



ANA LUIZA THEODORO FERREIRA BARRETO

**ESCALONAMENTO DA OPERAÇÃO DE MISTURA DE UMA
FORMULAÇÃO COSMÉTICA: UM ESTUDO DE CASO**

LAVRAS - MG

2022

ANA LUIZA THEODORO FERREIRA BARRETO

**ESCALONAMENTO DA OPERAÇÃO DE MISTURA DE UMA
FORMULAÇÃO COSMÉTICA: UM ESTUDO DE CASO**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa
Orientador

LAVRAS - MG

2022

ANA LUIZA THEODORO FERREIRA BARRETO

**ESCALONAMENTO DA OPERAÇÃO DE MISTURA DE UMA FORMULAÇÃO
COSMÉTICA: UM ESTUDO DE CASO**

**SCALE UP OF MIXING OPERATION OF A COSMETIC FORMULATION:
A CASE STUDY**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 22 de abril de 2022.

Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa - Escola de Engenharia / UFLA

Prof. Dr. Gilson Campani Júnior - Escola de Engenharia / UFLA

Wilians Micheletti Mota - Himalaya Wellness Company

Prof. Dr. Luciano Jacob Corrêa
Orientador

LAVRAS - MG

2022

Dedico este trabalho aos meus pais, Liana e Cláudio, por proporcionarem tudo que vivi até aqui e, acima de tudo, pelo grande amor e dedicação.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por me dar forças para seguir o sonho de ser engenheira química, por colocar pessoas importantes em meu caminho e por guiar minhas decisões.

Aos meus pais, Cláudio e Liana, pelo amor dedicado, por me darem o melhor em todos os momentos e pelo apoio incondicional.

À minha irmã, Maria Fernanda, pela amizade, carinho, por ser alguém que deixa os momentos mais leves e descontaídos.

Ao Antônio, por dividir essa jornada comigo, pelo constante incentivo e carinho no dia-a-dia.

Aos meus familiares e amigos, que estão sempre ao meu lado, vibrando por cada conquista.

À UFLA, por esta importante etapa da minha vida, pelo ambiente de acolhimento, por proporcionar grandes amizades e excelentes professores.

Aos professores da Engenharia Química, pelos ensinamentos e por serem exemplos de profissionais.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Jacob Correa, pela oportunidade de realizar este trabalho, pela orientação, compreensão e dedicação.

Ao time de *Tech Transfer* da Coty, por me proporcionar a experiência de estágio, por permitir e ajudar na realização deste trabalho, por todos ensinamentos, acolhimento e inspiração.

RESUMO

O setor "Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos" ou, popularmente conhecido como indústria de cosméticos, tem grande relevância na economia brasileira e mundial. É uma vertente da indústria química destinada à fabricação de produtos para embelezamento e cuidados pessoais. O processo de um cosmético envolve a incorporação, dispersão ou dissolução de matérias-primas e, por isso, a operação de agitação e mistura está presente desde a formulação de um produto em laboratório, até a sua fabricação. Dessa forma, na indústria de cosméticos, que é composta fundamentalmente por tanques de agitação, o estudo para assegurar a transferência de uma tecnologia para uma escala maior (Scale-up) é imprescindível. Sendo assim, neste trabalho, foi realizado um estudo de caso para o aumento de escala para a produção de uma tintura capilar. Para tal objetivo, realizou-se um profundo estudo da teoria que rege as operações de agitação e mistura, a escolha de um impelidor, o consumo de potência e a determinação de variáveis de processo. O experimento foi realizado coletando-se dados de potência e agitação de um tanque piloto de geometria cônica, equipado com impelidor do tipo âncora com raspadores, processando três diferentes tinturas capilares. Para o tonalizante, de viscosidade 55,3 cP, obteve-se 67 W de potência; para o shampoo tonalizante, com viscosidade de 1320 cP, 97 W; e para uma tintura em creme, de 10.030 cP, 74,5 W. Com isso, é possível afirmar o bom desempenho desse impelidor em fluidos viscosos. Realizou-se, por fim, os cálculos de aumento de escala para tanques projetados com capacidades de 500, 1000 e 2000kg. Para esse fim, o critério escolhido foi manter a similaridade geométrica e a razão P/V (potência por unidade de volume) constante. Plotou-se um gráfico de escalonamento, no qual é possível converter a rotação do agitador de escala piloto para um dos três tanques de escala industrial. Também, calculou-se o tempo de mistura (t_{m2}) e a potência da nova escala (P_2), que são fatores importantes para a avaliação do processo. Sendo assim, esses parâmetros variaram proporcionalmente com o tamanho do tanque. Portanto, com este estudo de caso, foi possível verificar que o critério de aumento de escala escolhido apresentou resultados coerentes, uma vez que a potência calculada condiz com o esperado para um tanque industrial.

Palavras-chave: Agitação e mistura. Aumento de escala. Cosméticos.

ABSTRACT

The cosmetics and personal care industry, popularly known as cosmetics industry, is extremely relevant for Brazilian and worldwide economy. It is part of the chemical industry destined to the manufacture of products for beauty and personal care. The process of a cosmetic involves the incorporation of raw materials and, therefore, the operation of agitation and mixing is present since the formulation of a product, in the laboratory, to its manufacture. Thus, the study to ensure the transfer of technology to a larger scale, or the Scale-up, is indispensable. Therefore, this study applied the scale-up for hair dyes. For this purpose, it was searched in the literature about the operation of agitation and mixing, the choice of impeller and parameters of process. In the experiment, power and agitation data were collected from a pilot tank of conical geometry, equipped with an anchor-type impeller with scrapers, processing three types of hair dyes. For the hair toner (55.3 cP) the power was 67 W, for the toning shampoo (1320 cP) 97 W and for a hair dye cream (10,030 cP) 74.5 W. With this, it is possible to affirm the good performance of this impeller in viscous fluids. A scale-up was carried out for the tanks designed, with 500, 100 and 200 kg of capacity. For this purpose, the criterion was to maintain the geometric similarity and the P/V ratio (power per unit volume). A scaling chart was plotted and it is possible to make a speed conversion for one of the industrial scale tanks, with the speed of the small scale. The mixing time (t_{m2}) and the power (P_2) of the new scale are also calculated, which are important factors for the evaluation of the process. Therefore, these parameters obtained are proportional to the size of the tank. Therefore, this study performed a validation of scaled-up criteria, since the calculated power is applicable to industrial tank.

Keywords: Agitation and mixing. Scale-up. Cosmetics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Exemplificação de um tanque de agitação usual.....	1
Figura 2.1 TOP10 mercados consumidores de produtos HPPC	6
Figura 2.2: Empresas de HPPC no Brasil	7
Figura 2.3: Estrutura básica do fio de cabelo	8
Figura 2.4: Reologia do fluido.....	10
Figura 2.5: Diagrama reológico para fluidos dependentes do tempo	12
Figura 2.6: Ilustração de um tanque agitado convencional	13
Figura 2.7: Ilustração de tanques cilíndricos verticais com vários tipos de fundos	14
Figura 2.8: Vórtice em um tanque agitado, vista lateral e superior, respectivamente ..	15
Figura 2.9: Mecanismo de ação das chicanas segundo seu posicionamento:.....	16
Figura 2.10: Tipos de fluxo: (a) Axial; (b) Radial; (c) Tangencial.....	17
Figura 2.11: Impelidores de mistura: (a) Hélice naval; (b) Turbina de pás retas;	17
Figura 2.12: Impelidor naval	18
Figura 2.13: Geometria do impelidor de 4 pás retas inclinadas.....	19
Figura 2.14: Turbina de Pás retas. (a) Aberta (sem disco); (b) Rushton (com disco). .	20
Figura 2.15: Impelidores (a) Âncora e (b) Helicoidal	21
Figura 2.16: Impelidor âncora com raspadores	22
Figura 2.17: Impelidor âncora com motor e dois eixos estacionários de defletores.....	22
Figura 2.18: Disco dentado.....	23
Figura 2.19: Ilustração do processo de cisalhamento	24
Figura 2.20: Número de potência versus número de Reynolds sete impelidores	27
Figura 2.21: Curva de potência elucidando os diferentes regimes	28
Figura 2.22: Similaridade geométrica entre tanques	31
Figura 3.1: Reator utilizado no trabalho	36
Figura 3.2: Becomix ® RW 15CD	37
Figura 3.3: Danfoss VLT® AutomationDrive.....	37

Figura 3.4: Etapas de cálculo para aumento de escala.....	39
Figura 4.1: Potência versus Agitação para viscosidades diferentes	42
Figura 4.2: P/V versus Agitação para viscosidades diferentes	43
Figura 4.3: Curva de Número de Potência versus Número de Reynolds para o.....	44
Figura 4.4: Curva de Número de Potência versus Número de Reynolds para o	44
Figura 4.5: Curva de Número de Potência versus Número de Reynolds para	45
Figura 4.6: Gráfico para conversão da velocidade de agitação	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1- Relações geométricas padrão	13
Tabela 2.2: Relações Geométricas Usuais Impelidor de 4 Pás Retas	20
Tabela 3.1: Descrição qualitativa das fórmulas	34
Tabela 3.2: Dimensões do Becomix ® RW 15 CD	35
Tabela 4.1: Análises iniciais dos produtos	41
Tabela 4.2: Dados coletados em 1108 rpm (1,5 m/s)	41
Tabela 4.3: Dimensões do piloto e dos tanques projetados	46
Tabela 4.4: Parâmetros de processo obtidos em planta pilto	47
Tabela 4.5: Resultados de Potência consumida e Tempo de mistura	48

NOMENCLATURA

D_T	Diâmetro do tanque	[m]
D_i	Diâmetro do impelidor	[m]
g	Gravidade	[m/s ²]
H_j	Distância impelidor até o fundo do tanque	[m]
H_L	Altura do fluido no tanque	[m]
L_c	Largura das chicanas	[m]
N	Frequência de rotação do impelidor	rps
N_p	Número de potência	-
N_{Re}	Número de Reynolds	-
P	Potência	[W]
P/V	Potência por unidade de volume	[W/m ³]
t	Espessura da pá	[m]
t_m	Tempo de mistura	[s]
V	Volume	[m ³]
w	Altura da pá do impelidor	[m]

SÍMBOLOS GREGOS

μ	Viscosidade do fluido	[kg/m.s]
μ_{ap}	Viscosidade aparente do fluido	[kg/m.s]
τ	Tensão de cisalhamento	[Pa]
γ	Velocidade de cisalhamento	[s ⁻¹]
ρ	Densidade do fluido	[kg/m ³]
Φ	Fator tempo de mistura	-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos gerais.....	2
1.2 Objetivos específicos.....	3
2 REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1 A indústria de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos (HPPC).....	4
2.1.1 Panorama do mercado	6
2.1.2 Tinturas capilares	8
2.2 Características reológicas	9
2.3 Sistemas de agitação e mistura.....	12
2.3.1 Chicanas	15
2.3.2 Impelidores.....	16
2.3.3 Consumo de potência em sistemas de agitação e mistura	25
2.3.4 Número de Reynolds	26
2.3.5 Número de potência	26
2.3.6 Tempo de mistura	29
2.4 Aumento de escala.....	29
3 METODOLOGIA	33
3.1 Materiais e equipamentos.....	34
3.1.1 Formulação.....	34
3.1.2 Planta piloto.....	35
3.1.3 Análises de viscosidade e densidade	38
3.2 Métodos	38
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1 Produção em planta piloto.....	41

4.2 Potência consumida.....	41
4.3 Número de Reynolds e o Número de potência.....	43
4.4 Aumento de escala	46
5 CONCLUSÕES	49
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	50
7 REFERÊNCIAS	51

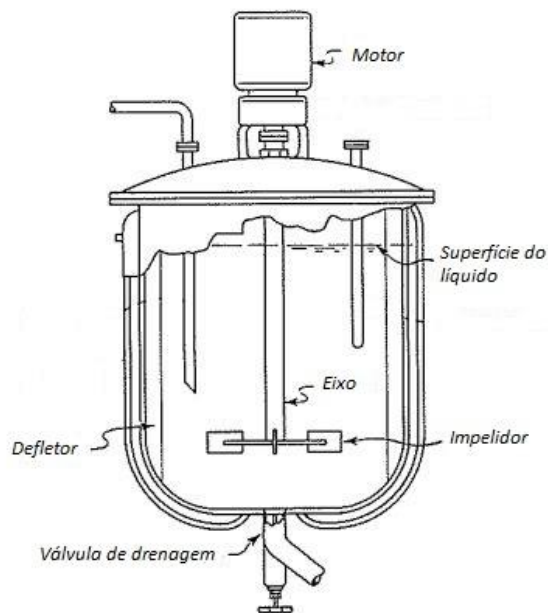
1 INTRODUÇÃO

Um produto cosmético é obtido a partir da incorporação de matérias-primas que tenham funções que agregam sensorial, cuidado ou embelezamento à pele, cabelos ou unhas. Por esse motivo, as operações de agitação e mistura estão presentes do laboratório à fábrica, possibilitando a entrega de um produto homogêneo e dentro das expectativas do consumidor.

De acordo com McCabe *et al.* (2005), muitas operações dependem de uma agitação e mistura efetiva dos fluidos. O processo de mistura, amplamente utilizado em grande parte das indústrias, promove fluxos e movimentos entre dois ou mais materiais, com a finalidade de obter um produto final. A operação de agitação, por sua vez, caracteriza-se por promover, em um único produto, fluxos e movimentos, a fim de homogeneizar toda a sua composição.

McCabe *et al.* (2005) descreve a operação de agitação e os equipamentos para que ocorra com sucesso. O equipamento mais usual neste tipo de processo, exemplificado na Figura 1.1, consiste em um tanque de fundo arredondado, com um eixo apoiado no centro, com um motor acoplado nele e que gira os impelidores na outra ponta do eixo. Salienta-se que existem variações dessas características de acordo com o processo em questão.

Figura 1.1: Exemplificação de um tanque de agitação usual



Fonte: McCabe *et al.* (2005) (Adaptado)

Fatores importantes para uma indústria, como tempo de processo, gasto com utilidades e qualidade final do produto, retratam o desempenho de uma planta de grande porte.

Por este motivo, tem-se a necessidade de que o processo seja eficiente, rápido e otimizado e, dessa forma, busca-se oportunidades de melhoria e estudo. Em função das inúmeras variáveis que permeiam os processos de agitação e mistura, existem muitas áreas de pesquisa e processos a serem estudados.

Na indústria de cosméticos, que é composta fundamentalmente por tanques de agitação, o estudo para assegurar a transferência de uma tecnologia para uma escala maior, ou seja, o *Scale-up*, é imprescindível.

No *scale-up* de uma formulação cosmética, deve-se levar em consideração não só as matérias-primas, as operações e envase, mas também as variáveis de processo para garantir a qualidade do produto.

De acordo com Joaquim Júnior et al. (2012), a escolha mais adequada do sistema, do ponto de vista técnico-econômico, deve estar baseada em fatores como, investimento inicial, consumo de potência, tempo de processo e homogeneização.

Quando se trata de um tanque de agitação, uma das maneiras é relacionar a eficiência de mistura do impelidor com o consumo de potência que os impelidores geram (Souza, 2011). Dessa forma, isso leva a minimizar os gastos e tempos de processos.

Portanto, é importante que a equipe de desenvolvimento de produtos esteja muito familiarizada com as operações de agitação e mistura, principalmente no que tange ao escalonamento do processo de um produto formulado em laboratório para uma produção industrial.

Neste contexto, uma agitação inapropriada pode causar, por exemplo, a aeração do produto, acarretando problemas no envase. Também é comum ocorrer a separação de uma emulsão, caso não seja oferecida a turbulência necessária.

1.1 Objetivos gerais

Tendo em vista a importância das operações de agitação e mistura nos processos cosméticos, este trabalho terá ênfase no cálculo de aumento de escala de uma formulação

cosmética. O estudo visa tornar uma formulação reproduzível em fábrica, sendo capaz de prever os parâmetros de processos a serem utilizados em tanques de agitação de larga escala, a fim de reproduzir o mesmo produto em qualquer nível de produção, seja laboratorial, piloto ou industrial. Neste caso, a formulação a ser trabalhada é a tintura capilar.

