguida determina-se o tipo de impelidor (Pás Retas, Pás Inclinadas, Turbina Rushton ou Âncora) para o processo específico escolhido. Sabendo-se estes dados e utilizando-se correlações empíricas apropriadas, estima-se então o consumo de Potência.

Para se avaliar o consumo de Potência de um sistema de agitação, além das propriedades físicas utilizadas no meio operacional é necessário saber detalhada a geometria tanque-impelidor tais como: diâmetro do tanque, diâmetro do impelidor, altura de nível do líquido, largura da pá do impelidor, altura da pá, inclinação da pá, número de pás, número de chicanas, largura das chicanas, distância entre o impelidor e o fundo do tanque ou da parede do tanque.

O consumo de Potência dos sistemas agitado é calculado por correlações empíricas. Para as geometrias estudadas neste trabalho, as correlações empíricas envolvidas no processo foram implementadas em uma ferramenta computacional (*Visual Fortran, versão 6.6*). A Figura 5.1 mostra o fluxograma do método empregado no desenvolvimento do programa computacional para a determinação das variáveis de projeto e números adimensionais no cálculo de impelidores.



Figura 5.1 – Esquema do método empregado no desenvolvimento do programa computacional para o cálculo convencional de impelidores

5.1.1 Exemplo Ilustrativo para o Cálculo da Potência do Impelidor

Através do procedimento adotado para o cálculo da Potência do impelidor, é ilustrado um exemplo de cálculo utilizando correlações empíricas. Tomando como exemplo as correlações empíricas implementadas no capítulo anterior por *Nagata (1975)* para um impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas, quando especificados a largura e o número de chicanas. A Potência pode ser estimada da seguinte maneira:

Condições do problema:

- Impelidor tipo Pás Retas
- Tanques com Chicanas

Condições operacionais e dados geométricos:

Considerando a água como o líquido presente no sistema de agitação (sistema homogêneo).

- Densidade do fluido, $\rho = 1000 \text{ Kg/ m}^{3}$;
- Viscosidade do fluido, $\mu = 0,001$ Kg/ ms;
- Velocidade de rotação do impelidor, N = 180 r.p.m. = 3 r.p.s.;
- Diâmetro do tanque, T = 1m;
- Altura do nível do líquido, H = T = 1m;
- Diâmetro do impelidor, D = 1/3T = 0.333m;
- Largura da pá do impelidor, w = 1/5D = 0,066m;
- Largura das chicanas, $B_w = 1/10T = 0, 1m$;
- Número de chicanas, nb = 4.
Nagata (1975) nos estudos das correlações empíricas para o impelidor tipo pás retas, fixou os parâmetros: número de pás, np = 2 e distância entre o impelidor e o fundo tanque, C = 1/3T = 0.333m.

Portanto, com as informações das propriedades físicas do fluido, da velocidade rotacional e o diâmetro do impelidor, o primeiro passo para estimar a Potência consumida do impelidor pode ser feito através do cálculo do Número de Reynolds.

Através da equação (4.5) implementada no capítulo anterior, o <u>Número de</u> <u>Reynolds</u> é obtido:

$$N_{\rm Re} = \frac{\rho ND^2}{\mu} = \frac{1000 \times 3 \times (0.333)^2}{0.001} = 3.33 \times 10^5 \text{ (regime turbulento)}$$

Com o Número de Reynolds calculado pode-se calcular o Número de Potência através do uso de curvas de Potência correlacionadas na literatura, *Nagata (1975)* e *Oldshue (1983)*. Pode-se também utilizar uma correlação empírica, como a correlação empírica de *Nagata (1975)* aplicada para pás retas em tanques com chicanas (especificação da largura e número de chicanas) implementadas no capítulo anterior, equação (4.23):

Cálculo do Número de Potência

$$N_{PB} = N_{P\max} - (1 - 2.9 \left(\frac{B_{w}}{T}\right)^{1,2} n_b^{2} (N_{P\max} - N_{P\infty})^{2}$$

Para o cálculo do Número de Potência quando a largura e o número de chicanas são especificados, é necessário saber as informações do Número de Potência máxima e Número de Potência para Reynolds infinito, através das equações (4.18) e (4.24) apresentadas no capítulo anterior:

$$N_{P_{\text{max}}} = \frac{A}{R_c} + B \left(\frac{H}{T}\right)^{\left(0.35 + \frac{w}{T}\right)}$$

$$N_{P\infty} = B \left(\frac{0.6}{1.6}\right)^p$$

Para o cálculo do Número de Potência máxima é necessário calcular os parâmetros A e B, que são calculados através das equações (4.14) e (4.15) respectivamente; e o valor do Número do Reynolds crítico dado pela equação (4.19) do capítulo anterior. Para o cálculo do Número de Potência para Reynolds infinito são necessárias as informações dos parâmetros B e p. O parâmetro geométrico p é calculado através da equação (4.16) do capítulo anterior. Os valores de A, B, p e Rc são funções das relações geométricas:

$$A = 14 + \frac{w}{T} \left\{ 670 \left(\frac{D}{T} - 0.6\right)^2 + 185 \right\}$$
$$B = 10^{\left[1.3 - 4\left(\frac{w}{T} - 0.5\right)^2 - 1.14\left(\frac{D}{T}\right)\right]}$$

$$R_{C} = \frac{25}{(w/T)} \left(\frac{D}{T} - 0.4\right)^{2} + \left(\frac{w/T}{0.11(w/T) - 0.0048}\right)$$

$$p = 1.1 + 4\left(\frac{w}{T}\right) - 2.5\left(\frac{D}{T} - 0.5\right)^2 - 7\left(\frac{w}{T}\right)^4$$

Para o cálculo do parâmetro geométrico A:

$$A = 14 + \frac{0,066}{1} \left\{ 670 \left(\frac{0,333}{1} - 0.6 \right)^2 + 185 \right\} = 29,03$$

Para o cálculo do parâmetro geométrico B:

$$B = 10^{\left[1.3 - 4\left(\frac{0,066}{1} - 0.5\right)^2 - 1.14\left(\frac{0,333}{1}\right)\right]} = 1,469$$

Para o cálculo do Número de Reynolds crítico:

$$R_{C} = \frac{25}{(0,066/1)} \left(\frac{0,333}{1} - 0,4\right)^{2} + \left(\frac{0,066/T}{0,11(0,066/1) - 0,0048}\right) = 28,53$$

Para o cálculo do parâmetro geométrico p:

$$p = 1.1 + 4\left(\frac{0,066}{1}\right) - 2.5\left(\frac{0,333}{1} - 0.5\right)^2 - 7\left(\frac{0,066}{1}\right)^4 = 1,294$$

Portanto, com os parâmetros geométricos e o Número de Reynolds crítico calculados, o próximo passo é determinar: o Número de Potência máxima e o Número de Potência para Reynolds infinito.

$$N_{P\max} = \frac{29,03}{28,53} + 1,469 \left(\frac{1}{1}\right)^{\left(0.35 + \frac{0,066}{1}\right)} = 2,49$$
$$N_{P\infty} = 1,469 \left(\frac{0,6}{1,6}\right)^{1,294} = 0,41$$

Substituindo estes valores na equação do Número de Potência específica (dado o número e largura das chicanas), temos:

$$N_{PB} = 2,49 - (1 - 2,9\left(\frac{0,1}{1}\right)^{1,2} 4)^2 (2,49 - 0,41) = 2,34$$

Verifica-se que para o Número de Reynolds calculado, $N_{Re} = 3,33 \times 10^5$ (regime turbulento), o Número de Potência obtido foi, $N_{PB} = 2,34$, isto pode ser observado na literatura através de curvas de Potência, *Nagata (1975) e Oldshue (1983)*.

E por final, o cálculo da Potência estimada para um impelidor tipo pás retas em tanques com 4 chicanas e $B_w = 0,1m$ é calculada através da equação (4.26) apresentada no capítulo anterior.

Cálculo da Potência consumida:

 $P_{B} = N_{PB} \rho N^{3} D^{5}$

 $P_{B} = 2,24 \times 1000 \times (3)^{3} \times (0,333)^{5} = 0,26 \text{ KW}$

5.2 Condições Operacionais para o Cálculo da Potência do Impelidor tipo Pás Retas

Nesta avaliação inicial do projeto foram implementadas várias correlações empíricas da literatura para uma análise das variáveis geométricas que influenciam o Número de Potência e, consequentemente, o cálculo da Potência no impelidor.

As condições operacionais (propriedades físicas do fluido, velocidade rotacional e relações geométricas) foram implementadas de acordo com os dados da literatura, considerando em todos os casos o diâmetro do tanque igual a 1m e o método de cálculo foi baseado de acordo com o exemplo ilustrativo mostrado anteriormente.

Para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas foram utilizadas as correlações de Nagata (1975) e Hiraoka et al. (1995).

Na utilização das correlações empíricas de Nagata (1975) foi necessário se estabelecer as seguintes etapas para o cálculo da Potência do impelidor:

 Especificação das propriedades físicas do fluido, velocidade rotacional e diâmetro do impelidor;

- Determinação do Número de Reynolds;
- Especificação das relações geométricas;
- Determinação dos parâmetros adimensionais: A, B e p;
- Determinação do Número de Potência.

Para a determinação do Número de Reynolds as propriedades físicas do fluido (densidade e viscosidade), velocidade rotacional e diâmetro do impelidor precisam ser especificadas. *Nagata (1975)* analisou as correlações para um impelidor de 2 pás e algumas relações geométricas. para determinação do Número de Potência.

A tabela 5.1 apresenta as condições operacionais que foram utilizadas para a obtenção do cálculo da Potência para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas utilizando as correlações empíricas de *Nagata (1975)*.

Impelidor Pás Retas para Tanques Sem Chicanas					
	Condições	Operacionai	S		
Densidade	(Kg/m^3)		1000,0		
Viscosidade	e (Kg/m s)		0,001		
Velocidade	rotacional (r.p.m.)		60-240		
Geometria	Geometria tanque-impelidor Relações geométricas padrão				
T (m)	1,0	D/T	0,3-0,7		
D (m) 0,333 w/D			0,05-0,25		
H (m) 1,0 H/T 0,5-1,0					
w (m)	0,2	np	2		

Tabela 5.1 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Sem Chicanas, *Nagata (1975)*.

Para a utilização das correlações empíricas de *Hiraoka et al. (1995)* foi necessário se estabelecer as seguintes etapas para o cálculo da Potência do impelidor:

- Especificação das propriedades físicas do fluido, velocidade rotacional e diâmetro do impelidor;
- Determinação do Número de Reynolds;
- Especificação das relações geométricas;
- Determinação de parâmetros adimensionais: γ , η , β , f_{∞} , C_{tr} , m, C_t , C_L , $f \in Re_G$;
- Determinação do Número de Potência.

Hiraoka et al. (1995) utilizaram correlações empíricas para um impelidor de pás retas em tanques cilíndricos com fundo chato e sem chicanas. Para o cálculo do Número de Potência foi necessário se calcular vários parâmetros adimensionais como os apresentados nas equações do capítulo anterior. Estes parâmetros adimensionais são funções das relações geométricas: D/T, w/T e H/T.

A tabela 5.2 apresenta as condições operacionais implementadas por *Hiraoka et al.* (1995) para o cálculo do Número de Potência e a Potência consumida para o impelidor de Pás Retas em tanques sem chicanas.

Tabela 5.2 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Sem Chicanas, *Hiraoka et al (1995)*.

Impelidor Pás Retas para Tanques Sem Chicanas						
	Condições Operacionais					
Densidade (1	Kg/m ³)	······································	1000,0			
Viscosidade	(Kg/m s)		0,001			
Velocidade 1	rotacional (r.p.m.)		60-240			
Geometria tanque-impelidor Relações geométricas padrão						
T (m)	1,0	D/T	0,3-0,7			
D (m)	D (m) 0,333 w/D					
H (m)	0,5-1,0					
w (m)	0,2	np	2			

Para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas, foram implementadas as correlações de Nagata (1975), Nishikawa et al. (1979) e Sano e Usui (1985).

Nagata (1975) apresenta dois tipos de correlações empíricas para o cálculo do Número de Potência. O primeiro refere-se ao cálculo do Número de Potência máxima e a obtenção da Potência máxima requerida no impelidor. O segundo refere-se ao cálculo do Número de Potência quando é necessário se especificar a largura e o número de chicanas. Para estes dois tipos de correlações é necessário se estabelecer as seguintes etapas no cálculo da Potência do impelidor:

- Determinação do Número de Reynolds crítico;
- Especificação das relações geométricas;
- Determinação dos parâmetros adimensionais: A, B e p;

- Determinação do Número de Potência máxima, Número de Potência para Reynolds infinito e Número de Potência específico.
- Especificação da velocidade rotacional, densidade do fluido e diâmetro do impelidor.

Para a determinação do Número de Potência máxima é necessário o cálculo do Número de Reynolds crítico que é função das relações geométricas do impelidor. Quando o número e largura das chicanas são especificados são necessárias as informações do Número de Potência máxima e Número de Potência para Reynolds infinito para a determinação do Número de Potência. O Número de Potência infinito é obtido quando o Número de Reynolds tende para infinito e é função dos parâmetros geométricos B e p.

A tabela 5.3 apresenta as condições operacionais que foram utilizados para a obtenção do cálculo da Potência máxima e especifica para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas utilizando as correlações de *Nagata (1975)*.

