Curso de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos

ESCOLA DE QUÍMICA

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ANDRÉA GONÇALVES BUENO DE FREITAS

SEPARADOR HELICOIDAL: UM NOVO ESTUDO BASEADO EM FLUIDODINAMICA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTOS

RIO DE JANEIRO
Outubro de 2015

ANDRÉA GONÇALVES BUENO DE FREITAS

SEPARADOR HELICOIDAL: UM NOVO ESTUDO BASEADO EM FLUIDODINAMICA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTOS

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para à obtenção do Título de Doutor em Ciências em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientadores:
Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD (EQ/UFRJ)

Prof. Gabriel Francisco da Silva, DSc (NUPETRO/UFS)

RIO DE JANEIRO
Outubro de 2015

CIP - Catalogação na Publicação

F862s

FREITAS, Andrea Gonçalves Bueno de
SEPARADOR HELICOIDAL: UM NOVO ESTUDO BASEADO EM FLUIDODINAMICA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTOS/ANDREA GONÇALVES BUENO DE FREITAS. – Rio de Janeiro,2015.
99f.

Orientador: Ricardo de Andrade Medronho.
Coorientador: Gabriel Francisco da Silva.
Tese (doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos,2015.

1. Água Oleosa. 2. CFD. 3. Eficiência. 4. Separador Tubular Helicoidal. 5. TOG. I. MEDRONHO, RICARDO DE ANDRADE, orient. II. SILVA, GABRIEL FRANCISCO DA, coorient. III. Título.

Elaborado pelo Sistema de Geração Automática da UFRJ com os dados fornecidos pelo(a)autor(a).

Andréa Gonçalves Bueno de Freitas

SEPARADOR HELICOIDAL: UM NOVO ESTUDO BASEADO EM FLUIDODINAMICA COMPUTACIONAL E EXPERIMENTOS

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para à obtenção do Título de Doutor em Ciências em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Orientado por:

Prof. Ricardo de Andrade Medronho, PhD (EQ/UFRJ)

Prof. Gabriel Francisco da Silva, DSc (NUPETRO/UFS)

Aprovada por:

Prof. Rodrigo Azevedo dos Reis, PhD (PPGEQ/UERJ)

Profa. Cláudia Míriam Scheid, DSc (DEQ/UFRRJ)

Prof. Luiz Fernando Lopes Rodrigues Silva, DSc (EQ/UFRJ)

Prof. Luis Américo Calçada, DSc (DEQ/UFRRJ)

Profa. Heloisa Lajas Sanches, DSc (EQ/UFRJ)

RIO DE JANEIRO
Outubro de 2015

“Ainda que eu falasse as línguas dos homens e dos anjos, se não tiver caridade, sou como o bronze que soa, ou como o címbalo que retine.
Mesmo que eu tivesse o dom da profecia, e conhecesse todos os mistérios e toda a ciência; mesmo que tivesse toda a fé, a ponto de transportar montanhas, se não tiver caridade, não sou nada.
Ainda que distribuísse todos os meus bens em sustento dos pobres, e ainda que entregasse o meu corpo para ser queimado, se não tiver caridade, de nada valeria!
A caridade é paciente, a caridade é bondosa. Não tem inveja. A caridade não é orgulhosa. Não é arrogante.
Nem escandalosa. Não busca os seus próprios interesses, não se irrita, não guarda rancor.
Não se alegra com a injustiça, mas se rejubila com a verdade.
Tudo desculpa, tudo crê, tudo espera, tudo suporta.
A caridade jamais acabará. As profecias desaparecerão, o dom das línguas cessará, o dom da ciência findará.
A nossa ciência é parcial, a nossa profecia é imperfeita.
Quando chegar o que é perfeito, o imperfeito desaparecerá.
Quando eu era criança, falava como criança, pensava como criança, raciocinava como criança. Desde que me tornei homem, eliminei as coisas de criança.
Hoje vemos como por um espelho, confusamente; mas então veremos face a face. Hoje conheço em parte; mas então conhecerei totalmente, como eu sou conhecido.
Por ora subsistem a fé, a esperança e a caridade - as três. Porém, a maior delas é a caridade.” I Cor 13, 1-13

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, Pai Bondoso, que me acompanha e guia. E, às minhas famílias: aquela na qual fui gerada; a que se agregou durante o caminho; e a família que gerei.

Baseando-me na curta experiência de vida que possuo, coloco-me no direito de afirmar que, acredito no aprendizado construído a partir de ações, contemplação, decisão, exemplo e observação.

Durante um período de tempo, o do doutorado, curto para alguns, longo para outros, para mim na medida exata, aconteceram plantios conscientes e colheitas surpreendentes. E neste caminho de amadurecimento ocorreram encontros importantes e incontáveis, relações afetivas foram construídas e companheiros surgiram para acrescentar.

Dentre os vários grupos de pessoas que participaram comigo desta trajetória de pesquisa encontram-se profissionais de duas instituições federais: Universidade Federal do Rio de Janeiro e Universidade Federal de Sergipe. Vale ressaltar também, o suporte financeiro da Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa da Universidade Federal de Sergipe, pelo auxílio THESIS do Programa de Bolsas de Pós-Graduação para Docentes e Técnicos Administrativos da UFS; e a Fundação Coordenação de Projetos, Pesquisas e Estudos Tecnológicos (COPPETEC) e Fundação Universitária José Bonifácio (FUJB).

Um agradecimento especial aos professores que orientaram esta Tese; aos demais professores das referidas instituições, que colaboraram com sugestões e apoio; aos professores que participaram das bancas de qualificação e defesa; aos colegas do Laboratório de Tecnologia Alternativa (LTA/UFS); aos alunos da Escola de Química (EQ/UFRJ); aos companheiros do Laboratório de Análises Clínicas (LAC/HU/UFS); e aos servidores da Fundação Hospitalar de Saúde de Sergipe, lotados no Hospital de Urgência Governador João Alves Filho (FHS/HUSE).

Agradeço de forma especial, aos profissionais da Unidade de Operações de Exploração e Produção de Sergipe-Alagoas (UO-SEAL), tanto os da sede, em Aracaju, como os do Laboratório de Fluidos de Carmópolis, que me forneceram informações sobre o contexto real da indústria de petróleo.

Por fim, ressalto com carinho, a grande contribuição dos amigos e amigas, antigos e novos, nascidos e mantidos.

A TODOS VOCÊS um grande abraço de agradecimento.

FREITAS, Andréa Gonçalves Bueno de. **Separador Helicoidal**: Um Novo Estudo Baseado em Fluidodinâmica Computacional e Experimentos. Rio de Janeiro, 2015.Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

A presente Tese de doutorado tem como objetivo estudar a aplicação de um separador tubular helicoidal, para o tratamento de água contaminada com óleo. O separador estudado, apresenta uma geometria inédita, com orientação vertical, rotação horária e baseada nos parâmetros geométricos, diâmetro da hélice (Dc), diâmetro interno do tubo (d) e distância entre as voltas (H_c); e nos experimentos onde foi adicionada uma saída na forma de Y na posição horizontal, caracterizando a originalidade deste estudo. Para o dimensionamento de tubos helicoidais e análise do seu escoamento interno, foram considerados, além do número de Reynolds, uma variação deste, o Reynolds crítico (Re_{crit}), que traduz o efeito da curvatura introduzido pelo número de Dean (De) e o efeito da torção definido pelo número de Germano (Gn). A Tese apresenta uma sucessão de testes experimentais com água oleosa produzida em laboratório, complementado com simulações de Fluidodinâmica Computacional. Para separação de água oleosa, dividiu-se este trabalho em duas partes, uma experimental e outra de simulação numérica com fluidodinâmica computacional. A parte experimental foi desenvolvida na Universidade Federal de Sergipe (UFS) e a parte computacional, na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Na primeira parte, a Experimental, foram construídas duas configurações diferentes, onde variou-se a composição da mistura, o tipo de saída do tubo helicoidal e o arranjo do sistema experimental. Na composição da mistura, primeiro foi aplicado petróleo sem nenhum aditivo químico, posteriormente óleo mineral lubrificante, e um agente emulsificante. No tipo de saída, duas diferentes peças em forma de Y foram construídas. Optou-se por preparar emulsões óleo-água em laboratório, chamadas de misturas sintéticas, a fim de reproduzir, num primeiro momento, a água de produção gerada nos poços terrestres de extração de petróleo. Em uma etapa posterior foi realizado um planejamento experimental com uma emulsão de água e óleo mineral lubrificante. Na parte seguinte, Computacional, utilizou-se o pacote comercial de CFD da empresa ANSYS, versão 16.1, onde o programa *Design Modeler* foi usado para elaborar a geometria do trabalho, o *Meshing* para fazer as malhas, o FLUENT para a Modelagem e Simulações numéricas, e os resultados foram analisados no CFD-Post. Foram feitos dois grupos de simulação. O primeiro, denominado Estudo de Torção, consistiu em avaliar com CFD o perfil de escoamento monofásico no tubo helicoidal quando este tinha a distância entre as voltas (H_c) variando de 0,02 a 0,10m. O segundo, denominado aqui de Reprodução de Experimento, consistiu na reprodução do experimento que apresentou melhor eficiência de separação. Os resultados obtidos com a simulação numérica foram consistentes com os dados experimentais obtidos, indicando que a modelagem utilizada está coerente. Este trabalho apresentou um resultado novo na literatura, trazendo a utilização de tubos helicoidais para separação de água oleosa, visando contribuir com a pesquisa acadêmica e para o desenvolvimento de um equipamento que possa vir a ser utilizado na indústria.

Palavras-chave: Água Oleosa. CFD. Eficiência. Separador Tubular Helicoidal. TOG.

FREITAS, Andréa Gonçalves Bueno de. **Helical Separator**: a New Study Based on Computational Fluid Dynamics and Experiments. Rio de Janeiro, 2015. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

This Doctoral thesis aims to study the application of a helical tube separator for the treatment of water contaminated with oil. The studied separator presents a new geometry, with vertical orientation, time rotation and based on geometric parameters, propeller diameter (Dc), the pipe internal diameter (d) and the distance between the turns (H_c); and in experiments where an outlet in the form of Y was added in the horizontal position, characterizing the originality of this study. For the design of helical tubes and analysis of its internal flow, were considered, in addition to the Reynolds number, a variation of this, the critical Reynolds (Re_{crit}), which reflects the effect of the curvature introduced by the number of Dean (De) and the twist effect defined by the number of Germano (Gn). The thesis presents a series of experimental tests with oily water produced in the laboratory, complete with simulations of Computational Fluid Dynamics. For the separation of oily water, this work was divided into two parts, one experimental and other of numerical simulation with computational fluid dynamics. The experimental part was developed at Federal University of Sergipe (UFS) and the computational part at Federal University of Rio de Janeiro (UFRJ). In the first part, the Experimental, two different configurations were built, where the composition of the mixture, the output type of the helical pipe and arrangement of the experimental system varied. In the composition of the mixture was first applied oil without chemical additives, subsequently lubricant mineral oil, and an emulsifying agent. In the type of output, two different Y-shaped parts were constructed. We chose to prepare oil-water emulsions in laboratory, called synthetic blends, in order to produce, at first, the water of production generated in onshore wells of oil extraction. At a later stage, it was carried out an experimental design with a water emulsion and mineral lubricant oil. In the next part, Computational, used the commercial package of CFD from ANSYS Company, version 16.1, where the program *Design Modeler* was used to design the geometry of the work, the *Meshing* to make the mesh, the FLUENT for modeling and numerical simulations and the results were analyzed using the CFD-Post. Two simulation groups were made. The first, called Twist Study, was to evaluate with CFD the single-phase flow profile in the helical tube when this was the distance between the turns (H_c) ranging from 0.02 to 0.10 m. The second, called here Experiment Reproduction, was the reproduction of the experiment that showed better separation efficiency. The results obtained from the numerical simulation were consistent with the experimental data indicating that the modeling used here is consistent. This paper presented a new result in the literature, bringing the use of helical tubes for separation of oily water, in order to contribute to academic research and the development of an equipment that may be used in the industry.

Keywords: Oily Water. CFD. Efficiency. Helical Tube Separator. TOG.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 16
1.1 Escopo do Trabalho 16
1.2 Objetivo 17
1.2.1 Objetivo Geral 17
1.2.2 Objetivos Específicos 17
2 REVISÃO DE LITERATURA 18
2.1 Equipamentos Aplicados no Tratamento de Água Oleosa 18
2.2 Geometria Helicoidal: forças envolvidas no escoamento em estudo 20
2.3 Modelagem Matemática 22
2.3.1 Conceitos Principais 22
2.3.2 Números Importantes: Dimensionais e Adimensionais 24
2.3.3 Equações e definições para o cálculo da Eficiência total (E_T), Razão de Fluido e Eficiência Reduzida 29
2.3.4 Alguns experimentos já realizados, com tubos helicoidais 30
2.3.5 Planejamento Experimental 38
2.3.6 Turbulência e Modelos de Turbulência 41
2.4 Fluidodinâmica Computacional 45
2.4.1 Fluent 46
3 METODOLOGIA 52
3.1 Parte Experimental 52
3.1.1 Configuração Experimental 1 52
3.1.2 Configuração Experimental 2 58
3.2 Simulação em CFD - Software e Hardware 62
3.2.1 Estudo da Torção 63
3.2.2 Reprodução de Experimento 66
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 70

4.1 Experimentos com Configuração Experimental 1 70
4.2 Experimentos com Configuração Experimental 2 72
4.3 Simulações para Estudo da Torção 74
4.4 Simulações para Reprodução de Experimento 75
5 CONCLUSÕES 79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 81
APÊNDICES 86
ANEXOS 97

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Desenho esquemático do funcionamento do separador espiral de micropartículas. 21
Figura 2 - Visões do Separador Tubular Helicoidal, identificando os diâmetros..... 23
Figura 3 - Ilustração de um tubo helicoidal, onde 2Rc é o diâmetro da hélice, ... 23
Figura 4 - Duto quadrado helicoidal. 31
Figura 5 -Configuração geométrica 32
Figura 6 - Esquema experimental com serpentinas helicoidais..... 36
Figura 7 - Tela do *Design Modeler*..... 47
Figura 8 - Tela do *Meshing App* 48
Figura 9 - Tela do *Fluent*– Modelagem 49
Figura 10 - Tela do *Fluent*– Solução 49
Figura 11 - Tela do *CFD-Post*..... 50
Figura 12 – Desenho com medidas e foto da saída em Y. 53
Figura 13 - Esquema do Sistema Experimental 1..... 54
Figura 14 - Foto do Sistema Experimental 1..... 54
Figura 15 - Nova saída, desenho com medidas e imagem 59
Figura 16 - Novo Separador Tubular Helicoidal 60
Figura 17 - Apresentação dos reciclos e suas bombas. À esquerda, (R1), com a Bomba 1 de cor azul, antes do Tanque 1 (azul), e, à direita, (R2), com a Bomba 2 de cor preta..... 60
Figura 18 - Ponto de coleta da amostra entrada V3, abaixo do manômetro, com tubo de silicone para caracterização da corrente de entrada..... 60
Figura 19 - Novo separador tubular helicoidal, com distância entre as volta (H_c) de 0,20 m.. 61
Figura 20 - Visão isométrica do tubo helicoidal simulado..... 62
Figura 21 - Apresentação dos pontos de medida definidos em ângulos de 90º em 90º..... 63
Figura 22 - Detalhe da face da malha 02, utilizadas nas simulações de Estudo da Torção 65
Figura 23 - Velocidade axial em função da posição radial no tubo helicoidal (T01, T02 e T03). 66
Figura 24 - Detalhes do refino da malha hexaédrica 68
Figura 25 - Teste de malha no tubo helicoidal na posição de (a) 900º e (b) 1440º 69
Figura 26 - Curva característica da Configuração Experimental 1..... 70
Figura 27 - Curva característica da Configuração Experimental 2..... 73
Figura 28 - Linhas de corrente e contornos de velocidade dos experimentos..... 75