1.2 Objetivos específicos

Para o aumento de escala ocorrer de forma assertiva é necessário o conhecimento do processo e do sistema de agitação em questão. Diante de um tema amplo, será abordada a teoria que rege as operações de agitação e mistura, a escolha de um impelidor e o consumo de potência.

Sendo assim, objetiva-se demonstrar o método adotado para aumento de escala por meio de um estudo de caso, em uma própria indústria cosmética. Além disso, a abordagem e investigação da influência viscosidade do produto sob o impelidor faz-se necessária, uma vez que é uma característica que afeta o consumo de potência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, será abordado o panorama da indústria de cosméticos, com enfoque no produto de estudo: a coloração capilar, além de conceitos que abrangem sistemas de agitação, fundamentados pela literatura e aplicados na produção de um cosmético. A revisão teórica contempla os temas que devem ser conhecidos e explorados para embasar a metodologia para o aumento de escala.

2.1 A indústria de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos (HPPC)

A Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) estabelece a definição de Produtos Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (HPPC) na Resolução RDC nº 79, de 28 de agosto de 2000, no Anexo 1:

Cosméticos, Produtos de Higiene e Perfumes, são preparações constituídas por substâncias naturais ou sintéticas, de uso externo nas diversas partes do corpo humano, pele, sistema capilar, unhas, lábios, órgãos genitais externos, dentes e membranas mucosas da cavidade oral, com o objetivo exclusivo ou principal de limpá-los, perfumá-los, alterar sua aparência e ou corrigir odores corporais e ou protegê-los ou mantê-los em bom estado. (ANVISA, 2000)

Este setor, ainda de acordo com a ANVISA (2000), é dividido em subgrupos, os quais distinguem pelo nível de risco que o produto apresenta ao usuário. São eles:

- Risco Nível 1: Produtos de higiene pessoal, cosméticos e perfumes que se caracterizam por possuírem propriedades básicas ou elementares. Este nível abrange produtos tais como: sabões, xampus, cremes de barbear, escovas dentais, loções de beleza, óleos e perfumes.
- Risco Nível 2 – Produtos de higiene pessoal, cosméticos e perfumes que possuem indicações específicas, cujas características exigem comprovação de segurança e/ou eficácia, bem como informações e cuidados, modo e restrições de uso. Os produtos deste nível estão sujeitos a cumprir requisitos técnicos mais severos. Alguns deles são: xampus anticaspa, cremes dentais anticárie, desodorantes, filtros UV, loções

bronzeadoras, tinturas para cabelos, descolorantes, clareadores e repelentes de insetos.

Segundo o BNDES (2007), o que comumente é chamada de indústria de cosméticos é, na verdade, composta por três segmentos, os produtos higiene pessoal, perfumaria e cosméticos, propriamente ditos. Representa, assim, uma vertente da indústria química, cuja principal atividade é a manipulação de fórmulas.

A categorização dessa indústria permite a divisão dos produtos nos três grupos:

- Produtos de Higiene Pessoal como, sabonetes, fraldas descartáveis, produtos para higiene capilar, itens para higiene oral, talcos, cremes de barbear;
- Produtos cosméticos, que são produtos de coloração e tratamento de cabelos, maquiagem, protetores solares, cremes e loções para pele;
- Perfumaria, que além de perfumes inclui águas de colônia e produtos pós barba.

Diante das definições apresentadas até aqui, fica claro que se trata de um setor bastante diverso, isso porque abrange uma grande variedade de produtos que tem variações de acordo com faixa etária, gênero, raça e poder aquisitivo do consumidor. Assim, há uma vasta gama de empresas no setor de HPPC, sendo desde multinacionais, diversificadas ou especializadas em algum dos segmentos, a pequenas e médias empresas nacionais.

Levando em consideração a concorrência, as empresas do setor adotam estratégias para se destacarem, como, diferenciação pela qualidade ou preço, táticas de vendas e a inovação, sendo a última uma importante característica dessa indústria (ROS, 2016).

Com a constante necessidade em apresentar novidades, são investidos recursos em lançamentos e promoções de novos produtos (BNDES, 2007). Entre os fatores relevantes para a competitividade das empresas, destacam-se um profundo estudo das tendências dos consumidores, atualização de embalagens e fórmula.

Por fim, outro fator interessante a ser considerado é a relação do setor de HPPC com outros setores de produção. Além de, obviamente, ser grande comprador de matérias-primas de indústrias químicas, existe também a ligação com a indústria farmacéutica, para a pesquisa e desenvolvimento de ativos e extratos. Também é um forte demandador de produtos da indústria de materiais e embalagens.

2.1.1 Panorama do mercado

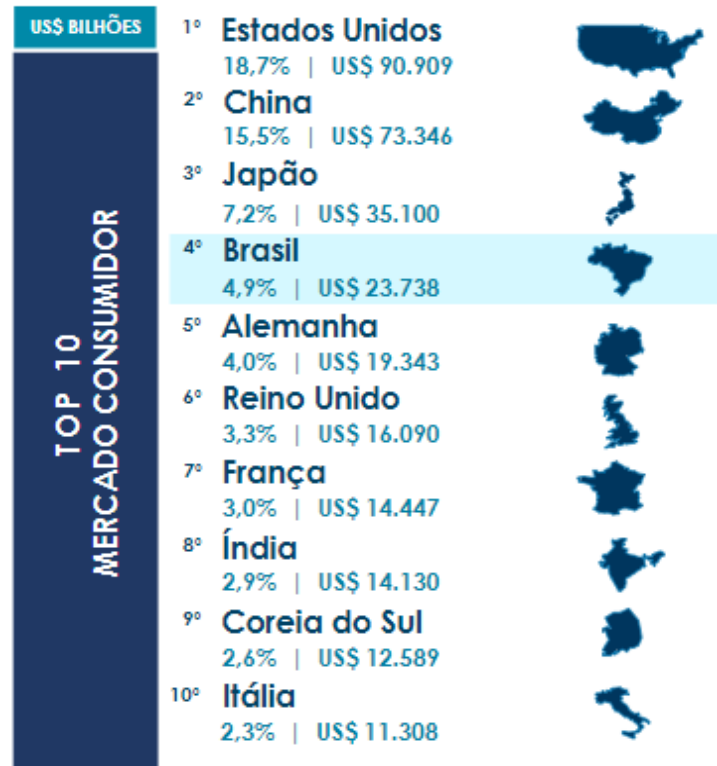
A indústria de HPPC tem particularidades pelo motivo de ser um setor bastante amplo e com grande variedade de produtos. Dessa forma, o panorama econômico dos cosméticos é concorrido e dinâmico. Isso acontece também devido às constantes mudanças do mundo globalizado, as quais refletem no comportamento do consumidor e nas tendências de mercado.

O mercado mundial de HPPC é amplamente dominado pelos países desenvolvidos. As grandes empresas multinacionais caracterizam-se pela elevada capacidade técnica e produtiva das suas plantas espalhadas pelo mundo.

Neste cenário, de acordo com a Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC), o Brasil é o quarto maior mercado consumidor do mundo para esses itens, com mais de US\$ 20 bilhões de consumo em 2020. Mais especificamente, na América Latina, o país detém a maior fatia de mercado.

Os dez maiores mercados consumidores estão listados na Figura 2.1, a seguir.

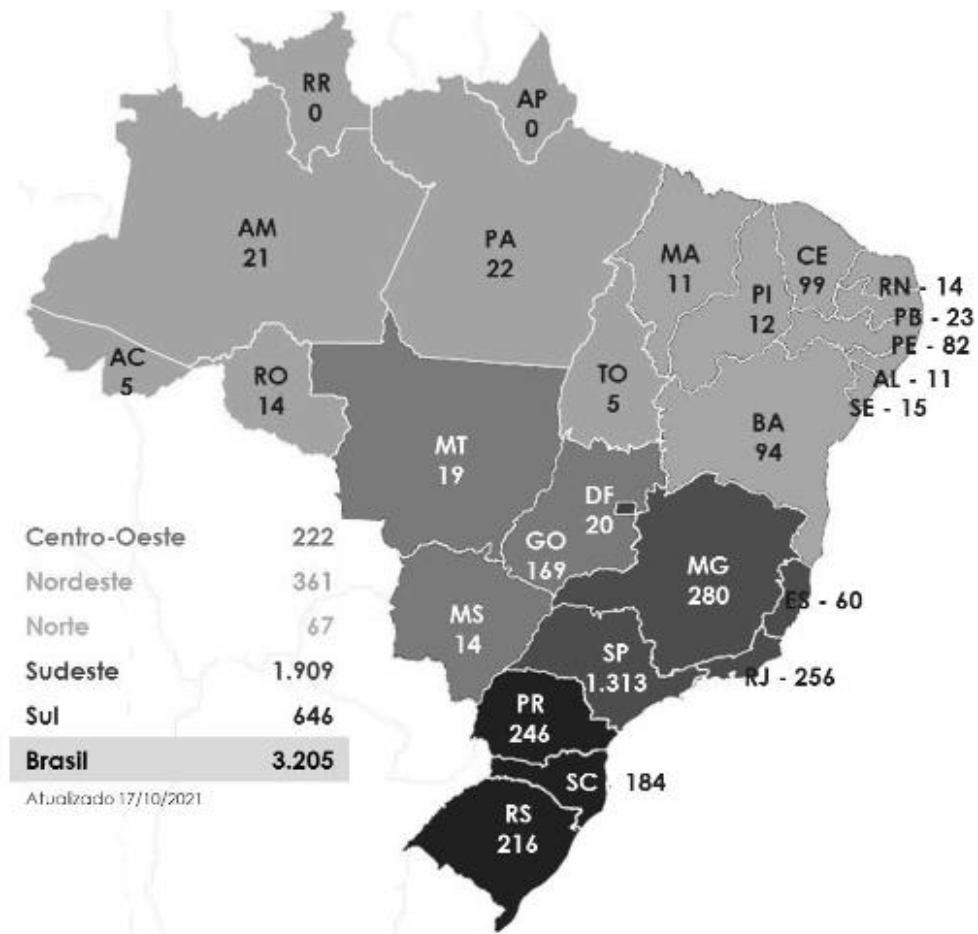
Figura 2.1: TOP10 mercados consumidores de produtos HPPC



Fonte: Eurimonitor (2021) citado por ABIHPEC (2022)

As empresas de HPPC no Brasil, predominantes no sudeste como mostra a Figura 2.2, não só abastecem o mercado brasileiro, mas também tornam o país um grande exportador para países como Argentina, Chile, Colômbia e México. De acordo com a ABIHPEC (2022), o número de empresas instaladas no País cresceu 7% de 2019 para 2020, sendo que a última atualização, em 2021, contabilizou mais de 3.200 empreendimentos.

Figura 2.2: Empresas de HPPC no Brasil



Fonte: ABIHPEC (2022)

Ainda, é o setor que mais investe em inovação. Dados de 2018 indicam que, cerca de R\$ 1,9 bilhão foi aplicado em Pesquisa e Desenvolvimento (ABIHPEC, 2019), valor que traduz uma das principais estratégias da indústria HPPC, a inovação.

De acordo com a ABIHPEC (2022), no que diz respeito a classificação do Brasil por categoria, o país ocupa segundo lugar em consumo de fragrâncias, produtos masculinos e desodorantes, terceiro em proteção solar e quarto em produtos para cuidados de cabelo. Fica claro, portanto, a relevância brasileira no mercado internacional de cosméticos.

2.1.2 Tinturas capilares

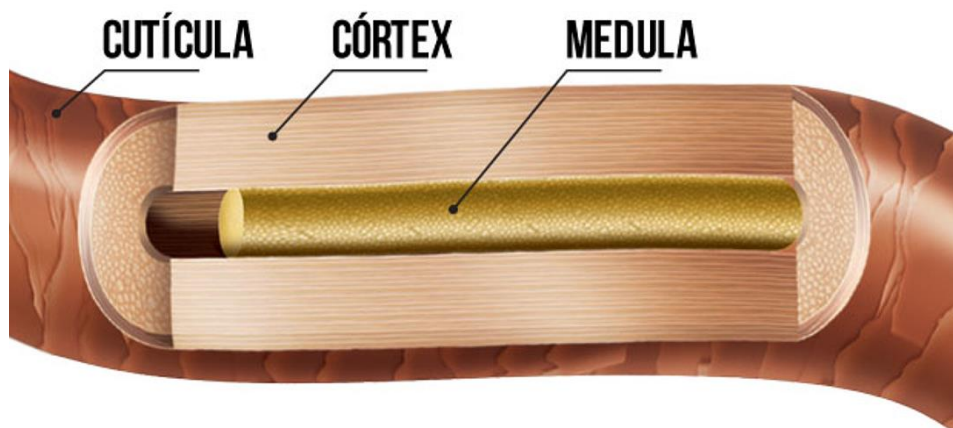
Mudar a cor dos cabelos é um ato milenar que ao passar do tempo vem ganhando relevância no que diz respeito à novas tecnologias e público diversificado. Dados da Mintel (2021) apontam que o Brasil é o país com mais lançamentos na categoria.

Para entendimento do mecanismo de ação do produto é necessário conhecer a morfologia do fio de cabelo. A estrutura capilar, basicamente, é dividida em cutícula, córtex e medula, como ilustra a Figura 2.3. A cutícula é a parte mais externa do fio de cabelo e atua na proteção e resistência.

O córtex, rodeado pela cutícula, contém a maior quantidade de massa da fibra capilar. Sua estrutura é extremamente organizada e contém o pigmento natural do cabelo, a melanina. Além disso, por apresentar a maior porção de queratina da estrutura capilar, agrega características mecânicas ao fio, como força e elasticidade (FRANÇA et al., 2015).

Por fim, a parte mais interna é denominada medula. Composta por células especializadas ou, muitas vezes, oca, quando presente no fio ela se estende continuamente pelo comprimento. De acordo com Guerra-Tapia e Gonzalez-Guerra (2014), a medula não apresenta função significativa.

Figura 2.3: Estrutura básica do fio de cabelo



Fonte: Bellkey Professional (2019)

Com isso, pode-se definir a ação das tinturas na estrutura capilar. Conforme Guerra-Tapia e Gonzalez-Guerra (2014), as colorações sintéticas podem ser classificadas de acordo com o grau de permanência, que são:

- a) Temporárias: A cor permanece no cabelo por alguns dias. Possui em sua formulação corantes de alto peso molecular, que aderem ou depositam-se na superfície da cutícula.
- b) Semi-permanentes: Seus corantes têm menores pesos moleculares e, em geral, não necessitam processo reativo para apresentar a cor. Assim, atingem a parte superficial do córtex, durando cerca de 10 lavagens. Um exemplo de tinturas semi-permanentes são os tonalizantes.
- c) Permanentes: É a tintura mais comum no mercado, por possuir uma vasta gama de tonalidades e cobrir até 100% dos fios brancos. Seus corantes de baixo peso molecular, penetram profundamente no córtex. Essas substâncias depositam a cor mediante a reação de oxidação. Sua formulação contém Hidróxido de Amônia como agente alcalinizante, o qual abre as cutículas do fio para penetração dos corantes.

Logo, esse tipo de cosmético apresenta diferentes propostas. O aspecto do produto varia de acordo com a sua funcionalidade, podendo ser, por exemplo, um creme viscoso, um líquido ou uma suspensão. A definição do processo depende, portanto, das características da formulação desenvolvida e, conseqüentemente, de seu comportamento reológico.

2.2 Características reológicas

Segundo Souza (2011), a movimentação do fluido é um fator determinante sob o aspecto da eficiência da operação. O conhecimento dessas características torna possível a avaliação do que o processo requer em questões de custos e execução.

Assim, o fluxo em um tanque de agitação é também condicionado pela fluidodinâmica do material que está em seu interior. Dessa forma, para o estudo da operação é interessante caracterizar o fluido quanto à viscosidade e à reologia.

