

**Análise numérica em tanque agitado por impelidor não convencional:  
curva de potência, número de bombeio e hidrodinâmica****Numerical analysis in stirred tank by unconventional impeller: power  
curve, number of pumps and hydrodynamics**

DOI:10.34117/bjdv5n7-023

Recebimento dos originais: 11/05/2019

Aceitação para publicação: 12/06/2019

**Gustavo Gomes Ferreira**

Aluno de graduação em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Espírito Santo  
Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo  
Endereço: Rod. BR-101 km 60(norte) - B. Litorâneo, São Mateus – ES, Brasil  
e-mail: ferreira.g.gustavo@gmail.com

**Alessandra Terezinha Silva Souza**

Engenheira de Petróleo pela Universidade Federal do Espírito Santo  
Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo  
Endereço: Rod. BR-101 km 60(norte) - B. Litorâneo, São Mateus – ES, Brasil  
e-mail: aletssouza@gmail.com

**Andre Leibsohn Martins**

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Instituição: Petróleo Brasileiro SA  
Endereço: Av. Horácio Macedo, 950 - Cidade Universitária da UFRJ, Rio de Janeiro – RJ,  
Brasil  
e-mail: aleibsohn@petrobras.com.br

**Fabio de Assis Ressel Pereira**

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Uberlândia  
Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo  
Endereço: Rua Fernando Ferrari, 514, CT12 – B. Goiabeiras, Vitória – ES, Brasil  
e-mail: fabio.a.pereira@ufes.br

**Daniel da Cunha Ribeiro**

Doutor em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina  
Instituição: Universidade Federal do Espírito Santo  
Endereço: Rod. BR-101 km 60(norte) - B. Litorâneo, São Mateus – ES, Brasil  
e-mail: daniel.ribeiro@ufes.br

**RESUMO**

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento de um tanque agitado dotado de um impelidor radial não convencional. A simulação computacional permite a otimização de custos de análises com experimentos físicos, melhorando a eficiência do processo de pesquisa. O modelo utilizado neste trabalho será fabricado futuramente para validação por processos experimentais, encontrando na Mecânica dos Fluidos Computacional

(Computational Fluid Dynamics, CFD), a possibilidade de obtenção de resultados experimentalmente complexos. Inicialmente é apresentada a geometria do tanque agitado e o teste de independência da malha, posteriormente, a hidrodinâmica em padrão de escoamento promovida pela geometria do impelidor não convencional, além de propriedades características de tanques agitados, sendo estes o comportamento do número de potência e número de bombeio. O objetivo deste tanque é de manter em suspensão sais específicos para análise de precipitação, um dos principais problemas pouco compreendidos na indústria de petróleo e gás. Os resultados foram satisfatórios, nos quais os parâmetros do conjunto podem ser vistos como mais eficientes se comparados à literatura.

**Palavras-chave:** Tanque agitado. Impelidor radial não convencional. CFD. Número de potência. Número de bombeio.

## ABSTRACT

The present work aims to evaluate the behavior of a stirred tank equipped with an unconventional radial impeller. The computational simulation allows the optimization of the costs of analysis with physical experiments, improving the efficiency of the research process. The model used in this work will be fabricated in the future for validation by experimental processes, finding in the Computational Fluid Dynamics (CFD) the possibility of obtaining experimentally complex results. Initially the geometry of the agitated tank and the independence test of the mesh, later the hydrodynamics in flow pattern promoted by the geometry of the unconventional impeller, besides characteristic properties of agitated tanks, being these the behavior of the number of power and number of pumping. The purpose of this tank is to keep in suspension specific salts for precipitation analysis, one of the main problems little understood in the oil and gas industry. The results were satisfactory, in which the parameters of the set can be seen as more efficient when compared to the literature.

**Keywords:** Agitated tank. Non-conventional radial impeller. CFD. Number of power. Pumping number

## 1 INTRODUÇÃO

Tanques agitados são amplamente utilizados na indústria química e metalúrgica em processos como, por exemplo, polimerização, reações catalíticas, extração de solventes, precipitação, entre outros, como proposto por Cheng D. *et al.* (2013). Em um mercado cada vez mais competitivo busca-se sempre o melhor entendimento e controle sobre as etapas de produção garantindo produtos com maior qualidade e melhor relação custo-benefício.

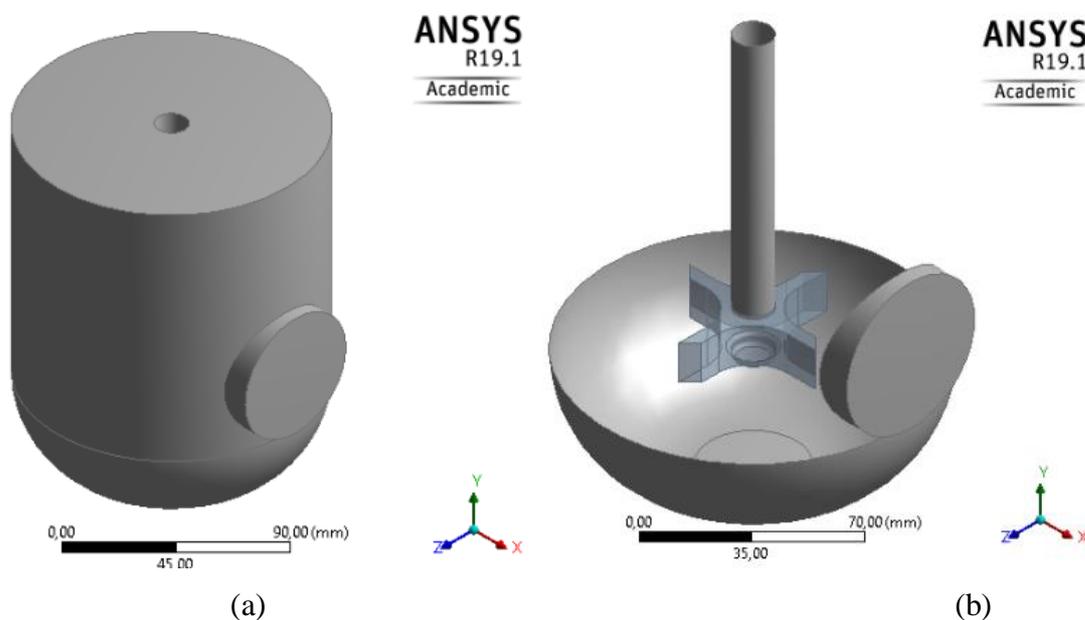
Dentro dos processos de precipitação, o conjunto tanque impelidor deve ser dimensionado de modo a garantir uma mistura homogênea dos reagentes e a suspensão dos precipitados. Alguns parâmetros importantes nesse cenário são a curva de potência, que permite determinar a velocidade ótima de rotação do impelidor (WANG; ZHANG Li; ZHANG Yifei, 2010), o número de bombeio que determina a capacidade do sistema de manter sólidos em suspensão, como proposto por Olini (2010), e a análise hidrodinâmica do fluxo

dentro do tanque, que permite analisar e compreender o escoamento esperado dentro do tanque agitado (CHENG *et al.*, 2016).