Figura 29 - Linhas de corrente coloridas com velocidade axial e hélice com H=0,02m..... 75
Figura 30 - Fração volumétrica de óleo, com diâmetro de partícula igual a 5µm..... 76
Figura 31 -Fração volumétrica de óleo, com diâmetro de partícula igual a 10µm..... 76
Figura 32 - Fração volumétrica de óleo, com diâmetro de partícula igual a 50µm..... 77
Figura 33 - Perfis de velocidade na última volta do tubo helicoidal, nos vários diâmetros simulados..... 77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Métodos de tratamento da água produzida disponíveis. 19
Tabela 2 - Demonstração de trabalhos que apresentam tubo helicoidal com diferentes configurações. 31
Tabela 3 - Características operacionais e geométricas de tubos helicoidais encontrados na literatura nacional. 33
Tabela 4 - Classificação dos regimes de fluxo para tubos retos e helicoidais. 42
Tabela 5 - Características da água + sal. 55
Tabela 6 - Características do Petróleo OBA08052015. 56
Tabela 7 - Fatores do Planejamento 58
Tabela 8 - Características do óleo Lubrax SL 15W-40. 61
Tabela 9 - Condições de contorno, propriedades dos fluidos e opções adotadas nas simulações. 64
Tabela 10 - Configurações das cinco geometrias do Estudo da Torção. 65
Tabela 11 - Números de elementos e nós das malhas testadas. 66
Tabela 12 - Número de elementos e nós das malhas testadas 67
Tabela 13- Condições de contorno, as propriedades dos fluidos e as especificações numéricas 68
Tabela 14 - Experimentos com variação da diferença de pressão vazão e velocidade de entrada, número de Reynolds e de Dean, na configuração experimental 1. 71
Tabela 15 - Dados obtidos variando o número de voltas: TOG em cada saída (S1 e S2) eficiência da configuração experimental 1 71
Tabela 16 - Valores dos números de Reynolds e Dean da Configuração Experimental 2 73
Tabela 17 - Parâmetros geométricos e operacionais com as respectivas Eficiências Total e Reduzida da Configuração Experimental 2 74

NOMENCLATURA

LISTA DE ABREVIATURAS

A/O	Emulsão água em óleo
A/O/A	Emulsão água-óleo-água
A-A	Seção do corte transversal
b	bits
bbl	Barris (1m3 ≈ 6,29 bbl)
boe	Barris de óleo equivalente (1.000m3 de gás ≈ 6,29 boe)
cP	centiPoise
cSt	centiStokes
d= 2r	Diâmetro interno do tubo (m)
d50	Diâmetro médio de gotícula
Dc = 2Rc	Diâmetro da hélice medida entre os raios do tubo (m)
De	Número de Dean
dg	Diâmetro da gotícula (mm)
Direção r	Direção radial
Direção s	Direção axial
Direção θ	Direção angular
E_T	Eficiência Total
E'_T	Eficiência Total Reduzida
Ɛ	Curvatura adimensional
g/cm^3	Grama por centímetro cúbico
Gb	GigaByte
GHz	GigaHertz
Gn	Número de Germano
H= 2πP	Distância entre as voltas, medida de centro a centro do tubo
H2, H4, H6, H8 e H10	Experimentos de torção
H_2O	Água
hp	Horse Power
k_c	Curvatura da hélice (1/m)
k	Energia cinética turbulenta
K_2MnO_4	Permanganato de potássio
kg/cm_2	Quilo por centímetro quadrado
kg/m.s	Quilo por metro segundo
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
L	Altura da hélice de cada experimento
M	Milhares
m/s	Metros por segundo
m^3	Metros cúbicos (1 bbl = 0,1589873 m^3)
m^3/dia	Metros cúbicos por dia
mg/L	Miligrama por litro
MHz	MegaHertz
mL/L	Mililitros por litro
MM	Milhões
n.d.	Não detectável
NaCl	Cloreto de sódio
ºF	Grau Fahrenheit

Pc	Passo do tubo formador do separador tubular helicoidal
Pa	Pascal
pH	Potencial hidrogeniônico
Pk	Taxa de produção de energia cinética turbulenta por unidade de volume
Pr	Número de Prandtl
Q	Vazão volumétrica de alimentação
Q_T	Vazão mássica de água na entrada (m^3/s)
Q_2	Vazão mássica de água no concentrado (S2) (m^3/s)
Q_{oT}	Vazão mássica de óleo na entrada (m^3/s)
Q_{oS2}	Vazão mássica de óleo no concentrado (S2) (m^3/s)
Re_{crit}	Número de Reynolds crítico
R_F	Razão de Fluido
rpm	Rotações por minuto
S1 e S2	Saídas 1 e 2
TB	TeraByte
Und	Velocidade secundária
Us	Velocidade axial
V	Velocidade de entrada ou inicial
Vm	Velocidade média do escoamento (m/s)
V1, V2 e V3	Válvulas 1, 2 e 3
Y	Forma da saída
φ	Ângulo do passo
ε	Dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa
λ	Torção adimensional
μ	Viscosidade dinâmica do fluido (Pa.s = Ns/m^2)
μg/L	Micrograma por litro
ρ	Massa específica do fluido (kg/m^3)
τ	Torção
δ	Razão de curvatura

LISTA DE SIGLAS

ANSYS	*Analysis Systems, Inc.*
API	*American Petroleum Institute*
APR	Água produzida real
APS	Água produzida sintética
APSM	Água produzida sintética mãe
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BSW	*Basic Sediments and Water*
C	Linguagem de programação C++
CAD	*Computer Aided Design*
CENPES	Centro de Pesquisas da Petrobras
CFD = DFC = FDC	*Computational Fluid Dynamics* = Dinâmica de Fluidos Computacional = Fluidodinâmica Computacional
CGL/MS	Cromatografia Gás-Líquido/Espectrometria de Massa
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FTH	Floculador Tubular Helicoidal
IR	*Infrared* = infravermelho
LabCFD	Laboratório de Fluidodinâmica Computacional

LDA	*Laser Doppler Anemometry*
LTA	Laboratório de Tecnologias Alternativas
NTU	*Nephelometric Turbidity Unit*
NUPETRO	Núcleo de Engenharia de Petróleo
OBA08052015	Petróleo oriundo da estação de tratamento de Bonsucesso – Carmópolis - SE
Petrobras	Petróleo Brasileiro S.A.
PI	Indicador de pressão
PIB	Produto Interno Bruto
ppm	Partes por milhão
RAM	*Random Access Memory*
RAO	Razão água-óleo
RGF	Reator Gerador de Flocos
SE	Estado de Sergipe, Nordeste, Brasil
SGE = LES	Simulações em grandes escalas = large-eddy simulations.
STH	Separador Tubular Helicoidal
TOG	Teor de Óleos e Graxa
TPH	Total de Hidrocarbonetos de Petróleo
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UFS	Universidade Federal de Sergipe
UO-SEAL	Unidade de Operações de Exploração e Produção de Sergipe-Alagoas

1 INTRODUÇÃO

1.1 Escopo do Trabalho

No decorrer das décadas a preocupação em relação a disponibilidade de recursos naturais aumentou. Sob a ampla atividade dos órgãos regulamentadores (no caso do Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA), e de uma educação ambiental consciente e responsável, observa-se uma mudança de hábitos cotidianos em relação à preservação da natureza.

A engenharia química vem se dedicando a novos estudos para lidar com esse novo cenário, aprimorando processos de captação de matérias-primas, elaborando formas alternativas para a redução do consumo de energia, desenvolvendo novas metodologias para o tratamento dos efluentes, entre outras melhorias durante as demais etapas da transformação do recurso natural em produto.

Durante a exploração do petróleo há a produção da água oleosa, tendo em vista que o petróleo não é extraído puro, ele advém de uma mistura de água, óleo, gás e impurezas. Para que esse óleo seja refinado, é necessário que haja uma purificação desta mistura, por meio de um processo de separação entre as fases. Essa separação é realizada, tanto em plataformas marítimas quanto em terra, em uma estação de produção. Outra fonte de água oleosa é a mistura acidental de óleos lubrificantes a corpos d'água. Esta mistura pode ter comportamento característico de emulsão ou não, dependendo dos contaminantes que participarem da mistura.

Existem algumas tecnologias estabelecidas na indústria que promovem o tratamento de água contaminada para reuso urbano, industrial e agrícola; como filtração, microfiltração, flotação, floculação, decantação, centrifugação entre outros. Para atender as necessidades de preservação do meio ambiente, é imprescindível o desenvolvimento de novas tecnologias e/ou reformulação das existentes para adequar a etapa de tratamento de efluentes líquidos às novas exigências.

Na área de fenômenos de transporte, destaca-se o estudo da aplicação de tubos helicoidais em escoamentos internos voltados para o processo de transferência de calor. Nesta Tese propõe-se a aplicação deste estudo no tratamento de corrente líquida contendo óleo.

Na construção desta Tese, optou-se por preparar emulsões óleo-água em laboratório, chamadas de misturas sintéticas, a fim de reproduzir, num primeiro momento a água de produção gerada nos poços terrestres de extração de petróleo. Em uma etapa posterior, foi

realizado um planejamento experimental com uma emulsão de água e óleo mineral lubrificante, com o intuito de se obter uma geometria com maior eficiência de separação.

Para o processo de tratamento de água oleosa, nesta Tese, foi analisado um Separador Tubular Helicoidal. Este apresenta uma geometria inédita, com orientação vertical, rotação horária e baseada nos parâmetros geométricos que serão definidos posteriormente e nos experimentos onde foi adicionada uma saída na forma de Y na posição horizontal, caracterizando a originalidade deste estudo.

1.2 Objetivo

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar a aplicação de um separador tubular helicoidal, para o tratamento de água contaminada com óleo. (A Tese inclui uma sucessão de testes experimentais com água oleosa produzida em laboratório, complementado com simulações de Fluidodinâmica Computacional).

1.2.2 Objetivos Específicos

- Listar os principais processos utilizados atualmente no tratamento da água oleosa.
- Preparar várias soluções aquosas de óleo e sais, com diferentes composições e comportamentos.
- Identificar entre os modelos matemáticos já existentes o que melhor retrata o escoamento helicoidal.
- Simular, por meio do uso de Fluidodinâmica Computacional, o escoamento interno helicoidal.
- Utilizar a técnica de Planejamento de Experimentos a fim de encontrar a configuração mais eficiente na separação óleo-água.
- Analisar os resultados obtidos, com relação à eficiência de separação.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Equipamentos Aplicados no Tratamento de Água Oleosa

Na literatura, existe uma gama variada de processos de tratamento de água oleosa, cada qual com a sua particularidade. A eficiência de cada processo varia em função das características do efluente, uma vez que a água contaminada com o óleo forma uma mistura complexa com propriedades distintas.

No trabalho apresentado por Curbelo (2002) encontra-se uma ampla análise dos estudos e pesquisas sobre a remoção das gotas de óleo em águas produzidas, envolvendo diferentes operações unitárias. Cumming (2000) aplicou o processo de separação de microfiltração em uma emulsão de querosene/água. Kong e Li (1999) testaram a remoção do óleo através de membranas microporosas hidrófobas de PVDF (*polyvinylidene fluoride*); Oliveira et al. (1999) estudou o processo de separação do óleo por flotação de gás dissolvido.

Rego (2008) empregou a Fluidodinâmica Computacional (CFD) para estudar o desempenho e otimizar a geometria de um hidrociclone cilíndrico, integrante de uma unidade experimental de flotação centrífuga, em escala piloto, para tratamento de águas oleosas. Os parâmetros geométricos estudados foram: (i) a altura do hidrociclone; (ii) a altura do prolongamento interno do *overflow* (*vortex finder*) e (iii) a forma do duto de alimentação. Os valores de eficiência de remoção do óleo e da fração de água pura obtida apresentaram erros inferiores a 1,0% quando comparados com os valores experimentais obtidos no Centro de Pesquisas da Petrobras (CENPES). Após a otimização geométrica, conclui-se que uma redução de um quinto da altura total original do hidrociclone combinado com uma redução de um terço do *vortex finder* (prolongamento interno do *overflow*) não altera a eficiência de remoção do óleo. O duto de alimentação não influencia na eficiência estudada, sendo mais simples optar por um duto de seção reta circular.

Segundo Carvalho (2011), os processos de tratamento da água produzida na indústria de petróleo, têm como objetivo principal separação de suspensões sólidas e emulsões ou de partículas de petróleo para que esteja de acordo com a resolução vigente, CONAMA nº393/2007. Vale salientar que o autor, em sua dissertação, mostrou a necessidade de um processo complementar além do separador água-óleo (SAO). Os processos de separação podem ser classificados de acordo com a sua natureza - física, química ou físico-química. Na prática,

para um melhor resultado é recomendado utilizar uma combinação entre processos de diferentes naturezas.

Fakhru-Razi et al. (2009) apresentaram uma revisão contendo uma série de métodos de tratamento disponíveis e aplicáveis na remoção do óleo da água de produção do petróleo. Esses métodos são apresentados de forma resumida, com seu princípio, vantagens e desvantagens na Tabela 1.

Tabela 1 - Métodos de tratamento da água produzida disponíveis.

Método	Princípio	Vantagens	Desvantagens
Separador de pratos corrugados (SAO)	Separação do óleo livre da água através de força gravitacional.	Baixo custo energético, eficiente para separação da maior parte do óleo, equipamento robusto e resistente.	Ineficiente para partículas de óleo mais finas, alto custo de manutenção.
Centrífugas	Separação do óleo livre da água através de força centrifuga gerada pela rotação de um cilindro.	Eficiente na separação de partículas de óleo e sólidos, baixo tempo de retenção.	Alto custo energético e de manutenção.
Extração	Remoção do óleo livre e dissolvido por solventes orgânicos leves.	Remoção do óleo dissolvido, fácil operação, sem custos energéticos.	Uso de grandes quantidades de solvente, regeneração do solvente.
Flotação	Gotículas de óleo aderem a bolhas de ar injetadas e emergem a superfície.	Ausência de partes móveis, alta eficiência devido a coalescência, fácil operação, robusto e durável.	Geração de uma grande quantidade de ar, necessidade de um tempo de retenção para separação.
Lama ativada	Uso de microrganismos para degradar o óleo e os contaminantes presentes na água.	Tecnologia barata, simples e limpa.	Requer oxigênio em grandes quantidades e espaço físico.
Hidrociclones	Separação das gotículas através de campo centrífugo.	Compacto, barato e com grande eficiência na remoção de pequenas gotículas.	Requer quantidade de energia considerável para pressurização da alimentação.

Fonte: FAKHRU-RAZI et al. (2009).

Além dos métodos apresentados, tem-se o estudo analisando o escoamento do separador tubular helicoidal realizado por Zhao et al. (2012), com e sem saídas intermediárias e uma otimização com relação ao raio da hélice e a velocidade de entrada, os dois fatores mais importantes que afetam na separação da água oleosa. Em teoria, o menor raio de revolução deveria proporcionar uma força centrífuga mais intensa e, a separação óleo-água mais eficiente. De fato, para um óleo menos viscoso, quando ocorre uma maior aceleração, as gotas de óleo dispersas, se misturam resultando na formação de emulsão, que não contribui para a separação

óleo-água. As simulações demostraram que a melhor separação ocorre quando o raio da hélice (Rc) é igual a 500 mm e a velocidade (V) de entrada 0,3 m/s.

2.2 Geometria Helicoidal: forças envolvidas no escoamento em estudo

O escoamento interno pode ser definido, como sendo aquele limitado por superfícies sólidas, incluindo os que se desenvolvem através de tubos, dutos, bocais, difusores, contrações e expansões súbitas, válvulas e acessórios. O escoamento interno pode ser laminar ou turbulento.

Reynolds (1883) define por laminar o escoamento, no qual o fluido escoa em *laminae*, ou camadas, ou seja, não há mistura macroscópica. Alguns casos de escoamentos laminares podem ser solucionados analiticamente. A turbulência ocorre a altos números de Reynolds. A transição de um escoamento para o regime turbulento, bem como a sua manutenção dependem da importância relativa entre os efeitos convectivos e viscosos ou moleculares. Enquanto os efeitos convectivos altamente não lineares são efeitos amplificadores de perturbações e geradores de instabilidades, os efeitos viscosos são amortecedores ou inibidores da formação de instabilidades. O número de Reynolds (Re) é definido, na Equação 01 como a razão entre os efeitos convectivos e os efeitos viscosos.

$$\mathrm{Re} = \frac{\text{Efeitos convectivos (não lineares que amplificam perturbações)}}{\text{Efeitos Viscosos (tendem a amortecer as instabilidades)}} \qquad (01)$$

Fox (1998) e Brunetti (2005), afirmam que não há soluções analíticas para escoamento turbulento, e devemos respaldar-nos essencialmente em teorias empíricas e em dados experimentais. Para escoamentos internos, o seu regime (laminar ou turbulento) é primordialmente uma função do número de Reynolds.