De acordo com Bontorim (2009), reologia é a ciência que descreve o comportamento do fluido quando submetido a uma deformação ou força de cisalhamento. Por isso, define o desempenho e quantifica a resistência ao escoamento, a qual é dada através da viscosidade. Portanto, a viscosidade pode ser estudada dentro dos parâmetros reológicos.

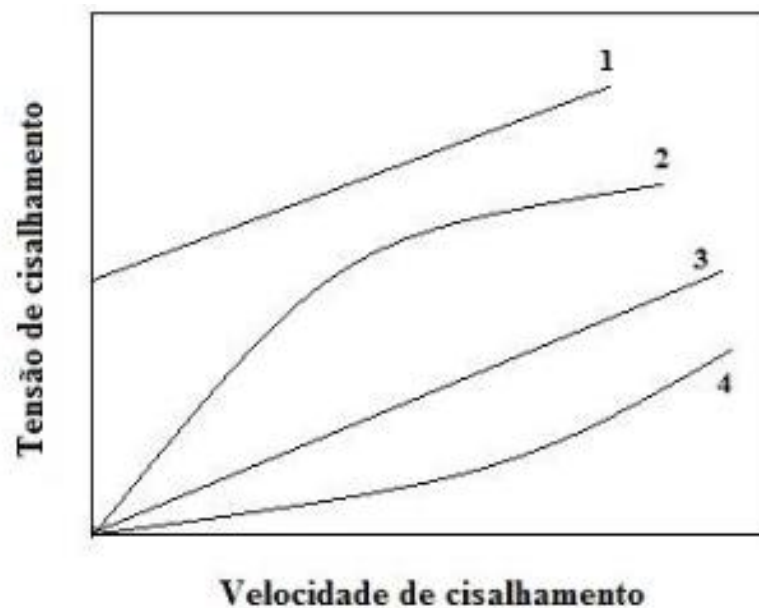
Segundo Bird et al. (1960) citado por Garavito (2013), a reologia é a ciência que descreve a deformação do fluido e o fluxo de matéria quando submetido a tensões, sob determinadas condições termodinâmicas e ao longo de um intervalo de tempo. Com isso, considera propriedades como: elasticidade, viscosidade e plasticidade.

A elasticidade é uma propriedade que certos materiais apresentam de serem capazes de recuperar a sua forma e o seu estado inicial. Já a plasticidade, ao contrário, é característica de materiais que se deformarem permanentemente a partir de uma tensão aplicada.

A viscosidade é a grandeza que indica o atrito entre as camadas consecutivas de fluido e a resistência a qualquer mudança do seu volume, sendo função da resistência denominada de cisalhamento (BONTORIM, 2009).

A Figura 2.4 apresenta o comportamento dos fluidos independentes do tempo, em relação a variação da tensão e velocidade de cisalhamento.

Figura 2.4: Reologia do fluido. 1: fluido Bingham; 2: fluido pseudoplástico; 3: fluido Newtoniano; 4: fluido dilatante



Fonte: Corrêa (2016)

A viscosidade (μ) para Fluidos Newtonianos é a relação linear da razão entre a tensão de cisalhamento (τ) e a velocidade de cisalhamento ($\dot{\gamma}$) e pode ser calculada numericamente pela Eq. (2.1).

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.1)$$

Os fluidos que apresentam essa relação não linear, são chamados de Não Newtonianos sendo divididos em três grandes grupos: viscoelásticos, independentes e dependentes do tempo.

Os fluidos viscoelásticos, segundo Garavito (2013), são substâncias que deformam quando submetidas à tensão de cisalhamento e quando esta cessa ocorre certa recuperação do estado inicial, ou seja, apresentam um comportamento elástico.

Para os materiais cujas propriedades reológicas não dependem do tempo, tem-se a Eq. (2.2), descrita pelo modelo da “lei da potência”.

$$\tau = K \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2.2)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

K = índice de consistência do fluido (Pa.sⁿ);

$\dot{\gamma}$ = velocidade de cisalhamento (s⁻¹);

n = índice de comportamento de escoamento do fluido (adimensional).

Conforme descrito por Correa (2016), n é igual a 1 quando o fluido é caracterizado como newtoniano e K é a própria viscosidade aparente do fluido.

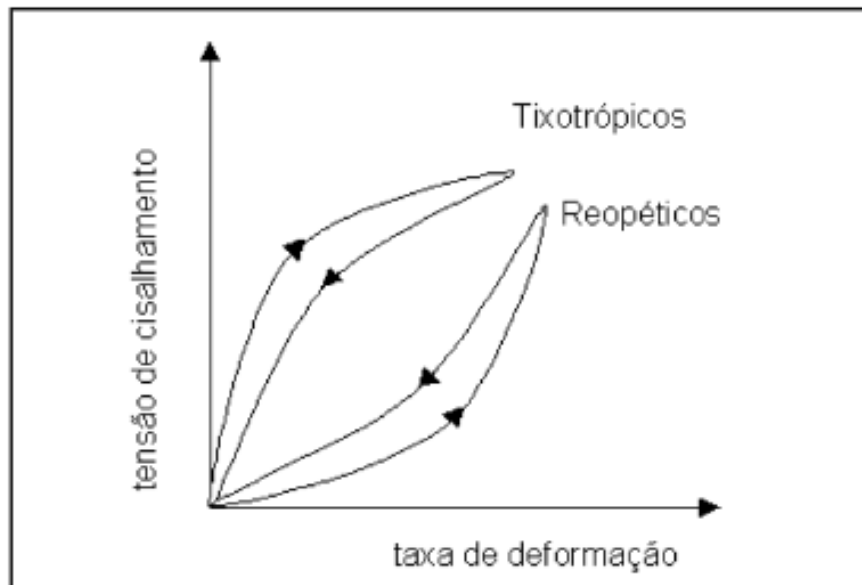
Quando n é menor que 1, o fluido é considerado como pseudoplástico. Para esse tipo de fluido, a viscosidade aparente diminui com o aumento da velocidade de cisalhamento. Ou seja, quanto maior a força aplicada no material, menor a resistência viscosa.

Por outro lado, se n é maior que 1, o fluido é considerado dilatante, em que a viscosidade aparente deste tipo de fluido aumenta com a velocidade de cisalhamento (CORRÊA, 2016). Assim, há o aumento da resistência viscosa quando a tensão é aplicada.

Ainda na classe dos fluidos os quais a reologia não depende do tempo, observa-se que o fluido de Bingham. Este, necessita de uma tensão mínima para que a deformação aconteça. Bontorim (2009) descreve que esse fluido tende a formar uma rede intermolecular quando em repouso, isso restringe o movimento de elementos de volume e dá a substância um caráter sólido com uma viscosidade extremamente alta. Contudo, quando as forças externas superam as forças de reticulação o material escoar.

Por fim, destaca-se os fluidos que apresentam propriedades que variam, além da tensão de cisalhamento, com o tempo de aplicação desta tensão, para uma velocidade de cisalhamento constante (GARAVITO, 2013). Neste grupo estão os materiais tixotrópicos, cuja viscosidade diminuí com o tempo de aplicação da tensão de cisalhamento, voltando a ficar mais viscosos à medida que a tensão de cisalhamento cessa, e os reopéticos, que se comportam de forma contrária, como mostrado na Figura 2.5.

Figura 2.5: Diagrama reológico para fluidos dependentes do tempo



Fonte: UFPE (2009)

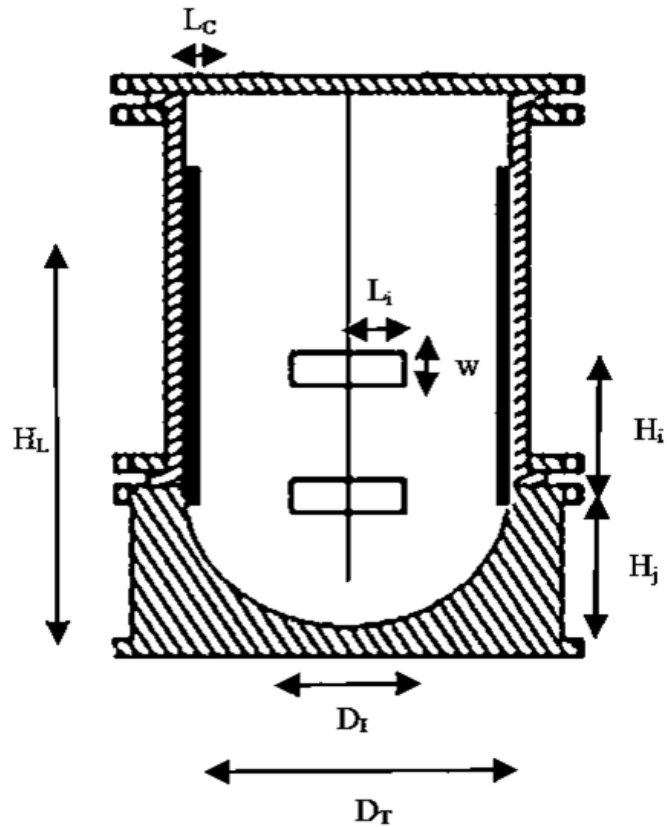
Quando se trata de cosméticos os dados reológicos são aplicáveis tanto para avaliação sensorial do produto, como também é um parâmetro importante para o projeto de impelidores.

2.3 Sistemas de agitação e mistura

Para que uma mistura ou dispersão ocorra de forma eficiente o sistema necessita de energia, que pode ser fornecida pela agitação mecânica.

Um sistema padrão de agitação e mistura consiste normalmente em um tanque, motor, eixo, rotor e, usualmente, defletores ou chicanas, conforme ilustra a Figura 2.6.

Figura 2.6: Ilustração de um tanque agitado convencional



Fonte: CORRÊA (2016)

Os parâmetros geométricos de um sistema de agitação são: o diâmetro do tanque (D_T), diâmetro do impelidor (D_i), comprimento da pá do impelidor (L_i), altura da pá do impelidor (w), a distância entre o impelidor até o fundo do tanque (H_j), altura do líquido (H_L) e a largura das chicanas (L_C).

McCabe et al. (2005) descreve relações geométricas para um tanque agitado padrão. Essas dimensões características são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.2.1- Relações geométricas padrão

$\frac{D_T}{D_i}$	$\frac{H_L}{D_i}$	$\frac{H_i}{D_i}$	$\frac{L_i}{D_i}$	$\frac{W}{D_i}$	$\frac{L_C}{D_T}$
3	3	1	0,25	0,2	0,1

Fonte: McCabe et al. (2005)

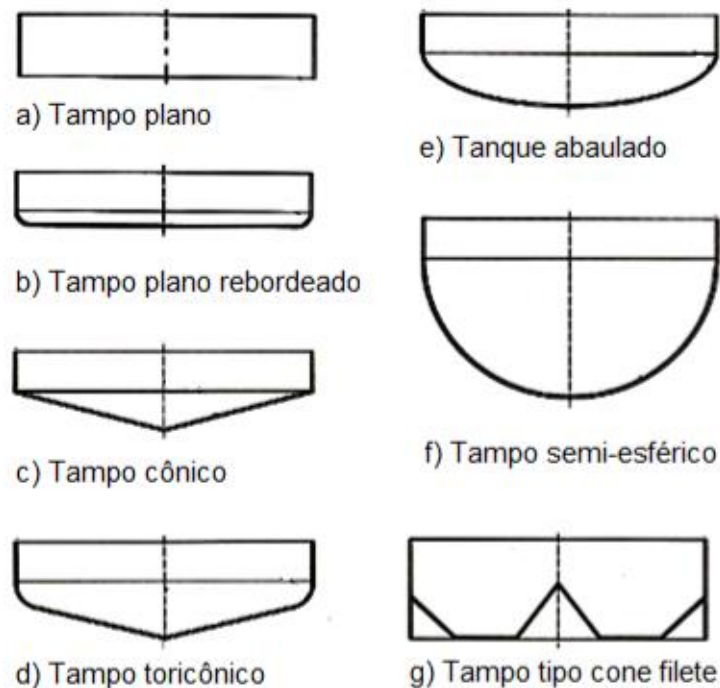
Segundo Campesi (2007), em tanques reais é difícil a obediência das relações acima, por isso são chamadas de convencionais ou padrões. Essas correlações indicam uma boa performance da homogeneização, mas nem sempre são usadas com rigor. Elas variam segundo a necessidade do projeto.

A razão entre diâmetro do impelidor (D_T) e altura do líquido (H_L) é estudada por diversos autores, a fim de conceber um projeto de agitador que retorne uma ótima eficiência.

De acordo com Souza, et al. (2003) Quando a relação entre a altura do líquido e o diâmetro do tanque for 1, a geometria tem se mostrado economicamente mais viável para a utilização de um único impelidor. Souza (2011) complementa que, para tanques mais esbeltos, o que faz o valor da proporção ser menor que 1, são necessários um número maior de impelidores.

Ainda em relação à característica do tanque, é importante considerar o fundo do tanque, uma vez que afeta o fluxo interno. Existem diversos tipos de fundo, mostrado na Figura 2.7, e pode-se considerar os principais, os planos, abaulados e semiesféricos. Para um projeto de tanque, alguns fatores devem ser levados em consideração como, drenagem do fluido, sanitização, custo, existência de pressão interna e volume do vaso. (CORRÊA, 2016).

Figura 2.7: Ilustração de tanques cilíndricos verticais com vários tipos de fundos



A forma do reator tem influência dos fluxos gerados pela agitação. Sabe-se que reator cilíndrico é o mais utilizado, mas existem outras geometrias, em particular o tronco cônico, que muda o perfil de velocidade e, portanto, afeta o escoamento (SCHMAL, 2017).

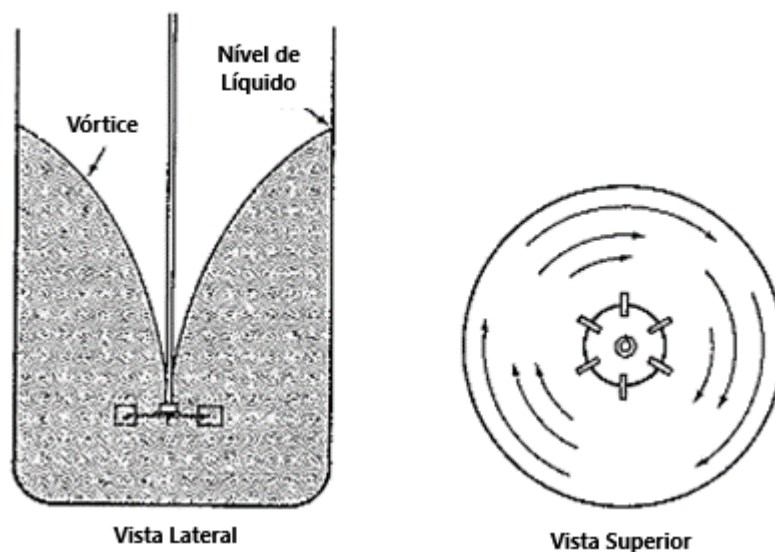
É de suma importância a identificação da geometria do sistema de agitação, uma vez que determina os perfis de escoamento do fluido no interior do tanque (SOUZA, 2011). Esse comportamento, define a interação entre os materiais no sistema, se há turbulência e em que intensidade ela se dá, o comportamento da superfície, ou seja, todos os fatores que implicarão no resultado do produto final.

2.3.1 Chicanas

As chicanas são dispositivos planos acoplados, geralmente, na direção longitudinal do tanque, posicionados junto à parede deste, ou fixados em um eixo. Elas são utilizadas para evitar a formação de vórtice (MARTINI, 2010).

O fenômeno de vórtice não é desejável para que a mistura seja eficiente, uma vez que reduz o nível de agitação. Se trata de um movimento em falso, no qual o fluido gira como um corpo sólido, como ilustrado na Figura 2.8.