Neste trabalho, serão determinadas as curvas de potência e de bombeio para um impelidor não convencional e também, uma análise hidrodinâmica em um tanque agitado sem chicanas, utilizando ferramentas de CFD, considerando um escoamento tridimensional, incompressível, isotérmico, monofásico em regime permanente.

## 2 GEOMETRIA DO TANQUE

A geometria utilizada para o presente trabalho é de um tanque/reator agitado mecanicamente, no qual o compõe, o tanque de parede como limite externo, de 63,5 [mm] de raio e 165 [mm] de altura, com curvatura côncava até 35 [mm] com base de diâmetro 18,5 [mm], onde à uma haste central de 7 [mm] de diâmetro e 119,6 [mm] de comprimento à partir do topo, não conectada ao fundo do tanque, como proposto na Figura 1. No fim do comprimento da haste, há o impelidor não convencional com 60 [mm] de diâmetro e 15 [mm] de espessura composto por 4 pás. Dessa forma, a razão de diâmetros do conjunto é  $D_{\text{impelidor}}/D_{\text{tanque}} = 1/2$ . Uma janela de observação circular é colocada rente à superfície interna do tanque com diâmetro interno de 24 [mm], que será instalada juntamente à um aparelho especial de fotografia no modelo laboratorial, ver Figura 1a e 1b.



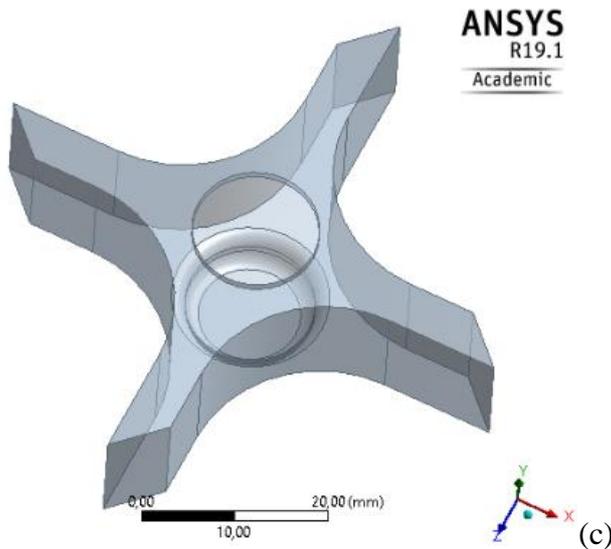


Figura 1. Visão diagonal superior da geometria do tanque (a), do tanque aberto (b) e do impelidor não convencional (c).

### 3 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático considera o escoamento tridimensional, incompressível, isotérmico, monofásico (água) em regime permanente, dentro de um tanque agitado. E tem como base, as equações de conservação de massa (Equação 1) e quantidade de movimento (Equação 2) (Manual Ansys CFX 19.1):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial (\rho \vec{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{U} \otimes \vec{U}) - \nabla \cdot (\mu_{eff} \vec{U}) = \nabla p' + \nabla \cdot (\mu_{eff} \vec{U})^T + B \quad (2)$$

Onde  $\rho$  é a massa específica;  $\vec{U}$  é o vetor velocidade;  $t$  é o tempo;  $\mu_{eff}$  é a viscosidade efetiva;  $B$  é a soma das forças corpo e  $p'$  é a pressão modificada.

O número de potência ( $N_P$ ) e o número de bombeio ( $N_Q$ ), ambos adimensionais, são dados pelas Equações 3 e 4, respectivamente.

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

$$N_Q = \frac{Q}{ND^3} \quad (4)$$

Onde  $P$  é a potência;  $Q$  é a vazão volumétrica;  $N$  é a velocidade rotacional e  $D$  é o diâmetro do impelidor.

Para avaliar o regime de escoamento, laminar ou turbulento, usa-se o Número de Reynolds ( $Re$ ) adimensional, que é dado pela razão entre forças inerciais e viscosas, que em tanques agitados é tipicamente baseado no diâmetro do impelidor e velocidade de rotação (RIBEIRO, 2012), em que  $\mu$  é a viscosidade do fluido.

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

Foi escolhido o modelo de turbulência  $k-\varepsilon$ , o qual como apresentado por Olini (2010), é muito utilizado na indústria, apresentando resultados satisfatórios para casos semelhantes.

## 4 MODELAGEM NUMÉRICA

### 4.1 MÉTODO DOS VOLUMES FINITOS BASEADO EM ELEMENTOS

No presente trabalho foi utilizado o software Ansys CFX 19.1, o qual utiliza o Método dos Volumes Finitos baseado em Elementos (MVFbE), uma variação do Método dos Volumes Finitos utilizando definições do Método de Elementos Finitos, o que alia as vantagens, respectivamente, de garantir a conservação da propriedade transportada e de trabalhar com geometrias complexas (RIBEIRO, 2012).

### 4.2 CRITÉRIOS DE CONVERGÊNCIA

Uma tolerância prefixada adotada neste trabalho foi de convergência numérica quando os resíduos das equações de conservação são menores que  $1^{-4}$ . No entanto percebeu-se através dos resultados de simulações que, a convergência numérica não era para todos os casos suficiente para validação da convergência física. Portanto, para garantir que esta representasse uma convergência física, foram dispostos pontos de monitoramento em posições aleatórias dentro do tanque.

Nesses pontos, dados de velocidade da água serão colhidos e plotados em um Figura em função do passo de tempo, e assim, investiga-se se, ao alcançar a convergência numérica, os valores de velocidade já estão constantes, mostrando que o problema também convergiu fisicamente.

Tal discrepância entre a convergência numérica e física pode ser vista nas Figuras 1 e 2, onde a primeira representa o valor dos resíduos numéricos das equações de conservação, relacionado à convergência numérica, e a Figura 2 a convergência física em todos os pontos de monitoramento, o que significa que o escoamento se tornou desenvolvido.

A Figura 2 e 3 foram retirados da análise de convergência proporcionada pelo software Ansys CFX Solver 19.1, para um caso escolhido de simulação de teste de malha, para malha

tipo 7, ver Tabela 1. Pode-se perceber que embora na Figura 2 os valores de resíduos das equações de conservação alcançaram  $1^{-4}$  (eixo y) com aproximadamente 1200 iterações/ passo de tempo acumulado (eixo x), na Figura 3, a constância dos valores de velocidade nos pontos de monitoramento (eixo y) só foi alcançada a partir de valores próximos de 1600 iterações (eixo x).

