



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA



PRO-REITORIA DE GRADUAÇÃO
ENGENHARIA MECÂNICA

BRUNA FERREIRA PAULINO
JEAN RICARDO TEIXEIRA TEODO

SISTEMA DE AGITAÇÃO E DOSAGEM EM UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO BIOLÓGICO

VOLTA REDONDA

2021

BRUNA FERREIRA PAULINO
JEAN RICARDO TEIXEIRA TEODO

**SISTEMA DE AGITAÇÃO E DOSAGEM EM UMA ESTAÇÃO DE
TRATAMENTO BIOLÓGICO**

Dissertação apresentada ao curso de ENGENHARIA
MECÂNICA do Centro Universitário de Volta
Redonda – UniFOA, como requisito obrigatório para
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

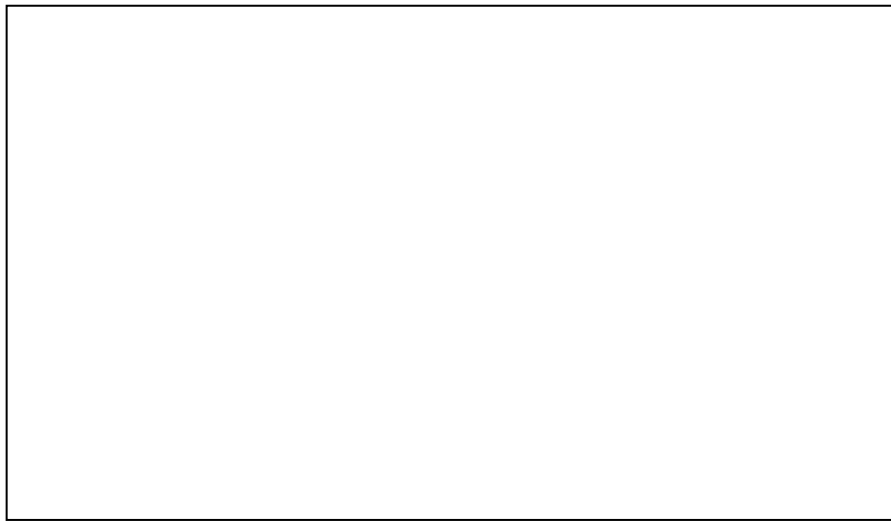
Coorientador: Prof. Dr. Sandro Rosa Corrêa

VOLTA REDONDA

2021

FICHA CATALOGRÁFICA

Bibliotecária: Alice Tação Wagner - CRB 7/RJ 4316

A large empty rectangular box with a thin black border, occupying the lower half of the page. It is currently blank, serving as a placeholder for a catalog entry or image.



FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
PRO-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
ENGENHARIA MECÂNICA



BRUNA FERREIRA PAULINO

JEAN RICARDO TEIXEIRA TEODO

Sistema de agitação e dosagem em uma estação de tratamento biológico

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE
“ENGENHEIRO MECÂNICO”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE ENGENHARIA
MECÂNICA**

Prof. DSc. Sandro Rosa Corrêa
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. ALEXANDRE FERNANDES HABIBE

1º Membro da banca/Orientador/UniFOA

Prof. Dr. ALEXANDRE ALVARENGA PALMEIRA

2º Membro da banca/UniFOA

Prof. Me. RUI AURELIO BARBOSA

3º Membro da banca/UniFOA

Maio de 2021.

DEDICATÓRIA

Dedicamos essa dissertação aos nossos pais, por serem nossos alicerces, sustento, nossa base, assistência, força e refúgio, sendo essenciais em nossa construção como indivíduos.

Aos nossos amigos por estarem sempre do nosso lado nos dando força para conquistarmos nossos sonhos e atingir nossas metas.

Dedicamos a eles por terem acreditado em nós até nos momentos em que nós ficamos envoltos de dúvidas e inseguranças.

Honraremos o fim desse ciclo em nossas vidas, graças ao apoio e o amor de vocês.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por ter nos honrado e guiado permitindo nossa chegada até aqui.

Agradecemos ao Engenheiro Naval António Carlos Basso da Cunha Leal que se compadeceu conosco e nos deu todo o apoio necessário dispondo seu tempo e conhecimento para o desenvolvimento da dissertação com muita humildade e paciência em nos ajudar.

Agradecemos aos nossos mestres por terem nos acrescidos desde o início de nossa caminhada acadêmica.

Agradecemos ao nosso orientador Alexandre Fernandes Habibe e o nosso benquisto professor Alexandre Alvarenga Palmeirinha por todo o auxílio prestado a nós mesmo durante esse período caótico que estamos atravessando, com o auxílio e compreensão, conseguimos alcançar nosso objetivo.

Agradecemos as nossas famílias e amigos por todo apoio prestado a nós, sem isso com certeza não conseguiríamos nos sustentar nos momentos de dificuldade e desânimo que vez ou outra nos assolavam. O amor e a compreensão de vocês foram fundamentais para nós.

EPÍGRAFE

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

Theodore Roosevelt

PAULINO, B. F.; TEODO, J. R. T. **Sistema de agitação e dosagem em uma estação de tratamento biológico**. 2021. Dissertação (ENGENHARIA MECÂNICA) – Fundação Oswaldo Aranha, Centro Universitário de Volta Redonda, Volta Redonda, 2021

RESUMO

O tratamento de efluentes das indústrias siderúrgicas, é um processo muito importante, pois a água proveniente desse processo é muito poluente, e se retornada a natureza de maneira inadequada pode causar sérios danos como a morte de diversas espécies aquáticas, prejudicaria também a flora e o abastecimento de água da população onde essa água poluída seria despejada. Para garantir que esse descarte seja feito de maneira adequada na natureza, esse fluido deverá receber seu devido tratamento. O processo de tratamento passa por diversificadas fases, uma delas é a agitação ou mistura que visa misturar o fluido contaminado a outro produto coagulante para o tratamento. Esse produto terá como função inibir a ação do contaminante. Nesse trabalho iremos falar sobre o processo de tratamento nos tanques de cianeto, que é o principal contaminante dos efluentes oriundos do processo coqueificação e carboquímico nas indústrias siderúrgicas, faremos o dimensionamento do agitador ideal para atender o processo de tratamento de acordo com o volume e vazão do fluido e suas características, selecionaremos o motoredutor que irá atender a esse processo e dimensionaremos o eixo do impelidor que suportará o trabalho que será exigido pelo motoredutor e suportará também as forças hidráulicas características para esse tipo de fluido. Por fim selecionaremos a bomba dosadora que irá despejar o fluido coagulante para o tratamento da água de maneira controlada e criaremos um plano de manutenção para que todo o processo seja seguro e funcione de maneira adequada aumentando a confiabilidade do sistema e minimizando as chances de ocorrer contingências que comprometam a eficiência do tanque.

Palavras-chave: agitação; dosagem; mistura; cianeto; tratamento.

ABSTRACT

The treatment of effluents from the steel industries is a very important process, as the water from this process is very polluting, and if returned to nature inappropriately can cause serious damage such as the death of several aquatic species, it would also damage the flora and the environment water supply of the population where this polluted water would be dumped. In order to ensure that this disposal is done properly in nature, this fluid must be properly treated. The treatment process goes through several stages, one of which is agitation or mixing that aims to mix the contaminated fluid with another coagulant product for the treatment. This product will have the function of inhibiting the action of the contaminant. In this work we will talk about the treatment process in the cyanide tanks, which is the main contaminant of the effluents from the coking and carbohydrate process in the steel industries, we will design the ideal agitator to meet the treatment process according to the volume and flow of the fluid and its characteristics, we will select the gearmotor that will attend to this process and we will dimension the impeller shaft that will support the work that will be required by the gearmotor and will also support the hydraulic forces characteristic for this type of fluid. Finally, we will select the dosing pump that will discharge the coagulant fluid for the water treatment in a controlled manner and we will create a maintenance plan so that the whole process is safe and works properly, increasing the reliability of the system and minimizing the chances of occurring contingencies that compromise the efficiency of the tank.

Keywords: agitation, dosing, mixing, cyanide, treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma do processo de produção de uma siderúrgica.	16
Figura 2. Bateria de Forno de Coque.	19
Figura 3. Fluxograma de um sistema de Tratamento de Gás de Coqueria.	21
Figura 4. Esquema e dimensões padrão de um sistema de agitação de líquidos.	27
Figura 5. Componentes em um sistema de agitação.	28
Figura 6. Esquema dos rotores tipo turbinas.	29
Figura 7. Esquema dos rotores tipo pás.	30
Figura 8. Esquema de rotores específicos.	30
Figura 9. Fluxograma de dimensionamento do agitador.	32
Figura 10. Configuração típica de um sistema de agitação.	33
Figura 11. Impelidor tipo pás retas inclinadas.	34
Figura 12. Curvas do número de bombeamento para impelidores de 4 pás retas.	41
Figura 13. Curvas do número de potência para vários tipos de turbinas.	43
Figura 14. Variações no fluxo do fluido em tanques com vários impelidores.	48
Figura 15. Exemplo de eixo em balanço.	50
Figura 16. Posição da vedação no eixo de um agitador.	54
Figura 17. Esquema do tanque agitado.	55
Figura 18. Seleção de um motoredutor SEW.	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais Processos de Remoção Química de Cianetos.	23
Tabela 2. Diferentes operações de mistura.	26
Tabela 3. Características de alguns impelidores.	34

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Relação entre o nível de agitação e o tipo de processo.	36
Quadro 2. Classificação do escoamento em função do número de Reynolds.....	40
Quadro 3. Tensões admissíveis para eixos de sistemas agitados	52

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1: Nível ou intensidade de agitação.....	35
Equação 2: Volume em metros cúbicos com base no diâmetro do tanque	37
Equação 3: Equivalência do tanque de batelada quadrada.....	37
Equação 4: Relação entre velocidade média e nível de agitação	38
Equação 5: Número de Reynolds	39
Equação 6: Número de bombeamentos.....	40
Equação 7: Número de bombeamentos para impelidores de 4 pás retas a 45° em função do número de Reynolds	41
Equação 8: Fator que leva em conta as forças viscosas em função do número de Reynolds .	41
Equação 9: Número de Reynolds corrigido de acordo com a variação D/T	42
Equação 10: Nível de agitação associado ao número de bombeamento	42
Equação 11: Número de potência	43
Equação 12: Curva do número de potência para impelidores de 4 pás retas a 45°	43
Equação 13: Parâmetro C_c	44
Equação 14: Parâmetro C_D	44
Equação 15: Fator de força viscosa levando em consideração o número de Reynolds	44
Equação 16: Velocidade média mínima do fluido em função do nível de agitação	45
Equação 17: Velocidade média da massa de fluido	45
Equação 18: Área do tanque baseada do diâmetro de baletada quadrada.....	45
Equação 19: Diâmetro mínimo do impelidor.....	46
Equação 20: Número de bombeamento para escoamento turbulento para impelidores de 4 pás retas a 45°.....	46
Equação 21: Estimativa inicial para o diâmetro mínimo do impelidor.....	46

Equação 22: Estimativa para rotação mínima	47
Equação 23: Potência do acionamento.....	47
Equação 24: Potência requerida para o motor.....	47
Equação 25: Capacidade de bombeamento considerando o número de impelidores utilizados.....	48
Equação 26: Torque máximo	49
Equação 27: Força hidráulica em um impelidor	49
Equação 28: Potência desenvolvida para impelidor.....	50
Equação 29: Momento fletor máximo.....	51
Equação 30: Tensão máxima de cisalhamento.....	51
Equação 31: Tensão máxima de flexão devida a forças hidráulicas	51
Equação 32: Diâmetro mínimo para eixos maciços baseado na tensão de cisalhamento combinada.....	51
Equação 33: Diâmetro mínimo para eixos maciços baseado na tensão de tração combinada.....	52
Equação 34: Rotação crítica de um eixo maciço em balanço	53
Equação 35: Massa equivalente	53
Equação 36: Verificação da deflexão do eixo	53

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal do tanque (m ²)
B	Largura das chicanas (m)
C	Distância do impelidor ao fundo do tanque (m)
C _C	Fator para correção de NP, função de C/D (adimensional)
C _D	Fator para correção de NP, função de D/T (adimensional)
D	Diâmetro do impelidor (m)
E	Módulo de elasticidade do material do eixo (MPa)
F _{Hi}	Força hidráulica do impelidor i (N)
H	Altura do tanque (m)
L	Comprimento em balanço do eixo (m)
M _{max}	Momento fletor máximo (N.m)
N	Rotação do impelidor (rps)
N _A	Nível ou intensidade de agitação (adimensional)
N _c	Rotação crítica do eixo do sistema de agitação (rps)
N _{Re}	Número de Reynolds (adimensional)
N _P	Número de potência (adimensional)
N _Q	Número de bombeamento (adimensional)
P	Potência requerida (W)
P _i	Potência requerida para o impelidor i (W)
P _M	Potência instalada do motor (W)
P _{Mi}	Parcela da potência do motor aplicada ao impelidor (W)
Q	Capacidade de bombeamento (m ³ /s)
S _b	Distância entre mancais de suporte (m)

T	Diâmetro do tanque (m)
T_Q	Torque no eixo (N.m)
V	Volume do tanque (m ³)
W	Largura das pás do impelidor (m)
W_i	Massa do impelidor i (kg)
W_e	Massa equivalente dos impelidores (kg)
Z	Altura da mistura (m)
Z_b	Módulo de resistência à flexão da seção transversal do eixo (m ³)
Z_p	Módulo polar da seção transversal do eixo (m ³)
d_s	Diâmetro do eixo (m)
f_{Hi}	Fator de carga para a força hidráulica do impelidor (adimensional)
f_{visc}	Correção das forças viscosas no cálculo de N_Q (adimensional)
f_{μ}	Correção das forças viscosas no cálculo de N_P (adimensional)
g	Aceleração da gravidade (m/s ²)
n_i	Número de impelidores (adimensional)
v_m	Velocidade média da massa de fluido no tanque (m/s)
w_s	Massa por unidade de comprimento do material do eixo (kg/m)
μ	Viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s)
ρ	Densidade do fluido (kg/m ³)
ρ_m	Densidade do material do eixo (kg/m ³)
σ	Tensão devida à flexão do eixo (MPa)
σ_b	Tensão admissível à flexão para o material do eixo (MPa)
τ	Tensão de cisalhamento devida à torção do eixo (MPa)
τ_s	Tensão admissível de cisalhamento à torção do material do eixo (MPa)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	14
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.2.1 Objetivo geral	14
1.2.2 Objetivo específicos	15
1.3 JUSTIFICATIVA	15
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 SIDERURGIA.....	15
2.1.1 Pátio de Matérias-Primas	16
2.1.2 Coqueria	16
2.1.3 Sinterização	17
2.1.4 Alto-Forno	17
2.1.5 Aciaria	17
2.1.6 Lingotamento Contínuo	17
2.1.7 Laminação	18
2.2 COQUERIA	18
2.3 CARBOQUÍMICO.....	20
2.4 TRATAMENTO DOS EFLUENTES ORIUNDOS DA COQUERIA	21
2.4.1 Tratamento Biológico	22
2.4.2 Tratamento Físico-Químico	22
2.5 TANQUES DE TRATAMENTO QUÍMICO EM ETES	24
2.6 AGITAÇÃO E MISTURA.....	25
2.6.1 Esquema geral de um tanque de agitação	26
2.6.2 Classificação dos Agitadores	27

2.6.2.1 Tipo de escoamento	27
2.6.2.2 Forma dos impelidores	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 MATERIAL	31
3.2 METÓDOS.....	31
3.3 DIMENSIONAMENTO DO TANQUE	32
3.4 DIMENSIONAMENTO DO IMPELIDOR.....	33
3.4.1 Impelidor escolhido	33
3.4.2 Nível ou intensidade da agitação	34
3.4.3 Dimensionamento de um sistema de agitação	36
3.4.3.1 Volume do lote	37
3.4.3.2 Propriedades do fluido	37
3.4.3.3 Nível de agitação	38
3.4.3.4 Número de Reynolds	39
3.4.3.5 Número de bombeamento.....	40
3.4.3.6 Número de potência e potência requerida.....	42
3.4.3.7 Diâmetro mínimo do impelidor	44
3.4.3.8 Rotação do sistema de agitação	46
3.4.3.9 Potência do acionamento	47
3.4.4 Dimensionamento com vários impelidores e razão Z/T diferente de 1	47
3.5 DIMENSIONAMENTO DO EIXO DO AGITADOR	49
3.5.1 Introdução	49
3.5.2 Cálculo do diâmetro mínimo do eixo	49
3.5.3 Verificação da rotação crítica	52
3.5.4 Verificação da deflexão do eixo	53

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AGITAÇÃO	54
4.1.1 Dimensionamento do motor	54
4.1.2 Dimensionamento do eixo	60
4.1.2.1 Dados	60
4.1.2.2 Diâmetro mínimo do eixo	61
4.1.2.3 Verificação da rotação crítica	64
4.1.3 Bomba dosadora	65
4.1.3.1 Seleção da bomba dosadora.....	66
4.2 PLANO DE MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA.....	67
4.2.1 Manutenção do agitador	67
4.2.1.1 Plano de manutenção	67
4.2.2 Manutenção da Bomba	68
4.2.2.1 Plano de manutenção	69
5 CONCLUSÕES	70
6 REFERÊNCIAS	70

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

No segmento industrial, há muitos processos e operações que só se completam através de agitação e mistura de fluidos. Os maquinários empregados nos processos de mistura e agitação são instalados onde há necessidade de misturar, agitar, homogeneizar ou dissolver soluções líquidas com partículas sólidas ou não.