Impelidor Pás Retas para Tanques Com Chicanas					
	Condições C	peracionais			
Densidade	(Kg/m^3)		1000,0		
Viscosidade	e (Kg/m s)		0,001		
Velocidade	60-240				
Geometri	a tanque-impelidor	Relações	geométricas padrão		
		D/T	0,3-0,7		
T (m)	1,0	w/D	0,05-0,25		
D (m)	D (m) 0,333 H/T				
H (m)	1,0	B _w /T	0,05-0,2		
w (m)	0,2	nb	2-6		
$B_w(m)$	2				

Tabela 5.3 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Com Chicanas, *Nagata (1975)*.

Nishikawa et al. (1979) forneceram uma pequena modificação na correlação do Nagata (1975) em tanques com chicanas para verificar o efeito da largura das chicanas e número de chicanas sobre o consumo de Potência. Para este tipo de correlação foi necessário se estabelecer as seguintes etapas no cálculo da Potência do impelidor:

- Determinação do Número de Reynolds crítico;
- Especificação das relações geométricas;
- Determinação dos parâmetros adimensionais: A, B e p;
- Determinação do Número de Potência máxima;
- Especificação da velocidade rotacional e o diâmetro do impelidor.

A tabela 5.4 apresenta as condições operacionais para calcular a Potência específica do impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas, utilizando as correlações de Nishikawa et al. (1979).

Tabela 5.4 – Condições Operacionais do Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Com Chicanas, *Nishikawa et al. (1979)*.

Impelidor Pás Retas para Tanques Com Chicanas				
	Condições	Operacionais		
Densidade (K	g/m ³)		1000,0	
Viscosidade (Kg/m s)		0,001	
Velocidade ro		60-240		
Geometria ta	nque-impelidor	Relações geomé	tricas padrão	
		D/T	0,3-0,7	
T (m)	1,0	w/D	0,05-0,25	
D (m)	D (m) 0,333 H/T			
H (m) 1,0 B _w /T 0,05-0				
w (m)	0,2	nb	2-6	
$B_w(m)$	0,1	np	2	

UNICAMP BIBLIOTECA CENTRAL Sano e Usui (1985) complementaram os estudos das correlações empíricas para o impelidor Pás Retas em tanques com chicanas, onde o cálculo do Número de Potência é função apenas das relações geométricas. Foi necessário se estabelecer as seguintes etapas no cálculo da Potência máxima do impelidor para as correlações de Sano e Usui (1985).

- Especificação das relações geométricas;
- Determinação do Número de Potência máxima.
- Especificação da velocidade rotacional, densidade do fluido e diâmetro do impelidor.

A tabela 5.5 apresenta as condições operacionais que foram utilizadas para a obtenção do cálculo da Potência máxima para o impelidor tipo pás retas em tanques com chicanas utilizando as correlações de *Sano e Usui (1985)*.

Tabela 5.5 – Condições operacionais para o Impelidor tipo Pás Retas aplicado à Tanques Com Chicanas, Sano e Usui (1985).

Impelidor Pás Retas para Tanques Com Chicanas						
	Condições Operacionais					
Densidade (I	Kg/m ³)		1000			
Viscosidade	(Kg/m s)		0,001			
Velocidade r	Velocidade rotacional (r.p.m.)					
	//////////////////////////////////////					
Geometria t	anque-impelidor	Relações ge	ométricas padrão			
		D/T	0,3-0,7			
T (m)	1,0	w/D	0,05-0,25			
D (m)	D (m) 0,333 H/T					
H (m)	$H(m)$ 1,0 B_w/T					
w (m)	w (m) 0,2 nb					
$B_w(m)$	0,1	np	2			

5.3 Condições Operacionais para o Cálculo da Potência do Impelidor tipo Pás Inclinadas

Para avaliação do cálculo do Número de Potência para os impelidores tipo Pás Inclinadas aplicado para tanques sem chicanas foram implementadas as correlações de *Nagata (1975)*, apresentadas no capítulo anterior. Para utilização destas correlações foi necessário se estabelecer as seguintes etapas para o cálculo da Potência do impelidor:

- Especificação das propriedades físicas do fluido, velocidade rotacional e diâmetro do impelidor;
- Determinação do Número de Reynolds;
- Especificação das relações geométricas;
- Determinação dos parâmetros adimensionais: A, B e p;
- Especificação do ângulo da pá;
- Determinação do Número de Potência.

As propriedades físicas do fluido (densidade e viscosidade), velocidade rotacional e diâmetro do impelidor precisam ser especificadas para a determinação do Número de Reynolds. *Nagata (1975)* analisou as correlações para um impelidor de 2 pás e algumas relações geométricas para determinação do Número de Potência. A tabela 5.6 apresenta as condições operacionais que foram utilizadas para a obtenção do cálculo da Potência para o impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques sem chicanas, utilizando as correlações de *Nagata (1975)*.

Tabela 5.6 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Inclinadas aplicado à Tanques Sem Chicanas, *Nagata (1975)*.

Impelidor Pás Inclinadas para Tanques Sem Chicanas					
	Condições	Operacionais			
Densidade (Kg	$/m^3$)		1000,0		
Viscosidade (K	g/m s)		0,001		
Velocidade rota	60-240				
Geometria tanque-impelidor Relações geométricas padrão					
T (m)	1,0	D/T	0,3-0,7		
D (m)	D (m) 0,333 w/D				
H (m)	H (m) 1,0 H/T				
w (m)	2				
ângulo da pá	10-60°				

Para o impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques com chicanas também foram implementadas as correlações de *Nagata (1975)*. Para a utilização destas correlações é necessário se estabelecer as seguintes etapas para o cálculo da Potência do impelidor:

- Especificação das relações geométricas;
- Determinação do Número de Reynolds crítico da pá reta;
- Determinação do Número de Reynolds crítico da pá inclinada;
- Especificação do ângulo da pá;
- Determinação dos parâmetros adimensionais: A, B, e p;
- Determinação do Número de Potência.
- Especificação da velocidade rotacional e diâmetro do impelidor.

O cálculo do Número de Reynolds crítico para o impelidor de pás inclinadas é função do ângulo das pás e do Número de Reynolds crítico referente ao impelidor tipo Pás Retas, conforme apresentado na equação (4.19) do capítulo anterior.

A tabela 5.7 apresenta as condições operacionais que foram utilizadas para a obtenção do cálculo da Potência máxima para o impelidor de Pás Inclinadas em tanques com chicanas utilizando as correlações de *Nagata (1975)*.

Tabela 5.7 – Condições operacionais do Impelidor tipo Pás Inclinadas aplicado à Tanques Com Chicanas, *Nagata (1975)*.

Impelidor Pás Inclinadas para Tanques Com Chicanas					
	Condições	Operacionais			
Densidade (Kg	(m^3)		1000,0		
Viscosidade (K	g/m s)		0,001		
Velocidade rotacional (r.p.m.)			60-240		
		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	L		
Geometria tan	Geometria tanque-impelidor Relações geométricas padrão				
T (m)	1,0	D/T	0,3-0,7		
D (m)	w/D	0,05-0,25			
H (m) 1,0 H/T			0,5-1,0		
w (m) 0,2 np 2					
ângulo da pá	10-60°				

5.4 Condições Operacionais para o Cálculo da Potência do Impelidor tipo Turbina Rushton

Para o impelidor tipo Turbina Rushton de 6 Pás Retas em tanques sem chicanas, foram utilizadas as correlações de *Nagata (1975)*. Para tanques com chicanas, foram utilizadas as correlações de *O'Connell et al. (1950) e Sano e Usui (1985)*.

É necessário se estabelecer as seguintes etapas para o cálculo de Potência para tanques sem chicanas utilizando as correlações empíricas de *Nagata (1975)* para impelidores tipo Turbina Rushton de pás retas:

- Especificação das propriedades físicas do fluido, velocidade rotacional e diâmetro do impelidor;
- Determinação do Número de Reynolds;
- Determinação do Número de Potência.

A tabela 5.8 apresenta as condições operacionais que foram utilizadas para a obtenção do cálculo da Potência máxima para o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques sem chicanas utilizando as correlações de *Nagata (1975)*.

Tabela 5.8 – Condições operacionais do Impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas aplicado à tanques sem chicanas, *Nagata (1975)*.

Impelidor Turbina Rushton de Pás Retas para Tanques Sem Chicanas					
	Condições	Operacionais			
Densidade (Kg/m³)1000,0Viscosidade (Kg/m s)0,001Velocidade rotacional (r.p.m.)60-240					
Geometria tanque-impelidor Relações geométricas padrão					
T (m) D (m)	0,3-0,7				

O'Connell et al, (1950), especificou as correlações empíricas do impelidor Turbina Rushton de 6 pás em tanques com chicanas para as regiões laminar e turbulenta. Para a obtenção do cálculo da Potência máxima deste tipo de impelidor precisa se especificar as seguintes etapas:

- Especificação das propriedades físicas do fluido;
- Determinação do Número de Reynolds;
- Especificação da relação geométrica: w/D;
- Especificação dos parâmetros: k e b;
- Determinação do Número de Potência máxima.

A tabela 5.9 apresenta as condições operacionais que foram utilizadas para a obtenção do cálculo da Potência máxima para o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas utilizando as correlações de *O'Connell et al. (1950)*.

Tabela 5.9 – Condições operacionais do Impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas aplicado à tanques com chicanas, O'Connell et al. (1950).

Impelidor Turbina Rushton de Pás Retas para Tanques Com Chicanas					
Condições Operacionais					
Densidade (Kg/	⁽ m ³)		1000,0		
Viscosidade (K	g/m s)		0,001		
Velocidade rota		60-240			
Geometria tan	que-impelidor	Relações geomé	tricas padrão		
		D/T	0,3-0,7		
T (m) 1,0		w/D	0,05-0,25		
D (m)	1,0				
H (m)	0,1				
w (m)	0,2	nb	4		
$B_w(m)$	2-6				

Sano e Usui (1985) complementaram os estudos das correlações empíricas para o impelidor Turbina Rushton de 6 pás retas em tanques com chicanas, fazendo com que o cálculo do Número de Potência máxima seja apenas função das relações geométricas. Para as correlações de Sano e Usui (1985) precisa se estabelecer as seguintes etapas para o cálculo da Potência do impelidor:

- Especificação das relações geométricas;
- Determinação do Número de Potência máxima;
- Especificação da velocidade rotacional, densidade do fluido e diâmetro do impelidor.

A tabela 5.10 apresenta as condições operacionais que foram utilizados para a obtenção do cálculo da Potência máxima para o impelidor tipo Turbina Rushton de 6 pás retas em tanques com chicanas utilizando as correlações de *Sano e Usui (1985)*.

Tabela 5.10 – Condições Operacionais do Impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas aplicado à Tanques Com Chicanas, *Sano e Usui (1985)*.

Impelidor Turbina Rushton de Pás Retas para Tanques Com Chicanas					
	Condições	Operacionais			
Densidade (Kg	/m ³)		1000		
Viscosidade (K	(g/m s)		0,001		
Velocidade rot	60-240				
Geometria tan	que-impelidor	Relações geomé	tricas padrão		
		D/T	0,3-0,7		
T (m)	1,0	w/D	0,05-0,25		
D (m)	D (m) 0,333 H/T				
H (m)	0,1				
w (m)	0,2	nb	4		
$B_w(m)$	0,1	np	2-8		

5.5 Condições Operacionais para o Cálculo da Potência do Impelidor tipo Âncora

As correlações empíricas do impelidor tipo Âncora foram implementadas para dois modelos diferentes de tanques: fundo abaulado e fundo chato. Para o impelidor tipo Âncora para tanques de fundo abaulado foram implementadas as correlações de *Edwards et al.* (1989), e para o impelidor tipo Âncora para tanques de fundo chato, foram utilizadas as correlações de *Takahashi et al.* (1980).

Para a utilização das correlações empíricas de *Edwards et al. (1989)* precisa se estabelecer as seguintes etapas para o cálculo da Potência do impelidor:

- Especificação das propriedades físicas do fluido, velocidade rotacional e diâmetro do impelidor;
- Determinação do Número de Reynolds;
- Especificação das relações geométricas;
- Determinação do Número de Potência.

A tabela 5.11 apresenta as principais condições operacionais que foram utilizadas para a obtenção do cálculo da Potência para o impelidor tipo Âncora para tanques de fundo abaulado utilizando as correlações de *Edwards et al. (1989)*.

Tabela 5	.11 - Con	dições op	peracionais	do Impeli	dor tipo	Ancora
aplicado	à tanques	de fundo	abaulado,	Edwards	et al (19	89).

Impelidor tipo Âncora para Tanques de fundo curvado					
	Condições C	peracionais			
Densidade (Kg/n	n ³)		1350,0		
Viscosidade (Kg	/m s)		0,01 e 45,0		
Velocidade rotac	cional (r.p.m.)		20-180		
		·			
Geometria tano	Geometria tanque-impelidor Relações geométricas padrão				
T (m)	1,0	h/T	0,5-1,5		
D (m)	0,8	D/T	0,7-0,92		
h (m)	h (m) 1,0 w/D				
C (m)	0,04-0,15				
w(m)	0,1	np	2		

As correlações empíricas de *Edwards et al. (1989)* foram implementadas para os regimes laminar e turbulento. Nos dois regimes a densidade do fluido permaneceu constante, enquanto que a viscosidade e a velocidade rotacional variaram. Para o regime laminar a viscosidade foi de 45 Kg/m.s e a velocidade rotacional foi de 120 r.p.m. e para o regime turbulento, a viscosidade foi de 0,01 Kg/m.s e a velocidade rotacional foi de 180 r.p.m..