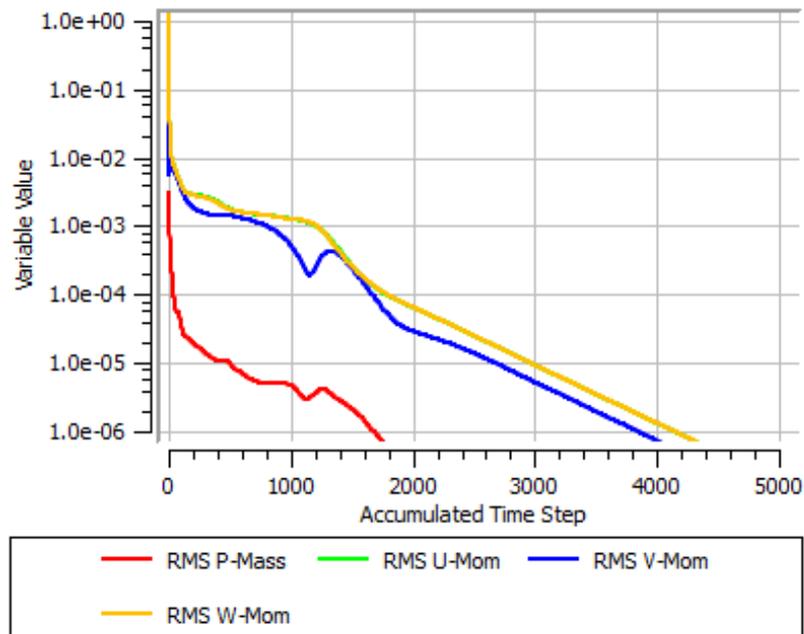


Figura 2 – Valores de resíduos das equações de conservação de Massa (unidimensional) e Quantidade de movimento (tridimensional) em função do passo de tempo acumulado.

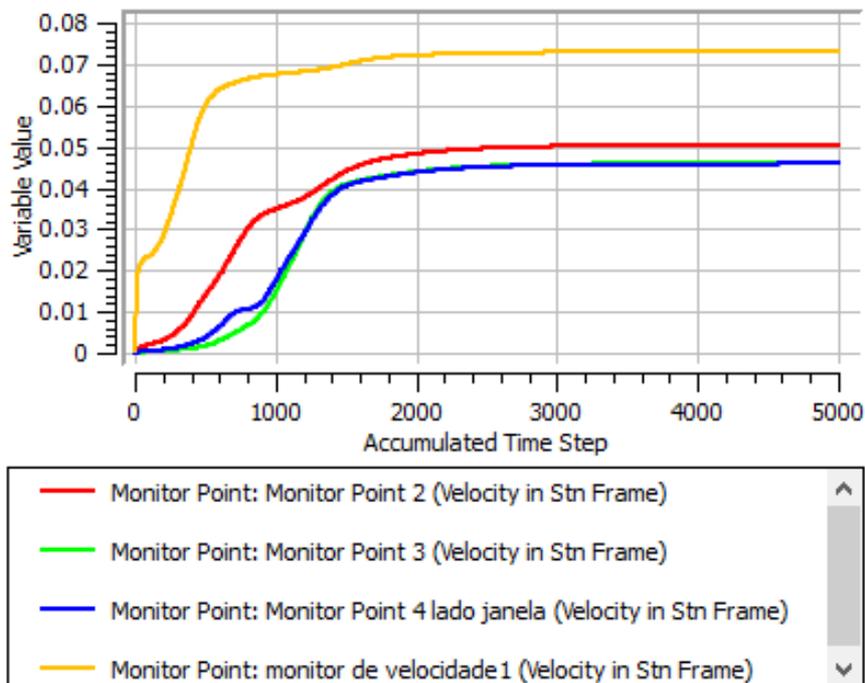


Figura 3 – Valores de velocidades nos pontos de monitoramento posicionados aleatoriamente em função do passo de tempo acumulado.

### 4.3 CONDIÇÕES INICIAIS E DE CONTORNO

Nas paredes do tanque e no impelidor, adotou-se a condição de não deslizamento. O domínio do tanque é estacionário, velocidade igual a zero, porém para a haste do impelidor, pertencente a este domínio, em todas as simulações, será considerado velocidade igual à do domínio do impelidor, sendo este rotacionado com velocidade angular constante representando a ação das pás sobre o líquido. Para teste de independência de malha, a velocidade de rotação foi de 100 rpm, condizente ao valor que será utilizado como padrão para os ensaios experimentais futuros, regime turbulento ( $Re = 7 \times 10^3$ ).

### 4.4 TESTES DE MALHA

O teste de independência de malha consiste em analisar para um mesmo caso específico, a solução para malhas com diferentes graus de refinamento, e assim permite entender a relação de grau de refinamento x gasto computacional x precisão dos resultados. Nesse sentido, ele permite encontrar através dos critérios de precisão pré-estabelecidos, qual grau de refinamento melhor retornará resultados mais precisos com menor gasto computacional.

Um dos procedimentos mais comuns da simulação computacional é o teste de independência de malha, além de posterior validação dos resultados obtidos nas simulações junto ao experimental, no entanto, devido à construção não finalizada do aparato experimental desse projeto, ainda não será possível realizar a validação de resultados.

O método proposto foi a manipulação do parâmetro de malha Tamanho de Elemento (*Element Size*), até o limite de malha disponível para a versão estudantil do Ansys Meshing 19.1, através de 8 malhas distintas, sendo a Malha 1, a menos refinada, e a Malha 8 a mais refinada, como representado na Tabela 1. Como o *Element Size* não garante semelhança de elementos para toda a geometria, foram considerados os parâmetros de qualidade de malha: Qualidade Média do Elemento, recomendável entre 0 e 1 e Razão de Aspecto, que é razão entre máxima e mínima área das superfícies de todos os elementos, recomendado abaixo de 10,3, segundo Ribeiro (2012, apud ANSYS CFX, 2010).

Tabela I: Qualidade dos parâmetros de malha

<b>Malha [Grau de Refinamento]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Tamanho médio de Elemento [mm]	5	4	3,5	3	2,5	2	1,5	1
Número de nós	16.095	27.079	36.722	52.165	77.620	127.186	239.628	566.383
Número de Elementos	80.226	137.227	187.431	268.358	401.089	663.050	1.259.489	2.997.002
Qualidade Média do Elemento	0,83155	0,83353	0,83571	0,8363	0,83576	0,83722	0,83728	0,83752
Razão de Aspecto	1,885	1,8713	1,8593	1,8567	1,8578	1,8514	1,8509	1,8495
Tempo de Simulação (horas)	0:36	0:57	1:21	1:56	2:48	4:50	9:44	16:03

A malha foi gerada no software Ansys Meshing 19.1, utilizando elementos unicamente tetraédricos, uma vez que estes se adaptam bem à maioria das geometrias, satisfazendo a modelagem de curvaturas e detalhes da geometria, como evidenciado por Poley (2014). A região próxima às pás do impelidor foi refinada com elementos menores, para refinar os cálculos do escoamento, mais complexos nessa região (ver Figura 4), conforme proposto por Poley (2014, apud MIRANDA, 2008). A análise visual e qualitativa da malha no volume de controle é crucial antes do prosseguimento da simulação, com o propósito de aumentar a garantia de que a simulação apresente resultados semelhantes à realidade.