Especificamente, o processo de agitação pode ser categorizado por três graus de intensidades: o grau suave, médio ou violento.

Comumente, são equipamentos dimensionados de maneira específica para cada caso de aplicação. Assim podendo ser fornecido com uma gama de variações. Essas variações são encontradas na faixa de potência, de rotação, tipo e diâmetro de hélice, e haste de eixo dos equipamentos. As variações dessas características são diretamente relacionadas com as características do fluido de trabalho e o tipo de operação desejada.

Para que o dimensionamento seja realizado com êxito, é necessário que além das características citadas, o modo de agitação, a densidade e a viscosidade do fluido do processo também sejam conhecidas pois influenciam na definição e dimensionamento do equipamento.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

As operações de agitação e mistura são análogas e acontece de serem facilmente confundidas. Mesmo que o intuito dos dois processos seja de alguma maneira movimentar substâncias, existem algumas particularidades que diferenciam um do outro claramente.

A agitação tem a finalidade de agitar substâncias no mesmo estado físico ou não. Dessa forma, apenas com a agitação das substâncias não é garantido que o processo de mistura ou homogeneização ocorrerá.

Já na mistura, substâncias de dois ou mais estados físicos são aleatoriamente distribuídas dentro ou por meio uma da outra. Dessa maneira, ocorre uma mistura das substâncias que presumivelmente resulta em uma homogeneidade.

1.2.2 Objetivo específicos

Este trabalho aborda a elaboração do dimensionamento e de um plano de manutenção de um sistema de dosagem química de uma estação de tratamento de efluentes biológicos composto por um agitador, um tanque e uma bomba dosadora com a finalidade de remover cianeto do efluente na etapa final do tratamento da planta para que atenda os parâmetros ambientais de retorno do efluente ao meio ambiente ou parâmetros para o reuso no processo industrial.

1.3 JUSTIFICATIVA

Nos últimos anos a sociedade vem sofrendo com a escassez de água, produto do crescimento contínuo e desordenado da população e também das recentes variações climáticas que começaram a ocorrer e estão afetando todo o planeta. Essa mudança fomenta os impactos causados pelo efluentes que são gerados por atividades antrópicas. Ainda que tratados, os efluentes industriais podem provocar alterações indesejadas na qualidade da água disposta ao uso comum. Para que tudo isso ocorra dentro de uma maneira controlada e o mais segura possível, existem algumas exigências feitas e fiscalizadas por órgãos ambientais que implicam com a segurança e com o custo do processo também.

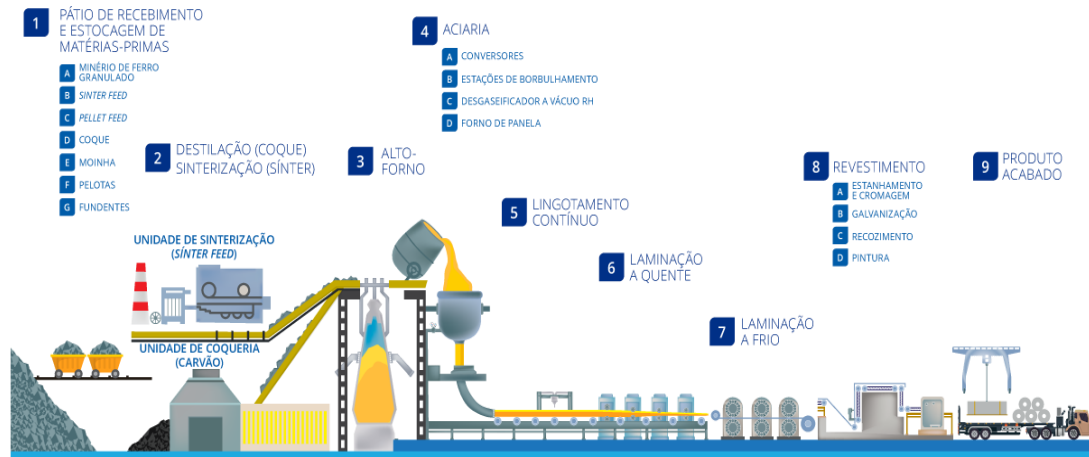
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SIDERURGIA

A Siderurgia é uma ramificação da indústria metalmeccânica que tem como propósito a produção e tratamento de aço e ferros fundidos. De acordo com a figura mostrada abaixo, há 9

etapas principais nas linhas de produção de uma usina siderúrgica, são elas: Coqueria, Sinterização, Alto-forno, Aciaria, Unidades de laminação e Revestimento.

Figura 1. Fluxograma do processo de produção de uma siderúrgica.



Fonte: CSN (2021).

2.1.1 Pátio de Matérias-Primas

No local denominado como pátio de matérias-primas é onde acontece o início do processo de produção da planta. Aqui acontece o recebimento, beneficiamento granulométrico, estocagem e homogeneização das matérias-primas e elementos utilizados no processo de produção do aço. Sendo o carvão mineral, minério de ferro e fundentes, o calcário o mais comum para isso, as principais matérias-primas do processo a serem recebidas e estocadas no pátio. A estocagem ocorre em locais abertos, os grãos são postos em pilhas até serem destinados as áreas de uso na produção.

2.1.2 Coqueria

Nessa etapa, é onde ocorre a produção do coque que é utilizado como insumo para reduzir o minério de ferro que é usado no alto forno. O coque é resultado da destilação e aglomeração do carvão. A coqueria tem como uma particularidade o fato do aquecimento do carvão, para dele ser retirado a matéria volátil, ser feito por fornos que são chamados de células, e esses serem extremamente estreitos e fechados. Com intercorrência à queima do carvão,

dentro das células é gerado o gás de coqueria que é utilizado como fonte de combustível nos queimadores das caldeiras das termelétricas e reaproveitado em outras linhas de produção.

2.1.3 Sinterização

A sinterização é onde ocorre o agrupamento de finos de minério de ferro para serem levados ao Alto-forno. O processo ocorre com a conjunção dos finos de minério e finos de carvão e de calcário sendo carregados na esteira de sinterização. Essa mistura é exposta a uma fonte de ignição e através do calor que é gerado da combustão do carvão, faz com que os finos de minério fundam e se tornem um composto do qual se tornará na sínter através do processo de britagem e peneiração. Após isso, a sínter obtida é carregada ao Alto-forno.

2.1.4 Alto-Forno

No Alto-forno, o minério de ferro em pelotas e sínter, o coque e os fundentes são levados até o topo do forno para serem descarregados e a junção desses elementos no interior do forno produz o ferro-gusa líquido. Esse ferro-gusa é transportado para Aciaria, e lá, é transformado em aço líquido.

2.1.5 Aciaria

Na fase do processo conhecida como Aciaria, o ferro-gusa vindo do alto-forno é recebido e sofre pré-tratamento de dessulfuração em umas estações específicas. Após isso, é carregado nos conversores de oxigênio para ser refinado e transformado em aço líquido. O aço líquido é tratado em equipamentos de processo de metalurgia secundária como os processos de desgaseificação, dessulfuração e decarbonetação para ajustar a temperatura, composição química e de parâmetros físicos, assim sendo possível que aço produzido alcance um grau de pureza e qualidade maior.

2.1.6 Lingotamento Contínuo

O lingotamento é a etapa onde ocorre a solidificação progressiva do aço através de moldes refrigerados e câmaras de spray de água. A solidificação do aço ocorre quando ainda em

seu estado líquido é vazado verticalmente dentro de um molde refrigerado com água, como mostrado no ponto 5 na figura 1. Esse molde possui uma abertura no topo e na base, com a ocorrência da remoção do calor, forma-se uma sólida pele externa ao veio de aço capaz de resistir ao calor e conter o aço líquido ainda presente no seu interior. O material passa a sofrer com a pressão do peso da coluna vertical do aço logo após a sua saída do molde. Assim, um conjunto de suportes definem qual será a largura e espessura da placa. Após isso, a placa é cortada de acordo com a especificação do produto requerido. Resumidamente, no lingotamento, é o local onde o aço líquido é transformado em placas de alta qualidade semiacabadas nas dimensões desejadas.

2.1.7 Laminação

Neste processo, os sólidos semiacabados vindos do Lingotamento e os lingotes e blocos são passados nos laminadores e assim transformados em uma gama extensa de produtos siderúrgicos classificados de acordo com sua forma e composição.

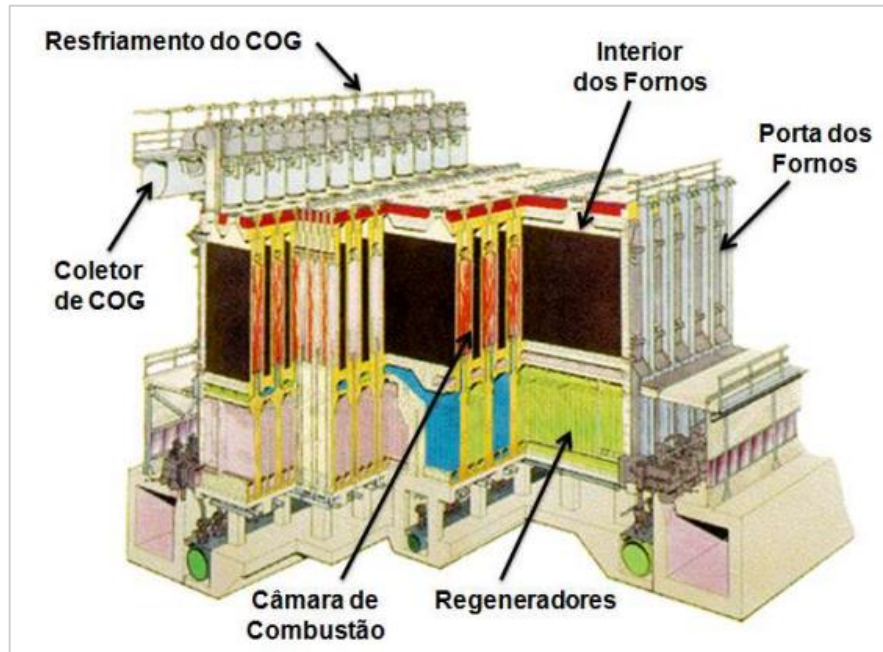
2.2 COQUERIA

A coqueria é onde ocorre o recebimento dos minérios, fundentes e carvão que ficam estocados no pátio de matéria primas. Geralmente o transporte dessas matérias primas até a coqueria é feito por transporte ferroviário até a coqueria, onde irá passar pelos processos de dosagem e britagem para que seja atingido um certo grau de granulometria adequada para que esse material possa ser destilado sem a presença de oxigênio em temperaturas próximas de 1300°C por um tempo de até 20 horas. Esse tempo varia em relação a eficiência do processo de destilação.

Após essa primeira etapa, o material é carregado através dos topos dos fornos verticais onde irá ocorrer a coqueificação e a remoção dos materiais voláteis, após o período da queima ocorre a desenformamento. O desenformamento é feito com a colocação de um embolo que é empurrado pelo carro de desenformamento auxiliado por um carro guia, depositando o coque no carro de apagamento que conduz o coque ainda incandescente até a torre de apagamento, onde jatos de água são utilizados para resfriar o coque fazendo com que não estejam mais incandescentes. Hoje, em um número reduzido de usinas utilizam-se o sistema de apagamento

ascendente, que consiste em bascular o coque em brasa em uma espécie de poço, onde o material será resfriado através da queda livre, mas esse método não é muito comum.

Figura 2. Bateria de Forno de Coque.



Fonte: COSTA, (2009).

Após ser resfriado, o coque pode retornar ao Pátio de matérias-primas para posteriormente ser carregado no Alto-forno.

No processo de da queima do coque e remoção de materiais voláteis, além do coque a ser empregado como combustível para redução de minérios nos Altos Fornos, como consequência do processo de coqueificação, é gerado o Gás de Coqueria, um subproduto com hidrocarbonetos em abundância, e que em usinas integradas são tratados para que os destilados desse processo gerem receita através da comercialização ou são tratados e reutilizados como fonte de energia em outros processos da usina. A coleta desses gases acontece no topo dos fornos verticais de coque e são enviados a uma planta carboquímica onde ocorrerá a destilação e recuperação dessas substâncias para reaproveitamento industrial ou venda.

Com o passar do tempo, algumas passaram a utilizar fornos de coqueria com pressão negativa, isso significa que quando aberto para desenformamento, não tem ocorrência de emissões fugitivas, ao invés disso, acontece uma formação de fluxo de ar de fora para dentro

do forno. Nesses fornos não ocorre a destilação dos gases durante a coqueificação, os gases gerados no interior de fornos são reaproveitados na queima do carvão, eliminando a formação de hidrocarbonetos.

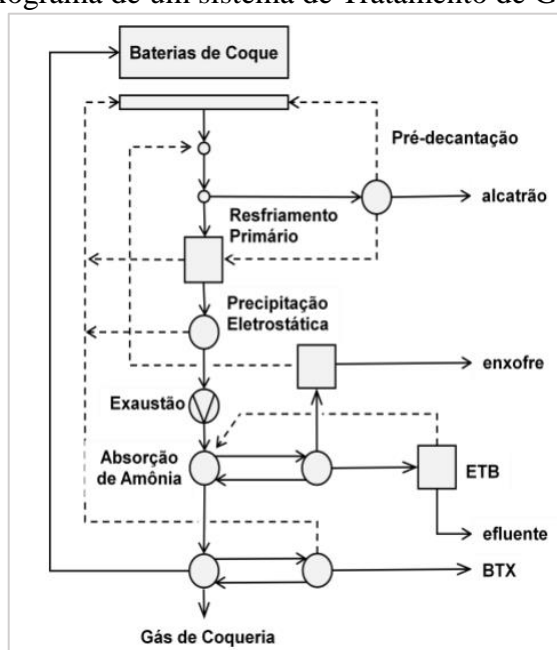
2.3 CARBOQUÍMICO

Na planta de carboquímicos é onde acontece o tratamento e a limpeza dos Gás de coqueria, dando origem os vários subprodutos que são do interesse industrial para geração de outros produtos, receitas e reuso no processo da planta.

O gás é um subproduto oriundo do processo da queima do carvão. No cenário de uma usina integrada, o gás é de suma importância pois gera receita e é utilizado como combustível em outros setores da indústria substituindo ou diminuindo o uso de combustíveis que são mais caros, como por exemplo o gás natural.

O Gás de Coqueria, é gerado nos fornos de coque a aproximadamente 950°C, no carboquímico é resfriado a 85°C e os seus subprodutos, alcatrão e licor amoniacal, são recuperados a partir de 30°C através do processo de separação por decantação entre os líquidos que compõem esta fração. Após isso, é submetido a uma sequência de tratamentos para que possa ser empregado como combustível, sendo os principais: resfriamento primário, exaustão, precipitação eletrostática, absorção de amônia, absorção de óleos leves e dessulfuração.

Figura 3. Fluxograma de um sistema de Tratamento de Gás de Coqueria.



Fonte: DIEMER et al., (2004)

O setor de Carboquímicos na siderurgia, pode ser dividido em:

- a) Limpeza de Gases
- b) Remoção de Amônia
- c) Óleos Leves
- d) Dessulfuração
- e) Destilação de Alcatrão.