Outra observação importante está na definição da variável geométrica C. Para impelidores tipo Âncora este parâmetro é definido como a distância entre a parede do tanque e o impelidor, e está relacionado com o diâmetro do tanque e o diâmetro do impelidor.

A implementação das correlações empíricas de *Takahashi et al. (1980)* para tanques de fundo chato, foi necessário se estabelecer as seguintes etapas para o cálculo da Potência do impelidor:

- Especificação das propriedades físicas do fluido, velocidade rotacional e diâmetro do impelidor;
- Determinação do Número de Reynolds;
- Especificação das relações geométricas;
- Determinação do Número de Potência.

A tabela 5.12 apresenta as condições operacionais que foram utilizadas para a obtenção do cálculo da Potência para o impelidor tipo Âncora para tanques de fundo chato utilizando as correlações de *Takahashi et al .(1980)*.

Tabela 5	.12 Condiç	ções oper	acionai	s do l	Impelic	lor tipo	Âncora
aplicado	à tanques	de fundo	chato, 1	Taka	hashi e	t al. (19	780)

Impelidor tipo Âncora para Tanques de fundo chato								
	Condições (Operacionais						
Densidade (1350,0							
Viscosidade	45,0							
Velocidade	20-150							
Geometri	a tanque-impelidor	Relações geométricas padrão						
T (m)	1,0	h/T	0,5-1,5					
D (m)	0,8	D/T	0,7-0,92					
h (m)	1,0	w/D	0,062-0,20					
C (m)	0,1	C/T	0,04-0,15					
w(m)	0,1	np	2					

As correlações empíricas de *Takahashi et al., (1980)* foram implementadas para o regime laminar. A densidade do fluido utilizada foi de 1350 Kg/m³, a viscosidade 45 Kg/m.s e a velocidade rotacional de 120 r.p.m.

Para uma avaliação mais precisa do projeto de impelidores foram implementadas outras variáveis de projeto e também grupos adimensionais, tais como: Torque, Tempo de Mistura, Número de Fluxo, Número de Mistura e Número de Froude. O Número de Potência e o Consumo de Potência foram comparados com o software comercial VISIMIX para uma análise geral dos resultados. O cálculo do Número de Froude só foi implementado nas correlações em tanques sem chicanas, que está relacionado com a formação de vórtices.

No próximo capítulo serão apresentadas os resultados utilizando-se as metodologias discutidas neste capítulo.

CAPÍTULO 6

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os principais resultados que foram gerados através da utilização das correlações empíricas em uma ferramenta computacional desenvolvida para o cálculo das variáveis adimensionais (Número de Potência, Número de Froude, Número de Fluxo e Número de Mistura) e o Cálculo da Potência estimada em sistemas de mistura. Foram analisadas as curvas de Potência (Número de Potência versas Número de Reynolds) para os impelidores tipo Pás Retas, Pás Inclinadas, Turbina Rushton e Âncora.

Em seguida foram estudados a influência das relações geométricas: D/T, w/D, H/T e B_w/T , h/T; C/T; a influência do número de pás do impelidor e do número de chicanas, a influência do ângulo da Pá do impelidor e velocidade rotacional sobre o Número de Potência, o Número de Froude, o Número de Fluxo, o Número de Mistura e a Potência dissipada no impelidor.

No final são comparados os resultados do Número de Potência e a Potência dissipada através da utilização da ferramenta computacional gerada neste trabalho com o software comercial VISIMIX, considerado o software mais completo para o cálculo da Potência requerida pelo conjunto tanque-impelidor.

6.1 Análises das Curvas de Potência

6.1.1 Análises das curvas de Potência para o Impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas

Para os impelidores tipo Pás Retas e Pás Inclinadas são apresentadas curvas do Número de Potência em função do Número de Reynolds para tanques sem e com chicanas, através das correlações empíricas apresentadas por *Nagata*, (1975) e *Hiraoka et al.*, (1995).



Figura 6.1 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo Pás Retas aplicado a tanques sem Chicanas com as seguintes relações geométricas: T = 1m; D/T = 0,333; w = 1/5D; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m.

A Figura 6.1 mostra os perfis do Número de Potência em função do Número de Reynolds para o impelidor tipo Pás Retas aplicado a tanques sem chicanas através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) e *Hiraoka et al.*, (1995). Estes resultados mostram que o Número de Potência diminui com o aumento do Número de Reynolds. Foi observado que os perfis de Número de Potência para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas calculado pelas correlações de *Nagata*, (1975) e *Hiraoka et al.*, (1995) foram muito semelhantes. Na região onde N_{Re} < 20 os resultados foram praticamente os mesmos. Os desvios aumentaram à medida que o fluxo se tornou transicional.



Figura 6.2 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo Pás Retas aplicado a tanques sem e com chicanas: T = 1m; D/T = 0,333; w = 1/5D; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata*, 1975].

A Figura 6.2 mostra os resultados do Número de Potência em função do Número de Reynolds para o impelidor tipo Pás Retas aplicado à tanques sem e com chicanas através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975). Estes resultados mostram que o Número de Potência diminui com o aumento do Número de Reynolds até atingir um valor constante para altos Números de Reynolds. Fica evidente na comparação que a presença de chicanas tem uma influência considerável no Número de Potência para altos Números de Reynolds em relação a tanques sem chicanas. Verifica-se também que para tanques com chicanas o Número de Potência permanece constante no regime turbulento, enquanto que em tanques sem chicanas o Número de Potência diminui à medida que o escoamento se

torna mais turbulento. Isto é devido à influência do Número de Froude, causando a formação de vórtices no fluido para tanques sem chicanas.



Figura 6.3 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo Pás Inclinadas (45 °) aplicado a tanques sem e com chicanas: T = 1m; D/T = 0,333; w = 1/5D; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata, 1975*].

A Figura 6.3 mostra os resultados do Número de Potência em função do Número de Reynolds para o impelidor tipo Pás Inclinadas aplicado a tanques sem e com chicanas através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975). Estes resultados mostram que o Número de Potência diminui com o aumento do Número de Reynolds até atingir um valor constante para altos Números de Reynolds.

Os resultados das figuras 6.2 e 6.3 mostram que para $N_{Re} < 100$ (regime laminar) o Número de Potência praticamente coincide em todos os casos.



Figura 6.4 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo Pás Retas e Inclinadas (45 °) aplicado a tanques sem e com chicanas: T = 1m; D/T = 0,333; w = 1/5D; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata, 1975*].

A Figura 6.4 mostra os resultados do Número de Potência em função do Número de Reynolds para o impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) aplicado a tanques sem e com chicanas através da utilização das correlações empíricas de *Nagata, (1975)*. Estes resultados mostram que o Número de Potência para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) tem um valor menor do que os impelidores tipo Pás Retas (posição vertical). Isto ocorre devido ao menor esforço gasto para empurrar o líquido.

6.1.2 Análises das curvas de Potência para o Impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas

São apresentadas as curvas de Número de Potência em função do Número de Reynolds para o impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas para tanques sem e com chicanas através das correlações empíricas apresentadas por *Nagata*, (1975) e O'Connell et al., (1950).



Figura 6.5 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas aplicado a tanques sem chicanas: T = 1m; D/T = 0,333; w = 1/5D; H = T; np = 6 e N = 180 r.p.m. [*Nagata, 1975*].

A Figura 6.5 mostra o perfil do Número de Potência versus o Número de Reynolds para o impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas em tanques sem chicanas utilizando a correlação de *Nagata*, (1975). Os resultados mostram que o Número de Potência aumenta consideravelmente no regime laminar (Np = 100000) quando comparado com o impelidor tipo Pás Retas (Np = 30) da Figura 6.1. Para altos Números de Reynolds o Número de Potência foi praticamente constante.



Figura 6.6 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas aplicado a tanques com chicanas: T = 1m; D/T = 0,333; w = 1/5D; H = T; e N = 180 r.p.m.. [O'Connell et al. 1950].

A Figura 6.6 mostra a influência do número de pás do impelidor tipo Turbina Rushton sobre o Número de Potência utilizando a relação de O'Connell et al., (1950). Observa-se que, com o aumento do número de pás, o Número de Potência aumenta. No regime turbulento o Número de Potência foi praticamente constante. A correlação de O'Connell et al., (1950) produz uma pequena inflexão no regime laminar, próximo de N_{Re} ≈ 20 .



Figura 6.7 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas aplicado a tanques sem e com chicanas: T = 1m; D/T = 0,333; w = 1/5D; H = T; np = 6 e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.7 mostra os resultados do Número de Potência versus o Número de Reynolds para o impelidor tipo Turbina Rushton aplicado a tanques sem e com chicanas utilizando correlações de *Nagata, (1975)* e *O'Connell et al., (1950)*. Entre o regime laminar e o de transição ($1 < N_{Re} < 200$) o Número de Potência é maior para tanques sem chicanas, enquanto que na região turbulenta ($N_{Re} > 200$) o Número de Potência é maior para tanque com chicanas. Pode-se observar através da correlação de O'Connell et al. que na Figura 6.7 o Número de Potência é praticamente constante na região turbulenta, enquanto que para tanques sem chicanas o Número de Potência só adquire um valor constante para altos Números ($N_{Re} > 100000$).

6.1.3 Análises das curvas de Potência para o Impelidor tipo Âncora

São apresentadas as curvas de Número de Potência em função do Número de Reynolds Para o impelidor tipo Âncora para tanques sem chicanas através das correlações empíricas apresentadas por *Edwards et al., (1989)* (aplicado para pás abauladas) e *Takahashi et al., (1980)* (aplicado para pás chatas).



Figura 6.8 – Número de Potência em função do Número de Reynolds para o Impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato [*Takahashi et al., 1980*] e em tanques de fundo abaulado [*Edwards et al., 1989*] para T = 1m; D/T = 0,8; C/T = 0,1; w = 1/5D; H = T; np = 2 e N = 120 r.p.m. (regime laminar) e N = 180 r.p.m. (regime turbulento).

A Figura 6.8 mostra resultados do Número de Potência em função do Número de Reynolds para o impelidor tipo Âncora. Verifica-se que na região laminar o Número de Potência aumenta à medida que o fluido se torna mais viscoso. Para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo abaulado o Número de Potência é constante para $N_{Re} > 200$, enquanto que o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato atinge um valor constante para Altos Número de Reynolds ($N_{Re} > 7000$).

6.1.4 Comparação das curvas de Potência



Figura 6.9 – Perfis do Número de Potência em função do Número de Reynolds para os tipos de impelidores: Pás Retas com chicanas, Pás Inclinadas com chicanas, Turbina Rushton de 6 pás retas com chicanas e o Âncora em tanques de fundo chato.

A figura 6.9 mostra os perfis do Número de Potência em função do Número de Reynolds para os impelidores estudados neste trabalho. Para os impelidores tipo Pás Retas, Pás Inclinadas e Turbina Ruhston as relações geométricas são mantidas as mesmas: T = 1m; D/T = 0,333; w = 1/5D; H = T; e velocidade rotacional de 180 r.p.m.. Para o impelidor tipo Âncora as relações geométricas foram as seguintes: T = 1m; D/T = 0,8; C/T = 0,1; w = 0,1D; h = T; e com velocidade rotacional de 120 r.p.m. no regime laminar e 180 r.p.m. no regime turbulento.

Os impelidores tipo Pás Retas e Pás Inclinadas praticamente não tiveram variação no Número de Potência no regime laminar. Observa-se também que nesta região os Números de Potência são maiores para o impelidor tipo Âncora.

No regime Turbulento o Número de Potência para os impelidores tipo Pás Retas, Pás Inclinadas e Turbina Rushton foi constante, enquanto que o impelidor tipo Âncora só conseguiu atingir valores constantes de Número de Potência em altos Números de Reynolds ($N_{Re} > 7000$). Nesta região o Número de Potência para o impelidor tipo Turbina Rushton é maior quando comparado com os outros tipos de impelidores estudados neste trabalho.

6.2 Estudos da Influência das Relações Geométricas

Neste trabalho foram estudados a influência das relações geométricas: D/T, w/D, H/T e B_w/T , h/T; C/T; a influência do número de pás do impelidor; do ângulo da pá do impelidor e do número de chicanas, e velocidade rotacional sobre o Número de Potência, o Número de Froude, o Número de fluxo, o Número de Mistura e a Potência dissipada no impelidor através da utilização das correlações empíricas implementadas na ferramenta computacional desenvolvida.

6.2.1 Efeito da taxa D/T sobre o Número de Potência, o Número de Froude, o Número de Fluxo, o Número de Mistura e a Potência do Impelidor

O diâmetro do impelidor foi estudado como sendo um dos principais fatores que afeta o cálculo do Número de Potência e respectivo consumo de Potência para os tipos de impelidores estudados neste trabalho.



Figura 6.10 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas e tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata*, 1975].

A figura 6.10 mostra o comportamento do Número de Potência com o aumento no diâmetro do impelidor no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$. À medida que o diâmetro do impelidor aumenta o Número de Potência diminui, ou seja, quando o diâmetro do impelidor se aproxima do diâmetro do tanque o Número de Potência é menor devido a

pouca presença de fluido entre a parede do tanque e a pá do impelidor, exigindo um esforço menor no sistema para empurrar o líquido.