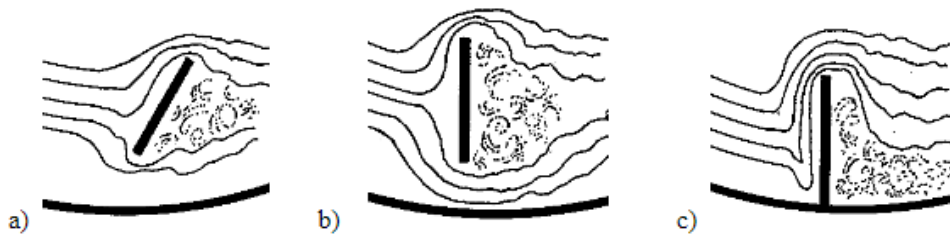
Figura 2.8: Vórtice em um tanque agitado, vista lateral e superior, respectivamente



Fonte: Adaptado de McCabe *et al.* (2005)

Para evitar a formação do vórtice, as chicanas são projetadas para redirecionar o escoamento para o impelidor, agindo na quebra do fluxo. A Figura 2.9 ilustra as chicanas em diferentes posições e como fluido se comporta através deste dispositivo.

Figura 2.9: Mecanismo de ação das chicanas segundo seu posicionamento:
(a) Inclínada; (b) Espaçada; (c) Junto à parede



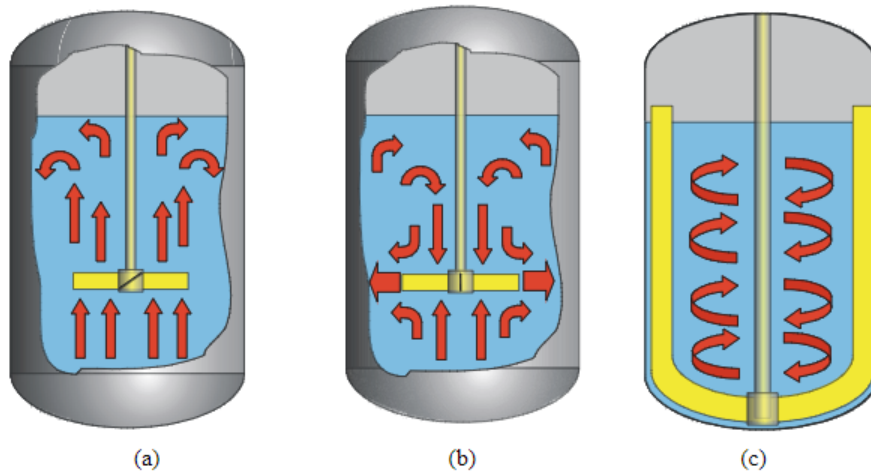
Fonte: (MARTINI, 2010).

2.3.2 Impelidores

Os impelidores são divididos em duas classes: aqueles que geram correntes paralelas ao eixo do impelidor e os que formam correntes na direção do raio do impelidor.

O primeiro fluxo é chamado de axial e o segundo radial (MCCABE *et al.*, 2005). Além desses, alguns impelidores geram uma maior movimentação próxima a parede do tanque e próximo ao centro é quase nula. Sendo assim chamado de tangencial. A Figura 2.10, ilustra o comportamento desses três fluxos, respectivamente (SOUZA, 2011).

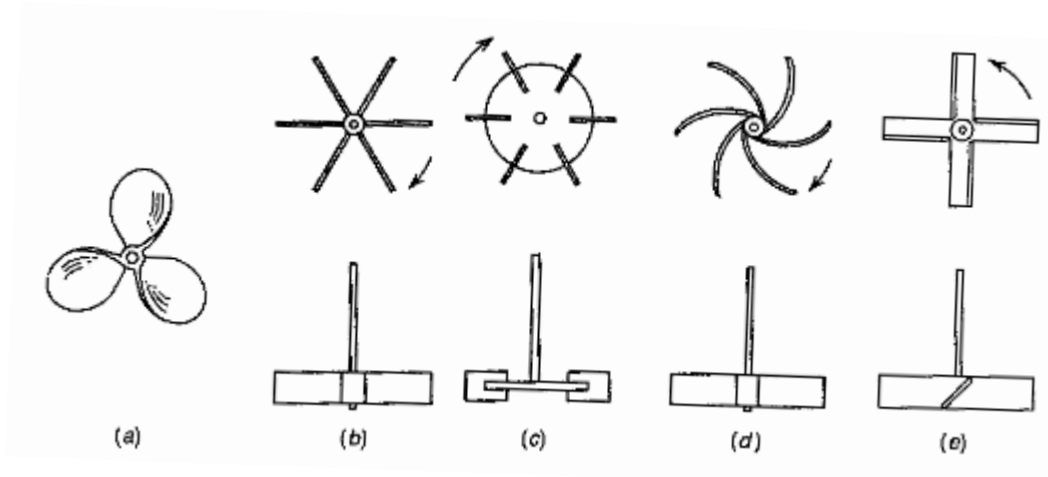
Figura 2.10: Tipos de fluxo: (a) Axial; (b) Radial; (c) Tangencial



Fonte: SOUZA, 2011

Existem diversos tipos de impelidores comerciais. A determinação do impelidor mais efetivo deve ser baseado no entendimento do processo, nas propriedades físicas e, muitas vezes, são projetados e desenvolvidos para as necessidades da indústria. Na Figura 2.11, estão ilustrados alguns dos agitadores mais conhecidos.

Figura 2.11: Impelidores de mistura: (a) Helice naval; (b) Turbina de pás retas; (c) Turbina de disco (Rushton); (d) Turbina de pás curvas; (e) Turbina de pás retas inclinadas



Fonte: McCabe et al. (2005)

Na indústria de cosméticos, a utilização do tipo de impelidor segue a lógica das características do produto, a interação dos materiais utilizados e suas propriedades físicas.

Dentre os processos cosméticos estão, a mistura líquido-líquido e líquido-sólido, dispersão de sólidos pesados, emulsificação e cisalhamento, e para cada um é necessário que haja uma agitação apropriada.

A seguir serão abordados alguns dos agitadores mais comuns no âmbito cosmético e suas particularidades.

a) Hélice Naval

A hélice Naval é um tipo de agitador que oferece um fluxo axial e que desempenha alta velocidade em líquidos pouco viscosos. Esse tipo de agitador cisalha o líquido vigorosamente. Apresentam um diâmetro bem menor que o tanque, sendo o padrão 10 vezes menor (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

O formato mais comum da hélice é com três pás como mostrado na Figura 2.12, mas também existem outros *designs* empregados para propostas específicas.

Figura 2.12: Impelidor naval



Fonte: Do autor

Portanto, por oferecer uma ampla faixa de rotação, esse tipo de hélice é bastante utilizada em pequena escala, no desenvolvimento de produtos, usual para mistura, dispersão de sólidos e transferência de calor.

b) Turbina de 4 Pás Retas

De acordo com o apresentado por Souza (2011), devido ao fato de possuírem uma ação branda, os impelidores de quatro pás retas são utilizados em inúmeros produtos. Dessa forma, atende fluidos com uma faixa de viscosidade bastante ampla, de 1 a 1.000.000 cP e, por isso, é bem versátil no que tange intensidade da turbulência e cria correntes longitudinais e radiais. São bastantes uteis nas operações de mistura de líquidos miscíveis e na dissolução de sólidos.

Esse impelidor aceita otimizações que podem melhorar seu desempenho e reduzir o consumo de potência. A colocação descentralizada minimiza a formação de correntes tangenciais, que na maioria das vezes podem prejudicar a mistura por propiciar zonas de estagnação ao centro. Além disso, correntes ascendentes são geradas pela mudança do sentido de rotação.

A versatilidade desses agitadores também advém da possibilidade de ser projetado com variação dos parâmetros geométricos.

Segundo Souza (2011), a inclinação das pás pode ser uma possibilidade para aprimorar a eficiência do sistema. O autor afirma que quanto menor a o ângulo de inclinação (θ), menor será a potência consumida, ressaltando que existem parâmetros geométricos que são usuais, apresentados na Tabela 2.2 e ilustrados na Figura 2.13.

Figura 2.13: Geometria do impelidor de 4 pás retas inclinadas

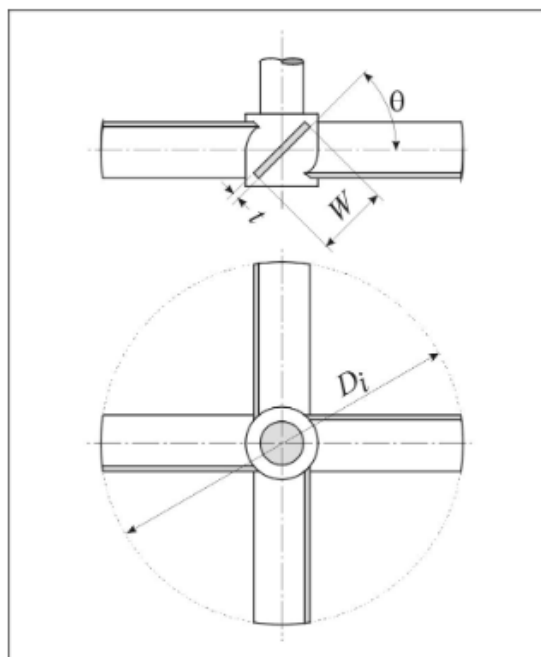


Tabela 2.2: Relações Geométricas Usuais para Turbina de 4 Pás Retas

Relação	Valores usuais	Faixa de Variação
D_i/D_T	0,33 a 0,39	0,2 a 0,7
W/D_i	0,20	0,14 a 0,30
θ	45°	20° a 90°
t/D_i	Calculado	0,005 a 0,01

Fonte: Souza (2011)

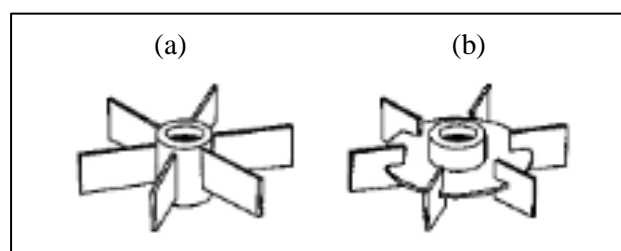
c) Turbina de pás retas

A Turbina de pás retas consiste em pás planas, usualmente 6, acopladas verticalmente ao eixo. Fornecem um fluxo radial, que é capaz de prover alto cisalhamento e turbulência, porém baixo bombeamento (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004).

Uma variação dessa turbina bastante conhecida, foi idealizada por Rushton (1950). Ela é composta por um disco horizontal aos qual são fixadas seis pás planas, que ocupam a borda do disco, como mostra a Figura 2.14.

A função do disco é impedir que os gases, injetados logo abaixo, subam diretamente sem serem dispersos pelo impelidor, direcionando-os para o fluxo gerado pelas pás, predominantemente radial (SOUZA, 2011, p.74).

Figura 2.14: Turbina de Pás retas. (a) Aberta (sem disco); (b) Rushton (com disco).



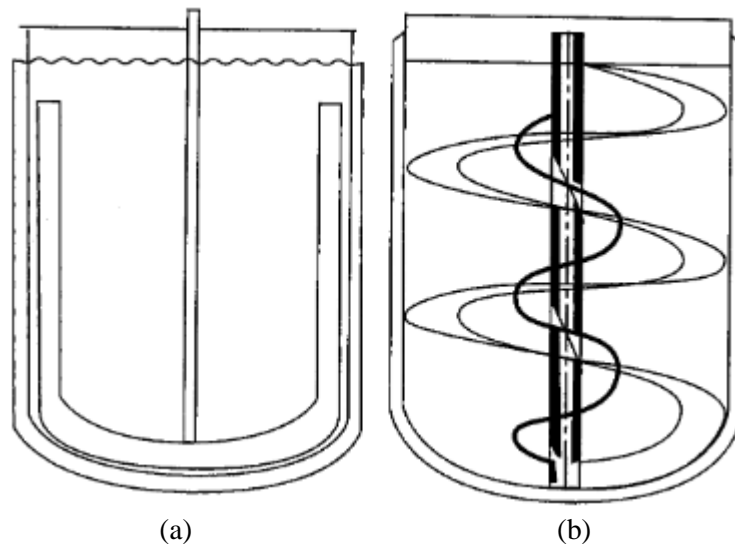
Fonte: PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA (2004) (Adaptado)

d) Âncora e helicoidal

Em fluidos de alta viscosidade, como emulsões, é comum a ocorrência de zonas de estagnação. Isso acontece pelo fato de a agitação promovida pelo impelidor não ser suficiente para gerar fluxos em regiões mais distantes do impelidor (CACHONI, 2018).

Portanto, para aplicações em regimes laminar, recomenda-se os impelidores do tipo *close clearance*, sendo os mais comuns os tipos âncora e helicoidal, ilustrados na Figura 2.15, respectivamente.

Figura 2.15: Impelidores (a) Âncora e (b) Helicoidal



Fonte: Paul, Atiemo-Obeng e Kresta (2004)

O impelidor tipo âncora é ideal para fluidos com viscosidades entre 5000 e 50000 cP, de acordo com Paul, Atiemo-Obeng e Kresta (2004). Isso porque, nessa faixa de viscosidade é possível arrastar o produto da parede, promovendo bombeamento e um fluxo predominantemente axial.

Em muitos sistemas ele é utilizado com a função de raspador, enquanto um impelidor, acoplado no eixo, promove agitação. Esse tipo de configuração é comum em processos em que há uma variação da viscosidade à medida que são adicionadas matérias primas.

Esse exemplo é muito empregado na produção de produtos cremosos, pois no momento que a fase oleosa é incorporada à aquosa é necessário cisalhamento, e assim, a mistura muda de aspecto e consistência. Sendo necessário um impelidor ancora para movimentar o produto estagnado na parede.

Nesse sentido, é bastante usual que raspadores sejam acoplados à âncora, como na Figura 2.16, para evitar que o fluido fique impregnado nas bordas do reator. Além disso, tem papel importante em processos em que há necessidade de aquecimento. Segundo Garavito (2013), os raspadores removem o fluido quente da parede do tanque para que o fluido frio entre em contato com a camisa do tanque, otimizando a troca térmica.

A autora ainda destaca que, apesar de promover uma agitação mais homogênea, raspador aumenta o consumo de potência do sistema de agitação pelo fato de ocorrer atrito na parede do reator.

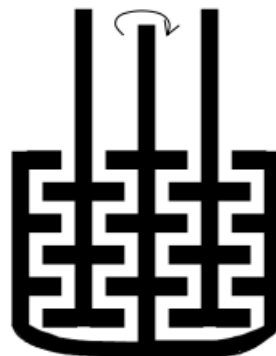
Figura 2.16: Impelidor âncora com raspadores



Fonte: Garavito (2013)

Outra modificação, também muito utilizada em tanques industriais e pilotos, é a conformação em que há defletores fixados em um agitador tipo âncora. A Figura 2.17 ilustra um exemplo, cujo eixo central possui um conjunto de pás e rotaciona o impelidor âncora com defletores acoplados. Há ainda dois outros eixos fixos com a mesma configuração do central, cujas pás são intercaladas.

Figura 2.17: Impelidor âncora com motor e dois eixos estacionários de defletores



Fonte: Plegue (2018)

Esta configuração aumenta a taxa de tensão no fluido dentro do tanque, o que facilita a homogeneização do produto (PLEGUE, 2018).

O segundo impelidor a ser apresentado neste tópico é o helicoidal. Este, por sua vez é acoplado ao eixo e promove um movimento de fluido de cima para baixo. Em geral operam em baixas frequências rotacionais e o diâmetro abrange quase todo o diâmetro interno do tanque, de modo a permitir a raspagem da parede e agitar toda a mistura (PAUL; ATIEMO-OBENG; KRESTA, 2004) .

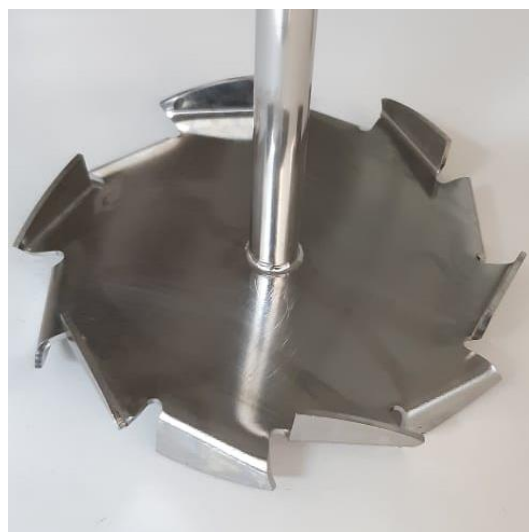
e) **Impelidor dispersor ou disco dentado**

Também chamado de Cowles, nome da fabricante mais conhecida desse tipo de impelidor, os dispersores são discos planos ou discos modificados que giram em altas rotações, cisalhando e dispersando partículas sólidas no líquido.