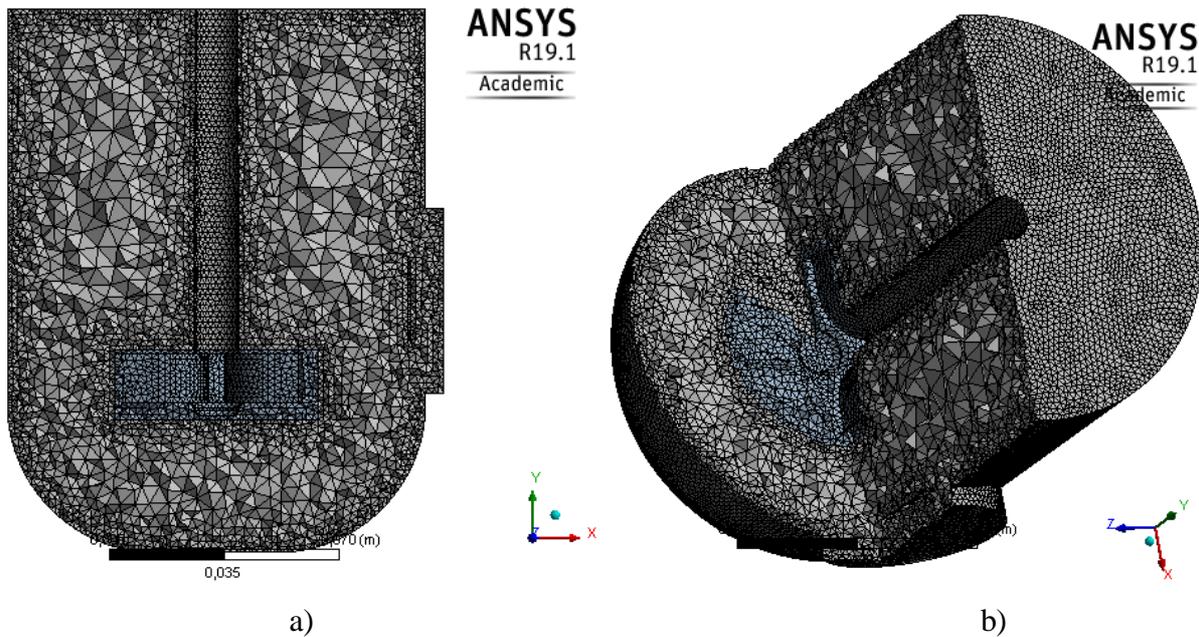


Figura 4: Cortes transversal da malha: a) visão lateral e b) diagonal, respectivamente, com a Malha 6.

Para perfil de velocidades, uma linha vertical posicionada próxima ao impelidor foi estabelecida, à direita do impelidor 3 [mm], no lado onde há a janela de observação. Com este, usou-se os pontos de picos de velocidades para o impelidor não convencional para teste de independência de malha, uma vez que a escolha sem análise qualitativa do escoamento pode induzir ao erro de mascarar os resultados.

Considerando que a geometria do impelidor é diferente de todas as outras já propostas na literatura, faz-se interessante analisar as características do escoamento. Como proposto por Ribeiro (2012, apud ROACHE, 1998), o estudo de independência de malha (Figura 5b) foi conduzido de forma a minimizar os erros de discretização, em uma região de pontos específicos, sendo esta região escolhida onde há o maior pico de altas velocidades do perfil de velocidades apresentado na Figura 5a como proposto no subtópico deste trabalho Estratégia de Resolução. Numericamente, considerando o tempo de simulação para alcançar o estado de convergência numérica e física como proposto anteriormente e adotando critério de erro de 5%, a partir da Malha 6 os valores começam a se tornar independente do grau de refinamento, sendo esta, portanto, a escolhida, como exposto na Tabela 2.

A Figura 5b apresenta visualmente o teste de independência de malha, considerando as posições em Y da Figura 5a, onde ocorre o pico de velocidades do perfil representado.

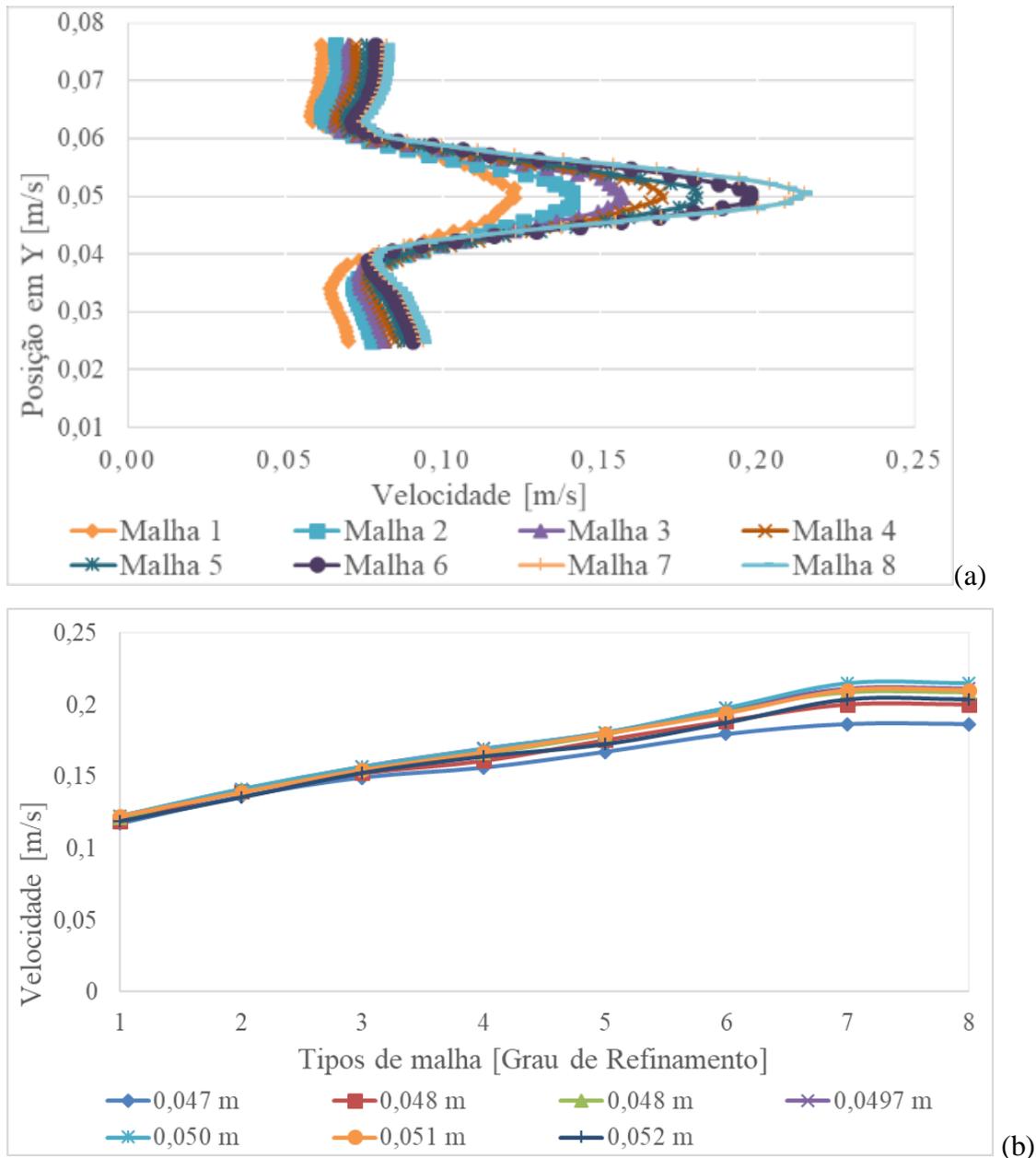


Figura 5: a) Perfil de velocidades próximo ao impelidor. b) Teste de independência de Malha.