Figura 6.11 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.11 mostra resultados dos perfis do Número de Potência com o aumento no diâmetro do impelidor no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) e *Hiraoka et al.*, (1995). À medida que o diâmetro do impelidor aumenta o Número de Potência diminui como já comentado na análise da Figura 6.10.

Comparando os resultados observa-se na Figura 6.11 que o Número de Potência foi maior entre 0.3 < D/T < 0.4 utilizando as correlações de *Hiraoka et al., (1950)* enquanto

que entre 0,4 < D/T < 0,7 o Número de Potência foi maior utilizando a correlação de *Nagata, (1975)*. Os resultados do Número de Potência foram semelhantes nas proximidades da relação D/T = 0,42.



Figura 6.12 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; $B_w = 0,1T$; nb =4; np = 2 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.12 mostra resultados dos perfis do Número de Potência com o aumento no diâmetro do impelidor tipo Pás Retas aplicado a tanques sem e com chicanas, em regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) e Hiraoka et al., (1995). Sano e Usui, (1985) e Nishikawa et al., (1979).

Observa-se na Figura 6.12 que o Número de Potência aumenta em até 4 vezes o seu valor sobre o efeito do diâmetro do impelidor na utilização de chicanas comparado com

as correlações para tanques sem chicanas. Na utilização da correlação de *Sano e Usui*, (1985) o Número de Potência permaneceu constante com o aumento do diâmetro do impelidor tipo Pás Retas, enquanto que as correlações de *Nagata*, (1975) e *Nishikawa et al.*, (1979) para tanques com chicanas o Número de Potência aumentou até D/T < 0,45 e diminuiu depois desta taxa, isto é devido à influência do Número de Reynolds crítico sobre o mesmo. Para D/T > 0,45 a presença de chicanas mostram uma maior influência fazendo com que o Número de Potência diminua à medida que o diâmetro do impelidor se aproximava das chicanas. Verifica-se também que os resultados do Número de Potência com a aplicação das correlações de *Nishikawa et al.*, (1979) com especificação do número e largura das chicanas (nb = 4 e $B_w = 0,1T$) foram semelhantes quando comparado com as correlações de *Nagata*, (1975), para o cálculo do Número de Potência máxima.



Figura 6.13 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques sem e com chicanas: w/D = 0,2; H = T; $B_w = 0,1T$; nb =4; np = 6 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.13 mostra os perfis do Número de Potência com o aumento no diâmetro do impelidor tipo Turbina Rushton aplicado a tanques sem e com chicanas, no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) e O'Connell et al., (1950) e Sano e Usui, (1985).

Observa-se na Figura 6.13 que o Número de Potência permaneceu constante sobre o aumento do diâmetro do impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas aplicado a tanques sem chicanas através da utilização da correlação de *Nagata*, (1975). Na utilização das correlações aplicadas a tanques com chicanas observou-se o seguinte: para a correlação de *O'Connell et al.*, (1950) o Número de Potência permaneceu constante para o aumento do diâmetro do impelidor, enquanto que na correlação de *Sano e Usui*, (1985) o Número de Potência diminuiu com o aumento do diâmetro do impelidor.



Figura 6.14 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor com o efeito do número de pás do impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas em tanques com chicanas: w/D = 0,2; H = T; $B_w = 0,1T$; nb =4 e N = 180 r.p.m. [O'Connell et al., 1950].
A figura 6.14 mostra resultados do Número de Potência em relação a variação D/T (diâmetro do impelidor/ diâmetro do tanque) utilizando a correlação de *O'Connell et al., (1950)*, em regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$. Nota-se que o Número de Potência aumentou com o aumento do número de pás. Entretanto, nota-se que a relação D/T não tiveram influência no número de pás utilizando esta relação.



Figura 6.15 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor com o efeito do número de pás do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas: w/D = 0,2; H = T; $B_w = 0,1T$; nb =4 e N = 180 r.p.m. [*Sano e Usui, 1985*].

A figura 6.15 mostra resultados do Número de Potência em relação a variação D/T (diâmetro do impelidor/ diâmetro do tanque) utilizando a correlação de *Sano e Usui.*, (1985), em regime turbulento ($2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5$). Nota-se que

o Número de Potência aumentou com o aumento do número de pás e com a diminuição da relação D/T.

Figura 6.16 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Âncora no regime laminar (N= 120 r.pm.) e no regime turbulento (180 r.p.m.) com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,1; h = T e np = 2, [*Edwards et al, 1989*].

A Figura 6.16 mostra a dependência do Número de Potência da relação diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque (D/T) para o impelidor tipo Âncora com fundo abaulado no regime laminar (29,4 \leq N_{Re} \leq 50,8) e no regime turbulento (1,98x10⁵ \leq N_{Re} \leq 3,43x10⁵), através da correlação de *Edwards et al.*, (1989).

O Número de Potência é maior no regime laminar quando comparado com os valores no regime turbulento. A relação D/T tem um efeito muito pequeno no Número de Potência no regime turbulento, embora o comportamento é o mesmo que nos casos anteriores (Pás Retas e Inclinadas sem chicanas e no tipo Turbina Rushton). O Número de Potência diminui com o aumento do diâmetro do impelidor no regime laminar.

A relação diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque tem um efeito mais pronunciado sobre o Número de Potência no regime laminar.



Figura 6.17 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas: w/D = 0,1; h = T; e N = 120 r.p.m.(regime laminar).

A Figura 6.17 mostra o efeito da taxa D/T sobre o Número de Potência para o impelidor tipo Âncora de fundo abaulado através da correlação de *Edwards et al., (1989)* e o tipo Âncora de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al., (1980)* em regime laminar (29,4 \leq N_{Re} \leq 50,8). Observa-se que os valores do Número de Potência são maiores para o impelidor tipo Âncora de fundo abaulado em relação ao impelidor tipo Âncora de fundo abaulado em relação ao impelidor tipo Âncora de fundo chato. Pode-se notar também que o Número de Potência diminui com aumento do diâmetro do impelidor até D/T < 0,85, mas aumenta para valores mais próximos do diâmetro do tanque.



Figura 6.18 – Número de Froude em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata, 1975*].

A Figura 6.18 mostra resultados do Número de Froude sobre o efeito do diâmetro do impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas em tanques sem chicanas para o regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$. Foi observado que, com o aumento do diâmetro do impelidor, o Número de Froude aumenta. Como o Número de Froude representa os efeitos da superficie livre no Número de Potência, resultando na formação do vórtice central, observa-se que, à medida que o diâmetro do impelidor aumenta, maior é a zona de formação do vórtice central.



Figura 6.19 – Número de Fluxo em função da taxa D/T do impelidor aplicado para tanques com chicanas com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; N = 180 r.p.m.; $B_w = 0,1T$; nb =4; np = 2 (impelidor tipo Pás Retas) e np = 6 (impelidor tipo Turbina Rushton), *Sano e Usui, (1985)*.

A Figura 6.19 conclui-se que a relação diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque quase não exerce influência sobre o Número de Fluxo muito embora o mesmo diminua discretamente com o aumento da relação D/T. O Número de Fluxo para o impelidor tipo Turbina Rushton é maior quando comparado com o impelidor tipo Pás Retas, em regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$. Isto ocorre principalmente porque o impelidor Turbina Rushton contém 6 pás, enquanto que o impelidor tipo Pás Retas contém 2 pás.



Figura 6.20 – Número de Mistura em função da taxa D/T do impelidor aplicado para tanques com chicanas com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; N = 180 r.p.m.; $B_w = 0,1T$; nb =4; np = 2 (impelidor tipo Pás Retas) e np = 6 (impelidor tipo Turbina Rushton), *Sano e Usui, (1985).*

Os resultados também mostram que o Número de Mistura diminui discretamente com o aumento do diâmetro do impelidor. O impelidor de Pás retas tem um Número de Mistura sensivelmente maior do que o impelidor tipo Turbina Rushton, em regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$. Isto é, à medida que o número de pás aumenta no projeto de impelidores o Número de Mistura diminui e, consequentemente, o tempo de mistura é menor. Observa-se na Figura 6.20 que o Número de Mistura para os dois tipos de impelidores apresentados se aproximam à medida que a relação diâmetro do impelidor/ diâmetro do tanque aumenta.



Figura 6.21 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0.2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.21 mostra os perfis do consumo de Potência para os impelidores tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) para tanques sem chicanas em regime turbulento (2,70x10⁵ $\leq N_{Re} \leq 14,7x10^5$), através das correlações de *Nagata*, (1975). Foi observado que a Potência do impelidor aumenta com aumento da relação D/T. Para o impelidor tipo Pás Retas a Potência consumida é maior do que o impelidor tipo Pás Inclinadas, e à medida que a relação D/T aumenta, a diferença do consumo entre os impelidores também aumenta. Isto ocorre devido ao menor esforço necessário feito pelas Pás Inclinadas para empurrar o líquido.



Figura 6.22 – Potência máxima em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata, 1975*].

A Figura 6.22 mostra os perfis do consumo de Potência para os impelidores tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) para tanques com chicanas em regime turbulento (2,70x10⁵ $\leq N_{Re} \leq 14,7x10^5$), através das correlações de *Nagata, (1975)*. Foi observado que a Potência do impelidor tipo Pás Retas é maior do que o de Pás Inclinadas, como já discutido na Figura 6.21. A diferença é que a variação de consumo é mais acentuada utilizando tanques com chicanas na correlação de *Nagata (1975)*.



Figura 6.23 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata, 1975*].

A Figura 6.23 mostra os perfis do consumo de Potência para os impelidores tipo Pás Retas para tanques sem e com chicanas em regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le$ 14,7x10⁵), através das correlações de *Nagata*, (1975). Observa-se que a diferença entre o cálculo da Potência chega a aumentar em até 10 vezes com a utilização de chicanas.



Figura 6.24 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.24 mostra resultados dos perfis da Potência com o aumento no diâmetro do impelidor no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) e *Hiraoka et al.*, (1995). À medida que a relação D/T aumenta, a Potência consumida também aumenta.

Comparando os resultados observa-se que os cálculos da Potência para 0,3 < D/T < 0,45 para as duas correlações estudadas foram praticamente as mesmas. Nas mesmas condições operacionais.



Figura 6.25 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor de Pás Retas em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.25 mostra resultados dos perfis da Potência para o impelidor tipo Pás Retas com o aumento na relação D/T no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, através da utilização das correlações empíricas de *Nagata; (1975); Nishikawa et al., (1979)* e *Sano e Usui, (1985)*, para tanques com chicanas. Comparando-se os resultados verifica-se que a correlação do *Sano e Usui, 1985* foi a que mostrou um menor consumo de Potência comparado com as outras correlações estudadas para tanques com chicanas. Observa-se também na Figura 6.25 que o ajuste feito na equação de *Nagata, (1975)* por *Nishikawa et al., (1979)* para B_w = 0,1T; nb = 4 mostrou resultados praticamente semelhantes com a correlação de *Nagata (1975)* para o cálculo da Potência máxima do impelidor.



Figura 6.26 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Turbina Rushton de pás petas em tanques sem e com chicanas: w/D = 0,2; H = T; $B_w = 0,1T$; nb =4; np = 6 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.26 apresenta resultados do consumo de Potência em relação ao aumento da relação D/T do impelidor tipo Turbina Rushton aplicado a tanques sem e com chicanas, no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975), O'Connell et al., (1950) e Sano e Usui, (1985).

Como pode ser observado na Figura 6.26 o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas tem uma diferença mais acentuada no consumo de Potência comparando tanques com e sem chicanas em relação ao impelidor tipo Pás Retas.

As relações de O'Connell et al., (1950) e Sano e Usui, (1985) apresentam resultados muitos próximos para tanques com chicanas.



Figura 6.27 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas: w/D = 0,1; h = T; e N = 120 r.p.m. (regime laminar).

A Figura 6.27 apresenta resultados do efeito da relação D/T sobre a Potência consumida para o impelidor tipo Âncora para tanques de fundo abaulado através da correlação *de Edwards et al.*, (1989) e o tipo Âncora para tanques de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al.*, (1980), ambas no regime laminar (29,4 \leq N_{Re} \leq 50,8). Os resultados mostram a Potência consumida pelo impelidor tipo Âncora para tanques de fundo abaulado.

6.2.2 Efeito da taxa w/D sobre o Número de Potência, o Número de Fluxo, o Número de Mistura e a Potência do Impelidor

A taxa w/D é considerado por muitos autores como um dos comprimentos característicos que influencia no cálculo do Número de Potência e Potência do impelidor.



Figura 6.28 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata, 1975*].

A figura 6.28 mostra resultados do Número de Potência em função da relação largura da pá/ diâmetro do impelidor para o impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$). À medida que a relação w/D aumenta, o Número de Potência aumenta. Isto acontece devido a uma maior presença de líquido sobre a pá exigindo, consequentemente, um esforço maior da mesma para mover a massa do fluido.



Figura 6.29 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques com chicanas: D/T = 0,333; H = T; e N = 180 r.p.m. [*Nagata*, 1975].

A Figura 6.29 mostra resultados do Número de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Pás Inclinadas (10°, 30°, 45° e 60°) aplicado a tanques com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), pela correlação de *Nagata (1975)*.

Foi observado que o Número de Potência aumenta a medida que ângulo da pá aumenta com a horizontal até chegar a um valor máximo que é o valor correspondendo ao ângulo de 90° (Pás Retas).