Os principais produtos obtidos após a conclusão do processo carboquímico são: Amônia, Cianetos, Benzeno, Tolueno, Xileno, Piche, Naftaleno, Fenóis, Naftas e Óleo Creosoto, elementos que possuem relevância financeira para a indústria.

2.4 TRATAMENTO DOS EFLUENTES ORIUNDOS DA COQUERIA

A destruição dos poluentes persistentes nos efluentes industriais tornou-se desejável e obrigatória. Esta pode ser realizada por métodos químicos e/ou biológicos.

2.4.1 Tratamento Biológico

No tratamento biológico os compostos orgânicos são removidos dos efluentes da coqueria através da oxidação biológica feita pelos microrganismos, porém a eliminação dos componentes xenobióticos dos resíduos industriais é de difícil execução devido ao fato de que os microrganismos são muito sensíveis a diversos fatores ambientais tais como flutuação da temperatura, pH, composição química e biológica tanto qualitativa como quantitativa (consórcio 12 microbiano do meio). Os microrganismos são também sensíveis à presença de diversas substâncias tóxicas como os fenóis, a amônia, o cianeto, tiocianeto e os metais pesados. Sabe-se que a estabilização ou a oxidação de rejeitos é o resultado de autopurificações naturais múltiplas. A primeira fase é a sedimentação. A decomposição do sedimento por microrganismos transforma os rejeitos em resíduos inertes e substâncias orgânicas solúveis, que por sua vez são processadas e metabolizadas, por outros organismos. Esta decomposição do material orgânico é um trabalho feito por microrganismos aeróbicos, anaeróbicos e aeróbicos facultativos, estes últimos, capazes de crescerem em presença de pequenas quantidades de oxigênio. Podem ser citados alguns tipos de processos biológicos, como as lagoas de estabilização, aeração modificada, lagoas de oxidação, filme imobilizado submerso e aerado, digestão anaeróbica e outros.

2.4.2 Tratamento Físico-Químico

Os tratamentos de efluentes feitos através dos processos físico-químicos são aplicados com intuito de remover partículas coloidais, sólidos em suspensão e contaminantes orgânicos ou inorgânicos. Os principais tipos deste tipo de tratamento e água e efluentes são: coagulação, floculação, decantação/flotação e filtração. Os principais contaminantes de coqueria que podem ser removidos quimicamente são os compostos de cianeto e fluoreto que são tratados através de agitação em tanques de coagulação.

Analisando-se inicialmente o caso do cianeto, é bastante conhecida a importância da remoção destes compostos para preservação da saúde das populações abastecidas pelas águas em que efluentes são despejados. Os compostos de cianeto são tóxicos a vida de todos os animais, pois impedem que ocorra o transporte de oxigênio no metabolismo. As formas de cianeto mais comumente encontradas nos processos industriais, são:

a) Cianetos livres: altamente tóxicos pela maior capacidade de hidrólise e liberação de cianeto de hidrogênio para a atmosfera.

b) Cianetos dissociáveis em ácidos fracos: são os que podem ser determinados como cianeto livre após a decomposição em meio ácido e destilação. Apresentam diferentes graus de estabilidade e tendência à quebra liberando HCN.

c) Complexos fortes: são os menos tóxicos, por serem de dissolução lenta. Os primeiros processos de tratamento exploraram esta propriedade para remover cianetos por complexação.

De acordo Dzombak (2005), os principais processos de remoção química de cianetos estão descritos na tabela 1.

Tabela 1. Principais processos químicos para remoção de Cianetos.

PROCESSO	REAÇÃO
Complexação com sal de ferro	$3Fe^{3+} + 3[Fe(CN)_6]^{-} \rightarrow Fe_4[Fe(CN)_6]_3 \downarrow$
Oxidação com dióxido de enxofre ou sulfato ferroso e ar na presença de sais de cobre	$CN^{-} + SO_2 + O_2 + H_2O \rightarrow CNO^{-} + H_2SO_4$
Cloração alcalina na presença de hipocloritos	$CNCl + ClCNCl + 2OH^{-} \rightarrow CNO^{-} + Cl^{-} + H_2O$
Remoção com peróxido de hidrogênio	$CN_{-} + H_2O \rightarrow CNO^{-} + H_2O$

Fonte: DZOMBAK, (2005).

Já o caso dos fluoretos, estes são facilmente encontrados no carvão, sendo responsável por significativos danos ambientais nos países que utilizam este material como combustível. A exposição a fluoretos livres de maneira excessiva pode ser fatal para os seres humanos e todas as formas de vida, visto a sua reatividade com cálcio e os efeitos deletérios para a estrutura óssea dos animais vertebrados.

Segundo Meenakshi e Maheshwari (2006), os fluoretos podem ser removidos de águas residuárias industriais, utilizando diversos métodos, dentre os quais se destaca: redução via

alumina ativada, osmose reversa ou outras tecnologias de membranas compatíveis, troca iônica e precipitação com cálcio, sendo este último o processo mais difundido.

Os métodos utilizados para a remoção do fluoreto foram os através da adição de diversos reagentes, conforme roteiro proposto em artigo publicado por Mohapatra et al (2009). De acordo com os resultados obtidos ficaram constatados uma eficiência idêntica para os casos supramencionados. Os compostos a base de alumínio são os mais indicados para a remoção dos fluoretos existentes em efluentes, sendo o sulfato de alumínio, o mais aplicável. No entanto, para concentrações mais baixas (até 4 mg/L) os compostos a base de magnésio são também indicados.

O sulfato de alumínio e o sal de cálcio são aplicados em combinação, formando componentes insolúveis, ou seja, existe uma formação de flocos que são removidos por decantação e filtração. Para aplicabilidade do modelo deve-se ter atenção com alguns fatores que podem interferir na remoção do composto, tais quais: diferentes concentrações de fluoreto na água; velocidade da adição de reagentes e agitação da 46 solução; o tempo de contato do reagente com a solução varia; o pH não será sempre o mesmo; e nem todos os efluentes necessitam ser filtrados.

2.5 TANQUES DE TRATAMENTO QUÍMICO EM ETES

Na indústria metalmecânica tanques de remoção de um determinado contaminante de um efluente são compostos por um sistema de agitação mecânica, dosagem química e uma malha de instrumentos que controlam os parâmetros operacionais da ETE.

Basicamente, o sistema é composto por um tanque onde o efluente é recebido para o tratamento, nesse tanque é preciso um agitador e uma tubulação para dosar o composto químico adequado para eliminar o contaminante do fluido. Essa tubulação, é a rede de saída de um sistema de dosagem química que contém como componente principal uma bomba dosadora. Também essencial para o funcionamento adequado do sistema é a malha de instrumentação geralmente composta por medidores de pH, medidores de temperatura e medidores de vazão.

Com a junção desses itens, um sistema de agitação e dosagem é formado para tratar os efluentes com a finalidade de serem descartados ao meio ambiente ou reutilizados no processo da empresa como ocorre nos casos das indústrias integradas.

2.6 AGITAÇÃO E MISTURA

Na indústria, os conceitos de agitar e misturar são considerados sinônimos. Na verdade, de acordo com McCabe (1993), agitar e misturar são completamente diferentes. A definição de agitação é um processo mecânico que faz com que o fluido se mova em qualquer direção (geralmente cíclica), promovendo a dispersão e a mistura. No entanto, se houver movimento aleatório entre as duas ou mais fases inicialmente separadas, haverá mistura. Esses materiais ainda podem ser combinados no produto final, e ainda são separados no produto final, mas estão uniformemente distribuídos. Geralmente, o processo de mistura pode ter as seguintes finalidades:

- Mistura de dois ou mais sólidos (pós secos);
- Mistura de líquidos imiscíveis;
- Mistura de líquidos e sólidos (pastas e suspensões);
- Dispersão de gases em líquidos;
- Promover transferência de calor (através da convecção);
- Promover transferência de massa (através da convecção);
- Reduzir aglomerado de partículas;
- Acelerar reações químicas;
- Obter materiais com propriedades diferentes da matéria-prima original.

As diferentes operações de mistura podem ser caracterizadas pelos seus aspectos físicos e químicos e se dividem em quatro grupos conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Diferentes operações de mistura.

Tipo de aplicação	Característica física	Característica Química
Líquido/sólido	Suspensão	Dissolução
Gás/Líquido	Dispersão	Absorção
Líquidos Miscíveis	Mistura	Reação
Líquidos Imiscíveis	Emulsão ou dispersão	Extração
Circulação	Bombeamento	Transferência de calor

Fonte: MCCABE, 1993.

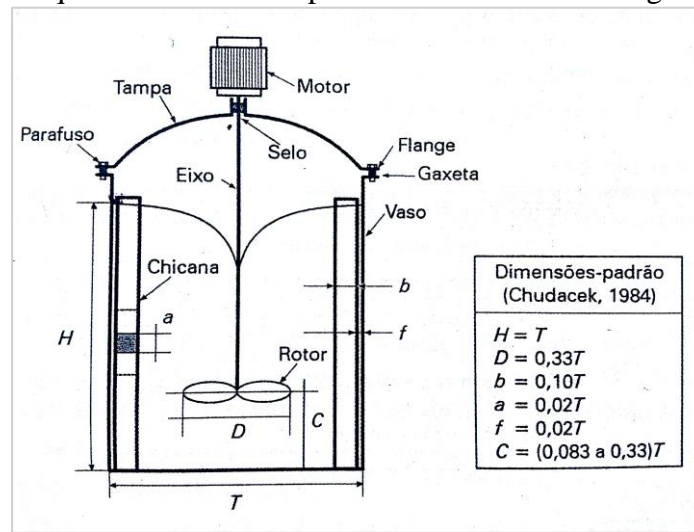
2.6.1 Esquema geral de um tanque de agitação

O sistema padrão de mistura de líquidos inclui as seguintes peças: motor, eixo, recipiente, rotor e acessórios (vedações, gaxetas e peças internas como defletores, serpentinas, etc.). Devido à necessidade de aplicações especiais ou agitação de fluidos complexos (suspensão, suspensão aerada ou dispersão de gás em líquido), esses itens podem sofrer algumas alterações. As vedações e gaxetas são importantes no processo de liberação de gás, pois esses gases não vazam. Se houver turbulência na mistura, são utilizados defletores, o que leva a um maior consumo de energia (TERRON, 2012). Um diagrama esquemático contendo esses elementos e alguns de seus parâmetros geométricos é usado no projeto padrão de um tanque agitado, conforme mostrado na Figura 4.

Para todos os tipos de processos que ocorrem no tanque, essas relações podem nem sempre ser ideais. Em um sistema líquido-gás, a altura do líquido é cerca de três vezes o diâmetro do tanque.

O projeto do sistema de mistura é realizado em várias etapas: Primeiro, selecione o tipo de agitador (lâmina, turbina, etc.) e selecione as condições de operação (rotação) de acordo com a finalidade do processo (mistura, emulsificação, aquecimento), transmissão, bombeamento, cisalhamento de partículas, etc.). Isso completa o tamanho do sistema e a energia consumida na mistura. Parâmetros como a potência consumida durante o processo de mistura dependem do padrão de vazão no tanque e da razão geométrica do equipamento.

Figura 4. Esquema e dimensões padrão de um sistema de agitação de líquidos.



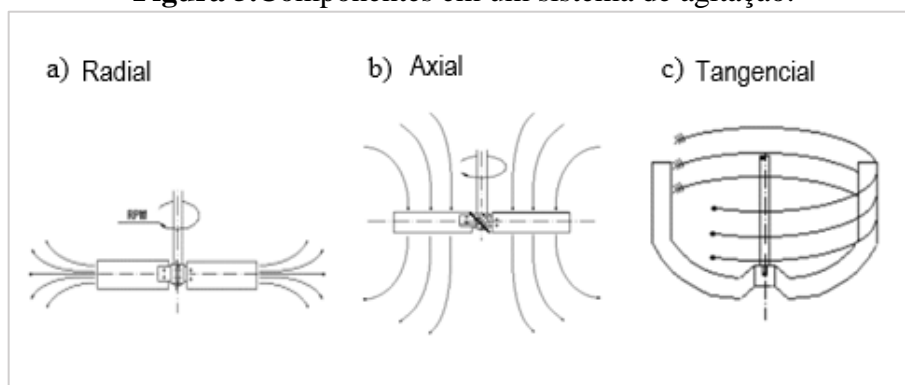
Fonte: TERRON, (2012).

2.6.2 Classificação dos Agitadores

Segundo Martini (2010), um agitador, impulsor ou rotor é um elemento fixado em um eixo que fará movimento sobre o líquido do tanque. O motor transfere o movimento para o eixo, o que faz com que o agitador gire. Existem muitos tipos de rotores, e sua classificação e descrição também são diferentes. Basicamente, eles podem ser diferenciados de acordo com o tipo de fluxo (radial, axial e tangencial), forma (pá, hélice, turbina, âncora) ou método de mistura.

2.6.2.1 Tipo de escoamento

O sistema de agitação pode ter três componentes de fluxo diferentes: axial, radial e tangencial, conforme mostrado na Figura 5. Dependendo do agitador, essa força pode aparecer sozinha ou em conjunto, mas um ou mais deles não (JÚNIOR et al., 2012).

Figura 5.Componentes em um sistema de agitação.

Fonte: MARTINI, (2010).

O fluxo axial (Figura 5b) empurra a massa líquida para o fundo do tanque. Este tipo de agitação produz menor consumo de energia e alto grau de homogeneização em todo o tanque de mistura, resultando em menos áreas de estagnação, principalmente no caso de defletores. Eles não causarão muitos danos ao produto e podem ser usados na maioria dos processos de mistura, como mistura de produtos líquidos, suspensão de sólidos e transferência de calor.

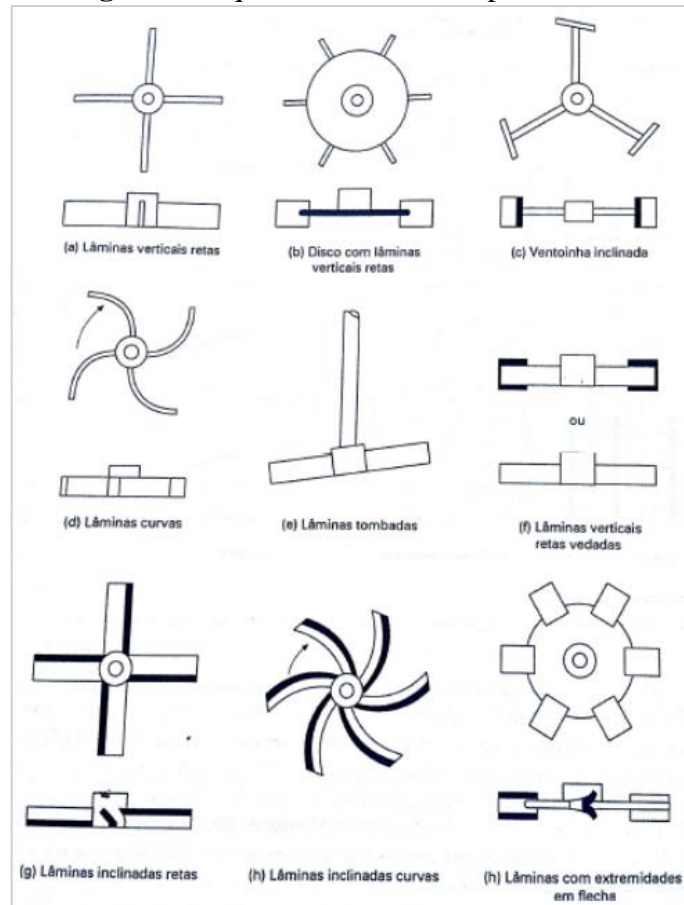
O impulsor, que é dominado por fluxo tangencial (Figura 5c), opera preferencialmente em fluxo laminar, a fim de misturar produtos de alta viscosidade geralmente acima de 50.000 cp. Eles empurram o material em um movimento circular paralelo à parede do tanque de mistura. Suas características fazem com que os equipamentos tenham alto consumo de energia, e por operarem em baixas velocidades, requerem alto torque de acionamento, logo o custo do investimento é alto.

O fluxo radial (Figura 5a) empurra certo volume de líquido para a parede do tanque, que possui como características alto consumo de energia, alta força de cisalhamento e alta capacidade de dispersão. Devido às suas altas forças de cisalhamento, impulsores com esses ingredientes principais podem apresentar maior corrosividade ao produto, dependendo de suas características. Geralmente são utilizados em processos que requerem dispersão, como dispersão de gases, transferência de massa, dissolução de materiais sólidos agregados e mistura em tanques com baixo nível de líquido (MARTINI, 2010).