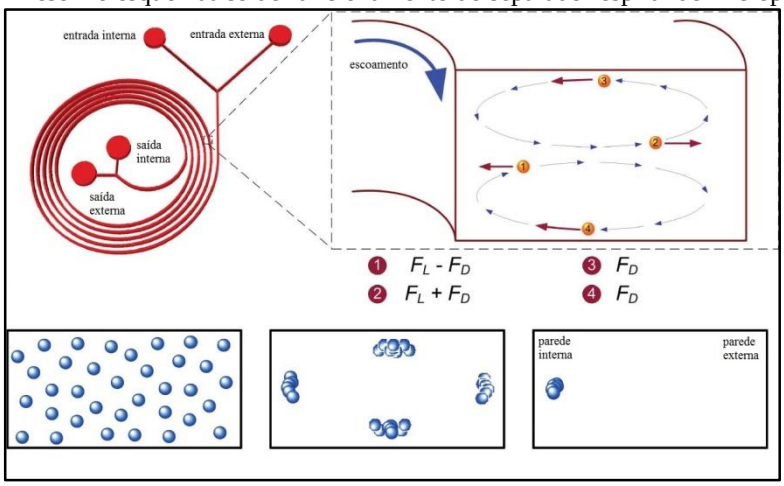
Em função do comportamento dos fluidos em um escoamento interno, as estruturas sólidas destinadas ao transporte de fluidos pode ser classificada como:

- duto forçado - quando o fluido, que nele escoa, o preenche totalmente, estando em contato com toda a sua superfície interna, não apresentando nenhuma superfície livre.
- duto livre – quando o fluido apresenta superfície livre (BRUNETTI, 2005).

Para a compreensão do que ocorre na parte interna de um tubo helicoidal, a Figura 1 apresenta um esquema do funcionamento de um separador espiral de micropartículas. O

equipamento consiste em duas entradas e duas saídas, e a amostra é introduzida através da entrada interna. A força de sustentação (F_L) e a forca de arraste de Dean (F_D) promovem um movimento de flutuação, que resulta na migração de partículas pelo micro canal. O princípio da migração diferencial de partículas, é verificado com partículas com a razão de diâmetro de partícula e diâmetro hidráulico do micro canal na faixa de 0,1 (a_p/D_h ~ 0,1). As partículas dispersas aleatoriamente alinham-se em quatro posições de equilíbrio no micro canal, onde as forças atuantes estão em equilíbrio entre si. Forças adicionais, devido ao vórtice de Dean reduzem as quatro posições de equilíbrio em uma única, situada na parede do micro canal. Esse procedimento se repete em outros escoamentos internos em tubos helicoidais, onde se percebe o escoamento secundário, como o desta Tese.

Figura 1 - Desenho esquemático do funcionamento do separador espiral de micropartículas.



Fonte: Bhagat et al. (2008, p.1907), com adaptações.

Coulson e Richardson (1982) afirmam que o padrão de fluxo mais conhecido é o que se apresenta numa serpentina em hélice. O fluido que flui abaixo do eixo central do tubo está sujeito a maiores forças centrífugas a ser comparado com o que flui perto da parede interior do tubo. Como consequência há um gradiente de pressão que induz o fluxo secundário. O fluido que escoa pelo tubo segue um percurso helicoidal, ao longo da curva. Devido à distribuição da pressão são formados campos de fluxo no interior do fluido, diferente, do previsto para líquidos newtonianos, pode-se perceber que os fenômenos de fluxos secundários ocorrem, quando os efeitos de inércia são expressivos.

O comportamento não-Newtoniano sofre diversas alterações na camada de repulsão. McConalogue e Srivastava (1968) afirmam que o aumento da taxa de escoamento do campo do escoamento secundário pode ser classificada em duas regiões, a primeira começando na região central livre de cisalhamento e o segunda no lado de fora da região imóvel de camada limite. O

perfil de velocidade axial começa cada vez mais de forma oval com a posição de velocidade máxima aumentando do lado de dentro para fora perto da parede. A tensão de cisalhamento apresenta variação em direção ao núcleo bem pequena. A tensão na parede começa maior comparando com os tubos retos.

Mota e Pagano (2014) afirmam que a separação de fases ocorre em todos os tipos de dutos curvados em função das diferenças na força centrífuga, força da gravidade e efeito do escoamento secundário entre as fases. Curvas do tipo U, quando bem dimensionadas, podem atuar como separadores parciais. Neste caso, o principal responsável pela segregação das fases é a ação da força centrífuga gerada pela curvatura do duto. A fase mais leve se desloca desde a região central em direção a parede interna do duto, enquanto a mais pesada permanece na região externa. Se apenas uma curva não for suficiente para promover a separação, pode-se usar uma sucessão de curvas, formando, assim, uma trajetória helicoidal.

2.3 Modelagem Matemática

Na realização de ensaios experimentais em laboratório ou, em uma modelagem matemática, como afirma Coelho (2011), busca-se entender de que forma a natureza dos fenômenos físicos de um dado processo pode ser determinado e quais grandezas físicas atuam no sistema e como elas o afetam.

Segundo Freitas (2009), para realizar o estudo de um fenômeno físico, pode-se optar por métodos teóricos ou ensaios em laboratório, que devem ser embasados em análise teórica prévia. Inicialmente, quando não há um modelo empírico definido, deve-se modelar a física do fenômeno. Por modelagem matemática entende-se determinar quais as grandezas físicas (por exemplo, temperatura, pressão e densidade) atuam sobre o sistema físico, e como elas o afetam (no caso de vários modelos equivalentes devem-se preferir os mais simples).

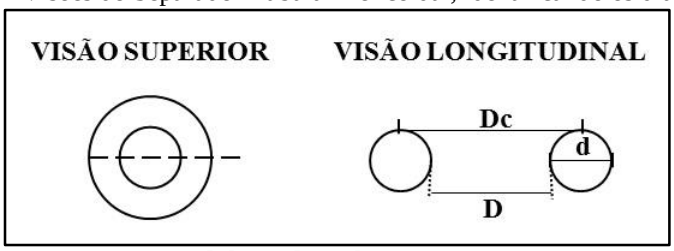
2.3.1 Conceitos Principais

Por existirem diversos estudos já publicados referentes ao escoamento em tubos helicoidais, nesta Tese, foi realizada uma revisão dos trabalhos que se encaixam nas condições escolhidas, destacando o fato de que estes trabalhos abordam a modelagem matemática de um tubo helicoidal. Na Universidade Federal de Santa Catarina, Mota (2011) realizou medições multifásicas em tubos helicoidais. Na Universidade Federal do Espirito Santo, Sartori (2006),

Pelissari (2006), Silva (2007) e Oliveira (2008) pesquisaram um floculador tubular helicoidal (FTH) para remoção de turbidez. Na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Carissimi (2007) construiu um reator gerador de flocos (RGF) para tratamento de água.

Na Figura 2, podem ser observadas as visões superior e longitudinal do separador tubular helicoidal e seus diâmetros característicos, conforme definido por (SARTORI, 2006): d, o diâmetro interno do tubo helicoidal; Dc, o diâmetro da hélice, medido de centro a centro do tubo; e D, o diâmetro da hélice, descontado o diâmetro do tubo, também chamado de diâmetro de enrolamento da hélice.

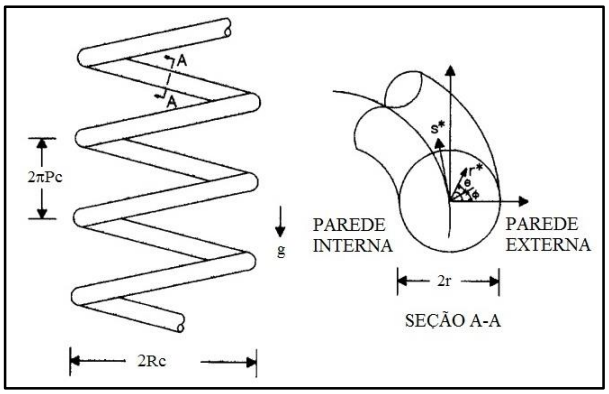
Figura 2 - Visões do Separador Tubular Helicoidal, identificando os diâmetros.



Fonte: Elaborada pela autora (2015).

Foi definido como principais parâmetros geométricos do tubo helicoidal, raio da hélice (Rc), raio interno do tubo (r), distância entre as voltas ($H_c = 2\pi Pc$) medida de centro a centro do tubo, sendo que Pc é o passo do tubo que forma o separador tubular helicoidal. A Figura 3 ilustra um tubo helicoidal. Para melhor entendimento da geometria, a figura inclui a visão transversal do tubo que é denominada seção A-A. Observa-se que o lado da parede mais próximo ao eixo de enrolamento da hélice é chamado de parede interna, enquanto o lado mais afastado é chamado de parede externa.

Figura 3 - Ilustração de um tubo helicoidal, onde 2Rc é o diâmetro da hélice, $2\pi Pc$ é a distância entre as voltas e 2r o diâmetro do tubo.



Fonte: adaptado de YANG, 1995, p.855.

2.3.2 Números Importantes: Dimensionais e Adimensionais

Eustice (1910) se dedicou a investigar experimentalmente a resistência do escoamento em tubos de metal, retos e curvos. Com objetivo de estudar o efeito da mudança de curvatura, alguns experimentos foram realizados, fazendo a água escoar em tubos flexíveis com paredes grossas, compostos de uma mistura de borracha e lona.

Esse mesmo autor, em 1911, apresentou um estudo que conclui que pequenas curvas de um tubo cilíndrico alteram o comportamento da água que escoa através do tubo. Neste trabalho de Eustice, são repetidos e observados atentamente os experimentos realizados anteriormente por Osborne Reynolds, testes em tubos de vidro helicoidais com traçadores coloridos adicionados a água.

Em escoamentos internos, utiliza-se o número de Reynolds (Re) para classificar se este é laminar ou turbulento. Em condições normais, a transição ocorre em Re ≈ 2.100 (Fox, 1998). Este número é definido como uma razão de forças e é apresentado na Equação 02.

$$\mathrm{Re} = \frac{\rho \bar{V}(2r)}{\mu} \qquad (02)$$

Onde:

Re = número de Reynolds;

ρ = massa específica do fluido (kg/m^3);

$\bar{V}$ = velocidade média do escoamento (m/s);

r = raio interno do tubo (m) e

μ = viscosidade dinâmica do fluido (kg/m.s).

Yang (1995) estudou numericamente a transferência de calor convectivo no escoamento laminar completamente desenvolvido. A equação de energia para o escoamento num tubo helicoidal foi obtida baseada na lei básica da conservação de energia. O comportamento da transferência de calor no tubo helicoidal é influenciado de forma significativa por três parâmetros principais: número de Dean (De), torção adimensional (λ) e número de Prandtl (Pr). Conclui-se que o escoamento secundário é mais forte com o aumento do número de Dean. Neste caso, o gradiente de temperatura é maior próximo da parede externa do tubo helicoidal. Entretanto, a rotação da distribuição de temperatura, ou seja, a forma de suas isotermas é atribuída aos efeitos de torção. Com o aumento da torção adimensional é previsto que a maior

rotação se apresente na seção transversal. Isto é mais significativo no escoamento com maior número de Prandtl.

Germano (1982, 1989) estendeu os estudos de Dean sobre toróides, tubo helicoidal com passo igual a zero, ou seja sem distância entre as voltas, e desenvolveu estudos sobre tubos helicoidais, introduzindo o efeito da torção no conceito do escoamento secundário. Estes dois autores mostraram que, em tubos curvados, a ocorrência do fluxo secundário é devido à diferença do momento axial entre as partículas de fluido do centro e a região da parede devido às mudanças constantes de direção.

Para essas análises faz-se necessário conhecer o diâmetro interno do tubo (d = 2r), o diâmetro da hélice medido de centro a centro do tubo (Dc), o diâmetro de enrolamento da hélice (D) e o raio da hélice (Rc), apresentados nas Equações de 03 a 05.

$$\mathrm{Dc} = 2\mathrm{Rc} \tag{03}$$

$$\mathrm{Dc} = \mathrm{D} - \mathrm{d} \tag{04}$$

ou ainda:

$$\mathrm{Rc} = \frac{\mathrm{D} - \mathrm{d}}{2} \tag{05}$$

Assim, para o dimensionamento de tubos helicoidais e a análise do seu escoamento, devem ser considerados, além do número de Reynolds, uma variação deste número, o Reynolds crítico (Re_{crit}), traduz o efeito da curvatura introduzido pelo número de Dean (De) e o efeito da torção definido pelo número de Germano (Gn).

Encaminhando o equacionamento, tem-se que a relação entre o raio interno do tubo e o raio da hélice, medido de centro a centro do tubo é a razão de curvatura (δ), definido na Equação 06. O número de Reynolds crítico (Re_{crit}), apresentado por Ko e Ting (2006) e que determina a transição entre os regimes laminar e turbulento, é obtido através da Equação 07. Esta correlação somente é aplicada na faixa de razão de curvatura entre os valores de 0,01 e 0,3.

$$\delta = \frac{\mathrm{r}}{\mathrm{Rc}} \tag{06}$$

$$\mathrm{Re_{crit}} = 2100\left[1 + 12 * (\delta)^{1/2}\right] \tag{07}$$

Onde:

Re_{crit} = Número de Reynolds crítico;

δ = razão de curvatura.

Em condições controladas, foi observado um escoamento laminar em duto reto, com números de Reynolds inferior a 4.000. Contudo, um valor de cerca de 8.000 é o número de Reynolds crítico mais alto para o qual o escoamento laminar é garantido; isto ocorre em virtude das vibrações do duto, das flutuações no escoamento ou da rugosidade da parede do tubo.

Para a continuação do estudo do escoamento num tubo helicoidal, alguns parâmetros importantes precisam ser definidos: observa-se na Figura 3, apresentada anteriormente, o parâmetro distância entre as voltas da hélice, demonstrada na Equação 08.

$$H_c = 2\pi * Pc \Leftrightarrow Pc = \frac{H_c}{2\pi} \quad (08)$$

Onde:

H_c = distância entre as voltas da hélice (m) e

Pc = passo da hélice (m).

Para definir o número de Dean, primeiro devem-se conhecer os parâmetros curvatura (k_c) e curvatura adimensional (ε), apresentadas nas Equações 09 e 10.

$$k_c = \frac{Rc^2}{Rc^2 + Pc^2} \quad (09)$$

Onde:

k_c = curvatura (m^{-1});

Rc = raio da hélice (m) e

Pc = passo da hélice (m).

$$\varepsilon = k_c \,.\, r \quad (10)$$

Onde:

ε = curvatura adimensional;

k_c = curvatura (m^{-1}) e

r = raio interno do tubo (m).

Considerando os parâmetros anteriores nas Equações 02 e 10, o número de Dean é definido na Equação 11.

$$De = Re * (\varepsilon^{0,5}) \quad (11)$$

Onde:
De = número de Dean;
Re = número de Reynolds; e
ε = curvatura adimensional.

Berger et al. (1983) mostraram que o limite superior do número de Dean para o regime de escoamento laminar em tubos helicoidais é aproximadamente 5.000.

Moll et al. (2007a), na primeira parte do trabalho, aplica em escala industrial, os conhecimentos dos vórtices de Dean, em três diferentes tipos de solução aquosa e dois tamanhos diferentes de membrana helicoidal. Na segunda parte realiza uma análise numérica do escoamento interno nas membranas, numa ampla faixa de número de Reynolds e formas de hélices. Concluíram que o número de Dean auxilia na previsão do comportamento da tensão de cisalhamento, como a distribuição da mesma ao longo do perímetro e seção transversal da membrana. Nos pequenos diâmetros, estudados por Moll et al. (2007b), tem-se que o passo tem grande influência na curvatura da hélice.

Para a definição do número de Germano é necessário conhecer a torção, definida abaixo na Equação 12.

$$\tau = \frac{Pc}{Rc^2 + Pc^2} \quad (12)$$

Onde:
τ = torção (m^{-1});
Pc = passo da hélice (m) e
Rc= raio da hélice (m).

Germano (1989) aplicou as equações de Dean (1928) no escoamento num tubo helicoidal, e demostra que estas dependem não somente do número de Dean, mas também de um novo parâmetro torção adimensional (λ), demostrado na Equação 13.

$$\lambda = \frac{\tau}{k_c} \tag{13}$$

Onde:

λ = torção adimensional;

τ = torção (m^{-1}) e

k_c = curvatura (m^{-1}).

Baseado nas Equações 07 e 12, mostradas anteriormente, que definem o número de Reynolds crítico e a torção, tem-se o número de Germano apresentado na Equação 14.

$$Gn = Re_{crit} * \tau * r \tag{14}$$

Onde:

Gn = número de Germano;

τ = torção (m^{-1});

r = raio interno do tubo (m) e

Re_{crit} = número de Reynolds crítico.

Ko e Ting (2006) apresentam mais um adimensional, Número Helicoidal, para caracterizar geometricamente a hélice a ser estudada. É definida pela razão entre o número de Dean e uma relação, descrita na Equação 15.

$$He = \frac{De}{\left[1+\left(\frac{H_c}{2\pi.D_c}\right)^2\right]^{1/2}} \tag{15}$$

Onde:

He = número Helicoidal;

De = número de Dean;

H_c = distância entre as voltas da hélice (m) e

Dc = diâmetro da hélice (m).