Figura 6.30 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor de Pás Retas em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.30 mostra resultados do Número de Potência em função da relação w/D para o impelidor de Pás Retas em tanque sem chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33_{x}10^{5}$), através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) e Hiraoka et al., (1995). À medida que esta relação aumenta, o Número de Potência aumenta como já comentado na Figura 6.28.

Comparando os resultados mostrados na Figura 6.30 observa-se que o Número de Potência foi menor entre 0,15 < w/D < 0,5 utilizando as correlações de *Hiraoka et al.,* (1995) enquanto que entre 0,5 < w/D < 0,75 o Número de Potência foi menor utilizando a correlação de *Nagata, (1975).* Os resultados do Número de Potência foram semelhantes para w/D = 0,525.



Figura 6.31 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [*Nagata, 1975*].

Os perfis do Número de Potência na Figura 6.31 mostram que a diferença relativa entre o Número de Potência para tanques com chicanas comparado com tanques sem chicanas, ambos para o regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$) aumenta em até 11 vezes dependendo da relação w/D. Isto mostra o quanto a presença de chicanas em tanques de mistura influencia o Número de Potência para impelidores tipo Pás Retas, o que pode ser ainda mais acentuado dependendo da relação w/D.



Figura 6.32 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m.

A Figura 6.32 apresenta os perfis do Número de Potência para o impelidor tipo Pás Retas em função da relação w/D no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975), *Nishikawa et al.*, (1979) e *Sano e Usui*, (1985), para tanques com chicanas. Comparando os resultados verifica-se que a correlação do *Sano e Usui*, (1985) foi a que mostrou um menor Número de Potência comparado com as outras correlações estudadas para tanques com chicanas. Observa-se que o ajuste feito na equação de *Nagata*, (1975) por *Nishikawa et al.*, (1979) para B_w = 0,1T; nb = 4 mostraram resultados praticamente semelhantes comparado com a correlação de *Nagata*, (1975) no cálculo do Número de Potência máxima do impelidor.



Figura 6.33 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas: D/T = 0,333; H = T; $B_w = 0,1T$; nb =4; np = 6 e N = 180 r.p.m.

A figura 6.33 apresenta o Número de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Turbina Rushton aplicado a tanques com chicanas, no regime turbulento $(N_{Re} = 3,33 \times 10^5)$, através da utilização das correlações empíricas de *O'Connell et al., (1950)* e *Sano e Usui, (1985)*. Observa-se que o Número de Potência foi menor entre 0,15 < w/D < 0,5 utilizando a correlação de *O'Connell et al., (1950)*, enquanto que entre 0,5 < w/D < 0,75 o Número de Potência foi menor utilizando a correlação de *Sano e Usui, (1985)*. Os resultados do Número de Potência foram semelhantes para w/D = 0,525.



Figura 6.34 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas: D/T = 0,333; H = T; $B_w = 0,1T$; nb =4 e N = 180 r.p.m. [O'Connell, 1950].

A Figura 6.34 mostra o comportamento do Número de Potência versus a taxa w/D para 2, 4 e 6 pás retas para o impelidor tipo Turbina Rushton em regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através da correlação empírica de *O'Connell et al., (1950)*. Os resultados mostram que o Número de Potência aumenta com o aumento do número de pás e com o aumento da relação w/T.



Figura 6.35 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas: D/T = 0,333; H = T; $B_w = 0,1T$; nb =4 e N = 180 r.p.m. [*Sano e Usui, 1985*].

A Figura 6.35 mostra o comportamento do Número de Potência em função da relação w/D no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), utilizando-se a correlação de *Sano e Usui*, (1985). Nota-se que a variação do Número de Potência em função da relação w/D foi já menos acentuado (Np = 15,2 para np = 6 e w/D) comparado com os resultados da correlação de *O'Connel et al.*, (1950) que obteve um Np = 17,3 para estes mesmos dados.



Figura 6.36 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas: D/T = 0.8; h = T; e N = 120 r.p.m. (regime laminar).

A Figura 6.36 mostra o comportamento do Número de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo abaulado através da correlação de *Edwards et al., (1989)* e o tipo Âncora de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al., (1980)*, ambas em regime laminar (N_{Re} = 38,4). Observa-se que o Número de Potência foi menor na faixa entre 0,06 < w/D < 0,12 utilizando a correlação de *Edwards et al., (1989)* para o impelidor tipo Âncora de pá abaulada, enquanto que entre 0,125 < w/D < 0,250 o Número de Potência foi menor utilizando a correlação de *Takahashi et al., (1980)* Para o impelidor tipo Âncora de pás retas. Os resultados do Número de Potência foram semelhantes para w/D = 0,12.



Figura 6.37 – Número de Fluxo em função da taxa w/D para o impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton aplicado para tanques com chicanas com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; N = 180 r.p.m.; $B_w = 0,1T$; nb =4 [Sano e Usui, 1985].

A figura 6.37 mostra resultados do Número de Fluxo em função da relação w/D no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$). Os resultados mostram que a largura da pá em função do diâmetro do impelidor w/D tem grande influência no Número de Fluxo e que o mesmo aumenta com o aumento da taxa w/D.



Figura 6.38 – Número de Mistura em função da taxa w/D para o impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton aplicado para tanques com chicanas com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; N = 180 r.p.m.; $B_w = 0,1T$; nb =4, [Sano e Usui, 1985].

A figura 6.38 mostra resultados do Número de Mistura em função da relação w/D no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$). Os resultados mostram que o Número de Mistura diminui com o aumento da largura da pá do impelidor. Para o impelidor Pás Retas o Número de Mistura foi maior do que o impelidor tipo Turbina Rushton. Observa-se que o Número de Mistura para os dois tipos de impelidores apresentados se aproximam à medida que aumenta o diâmetro do impelidor.



Figura 6.39 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.39 mostra os resultados do consumo de Potência para os impelidores tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) para tanques sem chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Nagata, (1975)*. Foi observado que a Potência aumenta com aumento da largura da pá do impelidor. Para o impelidor tipo Pás Retas a Potência é maior do que o impelidor tipo Pás Inclinadas. Isto ocorre devido à influência do Número de Potência no cálculo da Potência do impelidor.



Figura 6.40 – Potência em função da taxa w/D do impelidor de Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.40 mostra o consumo de Potência para os impelidores tipo Pás Retas e Pás Inclinadas para tanques com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Nagata*, (1975). Observa-se na Figura 6.40 que o aumento da Potência é bem mais significativo para impelidores de Pás Retas em tanques com chicanas do que em tanques sem chicanas.



Figura 6.41 – Potência em função da taxa w/D do impelidor de Pás Retas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.41 mostra o consumo de Potência para o impelidor tipo Pás Retas para tanques sem e com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através da correlação de *Nagata, (1975)*. Observa-se que a Potência chega a aumentar em 12 vezes o seu valor na utilização de tanques com chicanas para o impelidor tipo Pás Retas dependendo da relação w/D. Isto acontece devido ao movimento mais intenso do fluido entre o impelidor e as chicanas proporcionando um aumento no Número de Potência e consequentemente na Potência do impelidor. A presença de chicanas cria uma forte componente de velocidade na direção radial, o que não acontece com tanques sem chicanas.



Figura 6.42 – Potência sem função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.42 apresenta valores do consumo de Potência com o aumento da relação w/D para o impelidor tipo Pás Retas em tanque sem chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) e *Hiraoka et al.*, (1995). Observa-se que o Consumo de Potência foi menor entre 0,15 < w/D < 0,5 utilizando as correlações de *Nagata*, (1995), enquanto que entre 0,5 < w/D < 0,75 o Consumo de Potência foi menor utilizando a correlação de *Hiraoka et al.*, (1975). Os resultados foram semelhantes para w/D = 0,525.



Figura 6.43 – Comparação do Consumo de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m.

A Figura 6.43 apresenta o consumo de Potência para o impelidor tipo Pás Retas em função da relação w/D para o regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975), *Nishikawa et al.*, (1979) e *Sano e Usui*, (1985), para tanques com chicanas. Os resultados mostram que a correlação do *Sano e Usui*, (1985) foi a que mostrou um menor consumo de Potência. Observa-se também que o ajuste feito na equação de *Nagata*, (1975) por *Nishikawa et al.*, (1979) para $B_w = 0,1T$; nb = 4 mostraram resultados praticamente semelhantes comparado com a correlação de *Nagata*, (1975).



Figura 6.44 – Potência em função da taxa w/D do impelidor Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; np = 2; B_w = 0,1T; nb = 4 e N = 180 r.p.m..

A figura 6.44 apresenta o consumo de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanque com chicanas no regime turbulento $(N_{Re} = 3,33 \times 10^5)$, através da utilização das correlações empíricas de *O'Connell et al.*, (1950) e Sano e Usui, (1985). Os resultados mostram que o Consumo de Potência foi menor entre 0,15 < w/D < 0,5 utilizando a correlação de *O'Connell et al.*, (1950), enquanto que entre 0,5 < w/D < 0,75 o Consumo de Potência foi menor utilizando a correlação de Sano e Usui, (1985). O consumo de Potência foi semelhante para w/D = 0,525 na utilização das correlações empíricas de *Connell et al.*, (1950) e Sano e Usui, (1985).



Figura 6.45 – Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas: D/T = 0.8; h = T; e N = 120 r.p.m. (regime laminar).

A Figura 6.45 mostra resultados do consumo de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo abaulado através da correlação de *Edwards et al., (1989)* e o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al. (1980)*, ambas no regime laminar (N_{Re} = 38,4). Observa-se que o consumo de Potência foi menor entre 0,06 < w/D < 0,12 utilizando as correlações de *Edwards et al., (1989)* para o impelidor tipo Âncora de pá abaulada, enquanto que entre 0,125 < w/D < 0,250 o consumo de Potência foi menor utilizando a correlação de *Takahashi et al., (1980)*. Os resultados do consumo de Potência foram semelhantes para w/D = 0,12 para as duas correlações estudadas.

6.2.3 Efeito da taxa H/T sobre o Número de Potência e a Potência do Impelidor

O estudo do efeito do nível do líquido H no sistema de agitação será verificado utilizando-se as correlações de Nagata, (1975).



Figura 6.46 – Número de Potência em função da taxa H/T para o impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D = 0,2; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.46 mostra os perfis do Número de Potência para os impelidores tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) para tanques sem chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Nagata*, (1975). Foi observado que o Número de Potência aumenta com aumento do nível do líquido, ou seja, quanto maior a quantidade de líquido presente no sistema de agitação maior é o Número de Potência. Verifica-se também



que o Número de Potência é maior no impelidor tipo Pás Retas do que o impelidor de Pás Inclinadas (45°).

Figura 6.47 – Número de Potência em função da taxa H/T para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D = 0,2; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.47 mostra os perfis do Número de Potência para o impelidor tipo Pás Retas para tanques sem e com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Nagata*, (1975). Comparando os perfis do Número de Potência em tanques sem chicanas e com chicanas sobre o efeito da taxa H/T (nível do líquido/diâmetro do tanque), observa-se que o Número de Potência aumenta em até 5 vezes o seu valor na presença de chicanas para o efeito do aumento no nível do líquido.



Figura 6.48 – Potência em função da taxa H/T para o impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D = 0,2; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.48 mostra os perfis do consumo de Potência para os impelidores tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) para tanques sem chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Nagata*, (1975). Foi observado que o consumo de Potência aumenta com aumento do nível do líquido, ou seja, quanto maior a quantidade de líquido presente no sistema de agitação, maior será a Potência dissipada pelo impelidor. Verifica-se que para o impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques sem chicanas o consumo de Potência é menor do que o impelidor tipo Pás Retas.



Figura 6.49 – Potência em função da taxa H/T para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D = 0,2; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.49 mostra os perfis do consumo de Potência para o impelidor tipo Pás Retas para tanques sem e com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Nagata*, (1975). Comparando os perfis do consumo de Potência em tanques sem chicanas e com chicanas sobre o efeito da taxa H/T, observa-se que o consumo de Potência diminui em até 5 vezes para tanques sem chicanas em relação a tanques com chicanas para o impelidor tipo Pás Retas.

6.2.4 Efeito da taxa B_w/T e nb sobre a Potência do Impelidor e o Número de Potência



Figura 6.50 – Efeito do número de chicanas sobre a taxa da Potência versus o efeito da taxa B_w/T para o impelidor tipo Pás Retas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D = 0,2; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.50 mostra o consumo de Potência com chicanas sobre o consumo de Potência sem chicanas em função da largura das chicanas para diversos números de chicanas, no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$). Comparando-se os resultados da Figura 6.50 observa-se que, para um aumento no número de chicanas, a taxa de Potência aumenta até atingir um valor máximo, a partir do qual esta taxa diminui. Este resultado aparentemente contraditório ocorre porque à medida que a largura da chicana aumenta, diminui a distância entre a chicana e o impelidor, fazendo-se com que a componente radial de velocidade gerada pela chicana seja menos significativa.


Figura 6.51 – Efeito da taxa NPb/Npmáx sobre o efeito do número de chicanas e largura das chicanas para o impelidor tipo Pás Retas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0.333; w/D = 0.2; np = 2 e N = 180 r.p.m.[Nagata, 1975].