De acordo com Semco (2005) e Souza (2011) o cisalhamento é a capacidade de cortar de um impelidor, ou seja, a geração de uma ação mecânica direta que provoca um atrito de alta turbulência no fluido, sendo capaz de reduzir o tamanho das partículas.

O nível cisalhante de um disco dentado é dependente de dois fatores, a forma do impelidor e a velocidade periférica. Assim, o tamanho das bordas das pás do impelidor influenciam de modo que quanto maior elas forem, menor será o cisalhamento. Já o segundo fator influencia diretamente, quanto maior for a velocidade periférica maior será sua capacidade de corte (Souza, 2011).

Figura 2.18: Disco dentado

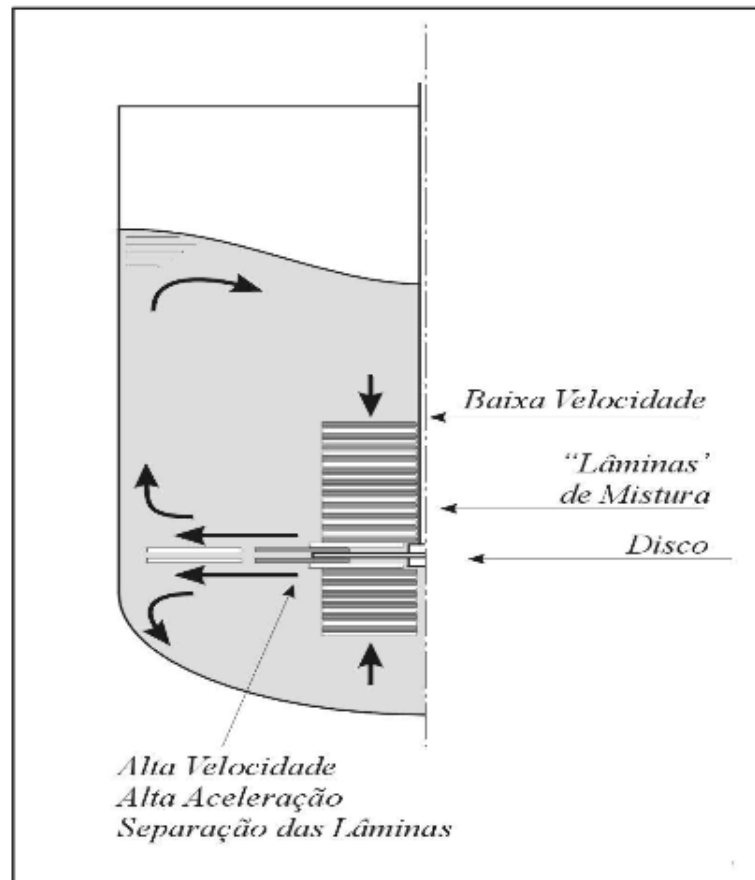


Fonte: Do autor

Os discos dispersores realizam essa dispersão a partir da transferência de energia, conforme Souza (2011), à medida que a mistura entra no vórtice, ela é succionada para o disco, que por sua vez transfere instantaneamente energia mecânica para o fluido.

É possível visualizar esse processo na Figura 2.19, em que cada camada da mistura entra em contato com o disco e é impulsionada em direção às paredes do vaso. Assim, acontece o cisalhamento.

Figura 2.19: Ilustração do processo de cisalhamento



Fonte: SOUZA (2011)

O dispersor Cowles é muito utilizado na indústria para homogeneizar soluções viscosas, para dispersar particulados sólidos e em processos de emulsificação. Isso porque provoca um regime de alta turbulência (GRABE, 2022)

Contudo, a eficiência desses discos depende da reologia do produto. Souza (2011) explica que a energia entregue pelo impelidor pode não ser suficiente para cisalhar um material viscoso, criando regiões estagnadas.

2.3.3 Consumo de potência em sistemas de agitação e mistura

Em tanques agitados a energia transmitida ao fluido, principalmente, através dos impelidores e, conseqüentemente, o consumo de potência durante a agitação deve-se, em grande parte, à resistência que o fluido exerce sobre as pás dos impelidores (CORRÊA, 2016).

Por isso, potência consumida pelo impelidor é um parâmetro importante para concepção de um sistema de agitação (MCCABE et al., 2005). A estimativa da energia requerida pelo impelidor é um fator que contribui para os custos de um processo.

Dessa forma, é interessante que o sistema de agitação funcione de forma eficiente e que os gastos de energia sejam minimizados. Isso explica o fato pelo qual o conhecimento da potência é amplamente utilizado em cálculos de escalonamento (CORRÊA, 2016).

A potência consumida por líquidos newtonianos de baixa viscosidade é dada pela Eq. (2.3) (SOUZA, 2011).

$$P = N_P \cdot N^3 \cdot D_i^5 \cdot \rho \quad (2.3)$$

Onde:

N_P : Número de Potência (adimensional)

N : rotação do impelidor (rps)

D_i : Diâmetro do impelidor (m)

ρ : Densidade do fluido ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

No estudo do consumo de potência em sistemas de agitação, existem algumas variáveis necessárias para se determinar esta estimativa, são elas: propriedades físicas do fluido (μ e ρ), rotação e localização do impelidor, geometria do impelidor e do tanque e a existência ou não de chicanas (SOUZA, 2011)

Nesse sentido, o cálculo de potência consumida é determinado para os agitadores considerando as relações geométricas padrões. Contudo, quando as dimensões do sistema diferem das configurações padrão, RUSHTON et al. (1950) citado por BADINO e SCHMIDELL (2001), propõem a multiplicação pelo fator de correção, dado pela equação abaixo:

$$f_c = \sqrt{\frac{\left(\frac{D_T}{D_i}\right)_{Real} \left(\frac{H_L}{D_i}\right)_{Real}}{\left(\frac{D_T}{D_i}\right)_{Padrão} \left(\frac{H_L}{D_i}\right)_{Padrão}}} \quad (2.4)$$

Onde D_T é o diâmetro do tanque, D_i é o diâmetro do impelidor e H_L a altura do líquido.

A potência de um sistema pode ser estimada através da utilização de diagramas e correlações de número de potência (N_p) em função do número de Reynolds (N_{Re}) para determinadas geometrias de reator e impelidores, como será mostrado no próximo tópico.

2.3.4 Número de Reynolds

Como abordado anteriormente, existe uma série de números adimensionais que não utilizados para modelar os sistemas de agitação e mistura. Os mais usuais são o Número de Reynolds e o Número de Potência (MCCABE W.L.; SMITH J.C.; HARRIOTT P., 2005).

O Número de Reynolds (N_{Re}) é importante para classificar para o fluxo causado pela agitação, uma vez que representa a relação entre as forças inerciais e forças viscosas, definido pela Eq. (2.5) (SOUZA, 2011).

$$N_{Re} = \frac{N D_i^2 \rho}{\mu_{ap}} \quad (2.5)$$

Onde:

N: rotação do impelidor (rps)

D_i : Diâmetro do impelidor (m)

ρ : Densidade do fluido (kg.m^{-3})

μ_{ap} : Viscosidade aparente do fluido (Pa.s)

Existem muitos estudos na literatura que abordam a classificação dos fluxos a partir do adimensional. Com isso, tem-se de premissa que um escoamento é considerado laminar quando o número de Reynolds é menor que 10, mas pode persistir em condições especiais. Salvo exceções, o regime é turbulento quando o adimensional é acima de 10^4 . Entre 10 e 10^4 uma região de Transição é encontrada onde os fluxos Laminar e Turbulento coexistem. (PERRY E CHILTON, 1973 e NAGATA, 1975).

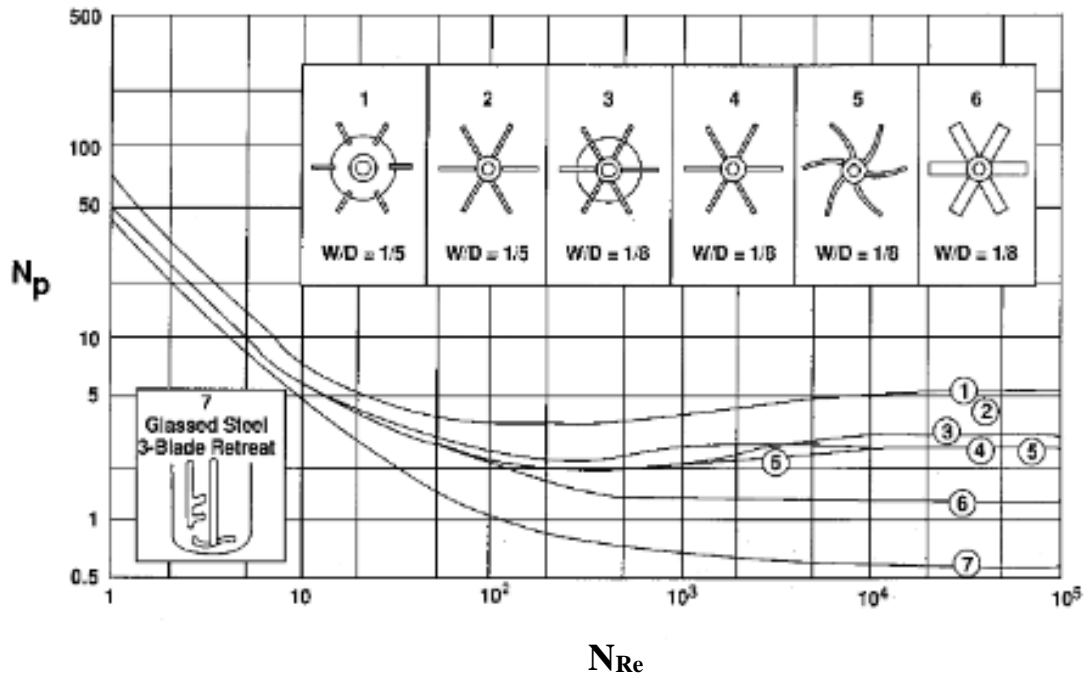
2.3.5 Número de potência

O número de potência (N_p) representa a relação existente entre a força de arraste das pás do impelidor e as forças de inércia do sistema. Este número está diretamente ligado à potência

consumida pelo impelidor, sendo que quanto maior seu valor maior o consumo de energia. É função do tipo de fluxo do impelidor e das proporções geométricas do equipamento.

Rushton et al. (1950) efetuaram determinações de potência transmitida para um grande número de impelidores e em diferentes geometrias. A Figura 2.20 mostra a relação entre N_p e N_{Re} para sete impelidores.

Figura 2.20: Número de potência versus número de Reynolds de sete impelidores

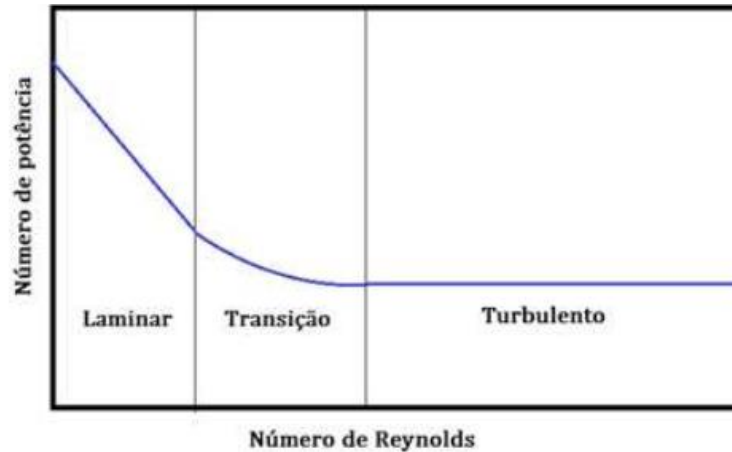


Fonte: Paul, Atiemo-Obeng e Kresta (2004), Adaptado de Rushton *et. al* (1950)

De acordo com o comportamento das curvas na Figura 2.20, pode-se definir três regiões distintas: a região laminar ($N_{Re} < 10$), uma região de transição e a região turbulenta para elevados valores do número de Reynolds (BADINO JR.; SCHMIDELL, 2001).

A Figura 2.21 ilustra o comportamento genérico do diagrama $N_p \times N_{Re}$ de acordo com o escoamento.

Figura 2.21: Curva de potência elucidando os diferentes regimes



Fonte: Garavito (2013)

O estudo do número de potência infere que em um gráfico $N_p \times N_{Re}$, a curva possui um comportamento linear decrescente. Já na região de transição nota-se um perfil não linear que tende para a constância a medida em que o escoamento se torna turbulento.

Na região turbulenta verifica-se que o número de potência é constante e independe do Número de Reynolds. Contudo, isso não é indicativo que a potência seja constante. Pelo contrário, ela aumenta ao se elevar o número de Reynolds, uma vez que o adimensional depende diretamente da velocidade agitação, assim como a potência (GARAVITO, 2013).

Dessa forma, segundo Badino Jr. e Schmidell (2001), tem-se as seguintes relações para os distintos regimes, mostradas nas Eqs. (2.6) e (2.7).

Na região laminar constata-se que:

$$N_p = K_1 (N_{Re})^{-1}, \text{ ou seja, } P = K_1 N^2 D^3 \mu \quad (2.6)$$

Na região de fluxo turbulento:

$$N_p = K_2 = \text{cte.}, \text{ ou seja, } P = K_2 N^3 D^5 \rho \quad (2.7)$$

A Eq. (2.6) indica que, para o dimensionamento de sistemas de agitação na região laminar, a potência varia proporcionalmente com o quadrado da frequência de agitação e com o cubo do diâmetro do impelidor, além de depender da viscosidade do fluido. Já na região turbulenta, demonstrada pela Eq. (2.7), a potência é proporcional ao cubo da frequência e à quinta potência do diâmetro do impelidor, dependendo também da densidade do fluido (BADINO JR.; SCHMIDELL, 2001).

Sendo assim, é possível calcular o número de potência, para o regime laminar e turbulento de acordo com as respectivas equações 2.8 e 2.9.

Para regime laminar,

$$N_p = \frac{P}{\rho N^2 D_i^3} \quad (2.8)$$

Para regime turbulento,

$$N_p = \frac{P}{\rho N^3 D_i^5} \quad (2.9)$$

2.3.6 Tempo de mistuta

O tempo de mistura (t_m) é um fator importante a ser mensurado no processo de agitação e mistura, uma vez que infere no consumo de energia, no custo do operador e na qualidade do produto.

Segundo Corrêa (2016), é o período necessário para a completa homogeneização de um fluido no interior de um tanque de agitação e mistura. Representa um valor empírico capaz de caracterizar o comportamento do fluido e avaliar se a mistura em questão é eficaz.

Os métodos de avaliação da homogeneização em tanques são, geralmente, empregados no acompanhamento da trajetória de uma quantidade de líquido adicionado no interior do tanque. Portanto, analisa-se uma variável até que fique constante, sendo assim determinado o tempo. As principais técnicas e variáveis para a determinação desse parâmetro segundo Battaglini (1998) e Corrêa (2016), estão descritas a seguir.

- a) Condutividade ou método de pH: em uma mistura condutora no interior do tanque em agitação, aplica-se soluções ácidas ou básicas. O tempo de mistura é determinado quando o pH se estabiliza.
- b) Método térmico: adição de uma quantidade do fluido em temperatura diferente da qual se encontra no interior do tanque. A temperatura da mistura é aferida por sensores e, quando está se estabiliza, tem-se o tempo de mistura .
- c) Método da adição de cor: um corante é adicionado à mistura e, visualmente, determina-se o tempo de homogeneização da cor.

2.4 Aumento de escala

O desenvolvimento de um processo, tradicionalmente, passa por três etapas: escala laboratorial, piloto e industrial.