O ângulo do passo é resultado da projeção de uma volta da hélice com o plano perpendicular do eixo dela. É determinada pelo arco tangente da torção adimensional, apresentada pela Equação 16 (XIE, 1990).

$$\varphi = \text{arc tg}\ (\lambda) \tag{16}$$

Onde:

φ = ângulo do passo; e

λ = torção adimensional.

O tubo helicoidal com escoamento interno, distância entre as voltas diferente de zero e diâmetro constante é bem estudado na aplicação em trocadores de calor. Aqui se propõe a aplicação em processos de separação de água produzida.

2.3.3 Equações e definições para o cálculo da Eficiência total (E_T), Razão de Fluido e Eficiência Reduzida

2.3.3.1 - Eficiência total (E_T)

O STH apresenta duas saídas, nesta Tese escolheu-se a S2 como concentrado. Desta forma, as definições de eficiência de separação foram baseadas nesta corrente. Para calcular a eficiência total (E_T) operando com uma mistura óleo-água, basta medir a vazão mássica de óleo no concentrado, ou seja, na saída 2 (Q_{oS2}), e dividi-la pela vazão mássica de óleo na entrada (Q_{oT}), como demostrado na Equação 17.

$$E_T = \frac{Q_{oS2}}{Q_{oT}} \tag{17}$$

Q_{oS2} = Vazão mássica de óleo no concentrado (S2) (m^3/s); e

Q_{oT} = Vazão mássica de óleo na entrada (m^3/s).

2.3.3.2 - Razão de Fluido (R_F)

A razão de fluido é definida como a razão entre a vazão mássica da fase contínua (água + sal) na corrente concentrada, na saída 2, (Q_2), e a vazão mássica da fase contínua na entrada (Q_T). Portanto, a razão de fluido, R_F, é dada pela Equação 18.

$$R_F = \frac{Q_2}{Q_T} \tag{18}$$

R_F = Razão de Fluido;
Q_2 = Vazão mássica de água no concentrado (S2) (m^3/s); e
Q_T = Vazão mássica de água na entrada (m^3/s).

2.3.3.3 - Eficiência Reduzida

A eficiência calculada com base na razão de fluido é denominada eficiência reduzida. Esta eficiência é obtida levando em consideração apenas o processo de separação gerado pelo campo centrífugo, apresentada na Equação 19.

$$E'_T = \frac{E_T - R_F}{1 - R_F} \tag{19}$$

Onde:
E'_T = Eficiência total reduzida;
E_T = Eficiência total; e
R_F= Razão de fluido.

2.3.4 Alguns experimentos já realizados, com tubos helicoidais

Na Tabela 2 são demonstrados alguns trabalhos, com dimensões próximas às aplicadas nesta Tese. Esta tabela apresenta tubos helicoidais com diferentes configurações, diâmetro interno de entrada do tubo (d), raio da hélice ou raio de revolução (Rc) e distância entre as voltas (H_c).

Tabela 2 - Demonstração de trabalhos que apresentam tubo helicoidal com diferentes configurações.

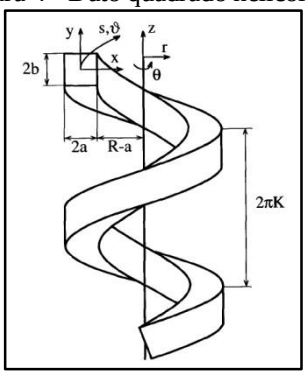
Autores	**d (mm)**	**Rc (mm)**	**H_c (mm)**
BOLINDER e SUNDEN, 1995	30	55	137
YAMAMOTO et al., 2002	8,8-15,4	6,9-22,7	92,9-282,6
YU et al., 2003	9,4 e 17,6	63,7	31,8 e 77,3
ZHAO et al., 2012	25,4	500	100

Fonte: elaborada pela autora (2015).

Cada experimento utilizou diferentes configurações, diâmetro interno do tubo (d), distância entre as voltas (H_c), raio de revolução ou raio da hélice (Rc), número de entradas e saídas (intermediárias ou finais) de acordo com a amostra estudada. A dimensão do tubo helicoidal, aplicada nesta Tese, foi escolhida de acordo com o trabalho de Zhao et al. (2009; 2012). Os estudos citados testaram vários tubos helicoidais com diferentes dimensões.

Estes trabalhos também apresentam diferentes aspectos geométricos com relação a forma do tubo helicoidal. Na pesquisa de Bolinder e Sunden (1995) tem-se um duto quadrado helicoidal, com os seguintes parâmetros geométricos: aresta de entrada do tubo (2a = 2b), distância entre as voltas (2πK), raio de revolução (R), representado na Figura 4.

Figura 4 - Duto quadrado helicoidal.

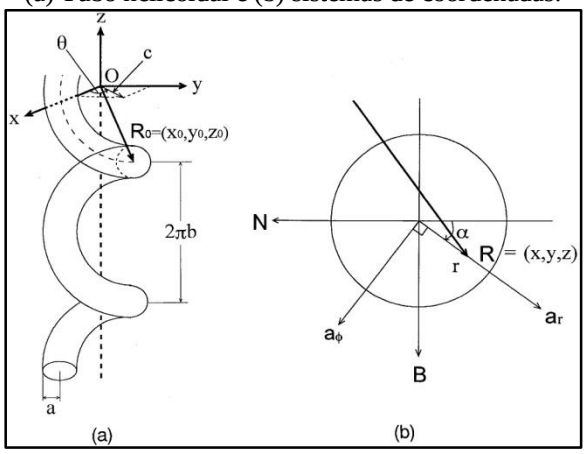


Fonte: BOLINDER e SUNDEN, 1995, p.350.

Yamamoto et al. (2002) realizaram um experimento para visualizar o escoamento da fumaça num tubo helicoidal, formado internamente por um tubo de vinil reforçado com fios de aço, o tubo helicoidal, e externamente por um tubo circular reto de acrílico. Para a discussão do experimento foram comparadas imagens do escoamento da fumaça com os cálculos numéricos, apresentando boa concordância. O escoamento secundário na seção transversal do tubo

transforma vórtices duplos com rotação anti-horária para recirculação, em um único vórtice com a redução da torção, permanecendo o número de Dean constante. A linha que divide os dois vórtices muda de direção de horizontal para vertical acompanhando a redução da torção. Na Figura 5 tem-se a configuração geométrica do tubo helicoidal e o sistema de coordenadas.

Figura 5 -Configuração geométrica
(a) Tubo helicoidal e (b) sistemas de coordenadas.



Fonte: YAMAMOTO, 2002, p.253.

Yu et al. (2003) apresentam um importante estudo que relaciona número de Reynolds, passo e razão de curvatura, com velocidade axial (U_s) e velocidade secundária (U_{nd}). Com gráficos comparativos de experimentos com *Laser Doppler Anemometry* (LDA) e simulações CFD. Os autores afirmam que os primeiros estudos em pesquisa experimental estavam interessados em encontrar uma relação entre a resistência hidráulica e a curvatura do tubo helicoidal, como apresentados nos estudos de White (1929) e Taylor (1929).

Carissimi (2003) concebeu e desenvolveu um sistema compacto de floculação em linha chamado de reator gerador de flocos (RGF), aproveitando a energia cinética do fluxo hidráulico para promover a agitação necessária para a dispersão do polímero floculante e formação de flocos ao longo de um reator tubular helicoidal para posteriormente serem destinados a uma etapa de separação sólido/líquido. Nesta geração dos flocos, observou-se o efeito da adição (injeção) conjunta de microbolhas, de tamanho controlado.

Na bibliografia nacional são encontrados alguns trabalhos desenvolvidos com tubos helicoidais. Na Tabela 3 são apresentadas características operacionais e geométricas destes, onde diâmetro interno do tubo (d), diâmetro da hélice, medida de dentro a centro do tubo (Dc), distância entre as voltas (H_c) e vazão volumétrica de alimentação (Q).

Tabela 3 - Características operacionais e geométricas de tubos helicoidais encontrados na literatura nacional.

Autores	d (cm)	Dc (cm)	H_c (cm)	Q (L/min)
Carissimi, 2003	1,25	5	1,25	2; 3; 4 e 5
Pelissari, 2006	0,79; 0,95 e 1,27	5; 10 e 30	0,15 a 1,59	0,5 a 4
Sartori, 2006	0,79; 0,95 e 1,25	10	0,25; 0,30 e 0,40	1; 2 e 4
Silva, 2007	0,95 e 1,27	5; 10 e 30	0,15 a 1,59	0,1 a 5
Carissimi, 2007	1,25; 2,50; 3,75 e 5,00	10	1,25; 2,50; 3,75 e 5,00	5; 20; 46 e 80
Oliveira, 2008	0,95; 1,27 e 1,58	10	0,15 a 0,25	1 a 4

Fonte: Elaborada pela autora (2015), baseada em: Carissimi (2003); Pelissari (2006); Sartori (2006); Silva (2007); Carissimi (2007); Oliveira (2008).

Pelissari (2006) realizou estudos com o objetivo de através da variação do diâmetro do tubo, do raio de curvatura e da vazão de alimentação, verificar: a influência do efeito da probabilidade de choques entre as partículas (Número de Camp), dos parâmetros que afetam a curvatura (Número de Dean) e a torção (Número de Germano) na eficiência do Floculador Tubular Helicoidal (FTH).

Sartori (2006) buscou compreender o comportamento do escoamento no interior de floculadores tubulares helicoidais utilizando modelagem numérica, com vistas a melhorias de desempenho dos processos que empregam este tipo de reator. Com variações na torção (Número de Germano - Gn), a curvatura (Número de Dean - De) diâmetro do tubo e vazão, no padrão do escoamento no interior das unidades de floculação nota-se a constância dos valores do gradiente de velocidade ao longo do reator e também que a velocidade axial não varia linearmente com os parâmetros Gn e De.

Silva (2007) avaliou os efeitos de parâmetros geométricos e hidrodinâmicos do FTH sobre o seu desempenho de processo, utilizando como ferramenta a modelagem matemática e, aprimorou o modelo de estimativa de eficiência de floculação, proposto por Pelissari (2006). Para isso foram feitas análises dimensional e de regressão múltipla, considerando novas variáveis e procedimentos experimentais. Como resultado, obteve-se um aumento da correspondência entre os dados, medidos e estimados, de 0,4500 para 0,9526 e uma diminuição do erro relativo médio de 17% para 2%, indicando que as variáveis utilizadas se ajustam bem ao modelo proposto para estimativa da eficiência de floculação.

Carissimi (2007) estudou, teoricamente, o comportamento hidrodinâmico e o desenvolvimento do reator gerador de flocos (RGF) para aplicar na separação sólido-líquido por agregação-sedimentação, agregação-flotação e remoção de óleos (separação líquido-

líquido). Foram ainda realizados estudos de validação técnica de seu potencial de aplicação no tratamento de água para consumo doméstico e reuso/reciclo de águas e efluentes líquidos dos setores da mineração e de lavagem de veículos.

Oliveira (2008) avaliou a influência do comprimento do reator na eficiência de remoção de turbidez, bem como os processos de agregação e ruptura de flocos. Foi verificado que, para todas as configurações estudadas, a eficiência de remoção de turbidez aumenta até um valor máximo e depois decresce com o aumento do comprimento dos reatores.

Islabão (2011) utilizou um *software* de Fluidodinâmica Computacional comercial, o ANSYS 12.1 - *Fluent*, para simular a reação de polimerização em solução do estireno, iniciada por radicais livres e conduzida em reator tubular. O reator estudado apresenta uma configuração helicoidal, porque esta permite melhor empacotamento do reator na planta industrial. Este autor, elaborou um modelo matemático considerando as variações axiais e radiais das propriedades, além da velocidade axial de escoamento, com base nas leis de conservação de massa, energia e quantidade de movimento.

Mota (2011) contribuiu para o desenvolvimento de um sistema de medição multifásica com um estágio de separação parcial gás-líquido. Utilizando um duto helicoidal para promover a segregação das fases e um sensor para monitorar a fração de água em um escoamento bifásico de água e óleo, aplicando técnicas de ondas eletromagnéticas na faixa de frequência de 300 MHz e o princípio de cavidade ressonante eletromagnética. Este sensor deve ser capaz de identificar a fração de água presente na mistura de líquidos (água-óleo) escoando em um duto, de maneira não intrusiva, ou seja, não interferindo no fluxo com antenas ou partes móveis.

Zhang et al. (2006) apresentaram um tipo de separador eficiente, com a aplicação de alguns princípios da separação, força centrífuga, sedimentação gravitacional, expansão e vibração. Para distinguir visualmente as fases (água e óleo), foi diluído permanganato de potássio (K_2MnO_4) na água. O diâmetro de gotícula de óleo escolhido foi de 0,1; 2 e 5 mm. Os autores concluíram, que quanto menor o tamanho da gotícula de óleo, maior será o número de voltas necessárias para promover a separação. Foram feitos furos no tubo helicoidal, em cada volta, para coletar água. A partir da quinta volta, do tubo helicoidal, a fração volumétrica de óleo se apresentou num ângulo de 270º, para gotícula com diâmetro (dg) de 2 mm. Diferentes distribuições de fração volumétrica de óleo foram notadas a depender do diâmetro da gotícula. Em seu trabalho, Zhang et al. (2006), apresentaram simulações e resultados experimentais que concordam entre si, há uma precisão na modelagem matemática indicando conformidade na combinação entre a simulação numérica e o experimento, corroborando para o projeto e alterações no separador helicoidal estudado.

Yamamoto et al.(2002) estudaram a torção mantendo a curvatura constante. Aplicaram uma ampla faixa de torção, com grandes números de Reynolds. Concluiu-se que a torção tem um efeito perturbador no escoamento. Para a discussão do experimento, foi realizada a visualização do escoamento da fumaça e os resultados foram comparados com os cálculos numéricos.

Yamamoto et al. (2000, 2002) aplicaram em trabalhos consecutivos um método numérico para calcular o perfil de velocidade apresentado em Yamamoto et al. (1994). Em seguida realizou um estudo numérico com velocidade angular constante. O escoamento estacionário viscoso, através de um tubo helicoidal com uma seção transversal circular com a velocidade angular constante no centro da curvatura, foi investigado numericamente para pesquisar a combinação dos efeitos da rotação (força de Coriolis), torção e curvatura (força centrífuga) no escoamento. Foram observadas as características do escoamento helicoidal com a variação do número de Dean.

A patente depositada pela Petrobras (Ribeiro et al.,1999), com identificação BR nº PI9704499-7 e título Separador Helicoidal Aperfeiçoado, apresenta um processo formado por um separador helicoidal de líquido e gás, aprimorado, cujo princípio de funcionamento se baseia na combinação das forças centrífuga e gravitacional. É constituído por um separador primário formado basicamente por uma câmara de expansão; um separador secundário formado por uma hélice de direcionamento do fluxo; de um separador terciário que consiste num reservatório ou piscina de separação gravitacional e de uma região de transição entre os separadores primário e secundário que consiste de pelo menos duas hélices de passo variável, cuja inclinação varia desde um ângulo de 90º até o ângulo de inclinação da hélice de passo constante do separador secundário, com a função de proporcionar um fluxo da fase líquida mais ‘suave’ na transição, entre os dois primeiros separadores.

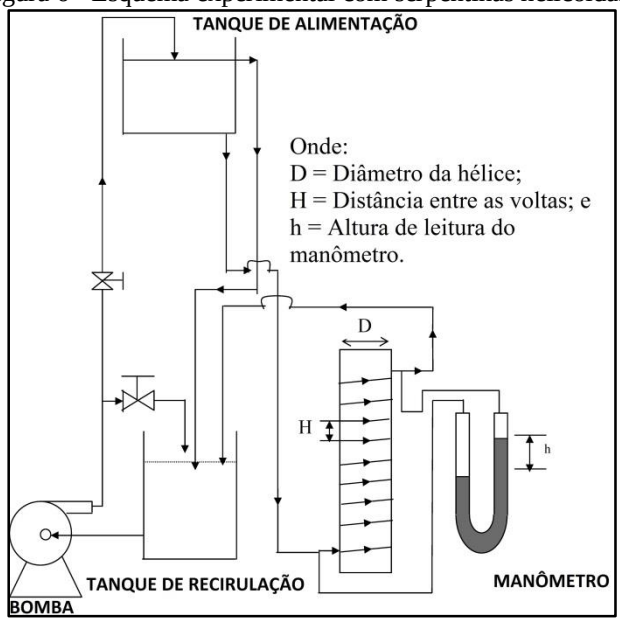
Segundo Agrawal e Nigam (2001), o fluxo secundário que é característico dos tubos helicoidais apresenta as seguintes vantagens:

- Maior gradiente de pressão axial;
- Maior número de Reynolds na transição para regime turbulento;
- Distribuição do tempo de residência que se aproxima a um fluxo empistonado;
- Maiores taxas de transferência de calor e de massa por unidade de pressão axial.