A Figura 6.51 mostra a taxa NPb/Npmáx (Número de Potência específica com chicanas sobre o Número de Potência máxima com chicanas) em função do número adimensional $[(B_w/T)^{1,2}nb]$ em regime turbulento (N_{Re} = 3,33x10⁵). Este gráfico mostra que para $[(B_w/T)^{1,2}nb] = 0,35$ o Numero de Potência específica é igual ao Número de Potência máxima. A taxa de NPb/Npmáx diminui para baixo número de chicanas e baixos valores na largura das chicanas ou para alto número de chicanas e altos valores no largura das chicanas.

6.2.5 Efeito da taxa C/T e h/t sobre Número de Potência e a Potência para o Impelidor tipo Âncora



Figura 6.52 – Número de Potência em função da taxa C/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas: w/D = 0,1; h = T; e N = 120 r.p.m. (regime laminar).

A Figura 6.52 apresenta resultados do Número de Potência em função da taxa C/T (distância entre o impelidor e a parede do tanque) para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo abaulado através da correlação de *Edwards et al., (1989)* e o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al., (1980)*, ambas no regime laminar (29,4 \leq N_{Re} \leq 50,8). Os resultados mostram que o comportamento do Número de Potência sobre o efeito da taxa C/T do impelidor é semelhante para estas correlações empíricas embora se observa que os valores do Número de Potência são

maiores para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo abaulado. Pode-se notar também que o Número de Potência diminui até C/T < 0,075, e depois aumenta com ao aumento entre a distância do impelidor e parede do tanque.



Figura 6.53 – Potência em função da taxa C/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas: w/D = 0,1; h = T; e N = 120 r.p.m. (regime laminar).

A Figura 6.53 apresenta o Consumo de Potência em função da taxa C/T (distância entre o impelidor e o fundo do tanque) para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo abaulado através da correlação de *Edwards et al., (1989)* e o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al., (1980)*, ambas no regime laminar (29,4 \leq N_{Re} \leq 50,8). Os resultados mostram que a Potência foi menor para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato. A Potência diminui com o aumento da taxa C/T, ou seja, à medida que a distância entre o impelidor e o tanque aumenta a Potência do impelidor diminui.



Figura 6.54 – Número de Potência em função da taxa h/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas: w/D = 0,1; D/T = 0,8; C/T = 0,1; e N = 120 r.p.m.(regime laminar).

A Figura 6.54 apresenta resultados do Número de Potência sobre o efeito da taxa h/T (comprimento da pá do impelidor/diâmetro do tanque) para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo abaulado através da correlação de *Edwards et al., (1989)* e o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al., (1980)*, ambas no regime laminar ($N_{Re} = 38,4$). Os resultados mostram que o comportamento do Número de Potência aumenta com o aumento da relação h/T.



Figura 6.55 – Potência em função da taxa h/T do impelidor tipo Âncora aplicado para tanques sem chicanas: w/D = 0,1; D/T = 0,8; C/T = 0,1; e N = 120 r.p.m. (regime laminar).

A Figura 6.55 apresenta o Consumo de Potência em função da taxa h/T para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo abaulado através da correlação de *Edwards et al.*, (1989) e o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al.*, (1980), ambas no regime laminar ($N_{Re} = 38,4$). A Figura mostra que a Potência aumenta com o aumento da relação h/T. A Potência foi menor utilizando-se a correlação de *Takahashi et al.*, (1980) para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato através da correlação de *Takahashi et al.*, (1980) para o impelidor tipo Âncora em tanques de fundo chato.

<u>6.2.6 Efeito do ângulo da Pá sobre o Número de Potência e a Potência para o</u> <u>Impelidor tipo Pás Inclinadas</u>



Figura 6.56 – Número de Potência em função do ângulo da pá do impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D =0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.56 mostra resultados do Número de Potência para o impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques sem e com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Nagata*, (1975). Observa-se que à medida que o ângulo da pá do impelidor aumenta, o Número de Potência aumenta.



Figura 6.57 – Potência em função do ângulo da pá do impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D =0,2; H = T; np = 2 e N = 180 r.p.m. [Nagata, 1975].

A Figura 6.57 mostra os resultados do consumo de Potência para o impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques sem e com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Nagata*, (1975). A Figura mostra que, à medida que o ângulo da pá do impelidor tipo Pás Inclinadas aumenta o consumo de Potência aumenta. Verifica-se que o consumo Potência é menor para o impelidor tipo Pás Inclinadas em tanques sem chicanas.

6.2.7 Efeito do número de pás sobre o Número de Potência, Número de Fluxo, Número de Mistura e a Potência no Impelidor



Figura 6.58 – Número de Potência em função do número de pás dos impelidores tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D =0,2; H = T; e N = 180 r.p.m. [*Sano e Usui, 1985*].

A Figura 6.58 mostra resultados do Número de Potência em função numero de pás para o impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Sano e Usui*, (1985). Observa-se que o Número de Potência aumenta com o aumento do número de pás. Os resultados mostram que o Número de Potência tiveram seus valores próximos.



Figura 6.59 – Número de Fluxo em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D =0,2; H = T; e N = 180 r.p.m. [*Sano e Usui, 1985*].

A Figura 6.59 mostra resultados do Número de Fluxo sobre o efeito numero de pás no impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Sano e Usui*, (1985). Observa-se que o Número de Fluxo aumenta com o aumento do número de pás. Os resultados mostram que o Número de Potência para o impelidor tipo Pás Retas foram maiores pela correlação de *Sano e Usui*, (1985).



Figura 6.60 – Número de Mistura em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0.333; w/D =0.2; H = T; e N = 180 r.p.m. [*Sano e Usui, 1985*].

A Figura 6.60 mostra resultados do Número de Mistura em função do numero de pás no impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Sano e Usui*, (1985). Os resultados mostram que o Número de Mistura diminui com o aumento do número de pás. Isto acontece devido a uma maior movimentação do liquido com o aumento do número de pás reduzindo o Número de Mistura e consequentemente a redução no tempo de mistura. Observa-se também que os valores do Número de Mistura para o impelidor tipo Pás Retas são menores pela correlação de *Sano e Usui*, (1985).



Figura 6.61 – Potência em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D =0,2; H = T; e N = 180 r.p.m. [*Sano e Usui, 1985*].

A Figura 6.61 mostra resultados do consumo de Potência em função do numero de pás no impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton em tanques com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), através das correlações de *Sano e Usui*, (1985). Os resultados mostram que a Potência aumenta com o aumento do número de pás. A potência do impelidor foi menor para o impelidor tipo Pás Retas pela correlação de *Sano e Usui*, (1985).

6.2.8 Efeito da Velocidade Rotacional do impelidor sobre a Potência do Impelidor



Figura 6.62 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Pás Retas e tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0.333; w/D =0.2; H = T; e np = 2 [*Nagata, 1975*].

A Figura 6.62 mostra resultados do consumo de Potência em função da velocidade rotacional para o impelidor tipo Pás Retas e Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas no regime turbulento $(1,11x10^5 \le N_{Re} \le 4,44x10^5)$, através das correlações de *Nagata*, (1975). Os resultados mostram que a Potência aumenta com o aumento da velocidade rotacional. Observa-se também que o a Potência para o Impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) foi menor para a variação na velocidade rotacional através dos estudos nas correlações empíricas do *Nagata*, (1975).



Figura 6.63 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D = 0,2; H = T; e np = 2.

A Figura 6.63 mostra resultados do consumo de Potência em função da velocidade rotacional para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas no regime turbulento $(1,11x10^5 \le N_{Re} \le 4,44x10^5)$, através das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) e *Hiraoka et al.*, (1995). Observa-se que os resultados da Potência foram próximos para baixos valores da velocidade de rotação. Pode-se observar que ao longo da variação da velocidade rotacional a Potência foi menor na utilização da correlação de *Nagata*, (1975).



Figura 6.64 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem e com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D =0,2; H = T; e np = 2 [*Nagata, 1975*].

A Figura 6.64 apresenta o consumo de Potência em função da velocidade rotacional para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem e com chicanas no regime turbulento $(1,11\times10^5 \le N_{Re} \le 4,44\times10^5)$, através das correlações empíricas de *Nagata*, (1975). Observa-se que o efeito da velocidade rotacional influencia bastante nos resultados para o cálculo da Potência do impelidor tipo Pás Retas com chicanas através da utilização das correlações empíricas de *Nagata*, (1975).



Figura 6.65 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; w/D = 0,2; H = T; e np = 2; $B_w = 0,1T$; nb =4.

A Figura 6.65 apresenta o consumo de Potência em função da velocidade rotacional para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(1,11x10^5 \le N_{Re} \le 4,44x10^5)$, através das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) para o cálculo da Potência máxima e as correlações de *Nishikawa et al.*, (1979) para o cálculo da Potência específica (B_w = 0,1T; nb =4). Os resultados mostram que o consumo de Potência do impelidor foi praticamente os mesmos.



Figura 6.66 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0.333; w/D =0.2; H = T; e np = 6; B_w = 0.1T; nb = 4.

A Figura 6.66 mostra resultados do consumo de Potência em função da velocidade rotacional para o impelidor tipo Turbina Rushton de Pás Retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(1,11\times10^5 \le N_{Re} \le 4,44\times10^5)$, através das correlações empíricas de *O'Connell et al.*, (1950) e Sano e Usui, (1985). Os resultados mostram que o consumo de Potência do impelidor foram praticamente os mesmos para uma faixa de velocidade entre 60 à 100 r.p.m. no uso das duas correlações empíricas estudadas. Nota-se também que o consumo de Potência foi menor na utilização da correlação empírica de *O'Connell et al.*, (1950).



Figura 6.67 – Potência em função da velocidade rotacional do impelidor tipo Âncora, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0.8; C/T = 0.1; w/D = 0.1; H = T; e np = 2.

A Figura 6.67 mostra resultados do consumo de Potência em função da velocidade rotacional para o impelidor tipo Âncora de pás retas aplicado a tanques sem chicanas no regime laminar ($6,4 \le N_{Re} \le 48,0$), através das correlações empíricas de *Edwards et al., (1989) e Takahashi et al., (1980)*. Os resultados mostram que o consumo de Potência do impelidor foram praticamente os mesmos para uma faixa de velocidade entre 20 à 60 r.p.m. no uso das duas correlações empíricas estudadas. Nota-se também que o consumo de Potência foi menor na utilização da correlação empírica de *Takahashi et al., (1980)* para o efeito da velocidade rotacional.

6.3 Comparação dos Resultados das Correlações Empíricas com o Software VISIMIX

São muitas as correlações utilizadas na literatura para tanques de mistura. Este trabalho optou, no seu estágio inicial, comparar os resultados das correlações estudadas com o software VISIMIX, sendo utilizado como ferramenta padrão para obter informações de testes experimentais. O software VISIMIX é o mais testado de todos os softwares disponíveis para o cálculo da Potência de impelidores.



Figura 6.68 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.68 apresenta os resultados do Número de Potência em função da taxa D/T para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas no regime turbulento $(2,70_x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, para as correlações de *Nagata, (1975), Hiraoka et al., (1995)* e o software VISIMIX. Comparando-se os resultados com o software VISIMIX observa-se que os Números de Potência para o impelidor tipo Pás Retas usando-se a correlação de *Nagata, (1975)* entre 0,3 < D/T < 0,4 são próximos aos resultados do VISIMIX, enquanto que entre 0,4 < D/T < 0,55 os resultados do Número de Potência na aplicação das correlações de *Hiraoka et al., (1995)* são próximos dos resultados do VISIMIX. Os Números de Potência foram menores com os resultados do Software VISIMIX.



Figura 6.69 – Resultados do consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = $\hat{2}$. e N = 180 r.p.m.

A Figura 6.69 apresenta os resultados do consumo de Potência em função da taxa D/T para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, para as correlações de *Nagata, (1975), Hiraoka et al., (1995)* e o software VISIMIX. Comparando os resultados das correlações de *Nagata (1975) e Hiraoka et al., (1995)* com o Software VISIMIX observa-se que o consumo Potência foi próximo na faixa 0,3 < D/T < 0,4. O perfil da Potência na utilização da correlação de *Hiraoka et al., (1995)* se identificou mais com os resultados do VISIMIX. Observa-se também que os resultados do VISIMIX indicam um menor consumo de Potência.



Figura 6.70 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T = 0,333; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

Na Figura 6.70 apresentaram-se os resultados do Número de Potência em função da taxa w/D para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas no regime turbulento $(N_{Re} = 3,33 \times 10^5)$, para as correlações de *Nagata*, (1975), Hiraoka et al., (1995) e o software VISIMIX. Comparando os resultados com o Software VISIMIX observa-se que os Números de Potência no uso da correlação de *Nagata*, (1975) entre 0,15 < w/D < 0,52 são próximos dos resultados do VISIMIX, enquanto que entre 0,52 < w/D < 0,70 os resultados do Número de Potência na aplicação das correlações de *Hiraoka et al.*, (1995) são próximos dos resultados do VISIMIX. O Número de Potência é menor com os resultados do Software VISIMIX em função da taxa w/D.



Figura 6.71 – Consumo de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

Na Figura 6.71 apresentam-se os resultados do consumo de Potência em função da taxa w/D para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas no regime turbulento $(N_{Re} = 3,33 \times 10^5)$, para as correlações de *Nagata, (1975), Hiraoka et al., (1995)* e o software VISIMIX. Comparando os resultados com o Software VISIMIX observa-se que o consumo de Potência no uso da correlação de *Nagata, (1975)* entre 0,15 < w/D < 0,52 são próximos dos resultados do VISIMIX, enquanto que entre 0,52 < w/D < 0,70 os resultados da Potência na aplicação da correlação de *Hiraoka et al., (1995)* são próximos dos resultados do VISIMIX. A potência estimada pelo Software VISIMIX foi menor em função da taxa w/D.