No laboratório, além elaboração da fórmula são definidas as condições de operação, como temperatura e pH. Segundo Badino Jr. e Schmidell (2001), tendo em vista a maior

flexibilidade e menor custo de operação, na escala laboratorial tem-se a oportunidade de teste de variáveis de processo e maior detalhamento.

A partir dos conhecimentos obtidos em bancada, a escolha de um critério de ampliação de escala deve ser uma etapa intermediária. Opera-se então, uma escala piloto, com o objetivo de obter o produto desenvolvido com o mesmo desempenho. A execução do lote piloto é necessária para o estudo do processo e para definição do critério de aumento de escala (BADINO JR.; SCHMIDELL, 2001).

Por fim, a escala industrial, devido à própria dimensão, visa o lado econômico do processo, ou seja, a produção em larga escala com objetivos comerciais e lucrativos.

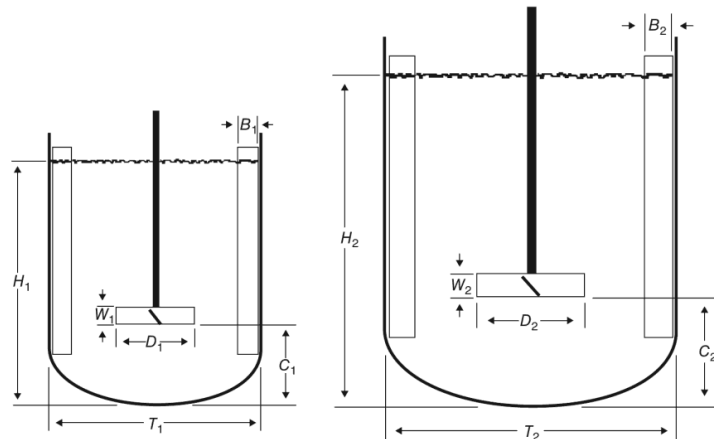
O principal objetivo do aumento de escala é projetar para um maior volume o sistema de agitação ideal, o qual atingirá a mesma qualidade de mistura que em um reator de laboratório ou piloto, conforme Paul, Atiemo-obeng e Kresta (2004).

Os autores apontam que as distribuições de taxa de cisalhamento e energia dissipada aumentam juntamente com o volume. Dessa forma, o processo deve ser ajustado para obter um produto tal qual o desenvolvido em laboratório.

Diante do exposto, o aumento de escala pode se basear na similaridade geométrica, cinemática ou dinâmica, sendo a semelhança geométrica o critério mais utilizado, pela sua simplicidade.

Para a similaridade geométrica existir, as dimensões do tanque agitado em pequena e larga escala devem apresentar as mesmas relações geométricas, como ilustra a Figura 2.22. Segundo Cullen *et al.* (2015), esse critério é usual em equipamentos cuja única variável é a rotação do impelidor, pois simplifica o escalonamento.

Figura 2.22: Similaridade geométrica entre tanques



Fonte: CULLEN et al. (2015)

O próximo passo é a escolha de um critério de ampliação de escala, o qual determina os cálculos de escalonamento.

Alguns critérios para o aumento de escala, normalmente recomendados para o âmbito cosmético, estão listados a seguir:

- Constância da potência por unidade de volume (P/V);
- Constância do tempo de mistura (t_m);
- Constância do número de Reynolds (N_{Re});

Para este trabalho foi escolhido manter a razão P/V constante. Com a escolha do critério para o aumento de escala, tem-se o seguinte equacionamento, de acordo com Badino e Schmidell (2001), para a estimativa da rotação no aumento de escala.

No regimes laminares ($Re < 10$), tem-se que:

$$N_P \propto f\left(\frac{1}{N_{Re}}\right) \quad (2.10)$$

Logo:

$$\frac{P}{N^3 D_i^5 \rho} \propto \frac{\mu}{\rho N D_i^2} \quad (2.11)$$

As propriedades massa específica (ρ) e viscosidade (μ) são constantes no aumento de escala. Assim:

$$P \propto \frac{N^3 D_i^5}{N D_i^2} \quad \text{ou} \quad P \propto N^2 D_i^3 \quad (2.12)$$

No regime turbulento, N_P é constante. Então,

$$P \propto N^3 D_i^5 \quad (2.13)$$

Para um tanque com geometria cônica, considera-se o seguinte volume:

$$V = \frac{\pi D_T^2 H_L}{12} \quad (2.14)$$

Onde D_T é o diâmetro do tanque (m) e H_L é altura da coluna de líquido (m).

Como se pretende, na ampliação de escala, manter semelhança geométrica, e sabendo-se que $D_T \propto D_i$ e $H_L \propto D_i$, tem-se que:

$$V \propto D_i^3 \quad (2.15)$$

Dividindo a Eq. (2.12) pela Eq. (2.15), tem-se que, para regime laminar que:

$$\frac{P}{V} \propto N^2 \quad (2.16)$$

Já para regime turbulento, dividindo a Eq. (2.13) pela Eq. (2.15), obtem-se a seguinte equação:

$$\frac{P}{V} \propto N^3 D_i^2 \quad (2.17)$$

Por isso, mantendo o critério de aumento de escala, potência por unidade de volume (P/V) constante, no regime turbulento, tem-se que:

$$\left(\frac{P}{V}\right)_1 = \left(\frac{P}{V}\right)_2 \quad (2.18)$$

Com isso, a rotação na nova escala será determinada através da Eq. (2.20).

$$N_1^3 \cdot D_{i1}^2 = N_2^3 \cdot D_{i2}^2 \quad (2.19)$$

$$N_2 = N_1 \cdot \left(\frac{D_{i1}}{D_{i2}}\right)^{2/3} \quad (2.20)$$

Norwood e Metzner (1960), citados por Corrêa (2016), propõe a Eq. 2.21 para a determinação do tempo de mistura, que relaciona o fator tempo de mistura (Φ) com o número de Reynolds (N_{Re}).

$$\Phi = \frac{\text{tm} (N \cdot D_i^2)^{2/3} g^{1/6} D_i^{1/2}}{H_L^{1/2} D_T^{3/2}} \quad (2.21)$$

Assim, pode-se extrair a seguinte proporcionalidade:

$$\text{tm} \propto \frac{D_i^{1/6}}{N^{2/3}} \quad (2.22)$$

Multiplicando e dividindo a Eq. (2.19) por $\frac{D_i^{1/6}}{N^{2/3}}$ e substituindo por (2.22), tem-se que

$$N_2 D_{i2}^{2/3} t_{m2} \frac{N_2^{2/3}}{D_{i2}^{1/6}} = N_1 D_{i1}^{2/3} t_{m1} \frac{N_1^{2/3}}{D_{i1}^{1/6}} \quad (2.23)$$

Levando a seguinte equação:

$$t_{m2} = t_{m1} \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^{5/3} \left(\frac{D_{i1}}{D_{i2}} \right)^{1/2} \quad (2.24)$$

Por fim, estima-se a potência na nova escala (P_2) em regime turbulento, considerando as propriedades físicas e o N_P constantes, que segundo Corrêa (2016), é dada por:

$$P_2 = P_1 \cdot \left(\frac{N_2}{N_1} \right)^3 \left(\frac{D_{i2}}{D_{i1}} \right)^5 \quad (2.25)$$

3 METODOLOGIA

As operações de agitação e mistura são basicamente fundamentadas em experimentos e observações. Conforme apresentado até aqui, o objetivo desse trabalho é demonstrar os conceitos e cálculos do *scale-up* aplicados à uma indústria de cosméticos.

Nesse sentido, utilizou-se o estudo de caso como método de pesquisa para contextualizar e descrever de forma concreta as premissas apresentadas no referencial teórico.

Com isso, a coleta dos dados experimentais foi inserida na rotina de uma empresa de cosméticos, na fase do desenvolvimento de um produto, mais especificamente quando se desenvolve o processo.

O estudo de caso foi conduzido no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento da Coty Indústria de Cosméticos, localizado em Barueri – SP. O experimento sucedeu-se a partir da

fabricação em escala piloto de três formulações distintas de coloração para cabelo (descritas no item 3.1.1).

3.1 Materiais e equipamentos

Para o desenvolvimento do experimento foi necessária a utilização de alguns materiais e equipamentos, conforme descrito a seguir.

3.1.1 Formulação

Para este trabalho utilizou-se dados da fabricação de lotes pilotos de fórmulas de coloração capilar, são elas: tintura em creme, tonalizante e *shampoo* tonalizante. A Tabela 3.1 lista os materiais utilizados para a produção desses produtos. Devido a questões confidenciais os ingredientes das formulações estão apresentados de forma qualitativa.

Tabela 3.1: Descrição qualitativa das fórmulas

Ingrediente/Função	Tintura em creme	Tonalizante	<i>Shampoo</i> tonalizante
Veículo (água)	x	x	x
Corante não oxidativo			x
Corante oxidativo	x	x	
Quelante pH ácido/neutro			x
Quelante pH Alcalino	x	x	
Tensoativo Aniônico		x	
Tensoativo Anfótero		x	x
Tensoativo não-iônico 1			x
Tensoativo não-iônico 2			x
Tensoativo não-iônico 3		x	
Emoliente	x	x	
Emulsionante	x		
Umectante	x	x	
Ajuste pH			x
Antiespumante/Solvente		x	
Espessante			x
Condicionante			x
Antioxidante	x		

Tabela 3.2: Descrição qualitativa das fórmulas (Continuação)

Solvente	x	x	
Condicionante/Controlador de viscosidade			x
Redutor	x		
Desnaturante (HIDROXIDO DE AMÔNIA)	x		
Alcalinizante (MONOETANOLAMINA)	x	x	x
Conservante		x	x
Ativos	x	x	x
Fragrância	x	x	x

3.1.2 Planta piloto

Os lotes em escala piloto de até 12kg foram obtidos com Becomix[®] RW 15CD equipado com impelidor do tipo âncora com raspadores. Além disso, apresenta em seus eixos defletores fixos, para assim, evitar formação de vórtice e garantir uma mistura efetiva.

Este reator possui geometria cônica, mais especificamente tronco de cone, o que torna os cálculos de escalonamento mais complexos pelo fato de não possuir diâmetro constante. O diâmetro do agitador acompanha a geometria do tanque, como mostrado na Figura 3.1.

Figura 3.1: Tanque utilizado no trabalho



Fonte: Do autor

A Tabela 3.2 apresenta as dimensões do tanque.

Tabela 3.2: Dimensões Becomix ® RW 15 CD

Altura do tanque (cm)	39,0
Diâmetro topo (cm)	34,0
Diâmetro do fundo (cm)	10,0
Diâmetro do impelidor topo (cm)	33,5
Diâmetro do impelidor fundo (cm)	9,5
Volume do tanque (cm ³)	16.295

As variáveis de processo, como velocidade de agitação e temperatura podem ser selecionadas em um *display* acoplado ao reator, como mostrado na Figura 3.2. O Becomix® RW 15CD também possui funcionalidades como vácuo e recirculação.

Figura 3.2: Becomix ® RW 15CD



Fonte: Key International, INC (2022)

Também instalado ao painel elétrico do reator há um inversor de frequência da marca Danfoss, modelo VLT® AutomationDrive, como o da Figura 3.3, o qual desempenha a função de controlar a velocidade do motor. É um equipamento elétrico que retorna valores de potência, corrente e velocidade de agitação e, portanto, foi utilizado para a coleta dados de potência consumida durante o processo.

Figura 3.3: Danfoss VLT® AutomationDrive



Fonte: Do autor

3.1.3 Análises de viscosidade e densidade

Os dados de viscosidade e densidade foram analisados nos seguintes equipamentos:

- Viscosímetro Brookfield RVDV-II+Pro e LVDV-II+Pro;
- Picnômetro de metal: instrumento de precisão utilizado para determinar o peso específico de tintas e produtos semelhantes;
- Termômetro laser digital infravermelho.

3.2 Métodos

Primeiramente, a partir de pesquisas na literatura, o método de escalonamento selecionado foi a potência do sistema por unidade de volume de produto constante.

Tendo claro os objetivos do experimento, decorreu-se a fabricação das três formulações em planta piloto, com seus respectivos processos. A cada produção manteve-se a velocidade de agitação (1,5 m/s) para a coleta de dados de potência, obtida diretamente no visor do equipamento conversor de frequência. Esses dados foram coletados ao final do processo.

Também foi de interesse deste trabalho observar de que forma a potência reage com a variação de velocidade, assim como os adimensionais N_p e N_{Re} , para os diferentes produtos. Dessa forma, extraiu-se a potência para as velocidades de 738 rpm, 885 rpm, 1108 rpm, 1254 rpm e 1475 rpm.

Assim, com os produtos prontos, analisou-se a viscosidade à 25°C, cujas metodologias foram previamente disponibilizadas pelo setor que desenvolveu as fórmulas, são elas:

- Tintura em creme: Viscosímetro Brookfield RVT. Spindle 4, 6 rpm, por 1 minuto;
- Tonalizante: Viscosímetro Brookfield LVT. Spindle 1, 60 rpm, por 1 minuto;
- *Shampoo* tonalizante: Viscosímetro Brookfield LVT. Spindle 63, 30 rpm por 1 minuto.

Além da viscosidade, também se estimou a densidade, à 25°C, utilizando um picnômetro de metal. Para isso, colocou-se o produto no picnômetro até completar todo seu volume e pesou-se em balança analítica a massa do ‘Picnômetro e Produto’. Depois utiliza-se a seguinte relação (Eq. 3.1):

$$\rho \left(\frac{g}{cm^3} \right) = \frac{\text{Massa Picnômetro e Produto} - \text{Massa Picnômetro vazio}}{\text{Massa Picnômetro e água} - \text{Massa Picnômetro vazio}} \quad (3.1)$$

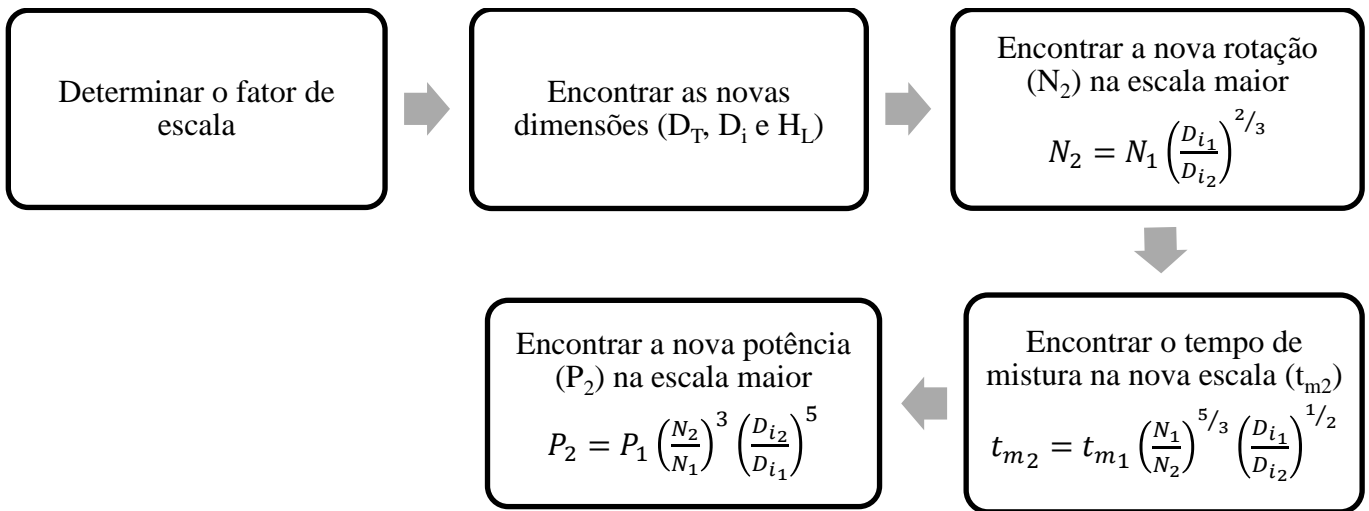
De posse de todos os dados realizou-se os cálculos dos dimensionais e o trabalho dos dados em gráficos.