2.6.2.2 Forma dos impelidores

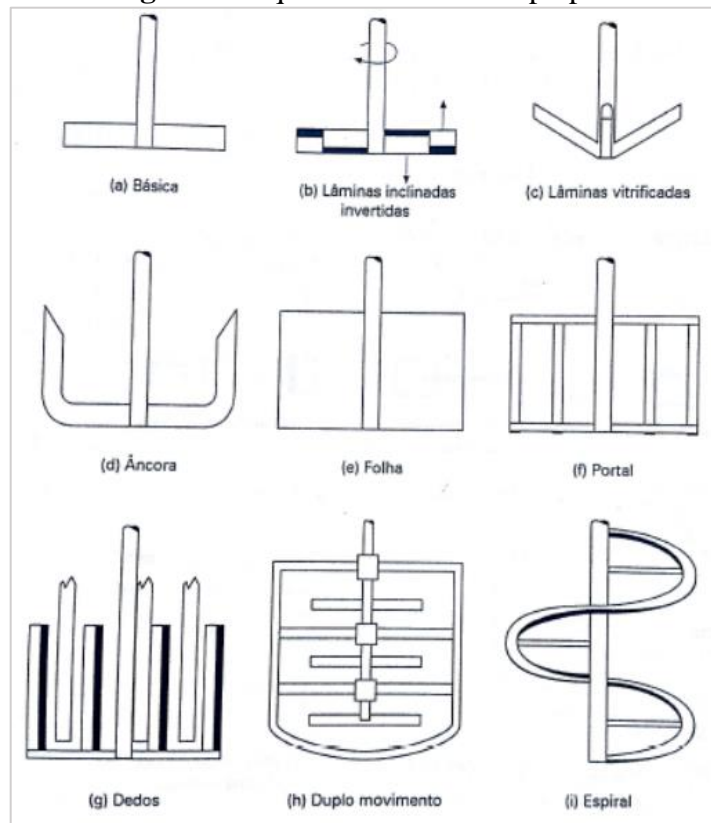
Os impulsores existentes têm as mais diversas formas e seu uso varia de acordo com suas aplicações. Os diferentes tipos de classificação podem ser vistos nas ilustrações das Figuras 6, 7, 8 e 9.

Figura 6.Esquema dos rotores tipo turbinas.



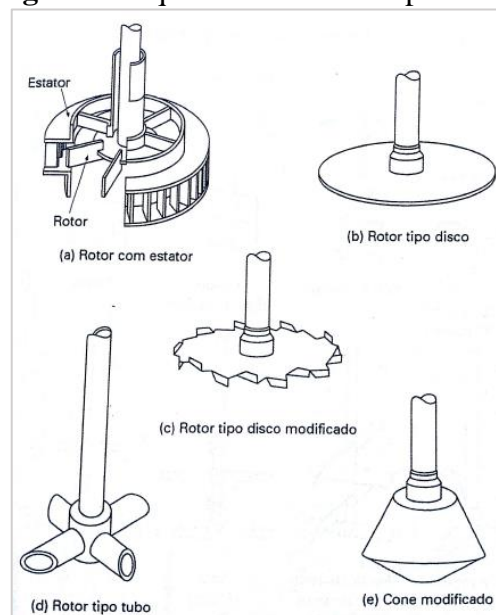
Fonte: TERRON, (2012).

Figura 7.Esquema dos rotores tipo pás.



Fonte: TERRON, (2012).

Figura 8.Esquema de rotores específicos.



Fonte: TERRON, (2012).

De acordo com Fellows (2008), a escolha do tipo e tamanho corretos de agitador depende do tipo e quantidade de fluido a ser processado e da velocidade de operação necessária para atingir o grau desejado de mistura com consumo mínimo de energia. Devido ao grande número de aplicações em todas as esferas da vida na indústria, existem muitos tipos de agitadores.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Para a conveniência do cálculo, a mistura de água é considerada um fluido newtoniano e sua forma será calculada usando o número de Reynolds no futuro. Entre as várias misturas preparadas no agitador, a seleção de uma mistura apropriada é baseada no tamanho do sistema de agitação, ou seja, o tamanho do líquido miscível quando a diferença de densidade entre eles é inferior a 0,6. Em um líquido com viscosidade próxima à da água, ondulações são produzidas na superfície.

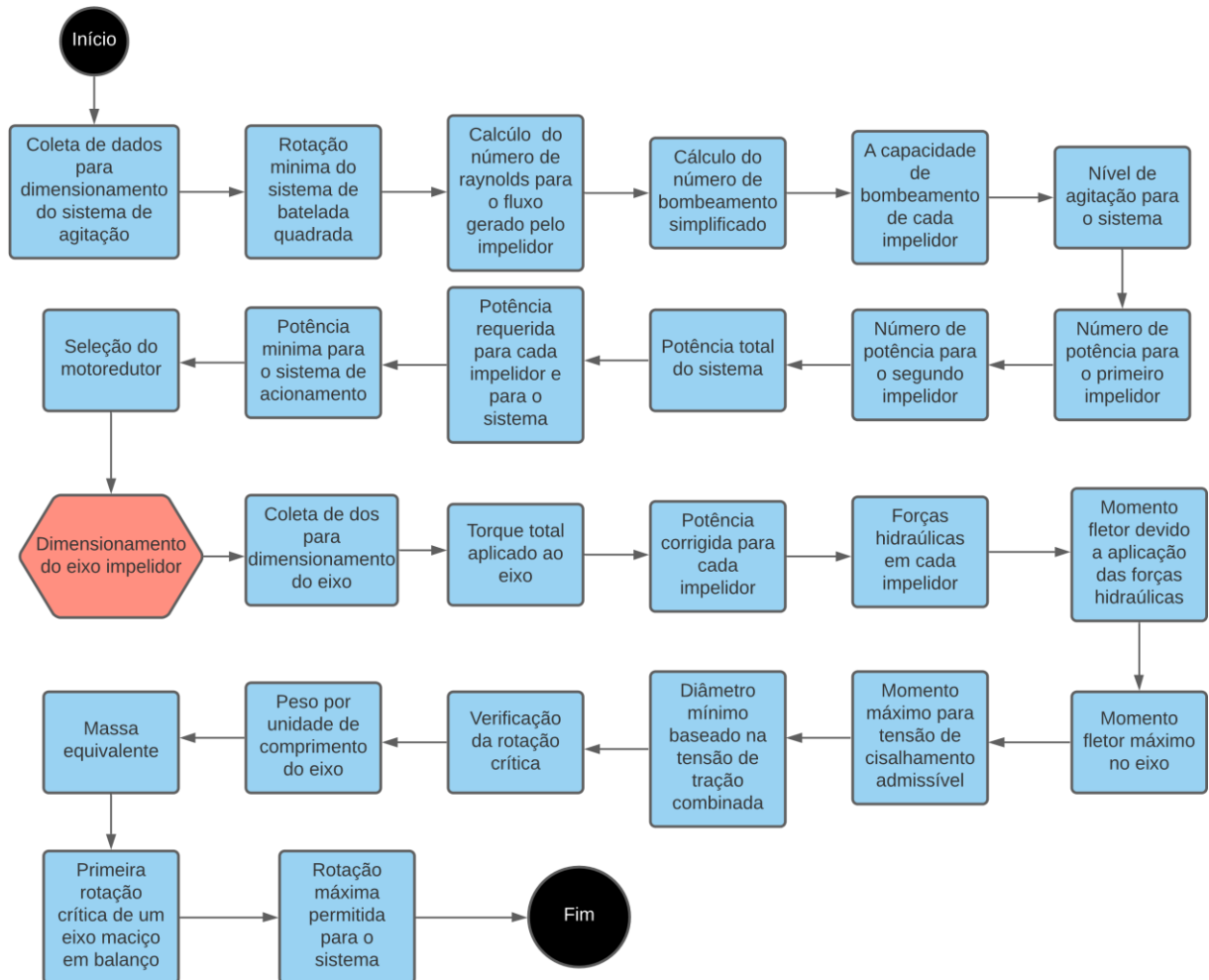
As informações técnicas dos equipamentos utilizados foram retiradas dos catálogos da empresa Bomax, disponíveis no site da empresa.

O dimensionamento do agitador foi realizado com base nas informações retiradas dos livros *Dimensional Analysis for Fluid Agitation Systems*, *Mechanical Design of Mixing Equipment*, *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice* e do material de apoio do curso de agitação de fluidos notas do curso cérebro engenharia com o auxílio e orientação do Engenheiro Naval António Carlos Basso da Cunha Leal. A bomba foi selecionada através das informações disponibilizadas no site da Grabe.

3.2 METÓDOS

Na figura 9, temos a metodologia aplicada para o dimensionamento do agitador através da elaboração de um Fluxograma que expõe as etapas dos cálculos:

Figura 9. Fluxograma de dimensionamento do agitador.

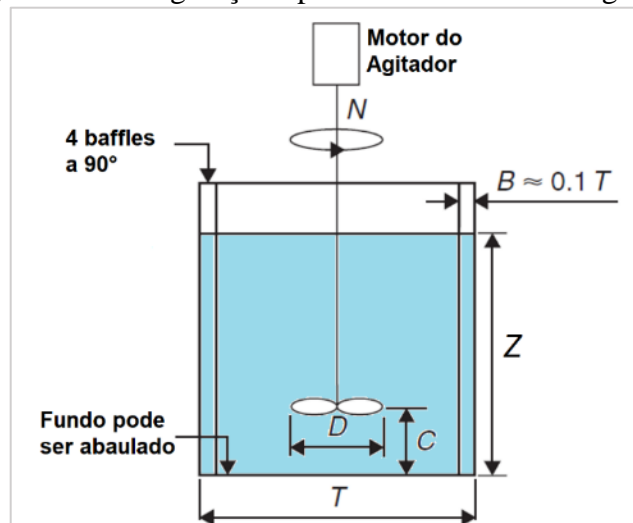


Fonte: Autores.

3.3 DIMENSIONAMENTO DO TANQUE

A Figura 10 mostra as variáveis que são utilizadas no dimensionamento do sistema de agitação do tanque:

Figura 10. Configuração típica de um sistema de agitação



Fonte: CULLEN, 2009.

Onde N é a velocidade de rotação do impulsor (rps), B é a largura do defletor (m), T é o diâmetro interno do tanque de água (m), D é o diâmetro do impulsor (m) e C é a altura do impulsor em relação ao fundo do tanque (m), Z é a altura do fluido sendo agitado (m). Para o dimensionamento do sistema, as relações geométricas mais utilizadas (JÚNIOR, 2012) são:

$$D/T = \text{de } 1/4 \text{ a } 1/2 \text{ (} 1/3 \text{ é mais comum)}$$

$$Z/T = 1$$

$$C/T = \text{de } 1/6 \text{ a } 1/2 \text{ (} 1/3 \text{ é o mais comum)}$$

$$B/T = \text{de } 1/10 \text{ a } 1/12$$

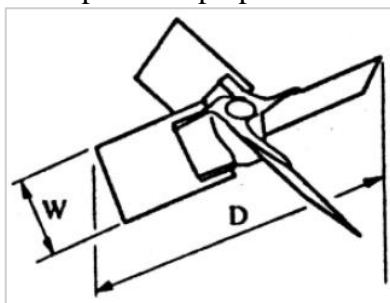
3.4 DIMENSIONAMENTO DO IMPELIDOR

3.4.1 Impelidor escolhido

Dada a grande variedade de impulsores disponíveis no mercado, o tipo de impulsor mais adequado foi considerado com base na literatura e nos dados disponíveis para seu projeto. Portanto, o impulsor selecionado é um tipo de lâmina inclinada de 45° com 4 pás retas. Sabe-se também que, além das pás, hélices e rodas de turbinas são utilizadas em mais de 80% das

aplicações industriais (JÚNIOR, 2012). A Figura 11 mostra o impulsor selecionado e seu tamanho, e a quadro 1 lista alguns valores de referência para Renault, potência, faixa de viscosidade e aplicações principais.

Figura 11. Impelidor tipo pás retas inclinadas.



Fonte: Apostila de Operações Unitárias 2, UNICAMP.

Tabela 3. Características de alguns impelidores.

Tipo de Impelidor	Faixa de viscosidade (Pa.s)	Rotação típica (rpm)	Potência (kW)	Utilização Principal
Naval	< 2	300 a 1750	0,2 a 2,25	Bombeamento
Pás	< 1000	20 a 150	0,75 a 375	Suspensão de sólidos
Turbina	< 50	100 a 350	1 a 150	Transferência de massa

Fonte: JUNIOR, 2012.

Segundo Paul (2004), o impulsor de pás é composto por um centro e um número par de pás, as quais podem ser soldadas ou aparafusadas e são mais leves que hélices de mesmo diâmetro. O ângulo entre a lâmina e a horizontal pode ser entre 10° e 90° , mas o ângulo mais comum é de 45° . Tem dois componentes, radial e axial, por isso é considerado um impulsor de fluxo misto.

3.4.2 Nível ou intensidade da agitação

O dimensionamento de impelidores pode ser feito utilizando resultados de ensaios com modelos de escala reduzida ou pode ser utilizado o método de fluido dinâmica computadorizado

(CFD). Embora os estudos com CFD estejam em franca expansão, seu uso ainda fica restrito a casos especiais e a trabalhos acadêmicos.

Três parâmetros característicos devem ser estabelecidos para qualquer categoria ou problema de agitação: tamanho, dificuldade e resposta dinâmica. O tamanho do problema é o volume equivalente, V_{eq} , que representa a massa total de fluido a ser agitado, que é igual ao produto da gravidade específica, S_g , e o volume real, V :

$$V_{eq} = S_g V \quad (1)$$

O parâmetro que representa a dificuldade para aplicações de mistura é a viscosidade do fluido, μ . Estes dois parâmetros estabelecem as características da batelada (lote) do fluido.

O terceiro parâmetro, que representa resposta dinâmica, quantifica o que deve ser feito ao lote em termos de intensidade de agitação. A resposta dinâmica para problemas de mistura e movimento é a velocidade média da massa de fluido, que é definida como a capacidade efetiva de bombeamento do impelidor dividida pela área da seção transversal de um tanque de batelada quadrada. Para simplificar a designação da intensidade de agitação, foi definida uma escala de um a dez de níveis de agitação. Os níveis de agitação para problemas de mistura e movimento são diretamente proporcionais à velocidade do fluido em massa.

A escala de agitação de um a dez representa os níveis típicos de intensidade de agitação. O nível de agitação igual a um representa a agitação mínima necessária para mover todo o lote de líquido, e o nível de agitação igual a dez é o nível prático máximo de agitação para a maioria dos requisitos do processo. A mudança incremental entre um nível e o próximo, por exemplo, de quatro para cinco, é a mudança mínima necessária provocar intensidades de agitação observavelmente diferentes. A escala de agitação e velocidade do fluido em massa pode ser relacionada aos requisitos de processo típicos (quadro 1). Esta tabela foi elaborada baseado em observações e análises feitas ao longo do tempo por diversos pesquisadores e fabricantes de agitadores.

Quadro 1.Relação entre o nível de agitação e o tipo de processo.

Nível de Agitação	Velocidade Média ft/min (m/min)	Descrição
1	6 (1,8)	Os níveis 1 e 2 são característicos de aplicações que requerem uma velocidade mínima do fluido para realizar o processo. ✓ Mistura de fluidos miscíveis com diferença de gravidade específica menor que 0,1. ✓ Mistura de fluidos miscíveis se a viscosidade do fluido mais viscoso é menor do que 100 vezes a do outro fluido. ✓ Controle das propriedades da batelada já processada. ✓ Movimentação do fluido sem turbulência.
2	12 (3,7)	
3	18 (5,5)	Os níveis de 3 a 6 são característicos de grande parte dos processos da indústria química. ✓ Mistura de fluidos miscíveis com diferença de gravidade específica menor do que 0,6. ✓ Mistura de fluidos miscíveis se a viscosidade do fluido mais viscoso é menor do que 10.000 vezes a do outro fluido. ✓ Suspensão de até 2% de sólidos com razão de sedimentação de 2 a 4 ft/min. ✓ Produz ondulações na superfície de líquidos de baixa viscosidade.
4	24 (7,3)	
5	30 (9,1)	
6	36 (11,0)	
7	42 (12,8)	Os níveis de 7 a 10 são característicos de aplicações que requerem altas velocidades do fluido para completar o processo, como um reator crítico. ✓ Mistura de fluidos miscíveis com diferença de gravidade específica menor do que 1,0. ✓ Mistura de líquidos miscíveis se a viscosidade do fluido mais viscoso é menor do que 100.000 vezes a do outro fluido. ✓ Suspensão de até 2% de sólidos com razão de sedimentação de 4 a 6 ft/min. ✓ Produz agitação superficial em líquidos de baixa viscosidade.
8	48 (14,6)	
9	54 (16,5)	
10	60 (18,3)	

Fonte: HICKS, MORTON e FENIC, 1976, traduzida pelos autores.