Figura 6.72 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem Chicanas, utilizando correlação empírica de *Nagata* (1975) e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m.

A Figura 6.72 apresenta os resultados do Número de Potência em função da taxa D/T para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas no regime turbulento $(2,70 \times 10^5 \le N_{Re} \le 14,7 \times 10^5)$, para a correlação de *Nagata, (1975)* e o software VISIMIX. Observa-se que os resultados na aplicação da correlação de *Nagata (1975)* se aproximam dos resultados do VISIMIX para baixos valores do diâmetro do impelidor (0,30 < D/T < 0,40).



Figura 6.73 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem Chicanas, utilizando correlação empírica de *Nagata* (1975) e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.73 apresenta os resultados do consumo de Potência em função da taxa D/T para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas no regime turbulento (2,70x10⁵ $\leq N_{Re} \leq 14,7x10^5$), para a correlação de *Nagata, (1975)* e o software VISIMIX. Observa-se que os resultados da Potência na aplicação da correlação de *Nagata*



(1975) se aproximam dos resultados do VISIMIX para baixos valores do diâmetro do impelidor (0,30 < D/T < 0,40).

Figura 6.74 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem Chicanas, utilizando correlação empírica de *Nagata* (1975) e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.74 apresenta os resultados do Número de Potência em função da taxa w/D para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), para a correlação de *Nagata*, (1975) e o software VISIMIX. Observa-se que os resultados do Número de Potência na aplicação da correlação de *Nagata*, (1975) para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) aplicado a tanques sem chicanas são próximos dos resultados do VISIMIX, principalmente para os valores entre 0,30 < w/D < 0,45.



Figura 6.75 – Consumo de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem Chicanas, utilizando correlação empírica de *Nagata* (1975) e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.75 apresenta os resultados do consumo de Potência em função da taxa w/D para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques sem chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$), para a correlação de *Nagata, (1975)* e o software VISIMIX. Observa-se que os resultados da Potência na aplicação da correlação de *Nagata, (1975)* para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) aplicado a tanques sem chicanas são próximos dos resultados do VISIMIX, principalmente para os valores entre 0,25 < w/D < 0,45.



Figura 6.76 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques com Chicanas, utilizando correlação empírica de *Nagata* (1975) e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.76 apresenta os resultados do Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques com chicanas com os resultados do Software VISIMIX no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$. Observa-se que os resultados na aplicação da correlação de *Nagata (1975)* se aproximam dos resultados do VISIMIX para os valores entre 0,30 < D/T < 0,50.



Figura 6.77 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques com Chicanas, utilizando correlação empírica de *Nagata* (1975) e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m.

A Figura 6.77 apresenta os resultados do consumo de Potência estimada para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques com chicanas com os resultados do Software VISIMIX no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$. Observa-se que os resultados da Potência na aplicação da correlação de *Nagata (1975)* são praticamente os mesmos dos resultados do VISIMIX na faixa entre 0,30 < D/T < 0,50. É importante observar que os resultados da Potência na aplicação da correlação da correlação de *Nagata (1975)* foram menores em função da taxa D/T.



Figura 6.78 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques com Chicanas, utilizando correlação empírica de *Nagata* (1975) e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.78 apresenta os resultados do Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques com chicanas com os resultados do Software VISIMIX no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$). Observa-se que os resultados do Número de Potência na aplicação da correlação de *Nagata*, (1975) para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) aplicado a tanques com chicanas são próximos dos resultados do VISIMIX, principalmente para os valores entre 0,15 < w/D < 0,22. É importante observar que os resultados do Número de Potência na aplicação da correlação da correlação da correlação da correlação da correlação da resultados do VISIMIX, principalmente para os valores entre 0,15 < w/D < 0,22. É importante observar que os resultados do Número de Potência na aplicação da correlação da visitados do VISIMIX, principalmente para os valores entre 0,15 < w/D < 0,22. É importante observar que os resultados do Número de Potência na aplicação da correlação da correlação da correlação da correlação da visitados do Número de Potência na aplicação da correlação da correlação da correlação da correlação da visitados do VISIMIX, principalmente para os valores entre 0,15 < w/D < 0,22. É importante observar que os resultados do Número de Potência na aplicação da correlação da correlação da visitados do Número de Potência na aplicação da correlação da visitados do Número da taxa w/D.



Figura 6.79 – Consumo de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques com Chicanas, utilizando correlação empírica de *Nagata* (1975) e o uso do Software VISIMIX com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.79 apresenta os resultados do consumo de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) em tanques com chicanas com os resultados do Software VISIMIX no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$). Os resultados mostram o consumo de Potência entre a correlação de *Nagata*, (1975) e o software VISIMIX para o impelidor tipo Pás Inclinadas (45°) aplicado a tanques com chicanas. Nota-se que os resultados do consumo de Potência utilizando-se da correlação de *Nagata* (1975) são próximos dos resultados do VISIMIX. É importante observar que os resultados da Potência na aplicação de *Nagata* (1975) foram menores em função da taxa w/D.



Figura 6.80 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.80 apresenta os resultados do Número de Potência em função da relação D/T para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, para as correlações de *Nagata, (1975), Sano e Usui, (1985)* e o software VISIMIX. Foi observado que o Número de Potência utilizando-se o software VISIMIX diminui com o aumento do diâmetro do impelidor. A correlação de *Sano e Usui, (1985)* é a que mais se aproxima dos resultados do VISIMIX, enquanto que a correlação de *Nagata, (1975)* foge do comportamento mostrado pela correlação de *Sano e Usui, (1985)* e o software VISIMIX.



Figura 6.81 – Consumo de Potência sobre o efeito do diâmetro do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.81 apresenta os resultados do consumo de Potência em função da relação D/T para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, para as correlações de *Nagata, (1975), Sano e Usui, (1985)* e o software VISIMIX. Comparando-se os resultados da Potência com o software VISIMIX observa-se que a correlação de *Sano e Usui, (1985)* para o Impelidor tipo Pás Retas em Tanques com chicanas é a que mais se aproxima dos resultados do VISIMIX, principalmente entre 0,30 < D/T < 0,50.



Figura 6.82 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.82 apresenta os resultados do Número de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(N_{Re} = 3,33 \times 10^5)$, para as correlações de *Nagata, (1975), Sano e Usui, (1985)* e o software VISIMIX. Comparando-se os resultados do Número de Potência com o software VISIMIX observa-se que os resultados pela correlação de *Sano e Usui, (1985)* para o Impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas estão mais próximos dos resultados do VISIMIX, principalmente entre 0,15 < w/D < 0,22.



Figura 6.83 – Consumo de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 2. e N = 180 r.p.m.

A Figura 6.83 apresenta os resultados do consumo de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(N_{Re} = 3,33 \times 10^5)$, para as correlações de *Nagata*, (1975), Sano e Usui, (1985) e o software VISIMIX. Comparando-se os resultados da Potência com o software VISIMIX observa-se que os resultados pela correlação de Sano e Usui, (1985) para o Impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas estão mais próximos dos resultados apresentados pelo VISIMIX, principalmente entre 0,15 < w/D < 0,22.



Figura 6.84 – Número de Potência em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chicanas, utilizando correlação empírica de *Sano e Usui (1985)* e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; w/D = 0,2; H = T; e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.84 apresenta o Número de Potência em função do número de pás para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$). Comparando-se os resultados do Número de Potência entre a correlação de *Sano e Usui*, (1985) e o software VISIMIX verifica-se que os resultados são praticamente os mesmos, principalmente para np = 4.



Figura 6.85 – Consumo de Potência em função do número de pás do impelidor tipo Pás Retas em tanques com Chicanas, utilizando correlação empírica de *Sano e Usui* (1985) e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; w/D = 0,2; H = T; e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.85 apresenta o consumo de Potência em função do número de pás para o impelidor tipo Pás Retas em tanques com chicanas no regime turbulento ($N_{Re} = 3,33 \times 10^5$). Comparando-se os resultados da Potência estimada entre a correlação de *Sano e Usui*, (1985) e o software VISIMIX verifica-se que os resultados são praticamente os mesmos, principalmente para np = 4.



Figura 6.86 – Número de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D = 0,2; H = T; e np = 6. B_w = 0,1T; nb =4. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.86 apresenta os resultados do Número de Potência em função da relação D/T para o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, para as correlações de *O'Connell et al., (1950), Sano e Usui, (1985)* e o software VISIMIX. A correlação de *Sano e Usui, (1985)* é a que mais se aproxima dos resultados do VISIMIX, principalmente entre 0,30 < D/T < 0,45; enquanto que a correlação de *O'Connell et al., (1950)* foge do comportamento, notando-se que o Número de Potência é praticamente constante ao longo de toda variação da taxa D/T.


Figura 6.87 – Consumo de Potência em função da taxa D/T do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: w/D =0,2; H = T; e np = 6. $B_w = 0,1T$; nb =4. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.87 ilustra o consumo de Potência em função da relação D/T para o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(2,70x10^5 \le N_{Re} \le 14,7x10^5)$, para as correlações de *O'Connell et al., (1950), Sano e Usui, (1985)* e o software VISIMIX. Observa-se que se utilizando a correlação de *Sano e Usui, (1985)* os resultado se aproxima dos resultados do VISIMIX entre 0,30 < D/T < 0,50; enquanto que a correlação de *O'Connell et al., (1950)* se aproxima dos resultados do VISIMIX para um faixa 0,50 < D/T < 70.



Figura 6.88 – Número de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 6. $B_w = 0,1T$; nb =4. e N = 180 r.p.m..

A Figura 6.88 apresenta o Número de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(N_{Re} = 3,33 \times 10^5)$, para as correlações de *O'Connell et al., (1950), Sano e Usui, (1985)* e o software VISIMIX. Utilizando-se a correlação de *Sano e Usui, (1985)* observa-se que os resultados são praticamente os mesmos do software VISIMIX. Entretanto os resultados pela correlação de *O'Connell et al., (1950)* apresentaram um Numero de Potência menor.



Figura 6.89 – Consumo de Potência em função da taxa w/D do impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com Chicanas, utilizando correlações empíricas e o uso do Software VISIMIX, com as seguintes relações geométricas: D/T =0,333; H = T; e np = 6. $B_w = 0.1T$; nb =4. e N = 180 r.p.m.

A Figura 6.89 apresenta o consumo de Potência em função da relação w/D para o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanques com chicanas no regime turbulento $(N_{Re} = 3,33 \times 10^5)$, para as correlações de *O'Connell et al., (1950), Sano e Usui, (1985)* e o software VISIMIX. Utilizando-se a correlação de *Sano e Usui, (1985)* observa-se que os resultados são praticamente os mesmos do software VISIMIX. Entretanto os resultados pela correlação de *O'Connell et al., (1950)* apresentaram um consumo de Potência menor.

6.3.1 Faixa de Aplicação das Relações Geométricas nas Correlações Empíricas para o Cálculo do Número de Potência e Consumo de Potência dos Impelidores analisados

Pôde-se observar que os resultados das correlações empíricas foram mais próximos aos resultados do software VISIMIX em determinadas faixas de relações geométricas (diâmetro do impelidor/diâmetro do tanque e largura da pá do impelidor/diâmetro do impelidor) para o cálculo do Número de Potência e consumo de Potência no regime turbulento dos seguintes tipos de impelidores: Pás Retas, Pás Inclinadas e Turbina Rushton, aplicado a tanques sem e com chicanas. As tabelas 6.1 e 6.2 apresentam este quadro comparativo no uso das correlações empíricas estudadas.

Tabela 6.1 - Faixa de Aplicação das Relações Geométricas em cada tipo de Impelidor estudado para o Cálculo do Número de Potência.

Tipo de Impelidor	Correlação Empírica	Relações Geométricas	
Pás Retas, Sem Chicanas	Nagata (1975)	0,30 < D/T < 0,40	0,15 < w/D < 0,35
	Hiraoka (1995)	0,40 < D/T < 0,55	0,60 < w/D < 0,75
Pás Retas, Com Chicanas	Sano e Usui (1985)	0,30 < D/T < 0,50	0,15 < w/D < 0,40
Pás Inclinadas, Sem Chicanas	Nagata (1975)	0,30 < D/T < 0,40	0,25 < w/D < 0,45
Pás Inclinadas, Com Chicanas	Nagata (1975)	0,30 < D/T < 0,50	0,15 < w/D < 0,30
Turbina Rushton de pás retas, Com Chicanas	O'Connell et al. (1950)	0,60 < D/T < 0,70	Sem faixa de aplicação
	Sano e Usui (1985)	0,30 < D/T < 0,45	0,15 < w/D < 0,45

Tipo de Impelidor	Correlação Empírica	Relações Geométricas	
D' Data San Chianna	Nagata (1975)	0,30 < D/T < 0,40	0,15 < w/D < 0,35
Pas Retas, Sem Chicanas	Hiraoka (1995)	0,40 < D/T < 0,55	0,60 < w/D < 0,70
Pás Retas, Com Chicanas	Nagata (1975)	0,30 < D/T < 0,35	w/D = 0,15
	Sano e Usui (1985)	0,30 < D/T < 0,60	0,15 < w/D < 0,35
Pás Inclinadas, Sem Chicanas	Nagata (1975)	0,30 < D/T < 0,45	0,25 < w/D < 0,45
Pás Inclinadas, Com Chicanas	Nagata (1975)	0,30 < D/T < 0,55	0,15 < w/D < 0,30
Turbina Rushton de pás retas, Com Chicanas	O'Connell et al. (1950)	0,30 < D/T < 0,70	Sem faixa de aplicação
	Sano e Usui (1985)	0,30 < D/T < 0,60	0,15 < w/D < 0,45

Tabela 6.2 - Faixa de Aplicação das Relações Geométricas em cada tipo de Impelidor estudado para o Cálculo do Consumo de Potência.