Tabela 2. Erro médio dos valores de velocidade no perfil de velocidades

Malha [Grau de Refinamento]	7	6	5	4
Erro Médio	0,005%	4,21%	7,92%	11,27%
Tempo de Simulação horas	9:44	5:27	2:53	1:56

#### 4.5 ESTRATÉGIA DE RESOLUÇÃO

Para o número de potência, o método utilizado para calcular a Potência P (Equação 3) foi de usar o torque fornecido pelo Ansys CFD Post 19.1 nas paredes das pás do impelidor e

na parede da haste, no eixo de rotação, multiplicados pela velocidade de rotação  $N$ , como proposto por Sophia (2010).

Para o número de bombeio, não há definição específica na literatura para determinar a vazão da Equação 4, desta forma, devido à característica radial do impelidor não convencional, foi considerada a vazão na interface entre o impelidor e o tanque, ponto mais próximo das pás.

Para o modelo de rotação do impelidor, foi utilizado o modelo MFR (*Multiple Frames of Reference*), no qual somente uma porção do volume do reator ao redor do agitador gira em relação à referência parada e o resto do tanque em repouso (RIBEIRO, 2012). Das possibilidades de MFR, o modelo escolhido foi o *Frozen Rotor*, onde os componentes em cada lado da interface são fixos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 ANÁLISE HIDRODINÂMICA

Como o propósito da geometria é manter os sólidos em suspensão, garantindo a visualização do comportamento destes pela janela de observação, faz-se crucial a análise do padrão de escoamento proporcionado pelo conjunto tanque-impelidor. Vale lembrar que conjunto tanque impelidor do nosso trabalho tem o objetivo de garantir o menor número e menor intensidade de zonas de recirculação nas bordas para favorecer assim a homogeneização do processo de precipitação, portanto garantir o menor número de zonas de recirculação nas bordas, além de monitorar a localização e características das existentes é crucial para estudar os fenômenos desejados do experimento.

Trazendo para o objetivo de estudo geral, precipitação de sais, é importante considerar que estes precipitam em zonas de baixa velocidade, sendo assim, a análise de vórtices é importante para compreender a localização destas zonas, além de permitir otimizações com objetivo de diminuir a ocorrência de zonas de baixa velocidade, permitindo um melhor estudo do fenômeno de precipitação.

Para  $N = 100$  rpm, as linhas de correntes são apresentadas na Figura 6, observando-se 2 zonas de recirculação, posicionadas uma acima e outra abaixo do impelidor que são geradas pelas pontas superior e inferior do impelidor, sendo que esta última, possui menor grau de recirculação, devido principalmente à geometria côncava do fundo do tanque. Para melhor compreender e visualizar a hidrodinâmica gerada, a Figura 7 representa um contorno de velocidades no mesmo plano vertical da anterior, permitindo melhor visão do perfil de

velocidades e distribuição bidimensional da energia do escoamento, relacionada à homogeneização do escoamento quando desenvolvido. Outra função de visualização do Ansys CFD Post 19.1 (*Volume Rendering*) também foi utilizada, desta vez para compreensão tridimensional da hidrodinâmica, como apresentado na Figura 8.

Comparado os resultados aos de Sophia (2010), apresentado na Figura 9, o qual para o conjunto tanque-impelidor radial (modelo de *Frozen Rotor*) apresentou 2 zonas de recirculação/vórtices principais, mas também outras secundárias, apresentando maior intensidade de zonas de baixa velocidade, para velocidade de rotação de 30 [rpm]. Dessa forma, o modelo proposto neste trabalho representa melhor eficiência do padrão de escoamento no tanque em termos da distribuição da energia por toda geometria (homogeneização) após escoamento desenvolvido, fator crucial para qualidade da suspensão de sólidos com foco em precipitação de sais.

Vale salientar que dificilmente uma comparação terá alta precisão, pois deve ser considerado o tipo de impelidor (radial, axial), a geometria do tanque e do impelidor, e a relação espacial entre os dois, a velocidade de rotação, a razão de diâmetros tanque impelidor, o modelo de rotação do impelidor considerado na simulação como estudado por Sophia (2010), entre outros fatores. No entanto tal dificuldade comparativa é esperada para casos de modelos não convencional, como neste trabalho, do impelidor.

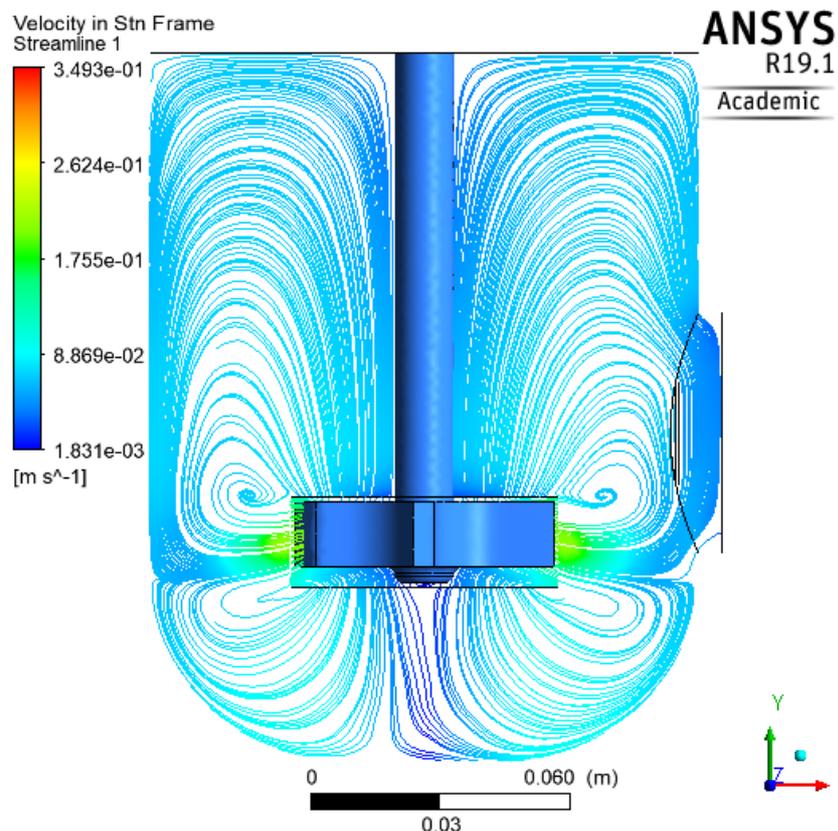


Figura 4. Padrão de escoamento formado no interior do tanque agitado à 100 rpm para *Frozen Rotor*.