Para a execução de experimentos com tubos helicoidais é necessário mais do que um tubo com configurações bem definidas. Há uma conjunção de equipamentos que devem ser adaptados para a operação destes.

O esquema experimental instalado por Gupta (2011) é apresentado na Figura 6. Nele para minimizar os efeitos nas medidas da queda de pressão, os medidores foram instalados a uma distância maior que cem diâmetros do tubo. A queda de pressão foi medida usando transdutores de pressão diferencial. O raio interno do tubo foi medido por pesagem do mesmo, cheio de água e conhecimento do comprimento da serpentina helicoidal. Foram testados cinco tipos de serpentinas com doze combinações variando a torção e a curvatura. As medidas tiveram uma precisão de ± 0,5%. Nas corridas experimentais, a água foi usada como fluido de trabalho e a serpentina foi fixada num suporte cilíndrico, em condições ambientes. A vazão da água foi medida com um rotâmetro calibrado.

Figura 6 - Esquema experimental com serpentinas helicoidais.



Fonte: adaptado de GUPTA (2011, p.1153).

A observação das equações aplicadas nos trabalhos estudados, sobre escoamentos em tubos helicoidais e os resultados apresentados, deve ser realizada de forma atenta já que há sistemas de coordenadas e aproximações de ordens diferentes nestes últimos.

Zhang e Zhang (1999) afirmam que o comportamento do escoamento num tubo circular helicoidal é influenciado por três parâmetros: curvatura (k), diferença da pressão axial (ΔP) e torção (τ). A curvatura e o gradiente de pressão axial representam a força inercial do escoamento e essa última é definida pela diferença entre as pressões (inicial e final) em função da velocidade. Por outro lado a torção é uma característica geométrica do tubo helicoidal. No centro do tubo, devido a curvatura, há um gradiente radial da pressão e a busca do equilíbrio entre a velocidade axial e a pressão, promove o duplo vórtice também denominado escoamento

secundário. Próximo a parede, o gradiente de pressão é nulo, devido a uma aproximação, já que neste ponto a pressão não pode ser compensada pela força centrífuga produzida pela velocidade axial.

No trabalho de Huttl e Friedrich (2001) foram estudadas numericamente as influências da curvatura e da torção no escoamento turbulento em tubo helicoidal. Estes autores mostraram que a curvatura do tubo (que induz o escoamento secundário) tem um forte efeito na magnitude do escoamento, inibindo significantemente a turbulência, se comparados com um tubo reto de mesmo diâmetro. No entanto, mantendo a curvatura constante e aumentando o parâmetro de torção, foi observado que a energia cinética turbulenta aumenta. Outro resultado importante é o efeito da torção no padrão do escoamento secundário. Com o aumento no valor do parâmetro de torção, a componente axial da velocidade fica praticamente inalterada, enquanto que as variações do escoamento secundário tornam-se mais evidenciadas.

Yu et al. (2003) demonstraram que a razão de curvatura e o passo são parâmetros chaves que afetam a força centrífuga do fluido no tubo helicoidal. Realizaram medidas de velocidade axial e secundária e quantificaram as relações de efeitos do número de Reynolds, razão de curvatura e passo, com relação às primeiras. Os autores obtiveram excelente concordância entre os dados experimentais (*Laser Doppler Anemometry* - LDA) e os resultados numéricos (CFD) encontrados.

Com respeito à torção, Sartori (2006) mostrou que seu efeito físico no padrão de escoamento é menos pronunciado do que o efeito da curvatura. Porém, devido a sua influência no escoamento secundário, que conduz a um aumento nas flutuações de energia cinética e da taxa de dissipação, este parâmetro não pode ser negligenciado. Seu principal efeito é aumentar a amplitude das componentes radiais e circunferenciais da velocidade e, consequentemente, seus gradientes espaciais, ajudando assim a entender porque a energia cinética turbulenta é aumentada quando a torção é aplicada. Outro efeito da torção observado é a introdução de forças de inércia adicionais.

Alam et al. (2007) realizaram uma investigação com relação ao escoamento num tubo com rotação, com uma ampla faixa de Dean, curvatura e torção, para uma melhor compreensão do comportamento do escoamento. Obtiveram vários gráficos dos vetores do escoamento secundário, linhas de corrente do escoamento secundário (centro) e diversos gráficos do contorno do escoamento, esclarecedores do movimento interno no tubo helicoidal com movimento rotacional.

Ferng et al. (2012) usaram a metodologia da Fluidodinâmica Computacional (CFD), pesquisaram as características térmicas e hidráulicas do tubo helicoidal do trocador de calor

com gás Hélio a alta temperatura escoando na lateral do tubo e água em baixa temperatura na parte interna do tubo helicoidal. A troca de calor, considerada pelos autores, é pela lateral do tubo. Entretanto os resultados previstos são do fluxo de calor transversal, com relação à parede. A temperatura na parede apresenta um mesmo percurso, e o fluxo de calor é assumido como condição de contorno na parede. Os dados experimentais anteriores são da dependência do fator de atrito e o número de Nusselt com o número de Reynolds (ou número de Dean) para o tubo helicoidal, são assumidas para o modelo de CFD aplicado. As características térmicas e hidráulicas do tubo helicoidal são muito complexas, por conta da curvatura da hélice, que induz a força centrífuga bem como ao perfil do escoamento secundário. Concluíram que o passo da hélice influencia na torção, dependendo do número de Dean, e o perfil do escoamento secundário interno ao tubo helicoidal pode influenciar de forma expressiva no aumento da taxa de troca de calor.

2.3.5 Planejamento Experimental

Experimentos não podem ser realizados de forma aleatória, aumentando e diminuindo cada uma das variáveis, num número qualquer de práticas; sem observar erros, métodos, sequência e condições de execução.

Há um contínuo interesse e empenho da comunidade científica para promover e tornar todas essas técnicas mais acessíveis, eficazes e eficientes, conduzindo a aplicação do planejamento experimental baseado em modelos, numa ferramenta padrão para os experimentalistas (FRANCESCHINI e MACCHIETTO, 2008).

Segundo Schwaab e Pinto (2011), planejar experimentos significa, de forma ampla:

- Definir as variáveis a serem observadas e que, portanto, constituem o universo da investigação; escolhendo quantas e quais variáveis serão investigadas e em qual universo experimental;
- Definir como e com que equipamentos as variáveis serão medidas e/ou avaliadas; escolhendo técnicas e equipamentos adequados e caracterizando os erros experimentais;
- Definir o conjunto de medidas a serem feitas e as condições da experimentação; qual quantidade de experimentos que devem ser executados e as condições experimentais para a observação; e

- Definir a sequência experimental a ser seguida, dado que nem todas as observações podem ser feitas ao mesmo tempo; a ordenação dos experimentos e se os planos experimentais devem ser sequenciais ou em bateladas.

O planejamento experimental está baseado em pressupostos sobre o comportamento do sistema experimental investigado. E sua rotina deve ser encarada como um processo iterativo, ao longo do qual os pressupostos vão sendo revistos e aperfeiçoados (SCHWAAB E PINTO, 2011).

Quando um processo novo está sendo investigado, o conjunto de informações disponíveis é geralmente pequeno e o planejamento de experimentos deve ser feito de forma sequencial. Uma metodologia interessante de ser aplicada nestes casos consiste em iniciar a investigação com um planejamento fatorial, ou análise fatorial, onde as interações entre as variáveis do processo possam ser observadas, e a partir dessas informações, propor mecanismos que permitam estabelecer modelos matemáticos do processo. A etapa seguinte consiste em propor um planejamento de experimentos para tornar possível a discriminação dos modelos, de modo que ao final desta etapa apenas um modelo seja escolhido como o que melhor se ajusta aos dados experimentais. A etapa final consiste então em planejar experimentos para aumentar a precisão dos parâmetros do modelo escolhido na etapa anterior. Desta forma, espera-se que ao final deste procedimento sequencial, o modelo matemático obtido seja capaz de fazer previsões precisas do processo em questão (SCHWAAB, 2007).

2.3.5.1 Planejamento Fatorial

Segundo Costa (2006) o sucesso de uma análise fatorial está diretamente ligado aos objetivos iniciais do pesquisador; por exemplo, se a intenção é a simples redução do número de variáveis, ela será bem sucedida se for possível determinar um pequeno conjunto de fatores que consiga explicar uma parte considerável da variabilidade do conjunto inicial de variáveis.

O planejamento fatorial apresenta as seguintes características, é uma técnica bastante utilizada, principalmente quando se tem duas ou mais variáveis independentes (fatores), esta técnica permite uma combinação de todas as variáveis em todos os níveis, obtendo-se assim uma análise da variável sujeita a todas as combinações possíveis. São extremamente úteis para medir os efeitos (ou influências) de uma ou mais variáveis na resposta de um processo. Este planejamento pode ser realizado com dois níveis, no máximo três, sendo esta a única maneira de prever interação entre os fatores.

Na análise fatorial, as variáveis estatísticas (fatores) são formadas para maximizar seu poder de explicação do conjunto inteiro de variáveis, e não para prever uma variável (éis) dependente (s) (COSTA, 2006).

Análise fatorial é um nome genérico dado a uma classe de métodos estatísticos multivariados cujo propósito principal é definir a estrutura subjacente em uma matriz de dados. Em termos gerais, a análise fatorial aborda o problema de observar a estrutura das inter-relações (correlações) entre um grande número de variáveis (por exemplo, escores de testes, itens de testes, respostas de questionários), definindo um conjunto de dimensões latentes comuns, chamados fatores (COSTA, 2006).

A forma mais simples de propor um planejamento fatorial consiste em definir dois níveis para cada variável (isto é, dois pontos de observação) e combinar estes níveis definidos para todas as variáveis. Para facilitar a análise dos efeitos de cada variável, é interessante normalizar a região experimental, de forma que os limites inferiores e superiores sejam iguais a -1 e +1, respectivamente, para cada variável. Desta maneira, considerando as hipóteses de erros experimentais independentes e constantes, sem erros nas variáveis independentes e com um mesmo número de réplicas em cada condição experimental, os efeitos que cada variável independente exerce sobre cada variável dependente podem ser isolados. Assim, é possível quantificar e comparar os efeitos que cada variável independente exerce sobre a variável dependente. Esta propriedade caracteriza este tipo de planejamento como um plano fatorial ortogonal (BOX et al., 1978; BOX e DRAPER, 1987 apud SCHWAAB, 2007).

Quando somente dois níveis são considerados, apenas as relações lineares e as combinações entre as variáveis podem ser avaliadas. Se existirem relações não-lineares, o que é muito comum na engenharia química, este planejamento é inapropriado para observar tais efeitos. Uma forma de amenizar este problema é realizar experimentos no ponto central, que no domínio das variáveis normalizadas, corresponde ao ponto 0. Assim, com três pontos passa a ser possível observar algum desvio da linearidade (BOX et al., 1978; BOX e DRAPER, 1987 apud SCHWAAB, 2007).

Um problema com a utilização destes planos fatoriais está relacionado ao grande número de experimentos que precisa ser realizado. Para procurar amenizar este problema, podem ser usados os planos meio-fatoriais, obtidos a partir da divisão do plano fatorial completo de forma a manter algumas de suas propriedades, como a ortogonalidade. Entretanto, à medida que o número de experimentos é diminuído, algumas interações podem não ser mais observadas ou os seus efeitos podem aparecer misturados com os de outras variáveis (BOX et al., 1978; BOX e DRAPER, 1987 apud SCHWAAB, 2007).

Em qualquer caso, o pesquisador deve saber como as variáveis estão inter-relacionadas para melhor interpretar os resultados. Finalmente, se o número de variáveis é muito grande ou se há uma necessidade de representar melhor um número menor de conceitos, em vez das muitas facetas, a análise fatorial pode auxiliar na seleção de um subconjunto representativo de variáveis ou mesmo na criação de novas variáveis como substitutas das variáveis originais, e ainda mantendo seu caráter original (COSTA, 2006).

Franceschini e Macchietto (2008) apresentam uma revisão das técnicas de planejamento experimental baseado em modelos e com o aumento da precisão dos parâmetros. Esse estudo é uma profunda revisão teórica, apresentando questões numéricas e teóricas decorrentes do uso desses métodos e exemplos práticos e, aplicações interessantes. Essas aplicações são observadas nas áreas de: engenharia cinética, controle de processos, sistemas biológicos, farmacodinâmica, engenharia de processos, etc.

Após os primeiros estudos teóricos das técnicas de planejamento experimental baseado em modelos têm surgido estudos importantes, com atenção especial aos últimos 10 anos, quando os avanços dos computadores tem permitido o uso dessas técnicas em aplicações mais complexas com tempos de resoluções reduzidos. Esses métodos estão sendo agora aplicados com o uso de programas comerciais (FRANCESCHINI e MACCHIETTO, 2008).

Segundo Costa (2006) a utilização da análise fatorial em pesquisas só passou a ser viável com o advento dos computadores e dos programas de análises que possibilitaram a realização dos cálculos de forma rápida, precisa e econômica.

2.3.6 Turbulência e Modelos de Turbulência

Em 1889 Reynolds formulou a noção de campos médios e flutuantes em escoamentos turbulentos, produziu um importante modelo teórico para a análise de escoamentos turbulentos que ainda se constituem em estado da arte. De importante nota, vale relembrar sob que condições Reynolds conduziu suas investigações científicas. À época que Reynolds iniciou sua carreira no *Owens College*, pouquíssimos recursos foram colocados à sua disposição. O próprio *Owens College* havia se instalado em uma antiga casa residencial em *Quay Street* que havia abrigado por um bom tempo Richard Cobden, um deputado por *Stockport*. Por esse motivo suas primeiras pesquisas precisavam ser feitas em aparatos muito primitivos em sua casa ou ao ar livre. Desta forma, os recursos necessários à realização de experimentos precisavam ser necessariamente simples, baratos e descomplicados. Apesar das dificuldades, o resultado final é de alta qualidade e amplamente conhecido e reproduzido.

Segundo Carissimi (2007) ainda há incertezas de como o efeito da curvatura age reduzindo a turbulência no escoamento interno dos tubos helicoidais. Sabe-se que a influência da aceleração das linhas de fluxo próximas às paredes, propicia o regime laminar do movimento. Com isso, foram estabelecidos três regimes de escoamentos fundamentais de fluxos para as hélices, com valores quatro vezes mais altos em relação aos tubos retos. Porém, quando aplicado no fluxo através de uma hélice, a expressão "transição para turbulento", como se aplica no fluxo em tubos retos, é inapropriada. A Tabela 4 mostra os regimes de fluxo para tubos retos e helicoidais. Para Re< 4000 no tubo reto e Re_{crit}< 8000 na hélice, o regime de fluxo é de transição.

Tabela 4 - Classificação dos regimes de fluxo para tubos retos e helicoidais.

Regime	**Tubo reto (Re)**	**Tubo helicoidal (Re_{crit})**
Laminar	< 2100	< 2300
Transição	2100 - 4000	2300 - 8000
Turbulento	> 4000	> 8000

Fonte: CARISSIMI (2007).

De acordo com Silveira Neto (2003), os métodos utilizados para análise dos escoamentos turbulentos podem ser classificados em dois grandes grupos: os experimentais e os teóricos.

Os métodos teóricos se despontam com um potencial cada vez maior em função do desenvolvimento de modelos e métodos de solução mais avançados, assim como devido ao desenvolvimento de máquinas de alto potencial de cálculo e de armazenamento de informações. No domínio dos métodos teóricos, apesar de todo o avanço nas máquinas, elas ainda se apresentam completamente insuficientes para a solução, a contento, das equações originais de Navier-Stokes, de forma a se resolver escoamentos turbulentos a altos números de Reynolds.

Representações simplificadas implícitas e explicitas dos campos caóticos, como espectros cortados ou discretizações numéricas, conforme Germano (1992), são comumente aplicadas no estudo da turbulência e, nas chamadas simulações em grandes escalas (SGE do inglês LES = *large-eddy simulations*). A característica principal é que elas são produzidas por operadores simplificadores, diferentes para cada nível de solução, e que podem ser organizadas hierarquicamente, em termos dos parâmetros característicos, como comprimento de malha ou modo de truncamento aplicado.

Silveira Neto (2003) afirma que modelos vêm sendo desenvolvidos, onde são tratados os diferentes efeitos físicos ligados à turbulência. Eles são agrupados em diferentes famílias de

acordo com sua origem e potencial de cálculo disponível. São classificados em grupos, segundo a época de desenvolvimento dos mesmos. O primeiro grupo, modelos clássicos, pode ser subdividido nos modelos: à zero equação de transporte, a uma equação, a duas e até as seis equações adicionais de transporte. Os modelos contemporâneos, mais modernos, apareceram em consonância com uma nova filosofia de modelagem e de simulação, trata-se da modelagem sub-malha e da simulação de grandes escalas (SGE). Os modelos clássicos interessam-se pelo comportamento médio e por informações puramente estatísticas dos escoamentos turbulentos. Com a metodologia de SGE objetiva-se a obtenção de informações instantâneas assim como de informações estatísticas. Neste caso é possível o uso de métodos teóricos para se compreender fisicamente a turbulência.