CAPÍTULO 7

7 CONCLUSÕES

Este projeto vem a contribuir nos estudos dos sistemas de agitação por prover informações para o cálculo da Potência dissipada por vários tipos de impelidores analisados e os estudos dos efeitos da geometria sobre o cálculo.

Para uma análise das curvas de Potência do impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas os resultados através da correlação de *Nagata*, (1975) foram semelhantes aos resultados de *Hiraoka et al.*, (1995) nas mesmas condições operacionais. Comparando os perfis do Número de Potência através das correlações de *Nagata*, (1975) para tanques sem e com chicanas pode-se observar que os Números de Potência são maiores em tanques com chicanas e que os mesmos tendem para um valor constante para altos Números de Reynolds. Foi verificado nos resultados do capítulo 5 que o Número de Potência em tanques sem chicanas sofreu ainda pequenas variações para altos Números de Reynolds (regime turbulento) devido à influência do Número de Froude sobre o Número de Potência.

Os estudos das curvas de Potência para os impelidores tipo: Pás Retas, Pás Inclinadas, Turbina Ruhston e Âncora analisadas neste trabalho permite concluir que o Número de Reynolds não tem muita influência sobre o Número de Potência para altos valores de Reynolds, somente para baixos números de Reynolds, principalmente, nos estudos do impelidor tipo Âncora.

A avaliação dos números adimensionais (Número de Potência, Número de Froude, Número de Fluxo e Número de Mistura) e o consumo de Potência em função da influência dos efeitos geométricos do tanque-impelidor mostraram-se satisfatórios comparado aos dados da literatura. O diâmetro do impelidor e, principalmente a largura da pá do impelidor, mostraram ter grande influência sobre o Número de Potência e a Potência dissipada do impelidor. As correlações empíricas apresentadas por *Sano e Usui, (1985)* para os impelidores tipo Pás Retas e Turbina Rushton aplicado a tanques com chicanas puderam também proporcionar um estudo do Número de Fluxo e do Número de Mistura sobre os efeitos das relações geométricas tanque-impelidor. O diâmetro do impelidor mostrou ter influência sobre o Número de Mistura, enquanto a que a largura da pá do impelidor teve influência sobre o Número de Mistura e o Número de Fluxo. Pode-se destacar que o número de pás do impelidor também tem influência considerável sobre estas grandezas.

A análise das correlações empíricas para o impelidor tipo Pás Retas aplicado a tanques com chicanas através da correlação empregada por *Nishikawa et al., (1979)* para nb $= 4 \text{ e B}_w = 0,1\text{T}$ ajustou-se aos resultados apresentados por *Nagata, (1975)* para o consumo de Potência e do Número de Potência máxima analisando-se os efeitos do diâmetro e largura do impelidor. Nesta análise foi também observado que a presença de chicanas influencia bastante no consumo de Potência.

O impelidor tipo Ancora possibilitou observar que a distância entre o impelidor e a parede do tanque C, foi outro fator que influencia nos resultados do Número de Potência e o consumo de Potência.

Para uma avaliação mais precisa nos resultados apresentados através do programa computacional desenvolvido, as respostas das correlações empíricas aplicadas no regime turbulento foram comparadas com o software comercial VISIMIX. Comparando-se as respostas das correlações empíricas de *Nagata*, (1975) para o impelidor tipo Pás Retas em tanque sem chicanas, verifica-se que os resultados do Número de Potência e da Potência do impelidor são próximos para os valores das taxas 0,30 < D/T < 0,40 e 0,15 < w/D < 0,30. Nas respostas das correlações empíricas de *Hiraoka et al.*, (1995) para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas, verifica-se que os resultados do Número de Potência são próximos para os valores das taxas 0,40 < D/T < 0,55 e 0,60 < w/D < 0,75, enquanto que os resultados do consumo de Potência são próximos para os valores das respostas das correlações empíricas de *Juraoka et al.*, (1995) para o impelidor tipo Pás Retas em tanques sem chicanas, verifica-se que os resultados do Número de Potência são próximos para os valores das taxas 0,40 < D/T < 0,55 e 0,60 < w/D < 0,75, enquanto que os resultados do consumo de Potência são próximos para os valores das correlações empíricas das correlações empíricas de *Sano e Usui*, (1985) para o impelidor tipo Pás Retas em tanque com chicanas, verifica-se que os

resultados do Número de Potência do impelidor são próximos para os valores das taxas 0.30 < D/T < 0.50 e 0.15 < w/D < 0.40, enquanto que os resultados do consumo de Potência são próximos para os valores das taxas 0.30 < D/T < 0.60 e 0.15 < w/D < 0.35. Comparando as respostas das correlações empíricas de Nagata, (1975) para o impelidor tipo Pás Inclinadas em tanque sem chicanas, verifica-se que os resultados do Número de Potência do impelidor são próximos para os valores das taxas 0.30 < D/T < 0.40 = 0.25 < 0.40 = 0.25 < 0.40 = 0.25 < 0.40 = 0.25 < 0.40 = 0.25 < 0.40 = 0.25 < 0.40 = 0.25 < 0.40 = 0.4w/D < 0.45, enquanto que os resultados do consumo de Potência são próximos para os valores das taxas 0.30 < D/T < 0.45 e 0.25 < w/D < 0.45. Comparando as respostas das correlações empíricas de Nagata, (1975) para o impelidor tipo Pás Inclinadas em tanque com chicanas, verifica-se que os resultados do Número de Potência do impelidor são próximos para os valores das taxas 0,30 < D/T < 0,50 e 0,15 < w/D < 0,30, enquanto que os resultados do consumo de Potência são próximos para os valores das taxas 0,30 < D/T < 0.55 e 0.15 < w/D < 0.30. Comparando as respostas das correlações empíricas de Sano e Usui, (1985) para o impelidor tipo Turbina Rushton de pás retas em tanque com chicanas, verifica-se que os resultados do Número de Potência do impelidor são próximos para os valores das taxas 0,30 < D/T < 0,45 e 0,15 < w/D < 0,45, enquanto que os resultados do consumo de Potência são próximos para os valores das taxas 0,30 < D/T < 0,60 e 0,15 < w/D < 0,45.

Desta forma, em uma análise geral, pode-se considerar que as respostas dos impelidores tipo Pás Retas e Turbina Rushton aplicado a tanques com chicanas para o cálculo do Número de Potência e a Potência consumida foram melhores correlacionadas pela correlação de *Sano e Usui, (1985)*, visto que esta se aproximou (numa faixa maior de D/T E w/D) dos resultados do Software VISIMIX, principalmente, sobre os efeitos do número de pás onde as respostas foram praticamente iguais ao do Software VISIMIX. Portanto, considerou-se que as melhores correlações empíricas são as de *Sano e Usui, (1985)* para o impelidor tipo Pás Retas e Turbina Rushton. Estas são utilizadas como referência para o cálculo convencional de agitadores.

7.1 Sugestões

Sendo este um trabalho de base para o cálculo de agitadores para projetos futuros, muito pode ser feito para um estudo mais completo nos sistemas de agitação, portanto várias sugestões são feitas para uma continuação deste projeto, como:

- Implementação de outras correlações empíricas mais recentes para comparar tanto com os resultados das correlações implementadas neste trabalho como aos resultados do Software VISIMIX.
- Testar correlações empíricas para outros tipos de impelidores que não foram estudados, como: Turbina de Pás Inclinadas para tanques sem e com chicanas, Âncora de pás inclinadas e o Helicoidal para fluidos não-newtonianos.
- Implementar outras variáveis de saída ao programa computacional como: velocidade de circulação do fluido, taxa de circulação do fluido, velocidade tangencial, velocidade tangencial perto da parede, força aplicada na pá do impelidor, força aplicada para a chicana, nível de agitação e altura da formação do vórtice. Será interessante trabalhar com outros tipos de fluidos para se verificar a influência da viscosidade, afim de que o usuário possa obter as informações necessárias para o projeto de sistemas de agitação.
- A Fluidodinâmica Computacional pode também ajudar em muito nos trabalhos de investigação destas correlações por testar faixas de aplicabilidade das correlações atuais e por propor novas correlações para o Número de Potência conforme o trabalho de Spogis, N. (2002).
- Obtenção de dados experimentais para gerar correlações para os impelidores propostos.
- Implementação de uma interface gráfica de forma que o usuário possa visualizar as respostas de forma mais clara e de fácil acesso. Contudo, torna-se um

î,

trabalho complexo, porém estimulante e realizador para aqueles que venham a trabalhar com projetos de sistemas de agitação.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

EDWARDS, M. F., SHAMLOU, P. A, Power Consumption of Anchor Impellers in Newtonian and Now-Newtoniam Liquids, Chemical Engineering Res. Des, vol. 67, September, 1989.

EDWARDS, M. F., WILKINSON, W. L. Heat Transfer in Agitated Vessels – Part I. The Chemical Engineer, August, 1972.

FOUST et al. Princípios das Operações Unitárias, 2ª edição, 1982.

GRAY, D. J., R. E. TREYBAL, S. M. BARNET, AIChEJ, volume 28, Nº 195, 1982.

GREAVES, M., K. A. H. KOBBACY, Fluid Mixing, I. Chem. E. Sym. Ser., volume 64, H1, 1981.

HIRAOKA et al., Power Correlation for Paddle Impellers in Spherical and Cylindrical Agitated Vessels, Kagaku Kogaku Rombunshu, volume 21, N° 141, 1995.

HIXSON, A. W., S. J. BAUM, Ind. Eng. Chem., volume 39, N° 2, 194, 1942.

HIXSON, A. W., V. E. LUEDEKE, Ind. Eng. Chem., volume 29, N° 8, 927, 1937.

MACK, D. E., ^a E. KROLL, Chem. Engr. Progr., volume 44, N^o 3, 189, 1948.

MARTIN, J. J., Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs, volume 42, N°_77, 1946.

MIRIAN, T. de GOUVÊA, Estimating Power Consumption of Agitators, Chemical Engineering, November, 1999.

NAGATA, S. Mixing – Principles and Applications, Kodansha Scientific Books, 1975.

NAGATA, S., N. YOSHIOKA, T. YOKOYAMA, Memoirs Fac. Eng., Kyoto Univ., volume 17, Nº 175, 1955.

NIENOW, A. W., D. MILES, 1 & EC Poc. Des. Dev., volume 10, Nº 1, 41, 1971.

NISHIKAWA, M., K. ASHIWAKE, N. HASHIMOTI, S. NAGATA, International Chem Eng., volume 19, N° 1, 153, 1979.

NOVAK, V., P. DITL, F. RIEGER, Proc. 4th Eur. Conf. On Mixing, C1, volume 57, 1982.

O'CONNELL, F. P., D. E. MACK, Chem. Engr. Progr., volume 46, N° 7, 358, 1950.

O'KANE, K., Proc. 1st Eur. Com. on Mixing and Cent. Sep., Cambridge, England, BHRA Fluid Eng., Granfield, England, A3, volume 23, 1974.

OLDSHUE, J. M. Fluid Mixing Technology, Chemical Engineering - McGraw-Hill, first edition, 1983.

OLNEY, R. B., G. J. CARLSON, Chem. Engr. Progr., volume 43, Nº 9, 473, 1947.

RUSHTON, J. H., Canad. Chem. Proc. Ind., volume 55, May, 1946.

RUSHTON, J. H., E. W. COSTICH, H. J. EVERETT, Chem. Engr. Progr., volume 46, N^o 9, 467, 1950.

SANO, Y., USUI, H., Interrelations among Mixing Time, Power Number and Discharge Flow Rate Number in Baffled Mixing Vessels, Journal of Chemical Engineering, volume 18, N° 47, 1985.

SHIUE, S. J., C. W. WONG, Canad. Journal Chemical Engineering, volume 62, N° 602, 1984.

SPOGIS, N. Metodologia para a Determinação de Curvas de Potência e Fluxos característicos para Impelidores Axiais, Radiais e Tangenciais utilizando a Fluidodinâmica Computacional, Maio de 2002.

STERBACEK, Z., TANSK, P. Mixing in the Chemical Industry, volume 5, 1^a-edição, 1965.

TAKAHASHI, K., ARAI, K., SAITO, S., Power Correlation for Anchor and Helical Ribbon Impellers in Highly Viscous Liquids, Journal of Chemical Engineering, volume 13, N° 147, 1980.

TATTERSON, G. B. Fluid Mixing and Gas Dispersion in Agitated Tanks, McGraw – Hill, 1991.

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

VISIMIX 2000 Turbulent, Summer, 1999.

WHITE, A. B., BRENNER, Trans. Amer. Inst. Chem. Engrs., volume 30, N°_585, 1934.

.....