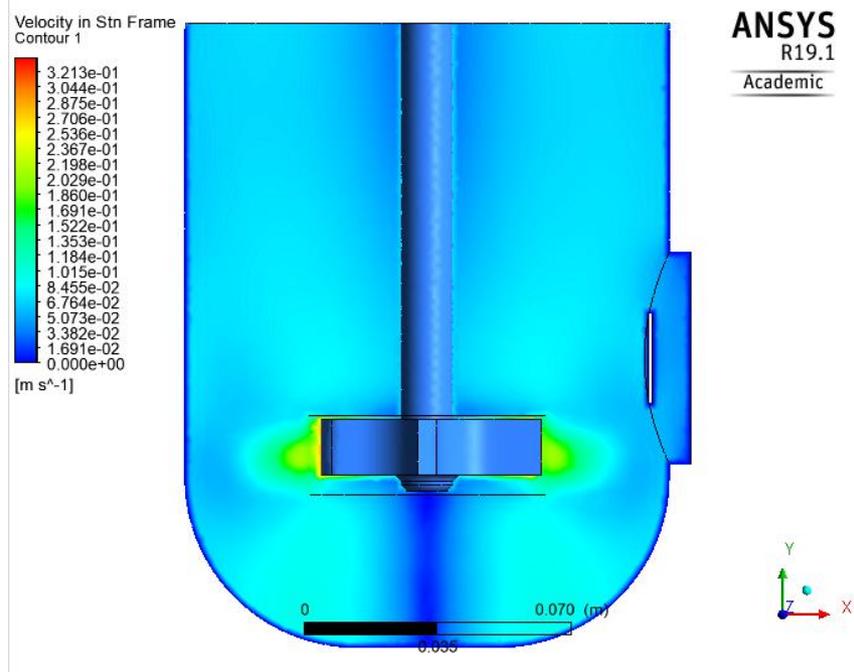


Figura 7. Perfil de velocidades formado à 100 rpm para *Frozen Rotor*. (Contorno de velocidade).

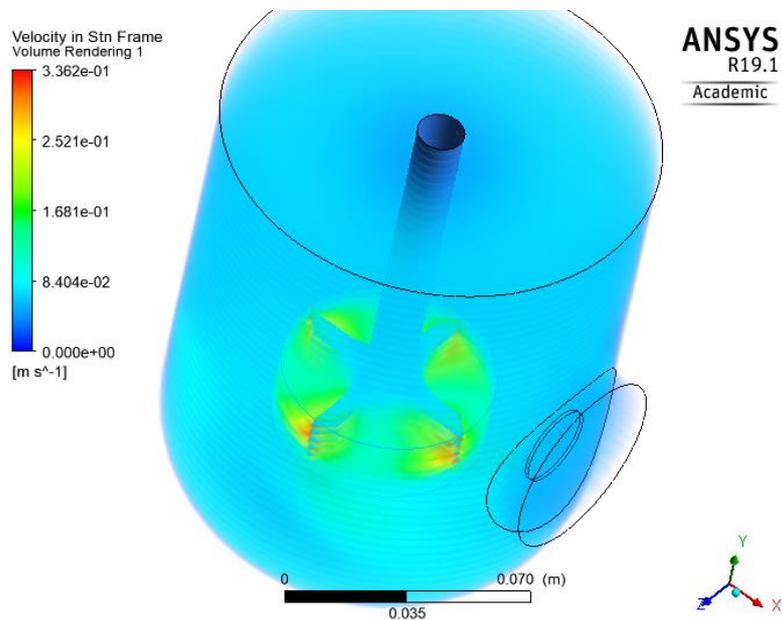


Figura 8. Perfil de velocidades formado à 100 rpm para *Frozen Rotor*. (Volume Rendering)

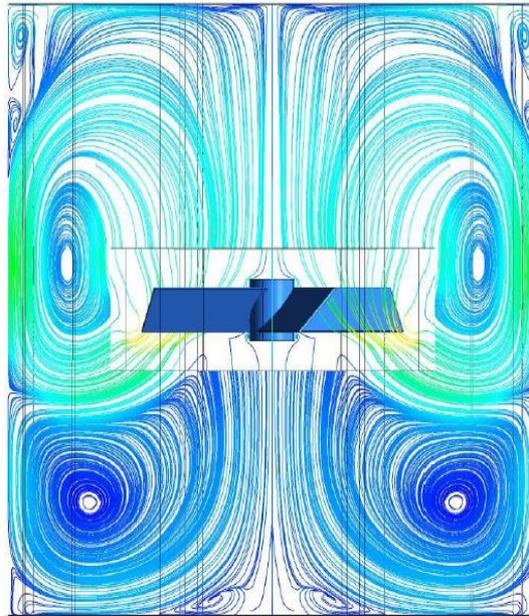


Figura. 9. Padrão de escoamento para Frozen Rotor, N=30 rpm. Fonte: Sophia (2010)

## 5.2 NÚMERO DE POTÊNCIA

Além do perfil de escoamento, outro parâmetro a ser analisado para caracterizar a nova geometria de impelidor proposta é o Número de Potência, que fisicamente pode ser entendido como a razão entre a potência entregue pelo motor e a energia cinética efetiva, ou também como a resistência do fluido ao movimento e a inércia como proposto por Ribeiro (2012, apud EARLE, 1983). Para um projeto de um sistema de mistura, faz-se interessante estimar a potência, uma vez que o consumo desta é proporcional ao custo da operação. Analisa-se o número de potência ( $N_P$ ) em função do número de Reynolds ( $Re$ ), para compreender a relação entre a energia necessária para promover o escoamento (laminar, transiente ou turbulento).

O número de potência depende de fatores geométricos, como número e geometria das pás, nível de inclinação das pás, geometria e configuração do impelidor, presença de chicanas, e altura do impelidor como proposto por Paul, Obeng e Kresta (2004). A análise do número de potência para o impelidor não convencional é apresentado na Figura 10.

Entende-se pela interpretação do Figura 10, juntamente com a análise comparativa de diversos impelidores distintos, proposta por Paul, Obeng e Kresta (2004) representado pela Figura 11 que:

- Na fase de regime laminar  $1 < Re < 10^2$ , o  $N_P$  depende inversamente do número de Reynolds, o que mostra que a potência depende fortemente da viscosidade. Foi

constatado numericamente, os torques na haste e no impelidor possuem mesma ordem de grandeza

- Na fase transicional  $10^2 < Re < 10^3$ , o número de potência varia suavemente.
- Na fase turbulenta,  $Re > 10^3$ , o  $N_p$  é independente da viscosidade líquida, e o torque na haste é desprezível em comparação ao torque no impelidor.