3.4.3 Dimensionamento de um sistema de agitação

O dimensionamento de um sistema de agitação leva em consideração as seguintes variáveis:

- a) Volume do lote a ser processado;
- b) Propriedade do fluido;
- c) Nível ou intensidade de agitação;
- d) Rotação do sistema;
- e) Número de bombeamento;
- f) Número de potência e potência requerida.

O procedimento a seguir apresenta o procedimento para o dimensionamento de um impelidor considerando que o processo é feito em um tanque de batelada quadrada (altura do líquido é igual ao diâmetro do tanque).

3.4.3.1 Volume do lote

Este é o fator mais significativo na determinação do tamanho do lote de fluido que deve ser agitado. Os cálculos do projeto são baseados em uma geometria de lote quadrado, ou seja, altura do líquido igual ao diâmetro do tanque. Para geometrias diferentes de um lote quadrado, ajustes subsequentes no número e localização dos impulsores, de acordo com o procedimento de projeto, podem ser feitos uma vez que a potência e a velocidade são determinadas. A fórmula para o volume em metros cúbicos com base no diâmetro do tanque (9) em metros, para uma batelada quadrada, pode ser expressa como:

$$V = \frac{\pi}{4} T^3 \quad (2)$$

Reorganizando esta expressão e resolvendo o diâmetro do tanque, tem-se o diâmetro equivalente de tanque de batelada quadrada:

$$T = \frac{4}{\pi} V^{1/3} \approx 1.084 V^{1/3} \quad (3)$$

Este valor será usado para determinar a área da seção transversal do tanque e a razão do diâmetro do rotor para o tanque (D/T).

3.4.3.2 Propriedades do fluido

As propriedades do fluido utilizadas no dimensionamento de um sistema de agitação são a densidade e a viscosidade dinâmica do fluido. Os valores a serem utilizados no dimensionamento devem considerar as variações dos valores destas propriedades com a temperatura envolvida no processo.

Embora a densidade seja utilizada no cálculo do número de Reynolds, NRe , que é a variável independente para as correlações de projeto empírico, o efeito mais significativo é a influência direta da densidade do líquido na potência do agitador. Baseado no número de

potência que representa uma relação entre a potência, a velocidade e o diâmetro do agitador, a densidade do líquido tem um efeito direto na potência necessária para uma determinada aplicação. Se o diâmetro do impelidor e a velocidade de operação estabelecem as características de fluxo, então os requisitos de energia estão relacionados a essas mesmas variáveis vezes a densidade do fluido.

A viscosidade dinâmica do fluido é a variável de projeto associada à dificuldade de movimentação do fluido. A viscosidade dinâmica tem um efeito importante no valor do número de Reynolds, que por sua vez é a variável correlacionada para o número de bombeamento e ao fator de potência da viscosidade. Como o número de Reynolds é inversamente proporcional à viscosidade dinâmica, ele diminui à medida que a viscosidade dinâmica aumenta, resultando em valores de número de bombeamento mais baixos e fatores de potência mais altos. As mudanças no número de bombeamento e no fator de potência resultam em requisitos de potência mais elevados para a mesma intensidade de agitação em um lote de líquido de alta viscosidade.

3.4.3.3 Nível de agitação

O nível de agitação é um número que varia de um a dez que deve ser especificado de acordo com o resultado do processo necessário. O nível de agitação é convertido na velocidade média da massa e na capacidade de bombeamento, que estabelece um diâmetro mínimo do impelidor necessário para uma determinada rotação. Finalmente, a potência requerida pode ser determinada para o diâmetro e a rotação do impelidor do sistema de agitação.

O nível de agitação, que é usado para quantificar a resposta dinâmica, é diretamente proporcional à velocidade média da massa. A relação entre a velocidade média de massa (v_m), em unidades de m/s, e o nível de agitação é dada por:

$$v_m = 0.03N_A \quad (4)$$

3.4.3.4 Número de Reynolds

Descoberto por Osborne Reynolds em 1883, o número de Reynolds (NRe) é um número adimensional usado em mecânica dos fluidos para o cálculo do regime de um determinado fluido, podendo ser esse escoamento: dentro de uma tubulação ou sobre uma superfície.

Em sistemas de agitação, o número de Reynolds é a variável independente utilizada para expressar os demais parâmetros adimensionais, como o número de bombeamento e o número de potência.

Para sistema agitados, o número de Reynolds (NRe) é dado em função das propriedades do fluido e do diâmetro e rotação do impelidor.

$$N_{Re} = \frac{\rho ND^2}{\mu} \quad (5)$$

A definição do regime de escoamento em função do número de Reynolds é um pouco diferente (Quadro 2) dos valores usualmente adota dos em escoamento de tubulações. Os valores mostrados são baseados em observação experimental e análise de diversos equipamentos em operação (CÉREBRO-ENGENHARIA, 2018).

Quadro 2. Classificação do escoamento em função do número de Reynolds.

Faixas	No. Reynolds (N_{Re})	Classificação das Faixas do Regime
1	$N_{Re} < 30$	Regime totalmente laminar
2	$30 < N_{Re} < 100$	Regime de transição com predominância laminar
3	$100 < N_{Re} < 1.000$	Regime de transição médio
4	$1.000 \leq N_{Re} \leq 20.000$	Regime de transição com predominância turbulenta
5	$N_{Re} \geq 20.000$	Regime totalmente turbulento

Fonte: Curso de Agitação de Fluidos, Cérebro-Engenharia, 2018.

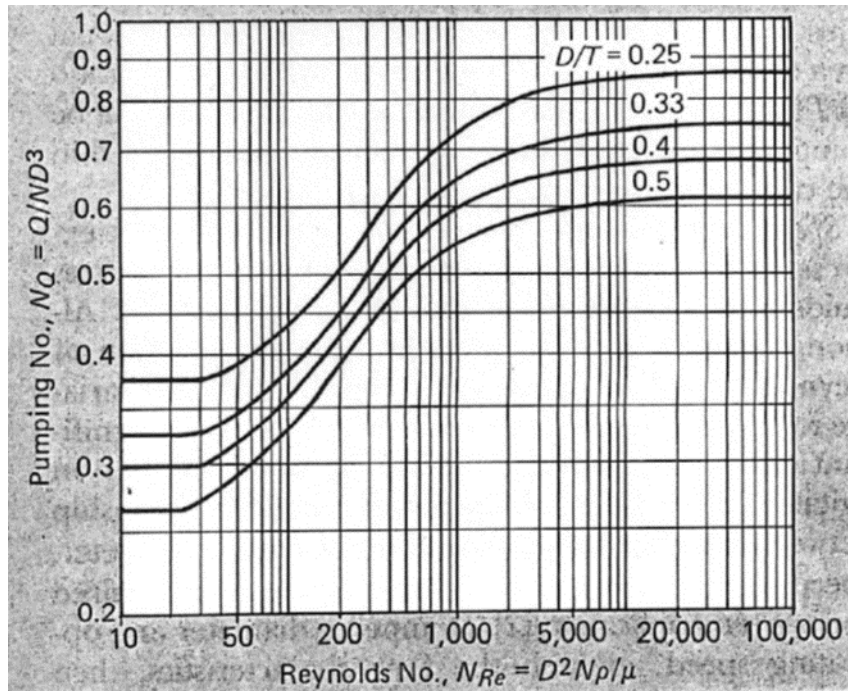
3.4.3.5 Número de bombeamento

O número de bombeamento é obtido experimentalmente e é usado e correlaciona a capacidade de bombeamento de um impelidor com seu diâmetro e rotação.

$$N_Q = \frac{Q}{ND^3} \quad (6)$$

O número de bombeamento é obtido para várias relações D/T para cada tipo de impelidor. A figura 12 mostra uma curva típica para o número de bombeamento para um impelidor de quatro pás retas inclinadas a 45° , para relações D/T variando entre 0,25 e 0,5.

Figura 12. Curvas do número de bombeamento para impelidores de 4 pás retas.



Fonte: DICKEY, 1984.

Para o impelidor de quatro pás inclinada a 45° , o número bombeamento em função do número de Reynolds pode ser expressão pela seguinte expressão:

$$N_Q(N_{Re}) = N_{Q,T} f_{visc}(N_{Re}) f(D/T) \quad (7)$$

Onde $N_{Q,T}$ é o valor de N_Q em regime turbulento, $f_{visc}(N_{Re})$ é um fator que leva em conta as forças viscosas e que é função do número de Reynolds e $f(D/T)$ que é um fator que considera a diferença entre o tanque utilizado no levantamento experimental de $N_{Q,T}$ e o tanque real utilizado.

Considerando um experimento com $D/T = 0.394$, tem-se:

$$N_Q(N_{Re}) = 0.683 f_{visc}(N_{Re}) \left(\frac{0.394}{D/T} \right)^{1/2} \quad (8)$$

O fator que leva em conta as forças viscosas em função do número de Reynolds. Para considerar as diferenças entre o tanque utilizado nos experimentos e um tanque real, o número de Reynolds deve ser corrigido de acordo com a variação de D/T .

$$\begin{aligned}
 N_{Re}^* &= N_{Re} \left(\frac{D/T}{0.394} \right)^{1/2} \\
 N_{Re}^* \leq 25 &\rightarrow f_{visc}(N_{Re}) = 0,439 \\
 25 < N_{Re}^* < 300 &\rightarrow f_{visc}(N_{Re}) = e^{-0,563-0,231\ln(N_{Re}^*)+0,0466\ln(N_{Re}^*)^2} \\
 300 \leq N_{Re}^* < 2000 &\rightarrow f_{visc}(N_{Re}) = e^{-5,328+1,683\ln(N_{Re}^*)-0,179\ln(N_{Re}^*)^2+0,0064\ln(N_{Re}^*)^3} \\
 N_{Re}^* \geq 20000 &\rightarrow f_{visc}(N_{Re}) = 1
 \end{aligned} \tag{9}$$

O nível de agitação pode ser associado ao número de bombeamento pela seguinte equação:

$$\begin{aligned}
 N_A &= \frac{60}{1,8} v_M \\
 N_A &= \frac{60}{1,8} \frac{Q}{A} = \frac{60}{1,8} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1/3} \frac{Q}{V^{2/3}} \\
 N_A &= 36,125 N_Q(N_{Re}) \frac{ND^3}{V^{2/3}}
 \end{aligned} \tag{10}$$

3.4.3.6 Número de potência e potência requerida

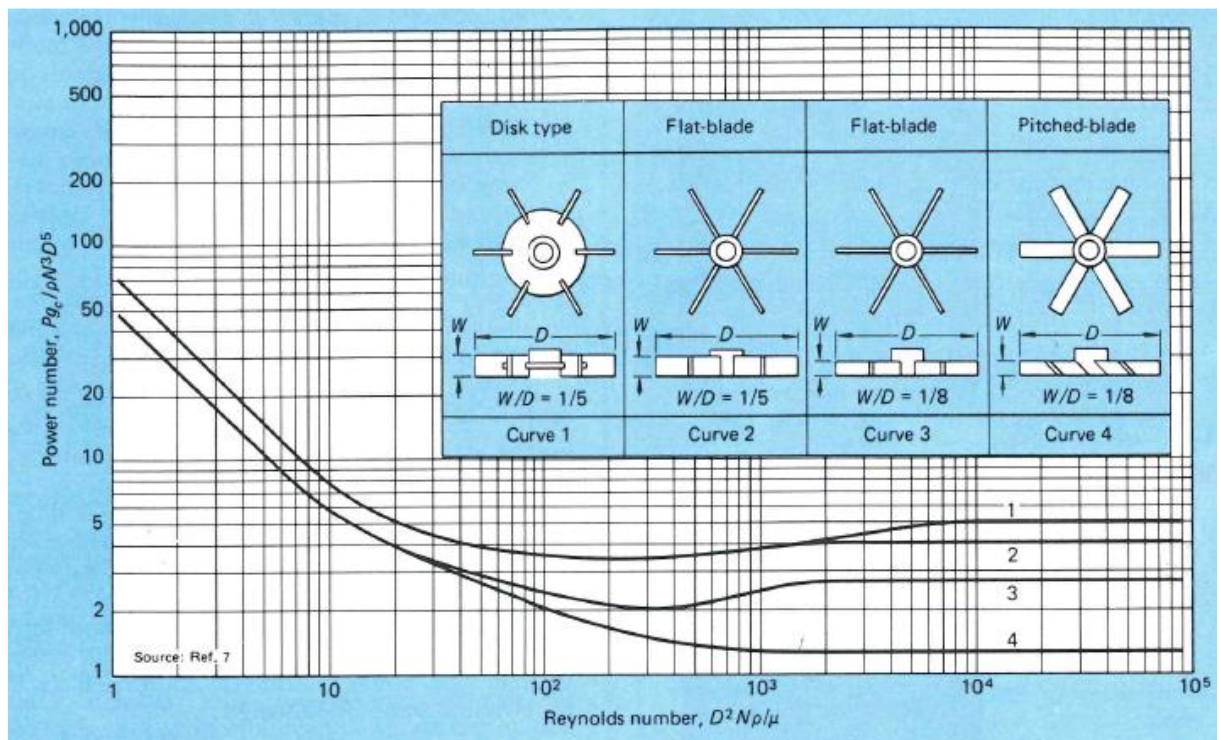
A potência necessária pode ser determinada, uma vez que o diâmetro e a velocidade do impelidor são conhecidos. A densidade e a viscosidade do fluido também influenciam os requisitos de potência do impelidor.

Uma turbina de pás de quatro pás inclinadas a 45° com largura das pás igual a 20 % do diâmetro do impelidor ($W/D = 1/5$) tem um número de potência turbulenta igual 1,37 (DICKEY, 1984). O número de potência é um agrupamento adimensional de potência, densidade de líquido, agitador velocidade e diâmetro do impelidor, que é usado para correlacionar o comportamento dos impelidores de um sistema de agitação. A equação para o cálculo do número de potência em unidades coerentes do sistema internacional é dada por:

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

O número de potência é bastante sensível ao tipo de escoamento presente, e é obtido experimentalmente sendo expresso em função do número de Reynolds. A figura 13 mostra curvas do número de potência típicas para diversos tipos de impelidores.

Figura 13. Curvas do número de potência para vários tipos de turbinas.



Fonte: DICKY e FENIC, 1976.

Para um impelidor de 4 pás inclinadas a 45° , com largura da pá igual a 20 % do diâmetro do impelidor, a curva do número de potência pode ser expressa por (Cérebro-Engenharia, 2018):

$$N_P(N_{Re}) = 1,37 C_C C_D f_\mu(N_{Re}) \quad (12)$$

O parâmetro C_C leva em consideração o efeito da distância do impelidor ao fundo do tanque, e pode ser expresso por (Cérebro-Engenharia, 2018):

$$\begin{aligned} C/D < 1 &\rightarrow C_C = \left(\frac{C}{D}\right)^{-0,25} \\ C/D \geq 1 &\rightarrow C_C = 1 \end{aligned} \quad (13)$$

O parâmetro C_D leva em consideração a variação da razão D/T no cálculo do número de potência. Entretanto, para as relações D/T utilizadas em impelidores de pás retas (variando de 0,25 a 0,70) o parâmetro é praticamente constante e igual a 1 (Cérebro-Engenharia, 2018).

$$C_D \approx 1 \quad (14)$$

O fator que leva em consideração as forças viscosas, f_μ , pode ser expresso em função do número de Reynolds, de acordo com as seguintes relações (DICKY, 1984):

$$\begin{aligned} N_{Re} \leq 1 &\rightarrow f_\mu(N_{Re}) = \frac{38,4}{N_{Re}} \\ 1 < N_{Re} < 8 &\rightarrow f_\mu(N_{Re}) = e^{3,649 - 0,942 \ln(N_{Re}) - 0,106 \ln(N_{re})^2 + 0,0448 \ln(N_{re})^3} \\ 8 \leq N_{Re} < 900 &\rightarrow f_\mu(N_{Re}) = e^{3,154 - 0,848 \ln(N_{Re}) + 0,0565 \ln(N_{re})^2} \\ N_{Re} \geq 900 &\rightarrow f_\mu(N_{Re}) = 1 \end{aligned} \quad (15)$$

3.4.3.7 Diâmetro mínimo do impelidor

O diâmetro necessário para a resposta dinâmica desejada deve ser determinado primeiro nos cálculos do projeto. O nível de agitação, que é usado para quantificar a resposta dinâmica, é diretamente proporcional à velocidade média em massa, como visto anteriormente.