Segundo Klein (2007) os modelos clássicos podem ser classificados em quatro grupos: modelos algébricos, modelos a uma equação, modelos a duas equações e modelos das tensões de Reynolds.

A seguir, será detalhado o modelo empregado neste trabalho, k-ε Padrão.

2.3.6.1 k-ε Padrão

Os modelos de duas equações são os mais aplicados, por apresentarem uma boa concordância entre a precisão numérica e o esforço computacional.

O modelo a duas equações, consoante Klein (2007), são baseados no conceito de viscosidade turbulenta, apresentam duas equações diferenciais de transporte de propriedades turbulentas, configurando-se assim como modelos de fechamento completos. Estas propriedades turbulentas são quantidades independentes que estão diretamente relacionadas com as escalas de comprimento e tempo turbulentas. Normalmente, são a energia cinética turbulenta, k, e a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de massa, ε. Mas há modelos que utilizam, por exemplo, a frequência turbulenta ω, ao invés da taxa de dissipação, ε.

Pode-se observar na equação de transporte para a energia cinética turbulenta, apresentada na Equação 20, que o primeiro termo do lado direito, da equação de transporte da energia cinética turbulenta, representa a taxa de produção de energia cinética turbulenta por unidade de volume, denominado Pk. Pode-se chegar a essa conclusão sobre esse termo, porque o mesmo aparece na equação de transporte da energia cinética média, porém com o sinal positivo, indicando haver transferência da energia cinética do escoamento médio para as escalas turbulentas. O segundo termo representa a taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por

unidade de volume, processo que se dá por meio dos efeitos viscosos presentes no meio, sendo denominado de ε. O terceiro termo representa a difusão viscosa e turbulenta.

$$\frac{Dk_t}{Dt} = -\overline{u_i u_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \upsilon\overline{\frac{\partial u_i}{\partial x_j}\frac{\partial u_i}{\partial x_j}} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[(\upsilon + \frac{\upsilon_t}{\sigma_k})\frac{\partial k_t}{\partial x_j}\right] \tag{20}$$

A taxa de dissipação da energia cinética turbulenta por unidade de volume, ε, é normalmente calculada pela equação de transporte, descrita pela Equação 21:

$$\frac{D\varepsilon}{Dt} = C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k_t}(-\overline{u_i u_j}\frac{\partial U_i}{\partial x_j}) - C_{2\varepsilon}\frac{\varepsilon^2}{k_t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\upsilon\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\mu_t}{\rho\sigma_e}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) \tag{21}$$

Dessa forma, percebe-se que as escalas de velocidade e comprimento são obtidas em função das quantidades escalares kt e ε. Falcão (2015) afirma que, ao resolver duas equações de transporte para determinação de μt, os modelos de duas equações tendem a minimizar a utilização de correlações empíricas e semi-empíricas para determinação da escala de velocidade e comprimento, sendo o modelo mais comumente aplicado o k-ε. A viscosidade turbulenta pode ser genericamente representada pelo produto de uma escala de velocidade e uma escala de comprimento da turbulência, contudo as escalas de velocidade e comprimento são obtidas em função de quantidades escalares, as quais são resolvidas por equações de transporte, definidas pelas Equações 22 e 23.

$$\vartheta = k_t^{1/2} \tag{22}$$

$$\ell = \frac{k_t^{3/2}}{\varepsilon} \tag{23}$$

A possibilidade de se modelar a escala de comprimento utilizando as variáveis kt e ε é proveniente do fato de que, sob condições de escoamentos com altos números de Reynolds, há uma cascata de energia sendo transferida das grandes escalas para as pequenas escalas, sendo, então, dissipada (MALALASEKERA e VERSTEEG, 1995).

2.4 Fluidodinâmica Computacional

Fluidodinâmica Computacional, do inglês *Computational Fluid Dynamics* (CFD), é uma ferramenta computacional para simulação do comportamento de sistemas envolvendo escoamento de fluidos, transferência de calor e outros processos físicos relacionados. CFD resolve as equações de escoamento do fluido sobre uma região de interesse, com condições iniciais e de contorno conhecidas.

Fortuna (2000) afirmou que o objetivo da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) é reduzir o número de experimentos e explorar fenômenos que não poderiam ser estudados em laboratório de forma prática.

Existem situações extremamente difíceis de serem modeladas e transformadas em equações para tratamento numérico. De acordo com Wilcox (1998) apud Fortuna (2000), um exemplo é a modelagem de escoamentos turbulentos, em que o uso de diferentes modelos de turbulência em um mesmo tipo de escoamento pode fornecer resultados distintos.

Computadores vêm sendo utilizados para resolver problemas de escoamento de fluidos há muitos anos. Inúmeros aplicativos têm sido desenvolvidos para resolver tanto problemas específicos, quanto classes específicas de problemas. Desde meados dos anos 70, a complexa matemática requerida para generalizar os algoritmos tem sido compreendida, e propostas de soluções gerais baseadas em CFD foram desenvolvidas. Estas soluções começaram a aparecer no início dos anos 80 e exigem cada vez mais o uso de computadores potentes, bem como um profundo conhecimento da fluidodinâmica do sistema em estudo.

O conjunto de equações que descreve as conservações de momento, massa e energia é conhecido como as equações de Navier-Stokes. Estas equações diferenciais parciais, foram descritas no início do século XIX e não possuem soluções gerais analíticas, mas podem ser discretizadas e resolvidas numericamente.

Potter (2007) afirmou que a análise de problemas de escoamento de fluidos complexos é frequentemente acompanhada pela visualização dos padrões de escoamento, o que permite o desenvolvimento de um entendimento intuitivo melhor e contribui na formulação do problema matemático.

Na descrição de um campo de escoamento, é conveniente visualizar o fluido como um conjunto de partículas individuais, sendo cada uma considerada como uma pequena massa de fluido, consistindo em um grande número de moléculas que ocupa um pequeno volume dV que se move com o escoamento. Se o fluido for incompressível, o volume não muda de tamanho, mas pode se deformar. Se o fluido for compressível, o volume se deforma, e também muda seu

tamanho. Em ambos os casos, admite-se que cada partícula se mova pelo campo de escoamento como um elemento distinto individualizado.

O conhecimento do campo de velocidades permite o cálculo da tensão de cisalhamento, da queda de pressão e da vazão (FOX, 1998). E, por consequência, a compreensão de como ocorre o escoamento secundário responsável pela migração diferencial baseado no tamanho de partículas.

2.4.1 Fluent

O *Fluent* é uma ferramenta de CFD integrado, no qual é possível ajustar os parâmetros da simulação, resolver e analisar os resultados sendo utilizado, para a simulação de diversos tipos de escoamento.

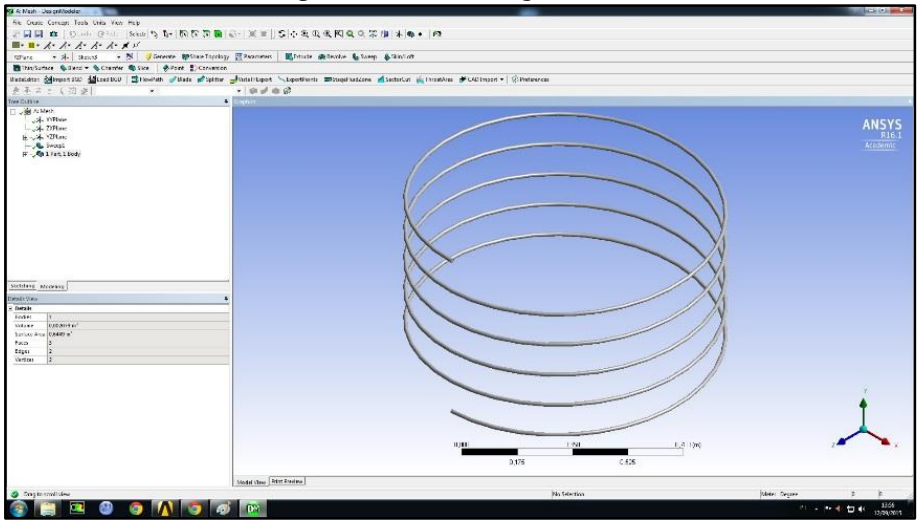
Segundo Freitas (2009), como se trata de um aplicativo comercial, ele é de certa forma, inflexível, apresentando, entretanto, uma boa interface ferramenta-usuário, sendo que o usuário tem a possibilidade de incluir rotinas computacionais escritas em C e, além disto, apresenta a flexibilidade da inclusão de equações para o cálculo de certas variáveis.

O pacote computacional ANSYS 16.1, foi escolhido para a execução dos trabalhos desta Tese. Para as simulações, foram empregados basicamente quatro programas que são: *Design Modeler, Meshing App, Fluent* e *CFD-Post*.

- Para desenhar a geometria de trabalho – *Design Modeler* - para a construção das geometrias e definição do domínio no qual as equações de transferência de fluidos são resolvidas e obtidas as soluções, como mostrado na Figura 7;

Segundo Fontes (2005), a geometria, ou seja, o domínio tem que ser convenientemente escolhido de forma a ser possível aplicar condições conhecidas no seu contorno. Uma vez definido o domínio de cálculo, sua geometria precisa ser introduzida no ambiente computacional, isto é, precisa ser representada através de seus componentes geométricos (pontos, curvas, superfícies e volumes). Isto pode ser realizado, através dos programas de, CAD (*Computer Aided Design*), que permitem modelar geometricamente qualquer objeto no espaço tridimensional.

Figura 7 - Tela do *Design Modeler*



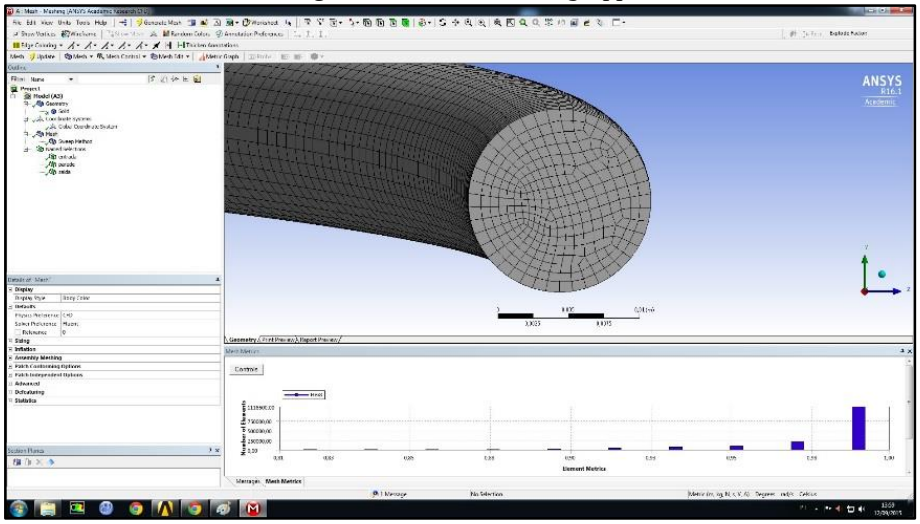
Fonte: elaborado pela autora (2015).

A hélice, ou mola helicoidal, é muito aplicada na área mecânica, diz-se que na sua maioria, é feita a partir de barra de aço que é enrolada, ou melhor, torcida, em forma de hélice cilíndrica ou cônica. No estudo realizado pela autora, essa barra é um tubo que apresenta seção circular. Com relação à direção que é torcida, a mola ou tubo, o sentido deve ser indicado no desenho. O usual, a mola helicoidal enrolada à direita, ou seja, sentido horário.

Um usuário de CFD tem a importante tarefa, de construir uma malha que possua compromisso entre a perfeição desejada e custo computacional, para solucionar o problema. Segundo Fontes (2005), estima-se que mais de 50% do tempo gasto em um projeto de CFD na indústria, é dedicado à definição da geometria (o que possui impacto direto sobre as condições de contorno a serem usadas) e à geração da malha.

- Para fazer as malhas – *Meshing App* - para a geração de elementos da malha numérica, podem ser criadas diferentes secções, o objetivo é encontrar o resultado que melhor retrata o fenômeno físico com o menor número de elementos, de acordo com a Figura 8;

Figura 8 - Tela do *Meshing App*

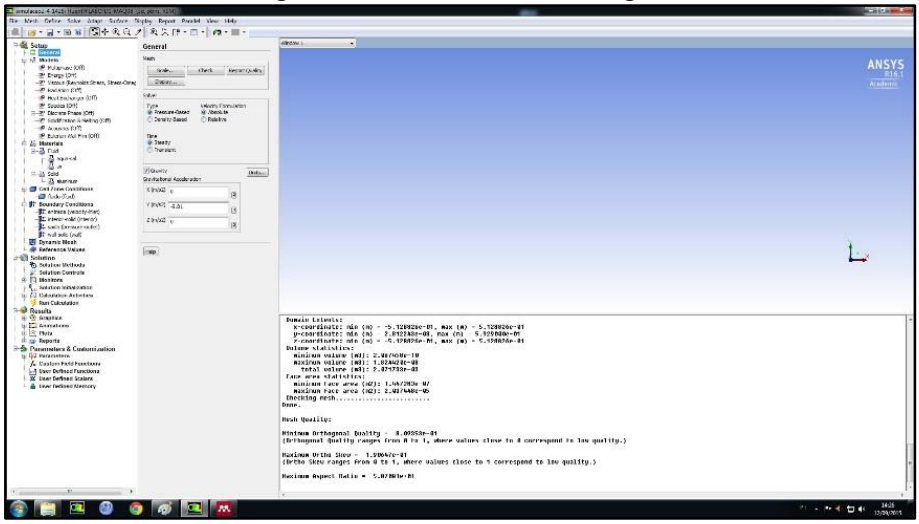


Fonte: elaborado pela autora (2015).

No trabalho de Mota (2011), as malhas geradas são compostas por elementos tetraédricos e prismáticos, sendo que os primeiros foram alocados na região central do duto e os últimos, próximos às paredes. Primeiramente, realizou-se um estudo qualitativo para se especificar o tamanho da região ocupada pelos elementos prismáticos, visando baixo custo computacional; mas que forneça uma boa representação das características de escoamentos em dutos helicoidais (perfil de velocidade axial e escoamento secundário, por exemplo). O tamanho máximo da aresta de um elemento tetraédrico foi estimado em 8% do diâmetro interno do duto. O tamanho máximo da camada de prismas foi especificado como 3 vezes o tamanho máximo da aresta de um tetraedro, ou seja 24% do diâmetro interno do duto. Esta metodologia foi aplicada por Sartori (2006), obtendo, assim, bons resultados na simulação de reatores helicoidais. Outro motivo para se adotar este procedimento é o fato de que um dos objetivos do trabalho citado anteriormente foi analisar o efeito da geometria (diâmetro interno, raio de curvatura e passo) no fenômeno de separação gás-líquido no interior de configurações helicoidais, portanto desta maneira, conseguiu-se manter uma proporção entre as malhas geradas para os distintos parâmetros geométricos.