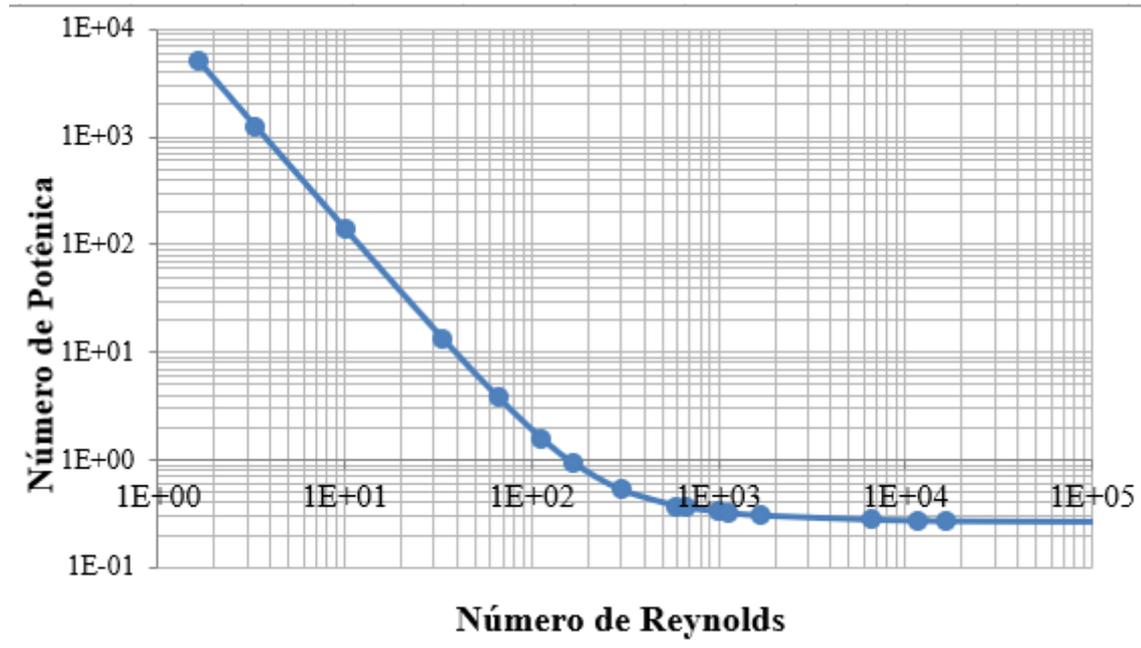


Figura 10. Número de potência x Número de Reynolds para o impelidor radial não convencional.

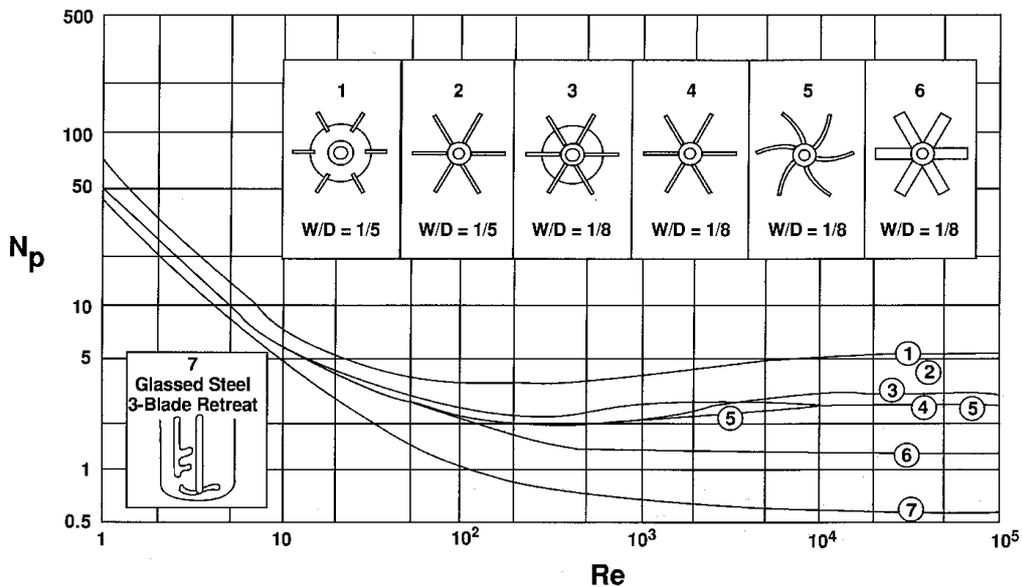


Figura 11. Número de potência x Número de Reynolds para diferentes geometrias de impelidores por Paul, Obeng e Kresta (2004, modificado de Rushton 1950).  $0,3 < D/T < 0,55$

A análise do comportamento do número de potência em função do regime de escoamento, permite compreender que, relativamente, muita energia (potência fornecida) é necessária para manter o escoamento em regime laminar, no entanto o oposto ocorre para os regimes transiente e turbulento. Analisando os estudos de ensaios mecânicos e simulações computacionais na literatura, com o tipo de escoamento como referência ( $Re$ ), tem-se o entendimento do número de potência para o impelidor não convencional radial proposto nesse trabalho, de razão de diâmetros  $D_{\text{impelidor}}/ D_{\text{tanque}}$ ,  $D/T = 1/2$ ):

Para simulações numéricas de geometrias semelhantes de impelidor, apresentadas em síntese na Tabela 3, organizadas por autores, tipo de impelidor, Número de potência médio em regime de turbulência, e razão de diâmetros, juntamente com análise da Figura 10 e 11, pode-se concluir que:

- Para regime laminar de escoamento, os resultados obtidos para o impelidor não convencional são muito altos, representando que maior energia relativa é necessária para alcançar esse tipo de regime se comparado às diferentes geometrias de impelidores radiais. No entanto, como proposto por Sophia (2010), impelidores radiais são comumente utilizados para gerar regimes turbulentos como interesse.
- Para regime turbulento de escoamento, objetivado para suspensão de sólidos (SOPHIA, 2010), os resultados de  $N_p$  são mais eficientes que os da literatura, o que significa que menor energia relativa é necessária para o impelidor convencional gerar escoamentos turbulentos ( $Re > 10^3$ ) do que outros impelidores radiais.

Tabela 3. Revisão bibliográfica comparativa de Número de potência x Número de Reynolds para diferentes geometrias de impelidor

<b>Autor</b>	<b>Tipo de impelidor - radial</b>	<b><math>N_p</math> médio de turbulência</b>	<b>D/T</b>
Nagata (1975)	8 pás 4 pás retas 45°	1,2 a 1,4	0,6
Oldshue (1983)	4 pás retas	1	-----
Paul, Obeng e Kresta (2004)	Figura 11	1,2 a 5	0,3 à 0,5
<b>Resultados</b>	<b>Não convencional</b>	<b>0,2 a 0,3</b>	<b>0,5</b>

Como já abordado aqui neste trabalho, é importante salientar que nessas comparações, devem ser considerados a quantidade e geometrias diferentes de pás, bem como razões de diâmetros  $D/T$ , entre outros fatores geométricos, não permitindo uma comparação de alta precisão do impelidor não convencional. Desta forma, através do estudo computacional percebe-se que a geometria proposta do impelidor não convencional apresenta valores muito baixos de  $N_P$ , requisitando menor potência para alcançar grandes números de Reynolds, se comparados às geometrias semelhantes.