O valor do nível de agitação é sempre expresso como um número inteiro, mas para fins computacionais, uma faixa de velocidades médias deve ser considerada. Por exemplo, um nível de 3 corresponde uma velocidade média de 0,09 m/s, mas para fins de dimensionamento, uma faixa de 0,075 m/s a 0,105 m/s deve ser considerada. Desta forma, o diâmetro mínimo do impelidor corresponde à menor velocidade média dentro dos limites de arredondamento (DICKY, 1984):

$$v_{m,\min} = 0.03(N_A - 0,5) \quad (16)$$

Começando com o nível mínimo de agitação, a velocidade média, a capacidade de bombeamento e, finalmente, o diâmetro do impelidor podem ser calculados. Mas para determinar a capacidade de bombeamento, o diâmetro do impelidor deve ser conhecido para calcular D/T e o número de Reynolds. A correlação empírica pode ser avaliada explicitamente apenas na faixa turbulenta ou laminar extrema. A técnica computacional mais conveniente é começar com a estimativa turbulenta para o diâmetro do impelidor e, em seguida, iterar por aproximação sucessiva até que as estimativas do diâmetro.

Por definição, a velocidade média é a capacidade de bombeamento do impelidor, dividida pela área da seção transversal do tanque (DICKY, 1984):

$$v_m = \frac{Q}{A} \quad (17)$$

A área da seção do tanque é baseada no diâmetro do tanque de batelada quadrada, dada pela expressão:

$$A = \frac{\pi}{4} T^2 \quad (18)$$

Reorganizando a definição do número de bombeamento na equação 6, e substituindo a capacidade de bombeamento, Q , pelas expressões que definem a velocidade média em termos do nível de agitação, equações 16, 17 e 18, o diâmetro mínimo do impelidor pode ser expresso como (DICKY, 1984):

$$D = \left(\frac{0,03(N_A - 0,5) \frac{\pi}{4} T^2}{N \cdot N_Q} \right)^{1/3} \square \left(\frac{0,024(N_A - 0,5) T^2}{N \cdot N_Q} \right)^{1/3} \quad (19)$$

Se o escoamento for considerado turbulento, o número de bombeamento para um impelidor de 4 pás retas inclinadas a 45° com um relação $W/D = 20\%$ é igual a (DICKY, 1984):

$$N_Q = 0,683 \left(\frac{0,394}{D/T} \right)^{1/2} \quad (20)$$

Substituindo a equação 20 na equação 19, pode-se obter uma estimativa inicial para o diâmetro mínimo do impelidor:

$$D = \left(\frac{0,056(N_A - 0,5) T^{3/2}}{N} \right)^{2/5} \quad (21)$$

3.4.3.8 Rotação do sistema de agitação

A rotação do sistema de agitação é selecionada utilizando padrões comerciais para moto redutores padrões. Se o nível de agitação e o diâmetro do impelidor forem conhecidos, podem obter uma estimativa para a rotação mínima a partir da equação 21.

$$N = \frac{0,056(N_A - 0,5)T^{3/2}}{D^{5/2}} \quad (22)$$

3.4.3.9 Potência do acionamento

O valor da potência utilizada no cálculo do número de potência é a potência aplicada ao eixo. Para um projeto de sistemas agitados, considera-se que esta potência é no máximo igual a 85 % da potência do motor adotado.

$$P = 0,85P_M \quad (23)$$

A potência requerida pode ser calculada a partir das equações 11, 12 e 23:

$$P_M = \frac{1,37f_\mu C_C C_D \rho N^3 D^5}{0,85} \quad (24)$$

$$P_M \approx 1,612f_\mu C_C \rho N^3 D^5$$

3.4.4 Dimensionamento com vários impelidores e razão Z/T diferente de 1

Embora os sistemas de agitação de batelada quadrada sejam utilizados para elaborar a teoria de agitação, na prática são utilizados sistemas com mais de um impelidor com relações de Z/T diferentes de 1. Quando são utilizados mais de um impelidor de pás retas inclinadas a 45° no mesmo sistema agitado, as potências requeridas são proporcionais ao número de impelidores utilizados.

A capacidade de bombeamento vai depender do número de impelidores utilizados e do volume a ser agitado. Reescrevendo a equação do nível de agitação, equação 10, de forma a considerar o número de impelidores utilizados, tem-se:

$$N_A = \frac{1}{0,03} v_M$$

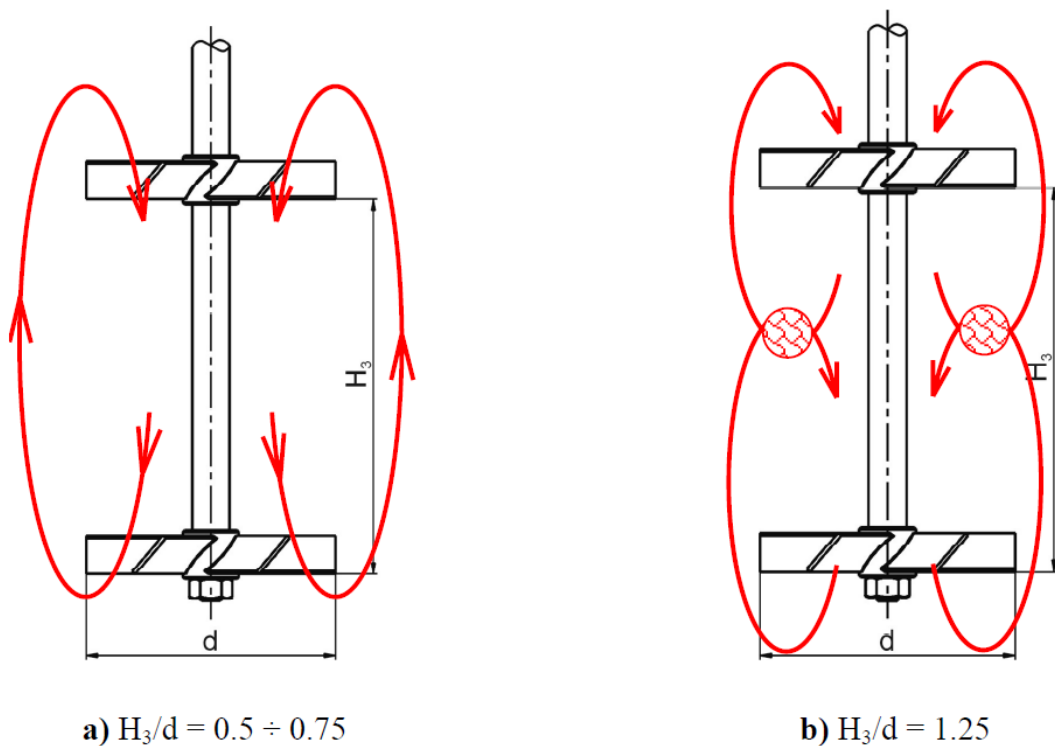
$$N_A = \frac{1}{0,03} \frac{Q}{A} = \frac{60}{1,8} \left(\frac{4}{\pi} \right)^{1/3} \frac{Q}{\left(\frac{V}{n_i} \right)^{2/3}} \quad (25)$$

$$N_A = 36,125 N_Q (N_{Re}) \frac{ND^3}{\left(\frac{V}{n_i} \right)^{2/3}}$$

O número de bombeamento em sistemas agitados com mais de um impelidor pode ser significativamente alterado em relação à condição de ensaio em batelada quadrada se o espaçamento (S) entre os impelidores inferior a $1,25 D$ (JIROUT, 2012).

A figura 14 mostra a influência da distância entre os impelidores no bombeamento do tanque (JIROUT, 2012).

Figura 14. Variações no fluxo do fluido em tanques com vários impelidores.



Fonte: JIROUT, 2012.

3.5 DIMENSIONAMENTO DO EIXO DO AGITADOR

3.5.1 Introdução

A principal função do eixo de agitação é transmitir o torque de acionamento ao impulsor. Antes de determinar o tamanho do eixo, deve-se selecionar o motor, a rotação do eixo e o impulsor.

O projeto do eixo é feito em três etapas:

1. Cálculo do diâmetro mínimo para suportar os esforços atuantes no eixo (torção e flexão).
2. Cálculo da frequência natural de vibração do eixo e dos impelidores.
3. Verificação da deflexão do eixo.

A estrutura e o formato do castelo do motoredutor afetara o tamanho do eixo do sistema. Para eixos em balanço, é recomendado que a distância entre os mancais do castelo seja de cerca de 20% do comprimento do eixo em balanço. A Figura 15 mostra um exemplo de um eixo cantilever usando um motoredutor de engrenagem de eixo oco.

3.5.2 Cálculo do diâmetro mínimo do eixo

O torque transmitido pelo eixo tem seu valor máximo acima do impelidor mais próximo do motor (primeiro impelidor de cima para baixo).

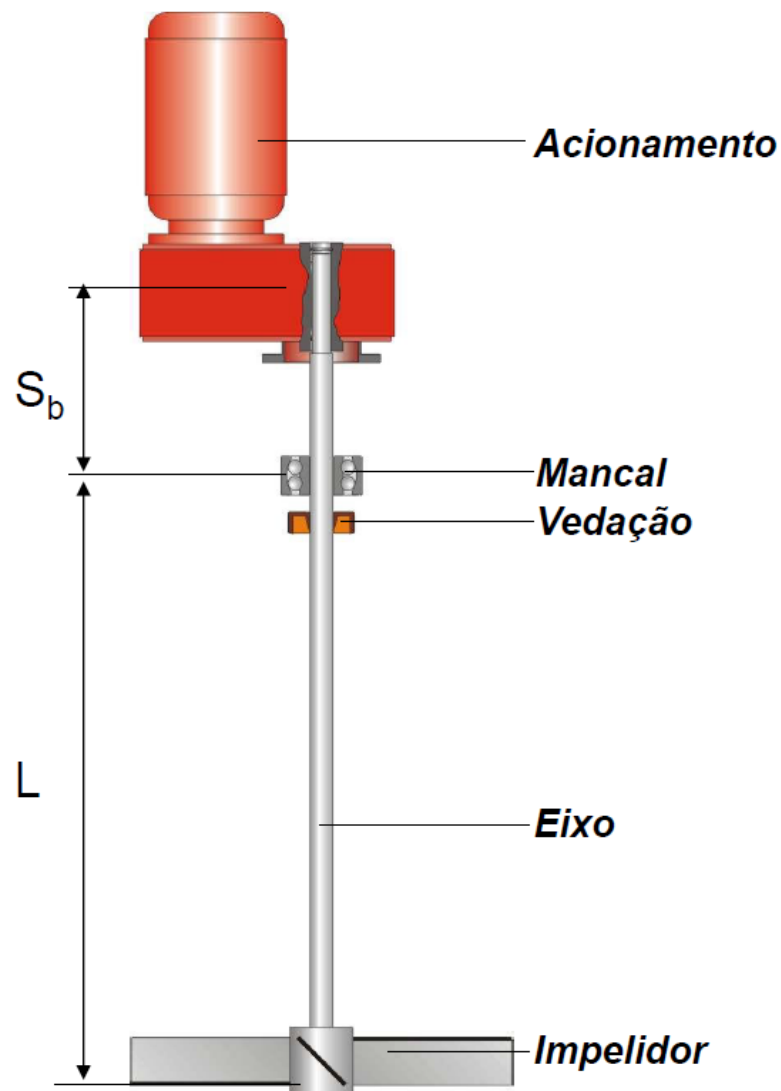
O torque máximo pode ser calculado utilizando a expressão:

$$T_Q = \frac{P_M}{2\pi N} \quad (26)$$

O movimento do impulsor faz com que a pressão hidráulica seja transmitida ao eixo na forma de um momento fletor. A determinação dessas forças é experimental. Na ausência de dados melhores, a seguinte equação pode ser usada para calcular a força hidráulica no impulsor do eixo i:

$$F_{Hi} = 0,05 \frac{P_{Mi}}{ND} f_H \quad (27)$$

Figura 15.Exemplo de eixo em balanço.



Fonte: Curso de Agitação de Fluidos, Cérebro-Engenharia, 2018.

A potência desenvolvida para impelidor i , P_{Mi} , para o cálculo do eixo é obtida a partir da potência adotada para o motor e das potências estimadas no cálculo do sistema de agitação (DICKY e FASANO, 2004):

$$P_{Mi} = P_M \frac{P_i}{\sum_{j=1}^n P_j} \quad (28)$$

Para eixos em balanço, o momento fletor máximo é igual a:

$$M_{\max} = \sum_{i=1}^n F_{Hi} L_i \quad (29)$$

Para eixos maciços, a tensão máxima de cisalhamento devido ao torque é igual a:

$$\tau = \frac{T_Q}{Z_p} = \frac{16T_Q}{\pi d_s^3} \quad (30)$$

Para eixos maciços, a tensão máxima de flexão devida à forças hidráulicas é igual a:

$$\sigma_b = \frac{M_{\max}}{Z_b} = \frac{32M_{\max}}{\pi d_s^3} \quad (31)$$

Como o momento fletor e o torque atuam simultaneamente, o cálculo ao cisalhamento e à flexão deve considerar estes dois esforços.

O diâmetro mínimo, para eixos maciços, baseado na tensão de cisalhamento combinada pode ser calculado utilizando a seguinte expressão (DICKY e FASANO, 2004):

$$d_{s,s} = \left[\frac{16\sqrt{(T_Q)^2 + (M_{\max})^2}}{\pi\tau_s} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (32)$$

O diâmetro mínimo, para eixos maciços, baseado na tensão de tração combinada pode ser calculado utilizando a seguinte expressão (DICKY e FASANO, 2004):

$$d_{s,t} = \left\{ \frac{16 \left[M_{\max} + \sqrt{(T_Q)^2 + (M_{\max})^2} \right]}{\pi \sigma_t} \right\}^{\frac{1}{3}} \quad (33)$$

O diâmetro mínimo a ser adotado é o maior valor calculado entre $d_{s,s}$ e $d_{s,t}$.

As tensões admissíveis geralmente utilizadas em dimensionamentos de eixos em sistemas de agitação estão resumidas no quadro.

3.5.3 Verificação da rotação crítica

A rotação crítica de um sistema de agitação é aquela igual à primeira frequência natural do sistema de agitação, formado pelo eixo e pelos impelidores por ele suportados.

Quadro 3. Tensões admissíveis para eixos de sistemas agitados

Material	Tensão de Tração	Tensão de Cisalhamento
	MPa	MPa
Aço Carbono	62,1	37,2
Aço Inox 304	66,2	40,0
Aço Inox 304L	57,9	35,2
Aço Inox 316	68,9	41,4
Aço Inox 316L	60,0	35,9

Fonte: DICKY e FASANO, 2004.

Nesta rotação, ou quando a rotação do impelidor se aproxima dela, o sistema de agitação entra em ressonância e a amplitude de vibração do sistema aumenta consideravelmente colocando-o em risco.

É aconselhável que o sistema opere sempre a uma rotação de 20 % a 30 % abaixo da rotação crítica.

Para dispersão de gases, o sistema deve operar a uma rotação 50% abaixo da rotação crítica.

A primeira rotação crítica de um eixo maciço em balanço pode ser calculada por (DICKY e FASANO, 2004):

$$N_c = \sqrt{\frac{3}{256\pi} \frac{d_s^2}{L}} \sqrt{\frac{E}{(L + S_b) \left(W_e + \frac{wL}{4} \right)}} \quad (34)$$

A massa equivalente W_e pode calculada utilizando a seguinte expressão:

$$W_e = \sum_{i=1}^n W_i \left(\frac{L_i}{L} \right)^3 \quad (35)$$

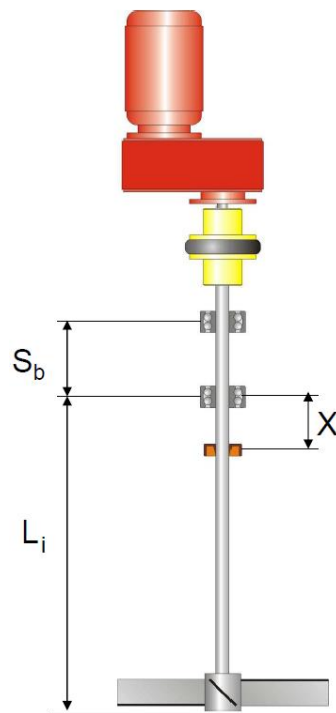
3.5.4 Verificação da deflexão do eixo

Dependendo do tipo de vedação utilizada, é necessário limitar a deflexão na região da vedação de forma a atender aos requisitos do fabricante da vedação.