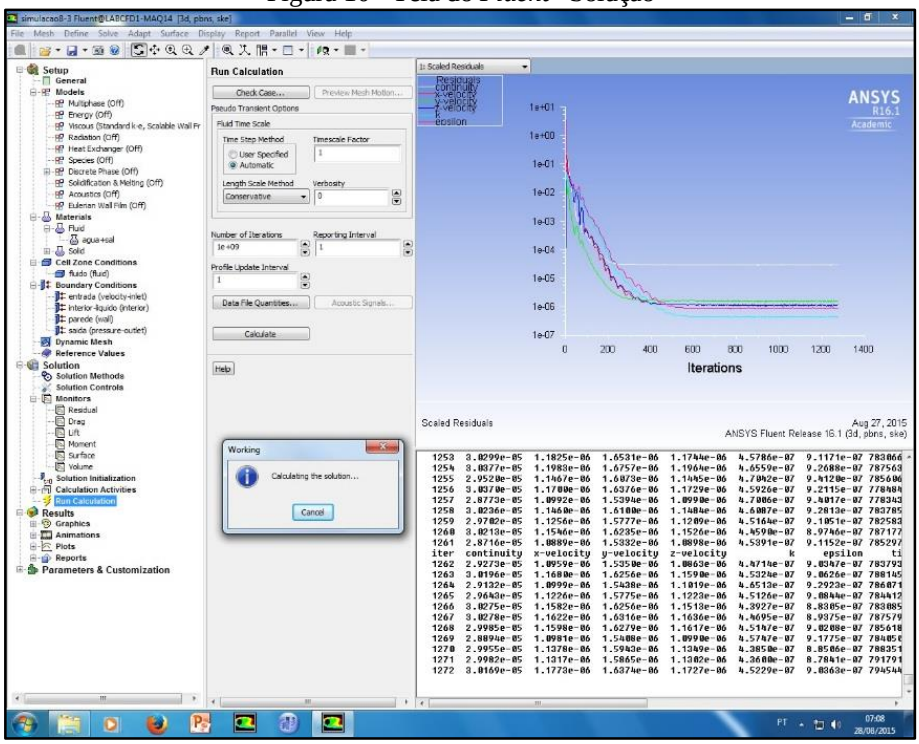
- Para a modelagem e solução do problema - *Fluent* - para a definição do modelo físico, propriedades dos materiais e condições de contorno; ou seja, o ajuste dos parâmetros de simulação e, para a resolução das equações e obtenção dos resultados, que irão gerar um arquivo solução do problema, que pode ser obtido utilizando um ou vários processadores (isto é, pode ser utilizado em *cluster*) como mostram as Figuras 9 e 10;

Figura 9 - Tela do *Fluent*– Modelagem



Fonte: elaborado pela autora (2015).

Figura 10 - Tela do *Fluent*– Solução



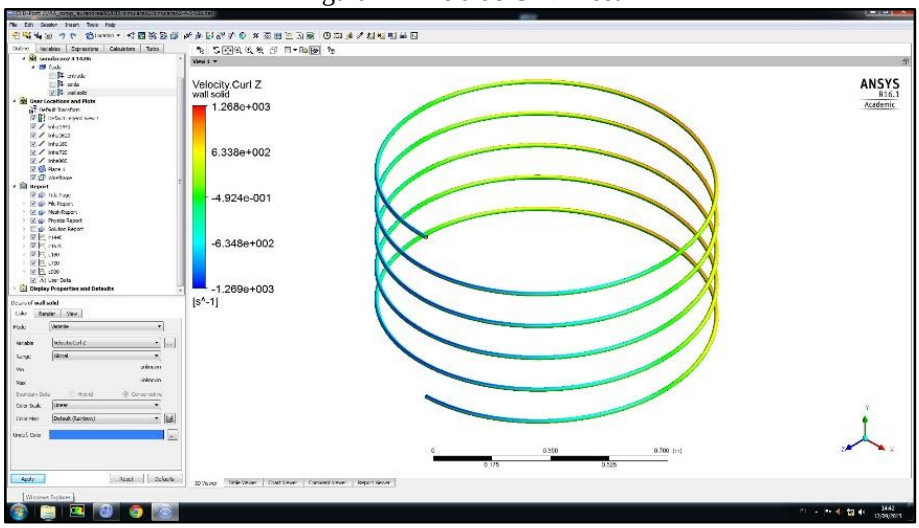
Fonte: elaborado pela autora (2015).

Fluent apresenta capacidade de modelagem de extensa faixa dos problemas de fluidodinâmica com fluidos compressíveis e incompressíveis; em regime laminar e turbulento. Este programa apresenta uma ampla gama de modelos matemáticos de fenômenos de transporte que podem ser combinados com habilidade às mais complexas geometrias. Como exemplo, tem-se a aplicação em escoamento laminar não newtoniano nos equipamentos de processo, transferência de calor em máquinas térmicas e componentes de engenharia automotiva,

combustão de carvão pulverizado em caldeiras, aerodinâmica externa, escoamento interno em compressores, bombas e escoamento multifásico em colunas de bolhas e leito fluidizado. Para ser possível a modelagem do fluido e do escoamento e o fenômeno de transporte relacionado no equipamento industrial e de processo, várias características devem ser observadas.

- Para a análise dos resultados - *CFD-Post* -processa e apresenta os dados graficamente, podendo o usuário, criar diferentes tipos de figuras e gráficos para melhor análise dos resultados, conforme Figura 11.

Figura 11 - Tela do *CFD-Post*



Fonte: elaborado pela autora (2015).

O programa *CFD-Post* apresenta entre suas principais características, as seguintes:

- Uma interface para o usuário que inclui uma visão interna que pode ser exportada como um dado de saída na forma de um gráfico;
- Variedade de gráficos e objetos geométricos aplicados para criar os gráficos de pós-processamento, para visualização da malha, e para definir os pontos de aquisição dos dados quantitativamente calculados;
- Desempenha uma variedade de cálculos exatos através dos objetos;
- Define variáveis escalares e vetoriais à escolha do usuário. Torna fixa uma variável com o objetivo de comparar com outras;
- Possui capacidade de pós-processamento para aplicação em máquinas térmicas;
- Controla padrão de perspectiva interativa (rotação, aumento, caixa de aumento), múltiplas janelas de visão, armazena perspectivas e figuras;

- Exporta resultados incluindo gráficos XY e gráficos com tempo.

Alves (2012) afirma que para a validação dos resultados das simulações em CFD é necessário confrontar os resultados obtidos numericamente com resultados experimentais. Esta necessidade existe devido ao fato das simulações numéricas poderem apresentar falsos resultados, sendo que estes podem ser resultantes da má escolha dos modelos, do pouco refino de malha, de condições de contorno inadequadas, de modelo de turbulência inadequado, de natureza numérica, dentre outros.

3 METODOLOGIA

Visando estudar um separador tubular helicoidal para separação de água oleosa, dividiu-se este trabalho em duas partes, uma experimental e outra de simulação numérica com fluidodinâmica computacional. A parte experimental foi desenvolvida no Núcleo de Engenharia de Petróleo (NUPETRO) do Laboratório de Tecnologias Alternativas (LTA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS) e a parte computacional, no Laboratório de Fluidodinâmica Computacional (LabCFD) do Departamento de Engenharia Química, na Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

3.1 Parte Experimental

A configuração geométrica do tubo helicoidal utilizado, de diâmetro (d) 0,0129 m, foi inspirada no trabalho de Zhao et al. (2012), resumido na Tabela 2, e apresenta orientação vertical, ou seja, eixo de hélice vertical, e diâmetro de enrolamento, D, de 1 m, com diâmetro da hélice (Dc) de 1,0129 m, de modo que o fluido gira em direção horária. Dessa forma, o número de Reynolds crítico é de Re_{crit}= 4962,17, com curvatura (k) no valor de 1,98m^{-1} e curvatura adimensional (Ɛ) com valor de 0,013. Vale ressaltar que este valor de Re_{crit} é menor que 8000, ou seja, dentro da faixa operacional para a qual se espera haver separação num tubo helicoidal.

Duas configurações foram implementadas neste estudo, onde variou-se a composição da mistura, o tipo de saída do tubo helicoidal e o arranjo do sistema experimental. A seguir serão apresentadas separadamente cada uma dessas configurações.

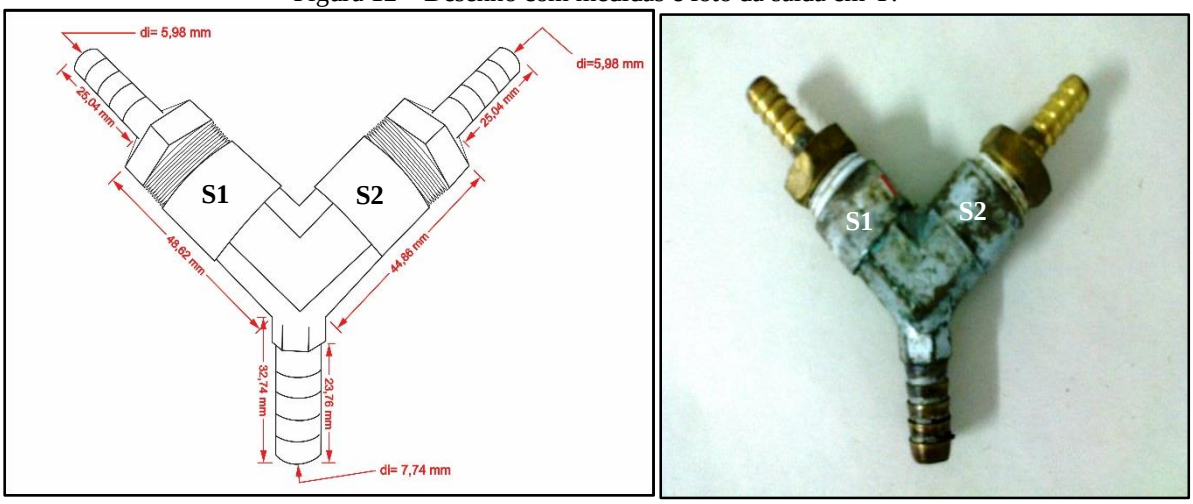
3.1.1 Configuração Experimental 1

Inicialmente, estudou-se a influência do número de voltas na separação de óleo. Foram realizados testes experimentais com 5, 6, 7, 8, 9 e 10 voltas, para os quais utilizou-se uma distância entre as voltas (H_c) de 0,1m. Esses experimentos foram realizados fixando-se a pressão na entrada do tubo em 1,2 kgf/cm^2. Para o experimento com 10 voltas, obteve-se a curva característica do escoamento.

3.1.1.1 Aparato Experimental

Para esses experimentos, foi construída uma saída na forma de Y, conforme Figura 12, com intuito de separar as correntes, obtendo uma mais concentrada e uma diluída. Esta peça foi acoplada ao término do tubo helicoidal, fixada na posição horizontal. Assim, criou-se duas correntes de saída: S1 (lado esquerdo) e S2 (lado direito), conforme Figura 12 (a) e (b).

Figura 12 – Desenho com medidas e foto da saída em Y.

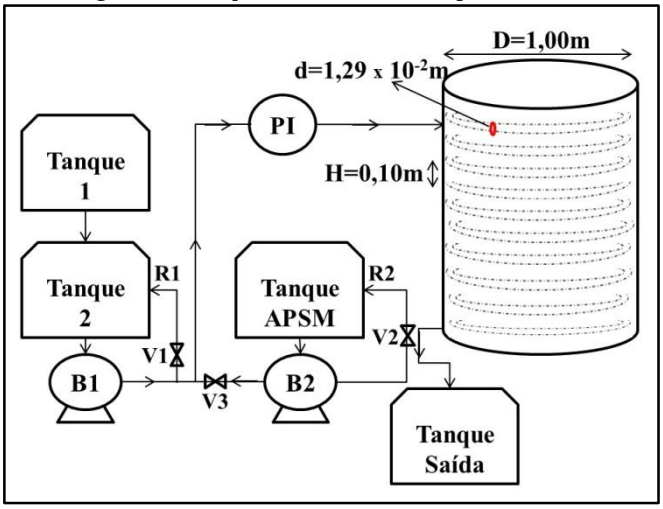


(a) (b)

Fonte: acervo da autora.

O esquema do Sistema Experimental 1 está apresentado na Figura 13 e é composto por: um tanque de alimentação (Tanque2); um tanque superior (Tanque1), no qual há a mesma solução de sal+água que preenche o Tanque 1, com função de equalizar o volume à medida que a bomba trabalha para que a altura permaneça constante; um tanque (Tanque APSM) que armazena a água produzida sintética mãe (mais concentrada em óleo que a mistura que entra no tubo helicoidal); um tanque de saída (Tanque Saída), que recolhe a saída do tubo helicoidal, correntes S1 + S2 (a medição das composições das correntes S1 e S2 foram feitas antes destas entrarem no tanque de saída); um medidor de pressão (PI), na parte superior do separador tubular helicoidal, para acompanhar a pressão de entrada; uma válvula (V1), responsável pelo reciclo da água+ sal do Tanque2; uma válvula (V2), que age como agitador da água produzida sintética, armazenada no Tanque APSM; uma válvula (V3), que controla a entrada da água+sal que influencia na leitura do PI; uma bomba (B1), com potência de ½ hp, que conduz a água + sal até o tubo helicoidal; e uma bomba (B2), com potência de 1 hp, que funciona como agitador quando a válvula V3 está fechada e atua fazendo um reciclo da mistura para o tanque APSM, quando a válvula V3 está aberta. A foto do Sistema Experimental 1 descrito está na Figura 14.

Figura 13 - Esquema do Sistema Experimental 1



Fonte: elaborado pela autora (2015).

Figura 14 - Foto do Sistema Experimental 1

Fonte: acervo da autora (2015).

3.1.1.2 Composição da Mistura 1

A mistura utilizada com esta configuração experimental, denominada Mistura 1, consistiu em água, sal e petróleo. As propriedades dos componentes e da mistura serão apresentadas a seguir.

Inicialmente, preparou-se uma solução composta apenas por água e sal. Para isso, foi adicionado ao tanque de alimentação (Tanque1) e ao tanque superior (Tanque2), água do

abastecimento público da cidade de São Cristóvão – Sergipe, somando aproximadamente 190 L. Adicionou-se, então, 4 kg de sal de cozinha (das marcas Lebre e Marlin) para obter uma concentração de 100.000 mg/L, justificada por esta ser uma aproximação da concentração de sal, média mensal, encontrada na estação de tratamento de Bonsucesso em Carmópolis - Sergipe.

A Bomba 1 é ligada com a válvula V1 completamente aberta para homogeneização da água + sal, e a válvula V3 completamente fechada. Fechando a V1, e abrindo a V3, ocorre o preenchimento de todas as voltas do tubo helicoidal com fluido água + sal. Assim, começam a serem lidas as marcações do manômetro PI e tirou-se a curva característica do sistema nesta configuração experimental.

A caracterização da mistura água+sal preparada foi avaliada pelo Método de Mohr, que consiste nas seguintes etapas:

a) Medir pH da amostra que deve estar entre 6,5 e 8,5 e ajustar, se necessário. Se o pH estiver abaixo de 6,5 ajustar com hidróxido de sódio, se o pH estiver acima de 8,5 ajustar com HNO_3.
b) Filtrar a amostra para eliminar sólidos em suspensão.
c) Como os valores calculados para salinidade são de 100.000 mg/L utilizamos uma alíquota de 0,1 ml da amostra.
d) Adicionar 50 ml de água destilada e 0,5 ml de indicador cromato de potássio 100 g/L.
e) Titular com solução de nitrato de prata 0,5 mol/L.
f) Calcular a salinidade através da Equação 24:

$$NaCl = \frac{(V_g - V_B) * F_c * 0{,}05 * 58{,}45 * 1000}{V_A} \tag{24}$$

A Tabela 5 apresenta as características da mistura água + sal. Os valores de densidade e viscosidade foram obtidos a partir de medidas com picnômetro e Reômetro AR 62, TA INSTRUMENTS, com geometria - cilindros coaxiais Steel – 989046, respectivamente.

Tabela 5 - Características da água + sal.

Parâmetro	**Valor**
Densidade 20 ºC (g/cm^3)	1,026
Viscosidade a 37,8ºC (cP)	4,4
Viscosidade a 50,0ºC (cP)	3,9
Viscosidade a 60,0ºC (cP)	3,8

Fonte: elaborada pela autora (2015).

As propriedades físicas do petróleo utilizado para preparar a mistura sintética estão apresentadas na Tabela 6. Este petróleo é um óleo de transferência chamado de OBA08052015, oriundo da estação de tratamento de Bonsucesso em Carmópolis – Sergipe, coletado na entrada do tanque primário, que recebe toda a água produzida nas diversas estações de tratamento do Campo de Carmópolis. Pode-se afirmar que é um hidrocarboneto com grau API médio, pois se encontra entre os valores de 22º e 30º.

Tabela 6 - Características do Petróleo OBA08052015.

Parâmetro	**Valor**
BSW (% vol)	2,00
Grau API(º)	23,58
Densidade 20 ºC (g/cm^3)	0,9124
Viscosidade a 37,8ºC (cP)	242,7
Viscosidade a 50,0ºC (cP)	125,86
Viscosidade a 60,0ºC (cP)	79,30

Fonte: elaborada pela autora (2015).

A mistura sintética consiste na mistura água+sal descrita, com concentração de NaCl de 100.000 mg/L, e 400 mg/L de petróleo, fornecendo um Teor de óleos e graxas(TOG) na ordem de grandeza da média mensal encontrada em Carmópolis - Sergipe.

Para realizar a mistura, inicialmente, enche-se o Tanque APSM com 34 L de água + sal e 0,5 L de petróleo OBA05082015. Esta é chamada de mistura água produzida sintética mãe, pois possui concentração maior que 400 mg/L. Este tanque é ligado à Bomba2, com a válvula V2 totalmente aberta, agindo assim como um reciclo, e agitando a água produzida sintética mãe. Ajustada a pressão de trabalho, reduz-se a abertura da válvula V2, de forma a preencher o percurso do tubo de conexão até a válvula V3. Abrindo lentamente a V3, percebe-se a alteração de cor do tubo helicoidal, as voltas sendo preenchidas com a água produzida de trabalho.