Por fim, foi desenvolvida uma planilha para a determinação dos parâmetros de processo em larga escala, a partir dos cálculos de aumento de escala mantendo-se a razão P/V constante.

Dada a complexidade das operações de agitação e mistura, o projeto e *scale-up* desse sistema são dados, basicamente, pela utilização do método de semelhança de sistemas, que se baseia na análise dimensional para obter critérios de mudança de escala.

É válido salientar que para simplificação de cálculos, a geometria do reator foi considerada cônica. A Figura 3.4, ilustra o fluxo seguido para a realização dos cálculos.

Figura 3.4: Etapas de cálculo para o aumento de escala



Portanto, partiu-se da definição de um fator de escala para assim, determinar o diâmetro do tanque maior (D_{T2}). O tanque em larga escala, neste trabalho, foi projetado baseando-se nas relações geométricas padrões. Em seguida estima-se a D_{i2} e H_{L2} .

Com isso, seguiu-se para a determinação da frequência rotacional do agitador na escala maior (N_2), com base nos cálculos para a razão P/V constante. O reator em questão possui diâmetro variável, neste caso, utilizou-se o diâmetro máximo do líquido no tanque.

No desenvolvimento em planta piloto, cabe observar questões como homogeneização da mistura. O tempo de agitação em cada etapa do processo é definido pelo operador, empiricamente. Assim, definido o tempo de homogeneização da etapa é possível calcular qual seria o tempo previsto para nova escala (t_{m2}).

Por fim calculou-se a potência requerida no nível industrial (P_2). Todos os cálculos foram baseados das relações geométricas padrão. Portanto, levando em consideração a geometria do reator, determinou-se o fator de correção (f_c) para a calcular a potência para o novo reator.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Produção em planta piloto

Em uma indústria de cosméticos, quando se executa um processo deseja-se obter o produto tal qual o formulado em laboratório, mas além disso, é imprescindível que seja levado em consideração questões de tempo de processo e custos de operação.

Com isso, realizou-se a produção em escala piloto de três produtos com características físicas distintas. A Tabela 4.1 apresenta os valores de viscosidade e densidade obtidos para cada um deles.

Tabela 4.1: Análises iniciais dos produtos

Produto	Viscosidade (cP)	Densidade (g/cm³)
Tintura em creme	10030,0	0,775
Tonalizante	55,3	0,968
Shampoo tonalizante	1320,0	1,000

4.2 Potência consumida

Após o fim do processo, coletou-se dados de potência para os cosméticos a uma agitação de 1,5 m/s, ou seja, 1108 rpm. O tamanho de cada lote também é importante para que seja estimado o volume de produto no reator, que foi mensurado a partir da densidade. A Tabela 4.2 contém esses dados e também o valor da razão Potência e Volume.

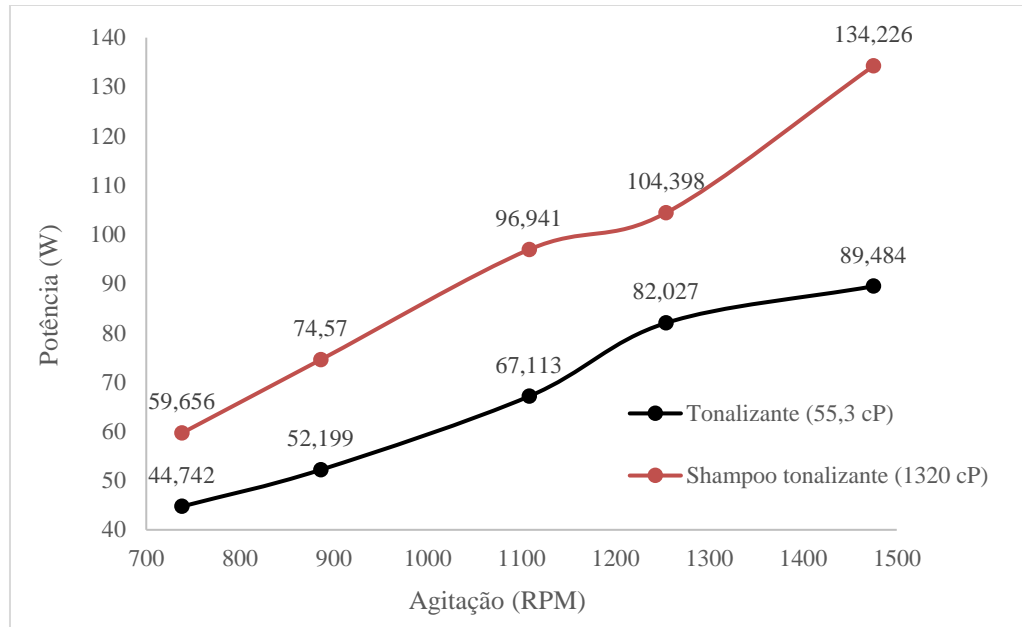
Tabela 4.2: Dados coletados em 1108 rpm (1,5 m/s)

Produto	Potência (W)	Quantidade de produto (kg)	Volume de produto (m³)	$\frac{P}{V}$ (W/m³)
Tintura em creme	74,57	10	0,0129	5.781
Tonalizante	67,11	9	0,0093	7.216
Shampoo tonalizante	96,94	9	0,0090	10.775

A potência consumida, obviamente, aumenta proporcionalmente com a agitação. Sendo assim, a título de comparação dessa premissa para as diferentes viscosidades, variou-se a agitação do impelidor para o tonalizante de cabelo e para o *shampoo* tonalizante. A Figura 4.1 mostra o comportamento da Potência em relação a Agitação.

Esse teste não foi reproduzido para coloração em creme, por ser uma tintura permanente, suscetível à rápida oxidação. Assim, uma agitação muito vigorosa poderia incorporar ar ao produto, prejudicando a performance da formulação.

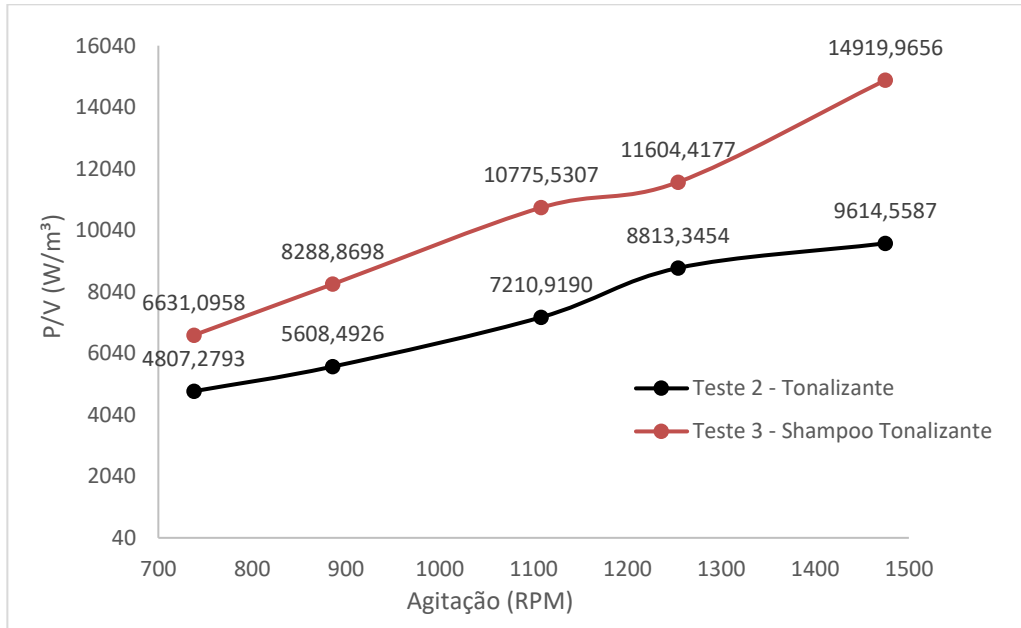
Figura 4.1: Potência *versus* Agitação para viscosidades diferentes



O levantamento de dados de potência a cada valor de agitação, mostra que são grandezas proporcionais, pois à medida que se aumenta a agitação, a potência também aumenta.

Para melhor comparação do consumo de energia para os dois produtos, pode-se plotar a razão P/V *versus* a agitação. Assim é possível realizar observações levando em consideração o espaço ocupado do reator por cada um dos cosméticos, uma vez que possuem diferentes densidades.

Figura 4.2: P/V versus Agitação para viscosidades diferentes



Pelas Figuras 4.1 e 4.2 é possível observar como a reologia do produto influencia no consumo de potência. Além disso, a comparação entre as duas curvas da Figura 4.1 infere que para produtos mais viscosos a potência requerida para agitar o fluido é maior.

Contudo, a potência consumida da coloração em creme não segue a mesma lógica. A razão P/V em uma agitação de 1108 rpm apresenta-se inferior aos demais produtos com viscosidades menores. Isso mostra o bom desempenho do impelidor âncora para fluidos com viscosidades mais elevadas. Assim como Garavito (2013) apresenta em seu estudo, esse tipo de impelidor mostra-se eficiente em sistemas com altas viscosidades e regime laminar.

4.3 Número de Reynolds e o Número de potência

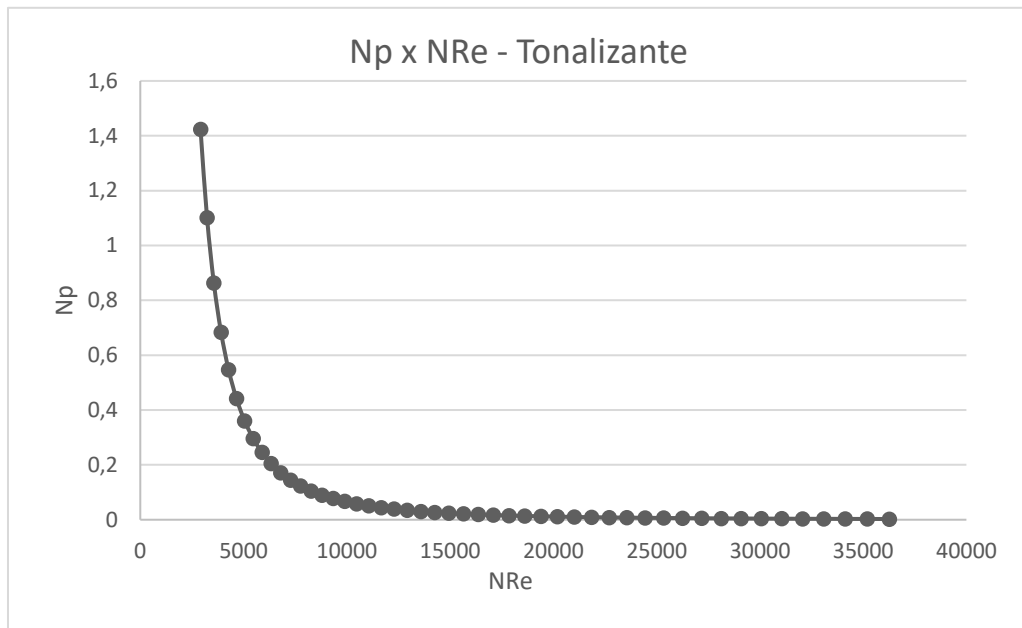
A variação do número potência foi analisada em relação ao N_{Re} para os três cosméticos.

Tendo em vista que o tanque tem diâmetro variável ao decorrer de sua estrutura, espera-se diferentes tipos de escoamento ao longo do mesmo. Por isso o cálculo do número de Reynolds levou em consideração as propriedades físicas do produto (ρ e μ) e uma frequência de rotação constante (1108 rpm).

Para o cálculo do número de potência, utilizou-se a equação geral, $N_p = P / \rho N^3 D_i^5$.

Sendo assim para o produto de menor viscosidade, obteve-se a seguinte curva (Figura 4.3).

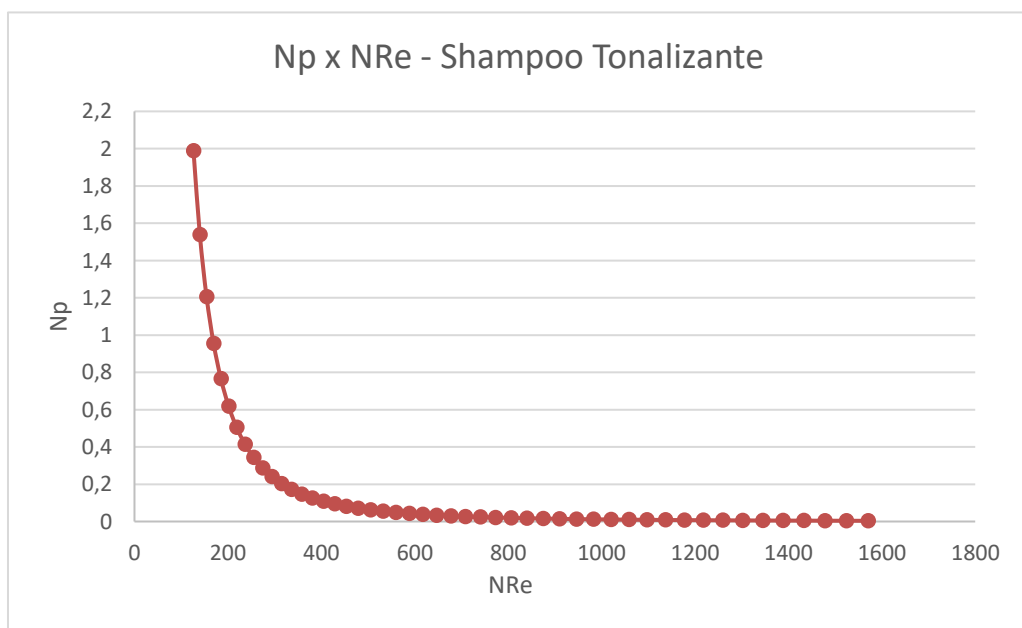
Figura 4.3: Curva de Número de Potência versus Número de Reynolds para o Tonalizante (55,3 cP)



Como pode ser observado na Figura 4.3, é possível constatar que para esse produto o escoamento promovido pelo impelidor é fundamentalmente turbulento, apresentando uma tendência conforme demonstrado na literatura. Como o esperado, por se tratar de um fluido de baixa viscosidade o número de potência tem um valor baixo, atingindo seu pico no fundo do reator, no menor diâmetro.

O comportamento da curva é o mesmo para o *shampoo* tonalizante, mostrado a seguir:

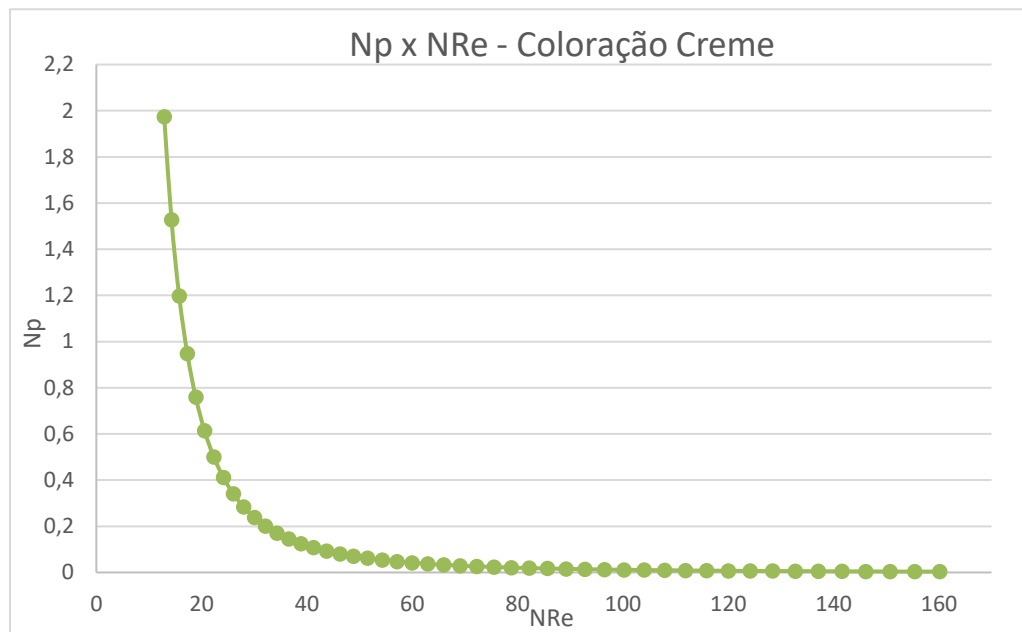
Figura 4.4: Curva de Número de Potência versus Número de Reynolds para o Shampoo Tonalizante (1320 cP)



Pode-se observar na Figura 4.4 que o impelidor opera na região de transição, ou seja, valores de N_{Re} entre 10 e 10.000. É possível notar que o número de potência tende para um valor constante a medida que o diâmetro aumenta.