Para eixos maciços em balanço, a deflexão a uma distância x do mancal inferior do castelo (Figura 16) pode ser calculada por:

$$\Delta_y(x) = \frac{1}{6EI} \sum_{i=1}^n F_{Hi} x (2L_i S_b + 3L_i x - x^2) \quad (36)$$

Figura 16. Posição da vedação no eixo de um agitador.



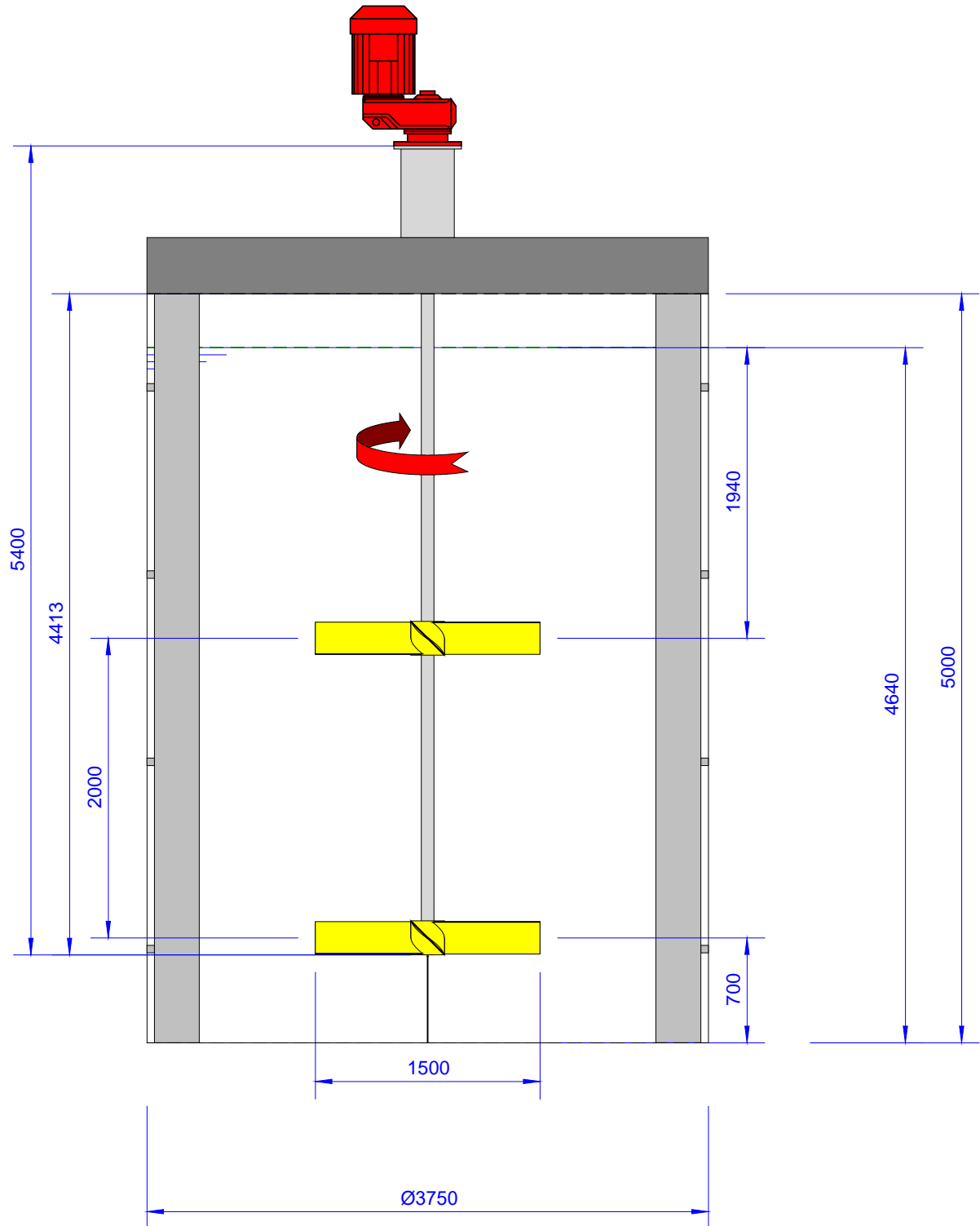
Fonte: Curso de Agitação de Fluidos, Cérebro-Engenharia, 2018.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE AGITAÇÃO

4.1.1 Dimensionamento do motor

O tanque do sistema de tratamento de efluentes químicos é utilizado para tratar a água contaminada pelo processo de fabricação de materiais metálicos de uma usina siderúrgica, tornando assim esta água adequada para reutilização no processo de fabricação ou para que possa retornar ao meio ambiente em condições ideais. O tanque foi projetado para atender o processo e está mostrado na figura 17.

Figura 17.Esquema do tanque agitado

Fontes: Autores.

Os dados para dimensionamento do sistema de agitação estão resumidos a seguir:

Diâmetro do tanque	T = 3,750 m
Altura do líquido no tanque	Z = 4,640 m
Volume da massa de fluido	V = 51,247 m ³
Número de impelidores	n _i = 2
Diâmetro dos impelidores.....	D = 1,500 m
Massa de cada impelidor	W = 100 kg
Posição do 1º impelidor ao fundo do tanque	C ₁ = 0,700 m
Posição do 2º impelidor ao fundo do tanque	C ₂ = 2,700 m
Densidade do fluido.....	ρ = 1000 kg/m ³
Viscosidade dinâmica.....	μ = 0,001 Pa.s
Nível de agitação mínimo para o sistema.....	N _A = 2

Considerando que o nível de agitação mínimo e o diâmetro do impelidor foram definidos, a rotação mínima do sistema para uma batelada quadrada é igual a:

$$N = \frac{0,056(N_A - 0,5)T^{3/2}}{D^{5/2}}$$

$$N = \frac{0,056 \times (2 - 0,5) \times (3,75)^{3/2}}{(1,5)^{5/2}}$$

$$N = 0,244 \text{ rps} \approx 15 \text{ rpm}$$

Como a rotação é menor do que 29 rpm, será adotada uma rotação de projeto inicial o valor de 30 rpm para evitar a utilização de motores com construção especial.

Como o afastamento entre os impelidores S (2 m) é maior do que $1,25D$ (1,875 m), o fluxo gerado por cada impelidor pode ser considerado independente. Neste caso, o bombeamento do sistema pode ser reduzido ao cálculo de um impelidor.

Calculando o número de Reynolds para o fluxo gerado pelo impelidor tem-se:

$$N_{Re} = \frac{\rho ND^2}{\mu}$$

$$N_{Re} = \frac{1000 \times 0,5 \times 1,5^2}{0,001}$$

$$N_{Re} = 1125000$$

Para este valor do número de Reynolds o fluxo gerado pelo impelidor é considerado turbulento. Nesta condição, o número de bombeamento pode ser calculado de forma simplificada desprezando o efeito das forças viscosas:

$$N_Q = 0,683 f_{visc} (N_{Re}) \left(\frac{0,394}{D/T} \right)^{1/2}$$

$$N_Q = 0,683 \times 1 \times \left(\frac{0,394}{1,5/3,75} \right)^{1/2}$$

$$N_Q = 0,678$$

A capacidade de bombeamento de cada impelidor é igual a:

$$Q = N_Q ND^3$$

$$Q = 0,678 \times 0,5 \times 1,5^3$$

$$Q = 1,144 m^3 / s = 4118 m^3 / h$$

O nível de agitação para o sistema pode ser calculado por:

$$N_A = 36,125 N_Q \frac{ND^3}{\left(\frac{V}{n_i}\right)^{2/3}}$$

$$N_A = 36,125 \times 0,678 \times \frac{0,5 \times 1,5^3}{\left(\frac{51,247}{2}\right)^{2/3}}$$

$$N_A = 4,755$$

O nível de agitação é bem maior do que o requerido inicialmente para o sistema, entretanto ele é imposto pelo requisito de rotação mínima do motor igual a 29 rpm.

Conhecidos o diâmetro e a rotação do impelidor é possível calcular o número de potência para o primeiro impelidor através da equação (o efeito das forças viscosas foi desprezado, uma vez que o escoamento é turbulento):

$$N_{P1} = 1,37 C_C C_D f_\mu (N_{Re})$$

$$N_{P1} = 1,37 \left(\frac{C_1}{D}\right)^{-0,25}$$

$$N_{P1} = 1,37 \times \left(\frac{0,7}{1,5}\right)^{-0,25}$$

$$N_{P1} = 1,658$$

Como a distância do primeiro impelidor ao fundo, $C_2 = 2,7$ m, é maior que o diâmetro do impelidor, o número de potência é igual a:

$$N_{P2} = 1,37 C_C C_D f_\mu (N_{Re})$$

$$N_{P2} = 1,37 \times 1 \times 1 \times 1$$

$$N_{P2} = 1,37$$

Como a distância entre os impelidores é maior do que o diâmetro do impelidor, o número de potência total do sistema é aproximadamente igual a (YOU *et all*, 2014):

$$\begin{aligned}
 N_{PT} &= N_{P1} + N_{P2} \\
 N_{PT} &= 1,658 + 1,37 \\
 N_{PT} &= 3,028
 \end{aligned}$$

Os valores potência requerida para cada impelidor e para o sistema podem ser obtidos a partir da equação:

$$P = N_p \rho N^3 D^5$$

$$\begin{aligned}
 P_1 &= N_{P1} \rho N^3 D^5 \\
 P_1 &= 1,658 \times 1000 \times 0,5^3 \times 1,5^5 \\
 P_1 &= 1573,39W \approx 1,573kW
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 P_2 &= N_{P2} \rho N^3 D^5 \\
 P_2 &= 1,37 \times 1000 \times 0,5^3 \times 1,5^5 \\
 P_2 &= 1300,43W \approx 1,300kW
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 P_T &= N_{PT} \rho N^3 D^5 \\
 P_T &= 2,874 \times 1000 \times 0,5^3 \times 1,5^5 \\
 P_T &= 2873,82W \approx 2,874kW
 \end{aligned}$$

Prevendo uma folga para a operação do motor, a potência mínima para o sistema de acionamento é igual a:

$$\begin{aligned}
 P_M &= \frac{P_T}{0,85} \\
 P_M &= \frac{2,874}{0,85} \\
 P_M &= 3,381kW
 \end{aligned}$$

Selecionando um modo redutor SEW de eixo paralelo, execução com flange B5 e eixo oco (tipo FAF). Analisando o Catálogo da SEW para Motoredutores Edição 08/2007, pode-se selecionar um motoredutor de potência nominal na saída do eixo de 4 kW (ver figura 17).

Figura 18. Seleção de um motoredutor SEW

P_m [kW]	n_a [rpm]	M_a [Nm]	i	$F_{Ra}^{1)}$ [N]	SEW f_B		m [kg]	
4,0	6,8	5630	170,83	90000	2,1	FA 127 DX 132M6	460	382
	7,5	5060	153,67*	90000	2,4	FAF 127 DX 132M6	495	381
						F 127 DX 132M6	495	380
						FF 127 DX 132M6	540	381
	13	2960	134,16	21200	1,00			
	14	2720	123,29	24000	1,10			
	16	2420	109,49	24600	1,25	FA 87 DX 112M4	125	368
	18	2160	97,89	24400	1,40	FAF 87 DX 112M4	135	367
	20	1940	88,01	24100	1,55	F 87 DX 112M4	130	366
	23	1690	76,39	23600	1,80	FF 87 DX 112M4	145	367
	25	1510	68,40	23200	2,0			
	30	1250	56,75	22400	2,4			
	23	1660	75,02	14600	0,90			
	24	1600	72,50	15000	0,95			
	26	1470	66,46	15900	1,00			
	30	1290	58,32	17000	1,15	FA 77 DX 112M4	84	363
	31	1220	55,27	17300	1,25	FAF 77 DX 112M4	91	362
	36	1070	48,37	18000	1,40	F 77 DX 112M4	88	361
	40	960	43,58	18500	1,55	FF 77 DX 112M4	99	362
	45	840	38,23	18900	1,80			
	51	745	33,74	19100	2,0			
	58	660	29,91	19400	2,3			

Fonte: Catálogo da SEW para Motoredutores Edição 08/2007.

Analisando o catálogo da SEW é possível verificar que existe mais de uma opção para a seleção de um motoredutor de 4 kW com rotação em torno de 30 rpm. No caso de sistemas agitados, é recomendável selecionar motoredutores com fator de serviço (f_B) maior do que 1,50. De preferência deve selecionar um valor superior a 2,0.

Desta forma, foi adotado o model FAF 87 DX 112M4 que possui um fator de serviço de 2,4.

4.1.2 Dimensionamento do eixo

4.1.2.1 Dados

Os dados para dimensionamento do eixo sistema de agitação estão resumidos a seguir:

Diâmetro eixo	$d_s =$	0,085 m
Comprimento em balanço do eixo.....	$L =$	4,413 m
Distância entre mancais	$S_b =$	0,987 m
Distância do 1º impelidor ao mancal inferior do castelo.....	$L_1 =$	4,413 m
Distância do 2º impelidor ao mancal inferior do castelo.....	$L_2 =$	2,413 m

O eixo e os impelidores foram fabricados em aço-carbono. As propriedades mecânicas do material utilizado na fabricação estão resumidas a seguir:

Tensão admissível à tração	$\sigma_b =$	62,1 MPa
Tensão admissível ao cisalhamento.....	$\tau_s =$	37,2 MPa
Módulo de elasticidade.....	$E =$	205 Gpa
Densidade	$\rho_m =$	7833 kg/m ³

4.1.2.2 Diâmetro mínimo do eixo

O torque total aplicado ao eixo é igual a:

$$T_Q = \frac{P_M}{2\pi N}$$

$$T_Q = \frac{4000}{2\pi \times 0,5}$$

$$T_Q = 1274,24 \text{ N.m}$$

A potência corrigida para cada impelidor é igual a:

$$P_{M1} = P_M \frac{P_1}{\sum_{j=1}^2 P_j}$$

$$P_{M1} = 4000 \times \frac{1573,39}{1573,39 + 1300,43}$$

$$P_{M1} = 2189,96W$$

$$P_{M2} = P_M \frac{P_2}{\sum_{j=1}^2 P_j}$$

$$P_{M2} = 4000 \times \frac{1300,43}{1573,39 + 1300,43}$$

$$P_{M2} = 1810,04W$$

As força hidráulicas em cada impelidor podem ser estimadas por:

$$F_{H1} = 0,05 \frac{P_{M1}}{ND} f_H$$

$$F_{H1} = 0,05 \times \frac{2189,96}{0,5 \times 1,5} \times 1$$

$$F_{H1} = 140,00 N$$

$$F_{H2} = 0,05 \frac{P_{M2}}{ND} f_H$$

$$F_{H2} = 0,05 \times \frac{1810,04}{0,5 \times 1,5} \times 1$$

$$F_{H2} = 120,67 N$$

Os momentos fletores devido à aplicação das forças hidráulicas são iguais a:

$$M_1 = F_{H1} L_1$$

$$M_1 = 140,00 \times 4,413$$

$$M_1 = 644,286 N.m$$

$$M_2 = F_{H2}L_2$$

$$M_2 = 120,67 \times 2,413$$

$$M_2 = 291,175 \text{ N.m}$$

O momento fletor máximo no eixo é dado por:

$$M_{\max} = M_1 + M_2$$

$$M_{\max} = 644,286 + 291,175$$

$$M_{\max} = 935,461 \text{ N.m}$$

O momento máximo para a tensão de cisalhamento admissível é igual a:

$$d_{s,s} = \left[\frac{16\sqrt{(T_Q)^2 + (M_{\max})^2}}{\pi\tau_s} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$d_{s,s} = \left[\frac{16\sqrt{(1273,24)^2 + (935,461)^2}}{\pi \times 37,2 \times 10^6} \right]^{\frac{1}{3}}$$

$$d_{s,s} = 0,062702 \text{ mm} = 62,702 \text{ mm}$$

O diâmetro mínimo baseado na tensão de tração combinada pode ser calculado utilizando a seguinte expressão:

$$d_{s,t} = \left\{ \frac{16 \left[M_{\max} + \sqrt{(T_Q)^2 + (M_{\max})^2} \right]}{\pi \sigma_t} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d_{s,t} = \left\{ \frac{16 \left[935,461 + \sqrt{(1273,24)^2 + (935,461)^2} \right]}{\pi \times 62,1 \times 10^6} \right\}^{\frac{1}{3}}$$

$$d_{s,t} = 0,06767 \text{ m} = 60,767 \text{ mm}$$

Como o diâmetro adotado de 85 mm é maior que o maior valor calculado (62,7 mm), o eixo suporta os esforços do sistema de agitação.