### 5.3 NÚMERO DE BOMBEIO

Outro parâmetro utilizado para caracterizar a capacidade de um tanque agitado é o número de bombeio ( $N_Q$ ), que mede a capacidade de bombeamento do conjunto. O bombeamento também pode ser definido como a quantidade de material descarregado por um impelidor rotativo (SOPHIA, 2010).

Para regime laminar (neste trabalho,  $0 < N < 50$ ), o estudo do número de bombeio é dificilmente caracterizado na literatura, como proposto por Sophia (2010), que em seu trabalho propôs o comportamento de  $N_Q$  para um impelidor de 4 pás inclinadas (radial), com rotação de 30 [rpm] apresentando o mesmo comportamento para o regime de turbulência, que para as condições geométricas do presente trabalho é em rotações próximas de 100 [rpm]. Dessa forma, os resultados são satisfatórios em termos de comportamento do Número de Bombeio x Velocidade de Rotação.

O número de bombeio mantém-se quase constante com leve decaimento com o aumento do Número de Reynolds, isto é, aumento da velocidade de rotação  $N$ , como proposto na Figura 12. Por questões de visualização gráfica, foi escolhido a representação em termos de velocidade de rotação, como realizado por Sophia (2010).

Em comparação numérica à literatura, Paul, Obeng e Kresta (2004), encontraram valores de  $N_Q$  em torno de 0,6 e 0,9 para diferentes razões de diâmetro, desde  $D/T = 0,25$  à 0,5, em que quanto maior a razão de diâmetros, menor o  $N_Q$ . Souza (2002), utilizando um impelidor tipo 4 pás inclinadas com  $45^\circ$  e razões de diâmetro  $D/T = 0,4$  valores de  $N_Q = 0,65$  em regime de turbulência. Sophia (2010), encontrou para o modelo de impelidor tipo 4 pás inclinadas, representada na Figura 9, valores de  $N_Q = 0,8$ .

Como representado na Figura 12, os resultados obtidos para o impelidor não convencional em regime de turbulência são de  $N_Q = 1,11$ . Realizando uma análise comparativa, temos que o impelidor não convencional apresenta resultados mais eficientes do

que os encontrados na literatura, isto é, os resultados indicam que o impelidor não convencional proposto neste trabalho possui maior capacidade de bombear o fluido dentro do tanque agitado, sendo assim mais eficiente.

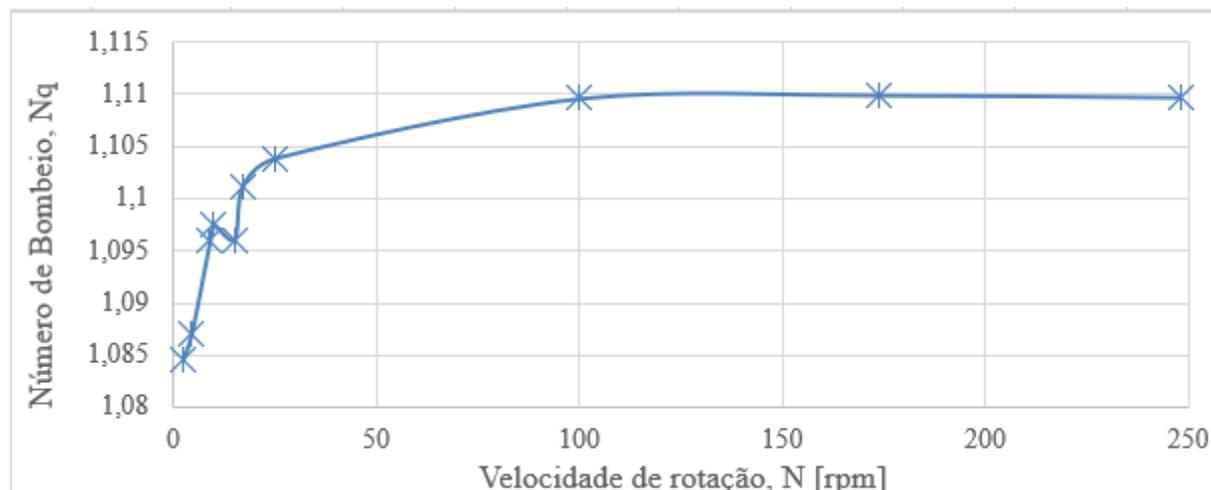


Figura 12. Número de Bombeio em função da velocidade de rotação para regimes transiente e turbulento.

## 6 CONCLUSÕES

Os resultados da simulação computacional são satisfatórios como modelo para estudo de precipitação, pois garante padrão de escoamento mais eficiente quando comparada à literatura, como visto pela análise hidrodinâmica, além disso, boa homogeneização do escoamento foi encontrada, com existência de 2 zonas de vórtices principais geradas pelo impelidor. O entendimento dos números de potência e bombeio permitiram a caracterização do impelidor não convencional, que por sua vez possuiu resultados mais eficientes se comparados à literatura, além de possuir comportamento gráfico equivalente. Como propostas para estudos futuros, tem-se a análise de todos os parâmetros aqui avaliados em função da variação da altura do impelidor no tanque/reator; análise mais detalhada das zonas de vórtices, suas características e sua influência na visualização pela Janela de Observação. Por fim, para continuação do trabalho, serão incrementados em trabalhos futuros os saís na mistura, para análise de precipitação dos mesmos.

## REFERÊNCIAS

ANSYS CFX. Ansys Help: CFX Theory Guide v. 19.1.

CHENG, D. *et al.* Numerical simulation of macro-mixing in liquid-liquid stirred tanks.

Journal of Chemical Engineering Science, v. 101, p. 272-282, 2013.

CHENG, D. *et al.* Modelling and experimental investigation of micromixing of single-feed semi-batch precipitation in a liquid-liquid stirred reactor. *Journal of Chemical Engineering Journal*, 2016.

NAGATA, S. *Mixing – Principles and Applications*, Japan, Kodanska Scientific Books, 1975.

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

OLINO, A. L. M. Otimização de impelidor KPC utilizando Fluidodinâmica Computacional (CFD). 2010, 76p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – UNICAMP, Campinas, 2010.

PAUL, E. L., ATIEMO-OBENG, V., KRESTA, S. M. *Handbook of industrial mixing: science and practice*. EUA: John Wiley & Sons, 2004.

POLEY, I. M. Modelagem e simulação CFD de reações de transesterificação em tanques com agitação mecânica. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica). Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RIBEIRO, D. C. Modelagem e simulação do escoamento de sistemas multifásicos em reatores agitados mecanicamente. 2012, 206p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Universidade Federal De Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

SOPHIA, L. V. G. Análise comparativa das alternativas para simulação CFD de tanque de mistura operando em regime turbulento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) Centro Universitário Da Fei, São Bernardo do Campo 2010.

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

WANG, *et al.* Experimental investigation and CFD simulation of liquid-solid-solid dispersion in a stirred reactor. Journal of Chemical Engineering