Por fim, a figura 4.5 exibe dados de N_P versus N_{Re} para o produto de maior viscosidade.

Figura 4.5: Curva de Número de Potência versus Número de Reynolds para Coloração em creme (10.030 cP)



Como observado na Figura 4.5 é possível notar o mesmo comportamento dos demais produtos supracitados. Para esse cosmético, com viscosidade de 10.030 cP, o regime de escoamento gerado tem características laminares, mas, ainda sim, apresentou o número de potência constante a medida que o diâmetro aumenta. Essa curva difere do esperado, conforme a literatura, em que a constância do N_P só é atingida para regime turbulento.

O fato da utilização da mesma equação ($N_P = P / \rho N^3 D_i^5$), fez com que as curvas para os três produtos fossem bastante semelhantes, pois, neste caso, o diâmetro do impelidor influencia significativamente no resultado, bem como a rotação do impelidor (N). Esses foram parâmetros constantes no processo. Sendo assim, os valores experimentais de Potência de cada fluido não foram significativos para esse cálculo.

Nesse sentido, para resultados mais coerentes, sugere-se a utilização de outras equações para serem aplicadas para as situações em que o processo se encontra na região de fluxo laminar e de transição.

Diante desses resultados, o tonalizante apresentou-se mais coerente, pois foi o único produto dentre os três que atingiu regime turbulento, adequando-se, portanto, à equação utilizada. Por esse motivo foi o produto selecionado para os cálculos de aumento de escala.

4.4 Aumento de escala

De acordo com a metodologia apresentada, realizou-se o *scale-up*, obtendo-se assim os parâmetros de processo para o reator de escala industrial, geometricamente semelhante ao da planta piloto.

Usando o método descrito, foi reproduzido o dimensionamento para três tanques, de diferentes capacidades., partindo de um fator de escala de 50, 100 e 200. A Tabela 4.3 apresenta as dimensões calculadas para os tanques a partir das correlções geométricas padrões.

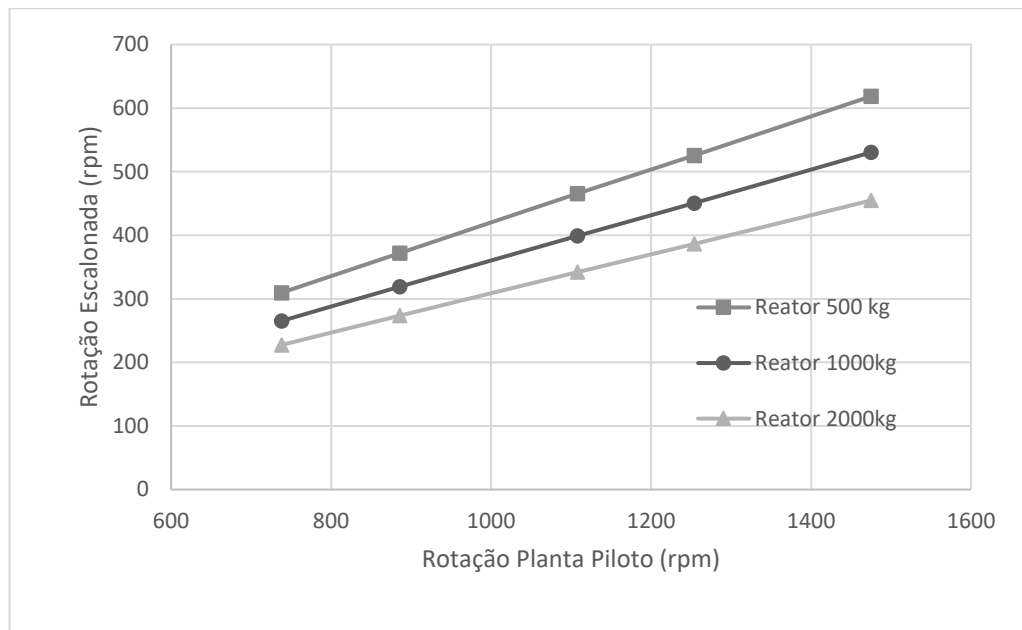
Para o reator em escala piloto realizou-se cálculos em relação ao volume útil do produto e do processo que deseja-se escalonar. Neste caso, o selecionou-se o tonalizante.

Tabela 4.3: Dimensões do piloto e dos tanques projetados

Dados do tanque	Escala piloto 10 kg	Reator 500 kg	Reator 1000 kg	Reator 2000 kg
Fator de escala	-	50	100	200
Tamanho do Lote (kg)	10	500	1000	2000
Volume de produto (m ³)	0,01	0,52	1,03	2,07
Diâmetro tanque (m)	0,34	0,87	1,1	1,38
Diâmetro impelidor/útil (m)	0,24	0,87	1,1	1,38
Altura do líquido (m)	0,71	2,61	3,29	4,14

Dessa forma, seguiu-se para os cálculos de agitação. A Figura 4.6 mostra os dados mantendo a razão P/V constante para escalonar a velocidade de agitação do tanque piloto para os reatores em escala industrial.

Figura 4.6: Gráfico para conversão da velocidade de agitação



Observa-se que, para a manutenção da razão P/V constante a frequência de agitação em escala maior diminui. Desta forma quanto maior for a capacidade do tanque, menor será a rotação requerida do impelidor.

Efetuiu-se também cálculos para que seja possível prever outros dois parâmetros importantes de processo: o tempo de mistura (t_m) e a potência consumida (P).

Para esse último critério, foi necessária a correção devido a geometria cônica do tanque. Sendo assim utilizou-se o fator multiplicador, estimado em 0,6 pela Eq. (2.4)

Então, partindo das seguintes condições da escala piloto (Tabela 4.4), obteve-se os parâmetros para os tanques industriais projetados, mostrados na Tabela 4.5.

Tabela 4.4: Parâmetros de processo obtidos em planta piloto

Planta piloto	
Agitação (rpm)	1108
Potência (W)	67,11
Tempo de mistura (s)	0,69

Tabela 4.5: Resultados de Potência consumida e Tempo de mistura

	Reator 500 kg	Reator 1000 kg	Reator 2000 kg
Fator de correção (f_c)	0,6	0,6	0,6
Volume de produto (m^3)	0,52	1,03	2,07
Potência calculada (W)	3355,5	6711	13422
Potência corrigida (W)	1946,2	3892,4	7784,8
P/V (W/m^3)	3767	3767	3767
Tempo de mistura (min)	11,1	12,8	14,7

Os três tanques apresentam o mesmo valor do fator de correção (f_c), o que demonstra que têm medidas proporcionais e o mesmo formato cônico.

A potência calculada também apresentou proporcionalidade para cada reator e tem seu valor reduzido ao ser multiplicada pelo fator de correção. O resultado foi adequado e dentro do esperado para uma planta industrial. De acordo com Nielsen et al. (2002), o consumo de energia em biorreatores em grande escala, por exemplo, deve ser de 1 a 5 kW.m⁻³.

Em comparação com tanques de larga escala do mesmo fabricante do utilizado em planta piloto, também é possível verificar que os resultados foram condizentes. O tanque Becomix[®] Modelo RW 1200 CD de 1200L de capacidade possui um motor de 12,64 kW de potência e o Becomix[®] M1 LVM 8000 de 8000L a potência do motor do agitador é 15 kW. Sendo assim, o processo de escalonamento do tonalizante seria satisfatório utilizando o critério P/V constante.

Além disso, segundo Joaquim Jr et al. (2012), um tanque de dimensões industriais possui um poder de bombeamento menor do que em escala piloto. Com isso é esperado que os tanques de maior capacidade necessitem de um tempo maior para homogeneização.

5 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho gerou resultados com os quais é possível concluir que a viscosidade é determinante para o consumo de potência do sistema. Contudo, para o impelidor utilizado, âncora com raspadores, trabalhando em fluidos com altas viscosidades não seguem essa premissa. O produto de 10.030 cP gerou uma potência consumida que se equipara aos outros dois cosméticos menos viscosos. Portanto, fica claro, o bom desempenho desse sistema de agitação para regimes laminares.

Com os cálculos do Número de Reynolds, tem-se um perfil de escoamento no interior do reator que varia com o diâmetro. Em resumo, o tonalizante apresentou regime turbulento, o shampoo tonalizante tendeu para um regime de transição e a coloração em creme ao laminar.

Com isso, plotou-se curvas de N_p versus N_{Re} para os três produtos e constatou-se que a equação utilizada representa melhor o comportamento em um regime turbulento.

Para cálculos de aumento de escala, projetou-se reatores com capacidades de 500, 1000 e 2000 kg. Para prever as novas velocidades de rotação do impelidor, utilizou-se a razão P/V constante. Sendo assim, as velocidades obtidas para os três reatores foram inversamente proporcionais ao seu tamanho, ou seja, o tanque de 500kg pode operar com maior frequência de agitação.

Assim, calculou-se a potência a ser consumida pelos tanques projetados e verificou-se resultados satisfatórios e economicamente viáveis para uma indústria de cosméticos. Com isso, é possível afirmar que a escolha do critério de escalonamento foi assertiva.

Por fim, tempo de mistura obtido para os tanques maiores aumentou proporcionalmente com o aumento do volume do tanque.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas sugestões para aprimoramento dos resultados e para trabalhos futuros.

- Estudo do escoamento no tanque cônico utilizando a fluidodinâmica computacional (CFD). Assim é possível eliminar as aproximações e obter o escoamento real no tanque.
- Aprofundamento no cálculo do número de potência (N_p). Utilizar correlações que representem o escoamento no interior do tanque.
- Verificar se a reologia da tintura em creme influenciou na potência consumida. Sendo assim, seria interessante a investigação do comportamento reológico desse produto ao longo do processo;
- Testar a efetividade dos cálculos de *scale-up* em tanques reais. Neste trabalho os tanques foram projetados com relações geométricas padrões. A ideia é, futuramente, implementar esse escalonamento em processos de uma indústria de cosméticos, estudando a reprodutibilidade e a qualidade final do produto envasado.

7 REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOAL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS. **A Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos**. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOAL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS. **Anuário 2019**. Disponível em: <https://abihpec.org.br/publicacao/anuario-abihpec-2019/>. Acesso em 14 fev. 2022

BADINO JR., A. C.; SCHMIDELL, W. **Aumento de escala**. *In: Schmidell, W. (Ed.) Biotecnologia Industrial*, Vol. 2, Engenharia Bioquímica, editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 2001.

BATTAGLINI, N. M. P. **Avaliação do comportamento de impelidores especiais em mistura de fluidos**. Botucatu: UNESP, Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu, 1998.

BELLKEY PROFESSIONAL. **Tudo sobre as cutículas do cabelo**. 2019. Disponível em <https://www.bellkey.com.br/tudo-sobre-as-cuticulas-do-cabelo/>. Acesso em 02 abr. 2022.

BNDES. **Panorama da indústria de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos**. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Acesso em: 14 fev. 2022.

BIRD, R., STEWARD, W. LIGHTFOOT, E. N. **Transport Phenomena**. New York: Wiley, 1960.

BONTORIM, G. **Estudo de Estabilidade de Emulsão Cosmética Utilizando Reologia e Técnicas Convencionais de Análise**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2009.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução nº79 de 28 de agosto de 2000**.

CACHONI, M. A. **Análise da influência da geometria e das condições de operação de um reator piloto agitado aplicado à processos de esterificação e polimerização com uso de CFD**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2018.

CAMPESI, A. **Avaliação da velocidade de cisalhamento média em biorreator convencional tipo tanque agitado e aerado**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências e de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2007.

CORRÊA, L. J. **Estudos de melhorias no processo de hidrólise enzimática de biomassas para produção de etanol**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2016.

CULLEN, P. J. et al. **Pharmaceutical blending and mixing**. John Wiley & Sons, 2015.

Eurimonitor International. **Hair Care in Brazil**. 2021. Disponível em: www.euromonitor.com. Acesso em: 14 de fev de 2022.

FRANÇA, S. A. et al. **Types of hair dye and their mechanisms of action**. *Cosmetics*, v. 2, n. 2, p. 110-126, 2015.

GARAVITO, A. M. T. **Determinação Experimental do Consumo de Potência Para Impelidores Âncora e Helicoidal Usando Fluidos Pseudoplásticos de Alta Viscosidade**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, 2013.

GRABE. **Agitador mecânico fluxomix – dispersor** Disponível em <https://www.grabe.com.br/>>. Acesso em: 24 fev 2022.

GUERRA-TAPIA, A.; GONZALEZ-GUERRA, E. **Hair Cosmetics: Dyes**. *Actas Dermo-Sifiliográficas (English Edition)*, v. 105, n. 9, p. 833-839, 2014.

JOAQUIM JÚNIOR, C. F. *et. al.* **Agitação e mistura na indústria**. Editora LCT, Rio de Janeiro, 2012.

KEY INTERNATIONAL, INC. Disponível em: <https://www.keyinternational.com/>. Acesso em 02 abr. 2022

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

MCCABE *et. al.* **Unit Operations in Chemical Engineering**. 5 ed., New York: McGraw-hill, 2005.

MINTEL. **Hair Care – Brazil**. 2021. Disponível em <https://www.mintel.com/>. Acesso em: 25 fev. 2022

NIELSEN, J; VILLADSEN J.; LIDEN, G. **Bioreaction engineering principles**. 2°ed. New York, 2002.

NAGATA, S. **Mixing: principles and applications**. John Wiley & Sons Inc, New York, 1975.

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

PAUL, E. L.; ATIEMO-OBENG, V. A.; KRESTA, S. M. **Handbook of Industrial Mixing Science and Practice**. John Wiley & Sons, 2003.

PERRY, R. H., CHILTON, C. H. **Chemical engineers handbook**. 5^oed. Japan: McGraw-Hill Kogakuska Ltda. 1973.

PLEGUE, T. J. **A Systematic Method For Scaling Of Industrial Mixers**. Baltimore: Johns Hopkins University, 2018.

ROS, A. R. **O crescimento da indústria de cosméticos no Brasil no século XXI**. Curitiba: Universidade Federal Do Paraná, 2016.

RUSHTON, J. H.; COSTICH, E.W.; EVERETT, H. J. **Power characteristics of mixing impellers -Part I**. Chem. Eng. Progress, vol. 46, n.8, p.395-404. 1950.

RUSHTON, J. H.; COSTICH, E. W.; EVERETT, H. J. **Power characteristics of mixing impellers-Part II**. Chem. Eng. Progress, vol. 46, n.9, p.467-76, 1950.

SCHMAL, M. **Cinética e reatores: Aplicação à engenharia química**. 3. ed. Rio de Janeiro: Synergia, 2017.

SEMCO. **Dispersor / Dissolvedor**. Disponível em:

<https://semcoequipamentos.com.br/equipamentos/dispersor/>. Acesso em: 24 fev. 2022.

SOUSA, P. R. M. **Escalonamento de tanques condicionadores utilizados na flotação de apatita**. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010

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

SOUZA, E. et al. **Improved agitators applied to high viscosity fluids in concentrated juices**. In: Transactions of the 2003 Citrus Engineering Conference. Lake Alfred, FL, American Society of Mechanical Engineering, Florida Section, 2003. v.49, p. 81-98.

UFPE. Mecânica de Flúidos: Reologia. Disponível em: Acesso em 22 fev. de 2009.