4.1.2.3 Verificação da rotação crítica

O peso por unidade de comprimento do eixo, w , pode ser calculado por:

$$w = \frac{\pi}{4} d_s^2 \rho_m$$

$$w = \frac{\pi}{4} \times 0,085^2 \times 7833$$

$$w = 44,448 \text{ kg} / \text{m}$$

A massa equivalente W_e pode calculada utilizando a seguinte expressão:

$$W_e = \sum_{i=1}^n W_i \left(\frac{L_i}{L} \right)^3$$

$$W_e = 100 \left(\frac{4,413}{4,413} \right)^3 + 100 \left(\frac{2,413}{4,413} \right)^3$$

$$W_e = 100 + 16,348$$

$$W_e = 116,348 \text{ kg}$$

A primeira rotação crítica de um eixo maciço em balanço pode ser calculada por:

$$N_c = \sqrt{\frac{3}{256\pi} \frac{d_s^2}{L}} \sqrt{\frac{E}{(L + S_b) \left(W_e + \frac{wL}{4} \right)}}$$

$$N_c = \sqrt{\frac{3}{256\pi}} \times \frac{85^2}{4413} \sqrt{\frac{205 \times 10^9}{(4413 + 987) \left(116,348 + \frac{44,448 \times 4413}{4} \right)}}$$

$$N_c = 1,515 \text{ rps} = 90,897 \text{ rpm}$$

A rotação máxima permitida para o sistema é igual a:

$$N_{\max} = 0,7 N_c$$

$$N_{\max} = 0,7 \times 90,897$$

$$N_{\max} = 63,628 \text{ rpm}$$

Como a rotação do sistema é de 30 rpm, o eixo está adequado.

4.1.3 Bomba dosadora

Como já citado mais acima, na etapa de remoção de cianeto é feita através da junção do sistema de agitação e dosagem química. A dosagem química pode ser empregada a vários cenários em que a utilização de produtos químicos precisa ser regular. A utilização desses produtos é feita quando há a necessidade de assegurar o processo ou melhorar sua eficiência.

A dosagem dos produtos químicos é realizada através de uma bomba que despeja regularmente a vazão de produto requerida ao sistema, essa bomba é definida como dosadora, a qual pode ser do tipo bomba por pulso, helicoidal ou centrífuga, a empregabilidade varia de acordo com o intuito de aplicação. Podem ser aplicadas em:

- Dosagens de produtos químicos em geral;

- Sistemas de flotação físico-químicos;
- Sistemas de tratamento de efluentes industriais;
- Sistemas de tratamento de água;
- Sistemas de tratamento de esgotos sanitários;
- Tanques / Lagoas de tratamento;
- Aquicultura: Cultivo e criação de peixes, camarão, etc;
- Sistemas de indústrias alimentícias;
- Sistemas de indústria de medicamentos;
- Outras aplicações.

4.1.3.1 Seleção da bomba dosadora

Ao tomar ciência dos parâmetros operacionais da área e do produto de dosagem a ser utilizado, sendo aqui, o sulfato ferroso em estado líquido, pode-se começar o levantamento dos dados necessários para selecionarmos uma bomba dosadora.

É necessário que seja conhecido o valor da vazão do sistema, a densidade do sulfato, a concentração do coagulante e a meta de dosagem. Assim temos:

- a) Densidade= 1,3 g/cm³
- b) Concentração= 6,5% Fe⁺ (M/M)*
- c) Meta de dosagem= 100 ppm Fe²⁺
- d) Vazão do sistema: 95 m³/h

Sabendo dos dados acima e os parâmetros, a bomba aplicável para o sistema, de acordo com o catálogo da empresa Grabe, é a modelo DDR-200-05, uma bomba de deslocamento positivo, composta basicamente de motor elétrico, caixa de redução, eixo excêntrico, sistema de regulagem, cabeçote e base monobloco. Se trata de uma bomba dosadora de diafragma com um range de vazão de 30 l/h até 200 l/h, pressão de 5 m.c.a, pressão de descarga de até 5 kgf/cm² e pressão de sucção de 0,3 bar.

Deve-se atentar ao fato de que a vazão de entrada de efluentes da área está sujeita a variações, a par disto, a bomba foi escolhida com uma larga variação de vazão de dosagem para que o sistema físico-químico da ETE não seja comprometido em eventualidades. Quando a vazão da área se mantém exatamente no valor de 95 m³/h a bomba precisa trabalhar com 112 l/h de sulfato ferroso. Quando essa vazão diminui, chega por exemplo a 75 m³/h, a dosagem

requerida é de 89 l/h. Caso a vazão ultrapasse o valor de 95 m³/h, supondo que alcance a 125 m³/h, a bomba precisará trabalhar com 148 l/h.

Levando em consideração a situação de trabalho ideal e possíveis situações de contingências, a bomba selecionada atende e assegura o bom funcionamento do sistema de remoção de cianeto.

4.2 PLANO DE MANUTENÇÃO DOS EQUIPAMENTOS DO SISTEMA

Sempre é recomendado o uso de óculos panorâmico e luvas ao manuseio de produtos químicos para a conservação da saúde humana.

4.2.1 Manutenção do agitador

A manutenção do agitador também deve ser realizada por profissionais treinados para manusear equipamentos que trabalham com produto químico, a fim de evitar que defeitos sejam inseridos no equipamento e que as chances de ocorrer acidentes com o colaborador sejam as menores possíveis.

4.2.1.1 Plano de manutenção

Inspeção visual equipamento semanalmente:

- a) Checar o nível de óleo da motoredutor;
- b) Checar o aspecto do óleo. Ex.: Coloração, aspecto turvo ou leitoso. Esse item varia conforme a seleção feita para o motor;
- c) Caso seja observado que após a partida do agitador a vibração esteja, os parafusos devem ser afrouxados para aliviar as tensões e reapertados até que a vibração seja minimizada.

Outras manutenções do agitador:

- a) Caso o selecionado seja um motor pneumático a lubrificação deve ser permanentemente com óleo SAE 10 com a vazão de lubrificação de uma gota por minuto para que o desgaste prematuro e o travamento dos componentes internos sejam evitados;
- b) Os tipos de rolamentos utilizados comumente são os blindados, isentando a necessidade de adição de lubrificante. Porém, caso seja feita a troca desses elementos, recomenda-se preencher levemente as caixas de rolamentos com graxa, para facilitar a montagem e evitar que os componentes sofram oxidação. Atentar para o detalhe do ajuste de montagem dos rolamentos, que deve ser com interferência, montagem justa.
- c) Quando selecionado um motor pneumático, os rolamentos devem ser trocados a cada 14 mil horas levando em conta as condições de instalação ideais além da garantia de que a lubrificação e alimentação de ar sem presença de umidade e impurezas foram respeitadas;
- d) Realizar ensaios elétricos e revisão no motor do agitador;
- e) Revisar angulação das pás do impelidor e se há algum tipo de incrustação que pode ocasionar um desbalanceamento do equipamento;
- f) Revisar elementos de fixação;
- g) Nos casos dos redutores, verificar no manual do fornecedor que é enviado junto com o equipamento a periodicidade de lubrificação e o tipo de lubrificante aplicado no equipamento;
- h) A temperatura de trabalho;

4.2.2 Manutenção da Bomba

A manutenção da bomba deve ser feita por profissionais qualificados, e treinados para lidar com equipamentos que trabalham com produto químico, a fim de evitar que defeitos sejam inseridos no equipamento e que as chances de ocorrer acidentes com o colaborador sejam as menores possíveis.

A bomba de dosagem possui o motor integrado a sua carcaça. Então as manutenções da parte elétrica e mecânica são feitas em conjunto.

4.2.2.1 Plano de manutenção

Inspeção visual equipamento semanalmente:

- a) Olhar atentamente as tubulação e conexões hidráulicas para que seja identificado previamente algum ressecamento ou trinca;
- b) Observar integridade dos selos e vedações, analisando se há algum vazamento na direção do selo da bomba e alguma vedação;
- c) Checar o nível de óleo da bomba;
- d) Checar o aspecto do óleo. Ex.: Coloração, aspecto turvo ou leitoso;
- e) Averiguar integridade da carcaça e tubos, se há corrosão em alguma parte;
- f) Observar condições da base de sustentação da bomba, se houver uma.
- g) Checar se as válvulas das linhas de sucção e de descarga não estão fechadas.

Outras manutenções:

Se o equipamento está fazendo um ruído anormal;

A temperatura de trabalho da bomba;

O sistema redutor da bomba já vem abastecido de fábrica por graxa. A graxa aplicada é uma graxa do tipo permanente, logo, não precisa que seja feita a troca do lubrificante periodicamente. Caso, seja necessário repor a graxa do equipamento, utilizar as seguintes graxas:

Kluber Structovis P00

Shell Tivela Compound A

Chemlub CL-ISO-700/s

Se o equipamento está fazendo um ruído anormal;

A temperatura de trabalho da bomba;

5 CONCLUSÕES

Com a etapa do processo de uma estação biológico utilizada para o dimensionamento do agitador e com o contexto citado acima, concluímos que é de suma importância que seja realizado um bom dimensionamento do equipamento para garantir que o sistema de agitação tenha a performance ideal para que todos os parâmetros ambientais de descarte e reuso da água da ETE sejam atendidos evitando assim, a ocorrência de danos ao meio ambiente e multas a serem pagas pela empresa.

6 REFERÊNCIAS

1. BRASIL. Ministério de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Portaria nº 379 de 26 de Abril de 1999. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, abr. 1999.
2. TERRON, L. R.; **Operações Unitárias para Químicos Farmacêuticos e Engenheiros Químicos**, Rio de Janeiro, LTC, 2012;
3. JÚNIOR, C. F. J.; CEKINSKI, E.; NUNHEZ, J. R.; URENHA, L. C. **Agitação e Mistura na Indústria**, 2ª Edição, LTC, Rio de Janeiro, 2012;
4. RODRIGUES, M. I.; **Aula Prática 5 – Agitação e mistura de fluidos**, Apostila de Operações Unitárias 2, Engenharia de alimentos, UNICAMP.
5. MARTINI, Thiago Luis.; **Influência dos impelidores e condições de mistura na produção de insumos químicos para o setor coureiro**, Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Química), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, dezembro de 2010.
6. ORTEGA, E. **Movimento de Partículas em Fluidos**, Laboratório de Engenharia Ecológica e Informática Aplicada – LEIA, Universidade de Campinas, 2012, disponível em: www.unicamp.br/fea/ortega/aulas/aula17_MovimentoParticulas.ppt, acessado em: 11/03/2021).
7. BARBOSA, Eduardo José.; **Dimensionamento do eixo do impelidor em sistemas de agitação e mistura para processos industriais**, dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Campinas, 2004.
8. BENACHOUR, M.; TEODOSIO, J. R.; **Módulo de agitação e mistura**, Aula de operações unitárias I, Universidade federal de Pernambuco, 2011.
9. MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P.; **Unit Operations Of Chemical Engineering**, fifth edition, 1993.

10. MYERS, K. J.; REEDER, M. F.; FASANO, J. B.; **Optimize Mixing by Using the Proper Baffles**, CEP Magazine, p. 42-47, 2002, disponível em: <http://people.clarkson.edu/~wwilcox/Design/mixopt.pdf>, acessado em 20/03/2021.
11. RODRIGUES, Luiz Eduardo Miranda J.; **Aula 10 – Escoamento Laminar e Turbulento**, IFPE – São Paulo.
12. PAUL, Edward L.; ATIEMO-OBENG, Victor A.; KRESTA, Suzanne M. **Handbook of Industrial Mixing**, 1 ed, John Wiley & Sons, Inc., 2004.
13. FILHO, Francisco Maugeri; **Engenharia Bioquímica**, Curso de Pós-Graduação da UNICAMP, Faculdade de Engenharia de Alimentos, 2002.
14. DICKEY, David S.; FENIC, John G. Dimensional Analysis for Fluid Agitation Systems. **Chemical Engineering**, New York, Janeiro, 1976.
15. DICKEY, David S.; FASANO, J. B. Mechanical Design of Mixing Equipment. **Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice**, Edited by Edward L. Paul, p. 1247-1332, 2004.
16. HICKS, Richard W.; MORTON, Jerry R.; FENIC, John G. How to Design Agitators for Desired Process Response. **Chemical Engineering**, New York, Abril, 1976.
17. CÉREBRO-ENGENHARIA, **Curso de Agitação de Fluidos**: Notas do curso. Campinas, 2018
18. You, See T.; Raman, Abdul A., Shahand, Ehsan , Raja S. S. R. R.; Nor, Mohamad I. M. Multiple-impeller stirred vessel studies, **Chemical Engineering**, New York, 2014, 30 (3), p323–336.
19. Jirout, Tomáš. **Pumping Capacity of Pitched Blade Multi-Stage Impellers**, 14th European Conference on Mixing, Warszawa, 10-13 September 2012
20. GRABE EQUIPAMENTOS INDUSTRIAIS LTDA. **Manual de instalação, operação e manutenção: Bomba dosadora de diafragma série DDR**. São Paulo.
21. BOMAX DO BRASIL LTDA. **Manual agitador e misturador agimax**. São Paulo, 2021, 8 páginas. Disponível em: <https://www.bomax.com.br/images/catalogo/13_Agitadores_misturadores_Agimax/Manuais/ManualAgimax.pdf> Acessado em: 20 de Maio, 2021.
22. COSTA, V. L., ESCORSIM, S., COSTA, D. L., **Processo produtivo e produção de aço**, p. 4 – 6, 2007.
23. COSTA, L.C., **Parâmetros de controle do processo de coqueificação das baterias de fornos de coque da COSIPA**, São Paulo, EPUSP, p.31, 2009
24. DIEMER, P. et al., **Potentials for utilization of coke oven gas in integrated iron and steel works**, International Meeting On Ironmaking, Vitoria, ABM, pp.87-88, 2004.

25. VIEIRA, W. P., **Estudo de corrosão em tubulações de gás de coqueria**, Vitória, UFES, p.50-53, 2004.
26. REBHUN, M. e ENGEL, G., **Reuse of wastewater for industrial cooling systems**. Journal (Water Pollution Control Federation), p. 237-241, 1988.
27. ZOMBAK, D. A., Ghosh, R. S., Wong-Chong, G. M., **Cyanide in Water and Soil: Chemistry, Risk, and Management**, CRC Press (USA), 1 ed., 2005
28. MEENAKSHI, R.C. MAHESHWARI, A. **Fluoride in drinking water and its removal**. Journal of Hazardous Materials, v. 137, 2006, p. 456 – 463.
29. MOHAPATRA, M. et al. **Review of fluoride removal from drinking water**. Journal of Environmental Management, v. 91, n. 1, p. 67-77, 2009
30. MCCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P.; **Unit Operations Of Chemical Engineering**, fifth edition, 1993.
31. FELLOWS, P. J.; **Tecnologia do Processamento de Alimentos**, 2ª Edição, Editora Artmed, São Paulo, 2008.
32. COMPANHIA SIDERURGICA DO PECÉM. **Processo de produção do aço**, São Gonçalo do Amarante, Ceará, 2021. Disponível em:< <https://www.cspecem.com/pt-br/sobre-a-csp/processo-de-producao-do-aco/>> Acessado em: 19 de Março, 2021.
33. SILVA, F. M. **A indústria siderúrgica e sua importância para a higiene ocupacional**, Jundiaí, São Paulo. Disponível em:<<https://www.siryhos.com/single-post/a-ind%C3%BAstria-sider%C3%BArgica-e-sua-import%C3%A2ncia-para-a-higiene-ocupacional>> Acessado em: 19 de Março, 2021.