A caracterização do TOG da mistura foi feito, medindo-se individualmente as vazões e concentrações de amostras das saídas S1 e S2. Com estas medidas, calculou-se também a eficiência de separação do separador tubular helicoidal.

Para determinação do TOG, utilizou-se o método de absorção molecular, que consiste nas seguintes etapas:

a) Verificar limpeza do funil de separação de 250 ml. Garantir vedação perfeita do funil.
b) Retirar frasco de amostragem da refrigeração e deixar atingir temperatura ambiente.
c) Transferir todo o conteúdo do frasco de amostragem para o funil.

d) Adicionar cerca de 20 ml de clorofórmio ao frasco de amostragem vazio e agitar.
e) Transferir o extrato (clorofórmio + óleo) para o funil de separação e agitar o funil abrindo periodicamente para aliviar pressão.
f) Deixar funil em repouso, na vertical e aguardar a separação das fases. Caso haja a formação de emulsão adicionar aproximadamente 2 ml de etanol ou álcool isopropílico, agitar e aguardar a separação das fases.
g) Drenar o clorofórmio (e o residual de emulsão se houver) para um funil de filtração com papel de filtro qualitativo de filtração rápida ou similar contendo de 1g a 10g de sulfato de sódio. Recolher o filtrado em balão volumétrico de 50 ml ou 100 ml.
h) Repetir o procedimento das etapas d a g, por duas vezes.
i) Medir o volume da amostra inicial utilizando uma proveta graduada de 100 ml.
j) Reservar amostra de extrato para leitura em espectrofotômetro.
k) Observar visualmente a coloração do extrato para então proceder a diluição necessária.
l) Ligar o espectrofotômetro.
m) Ajustar o comprimento de onda (400 nm) para curva selecionada no botão ao lado do espectrofotômetro.
n) Utilizar o clorofórmio utilizado na extração para zerar o equipamento.
o) Transferir amostra do balão volumétrico para cubeta do espectrofotômetro e realizar leitura da absorbância.
p) Caso o espectrofotômetro não consiga efetuar a leitura, ultrapassando a escala, deve-se realizar diluição do extrato (clorofórmio + óleo) e efetuar os cálculos multiplicando a leitura pelo fator de diluição correspondente.

O procedimento descrito acima foi realizado também com tetracloroetileno e hexano, além do clorofórmio. Foi então construída uma curva padrão para cada solvente, apresentadas no Apêndice A.

Para o cálculo do TOG, utilizou-se a Equação 25, onde: A é a leitura no espectrofotômetro (já em ppm); $V_{solvente}$ é o volume de solvente utilizado na extração; $V_{amostra}$ é o volume da amostra de água produzida, e $F_{diluição}$ é o fator de diluição.

$$\mathrm{TOG} = \left(\frac{\mathrm{A} \,.\, \mathrm{V_{solvente}}}{\mathrm{V_{amostra}}}\right) . \mathrm{F_{diluição}} \qquad (25)$$

3.1.2 Configuração Experimental 2

Tendo em vista que os testes experimentais obtidos com a Configuração Experimental 1 (onde variou-se o número de voltas do tubo helicoidal), indicaram que o aumento no número de voltas não contribuía para a separação do óleo, conforme será mostrado na Tabela 15, no Capitulo 4 que trata dos Resultados e Discussão, optou-se por fazer um estudo da distância entre as voltas (H), mantendo-se o número de voltas em 5. Foi feito então um planejamento experimental do tipo fatorial 2^2 com 2 pontos centrais, apresentado na Tabela 7, para variar a distância entre as voltas e a pressão de entrada nos tubos, com objetivo de encontrar a configuração que fornecesse melhor separação.

Tabela 7 - Fatores do Planejamento Experimental e seus níveis

Fatores	**Níveis**		
	-1	**0**	**1**
H (m)	0,15	0,20	0,25
P (kgf/cm^2)	0,50	1	1,5

Fonte: elaborada pela autora (2015).

Dessa forma foram realizados 6 experimentos com esta nova configuração, apenas com água+sal, para determinação da curva característica para o arranjo com H_c = 0,2 m.

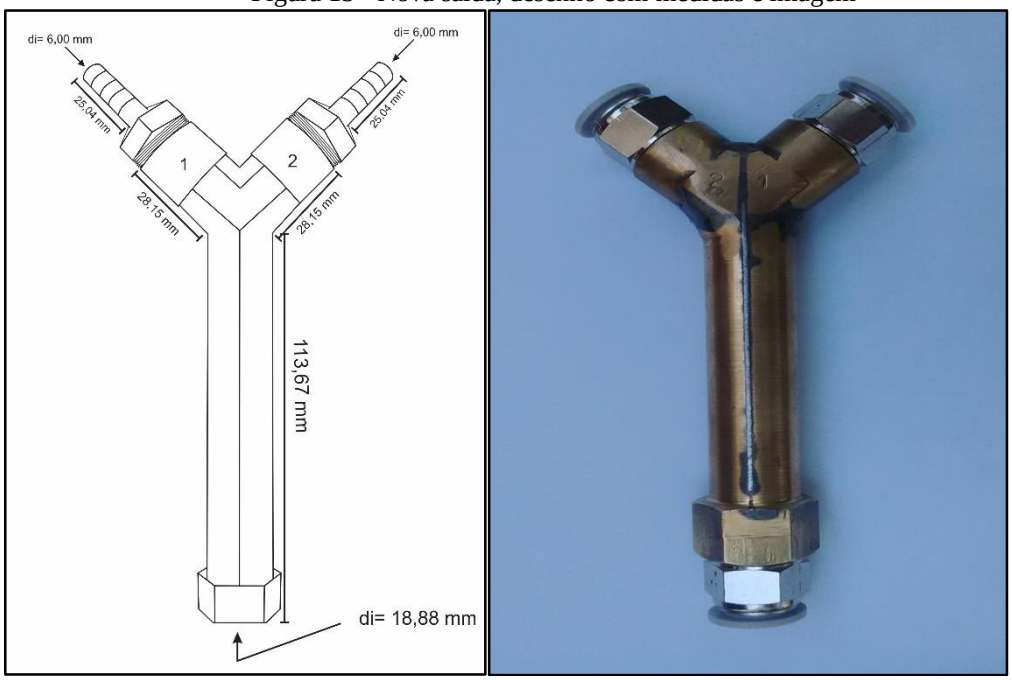
3.1.2.1 Aparato Experimental

O aparato experimental da Configuração Experimental 1 foi alterado de modo a se buscar amostras mais apropriadas às medições de separação. As principais modificações foram:

- ao invés de um tanque para a mistura água+sal e outro para a água produzida sintética mãe, foi utilizado um único tanque com água+sal+óleo;
- utilização de óleo mineral lubrificante, ao invés de petróleo, e um emulsificante, de modo a buscar uma mistura menos estável que aquela usando petróleo;
- inserção de um ponto de amostra de entrada, antes da entrada no tubo helicoidal (Figura 19);
- nova saída no tubo helicoidal para reduzir os acidentes provocadores de turbulência e tentar eliminar uma possível perturbação da separação das fases na saída do tubo helicoidal devido à presença de uma restrição de diâmetro devido à utilização da peça Y da Configuração Experimental 1. O novo Y utilizado, apresentado na Figura

15 (a) e (b), tem diâmetro interno igual ao do tubo helicoidal e apresenta uma parede de aço interna, que faz com que o fluido no interior do tubo helicoidal se divida naturalmente ao entrar na nova peça Y, sem nenhuma perturbação ao escoamento, direcionando cada corrente para sua respectiva saída, S1 ou S2.

Figura 15 - Nova saída, desenho com medidas e imagem

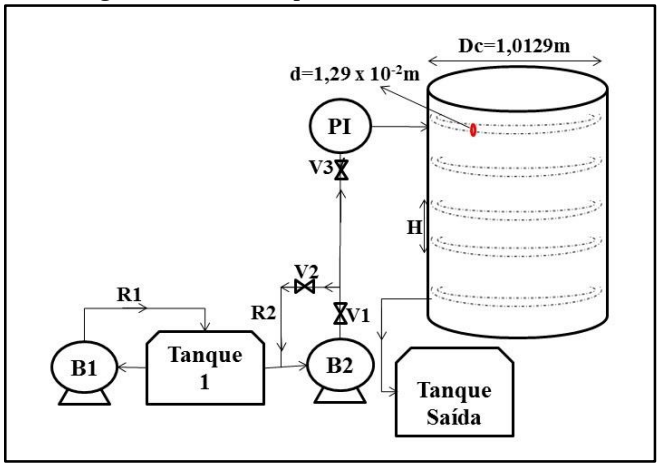


(a) (b)

Fonte: acervo da autora (2015).

O esquema do novo aparato experimental resultante das modificações citadas encontra-se na Figura 16. O reciclo R1, acoplado à Bomba 1 (B1), com 1 hp de potência, funciona como agitação para a mistura sintética, armazenada no Tanque 1. O reciclo R2, ligado a Bomba 2 (B2), com 1 hp de potência, tem a função de elevar a água produzida sintética até o separador tubular helicoidal. As válvulas V1 e V2, são acionadas de forma cadenciada para promover a variação de vazão, durante o experimento. A válvula V3 é acionada para a retirada da amostra de entrada e fechada imediatamente após a coleta. O PI é o medidor de pressão, manômetro. A saída do tubo helicoidal (correntes S1 + S2) é coletada no Tanque de Saída, sendo a medição das composições das correntes S1 e S2 feitas antes destas entrarem no tanque de saída. As Figuras 17, 18 e 19 são fotos do sistema experimental descrito.

Figura 16 - Novo Separador Tubular Helicoidal



Fonte: elaborada pela autora (2015).

Figura 17 - Apresentação dos reciclos e suas bombas. À esquerda, (R1), com a Bomba 1 de cor azul, antes do Tanque 1 (azul), e, à direita, (R2), com a Bomba 2 de cor preta

Fonte: acervo da autora (2015).

Figura 18 - Ponto de coleta da amostra entrada V3, abaixo do manômetro, com tubo de silicone para caracterização da corrente de entrada

Fonte: acervo da autora (2015).

Figura 19 - Novo separador tubular helicoidal, com distância entre as volta (H_c) de 0,20 m

Fonte: acervo da autora (2015).

3.1.2.2 Composição da Mistura

Conforme mencionado anteriormente, ao invés de petróleo, utilizou-se, com esta configuração experimental, óleo mineral lubrificante. O óleo utilizado foi o Lubrax SL15W-40, que pode ser adquirido em postos de gasolina. É mineral multiviscoso de elevado desempenho para uso nos modernos motores a gasolina, etanol, flex e GNV. As propriedades deste óleo estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 - Características do óleo Lubrax SL 15W-40.

Parâmetro	Valor
Densidade 20 ºC (g/cm^3)	0,8825
Ponto de Fulgor (ºC)	236
Ponto de Fluidez (ºC)	-24
Viscosidade a 40ºC (cP)	0,108
Viscosidade a 100ºC (cP)	0,0142

Fonte: elaborada pela autora (2015).

Inicialmente, foi preparada uma solução de 80L de água do abastecimento da cidade de São Cristóvão com 4 kg de sal de cozinha, de modo a obter, com auxílio de um picnômetro,

uma densidade na faixa de 1,025 a 1,029 g/mL, que é a densidade aproximada da água do mar. A obtenção da curva característica foi realizada com esta solução, apenas água+sal.

À solução água+sal preparada, adicionou-se 20L de óleo, com o objetivo de melhor visualizar a separação, por decantação gravitacional, após coleta. Para garantir a formação de emulsão, foi adicionado 200 mL de emulsificante comercial, Dentrol BR60.

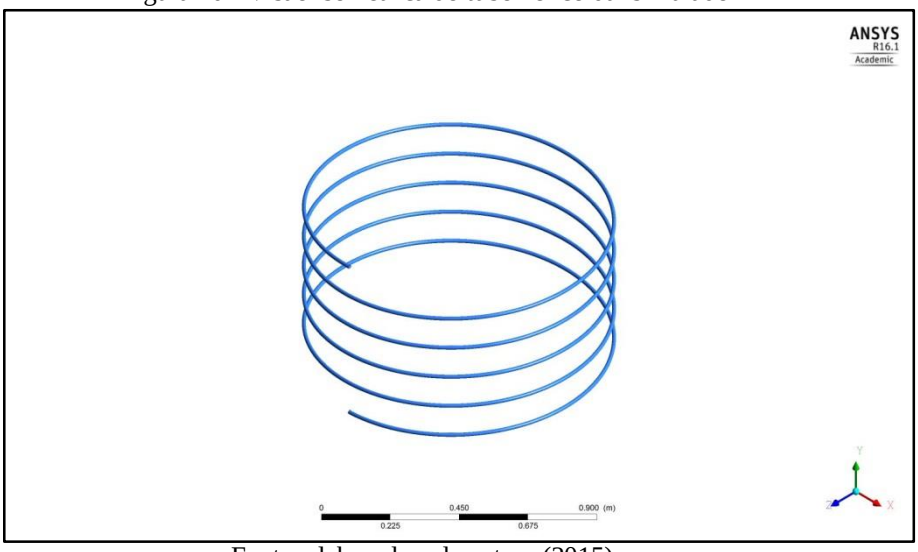
Após a adição da água, do sal, do óleo e do emulsificante, no Tanque 1, a agitação (Reciclo1 e Bomba1) foi acionada por 30 minutos para promover a formação de emulsão. Ainda com agitação, foi iniciado o experimento com o acionamento da Bomba2, e, ao controlar as válvulas V1 e V2, foi realizada a variação de pressão e consequentemente, da vazão.

3.2 Simulação em CFD - Software e Hardware

Para a execução das simulações com fluidodinâmica computacional foi utilizado um computador com a seguinte configuração básica: processador Intel®*core*™i7de 2,80 GHz e memória RAM de 4,00 Gb e Sistema Operacional Windows de 64 bits. Utilizou-se o pacote comercial de CFD da empresa ANSYS, versão 16.1, onde o programa *Design Modeler* foi usado para elaborar a geometria do trabalho, o *Meshing* para fazer as malhas, o *FLUENT* para a Modelagem e Simulações numéricas, e os resultados foram analisados no *CFD-Post*.

A Figura 20 mostra uma visão isométrica do tubo helicoidal cuja orientação é vertical, com o escoamento girando no sentido horário, de cima para baixo, com H_c = 0,10m

Figura 20 - Visão isométrica do tubo helicoidal simulado

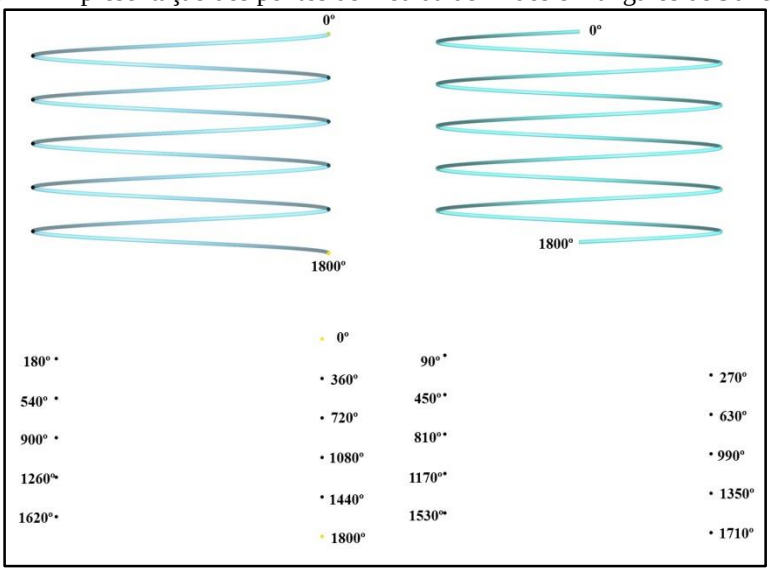


Fonte: elaborado pela autora (2015).

Foram feitos dois grupos de simulação. O primeiro, denominado Estudo de Torção, consistiu em avaliar com CFD o perfil de escoamento monofásico no tubo helicoidal quando este tinha a distância entre as voltas (H_c) variando de 0,02 a 0,10m. O segundo, denominado aqui de Reprodução de Experimento, consistiu na reprodução do experimento que apresentou melhor eficiência de separação. A seguir, cada um dos grupos de simulação serão descritos.

Para facilitar a apresentação dos resultados do tubo helicoidal, convencionou-se a divisão deste em planos de 90º em 90º. A Figura 21 mostra a posição dos planos estudados.

Figura 21 - Apresentação dos pontos de medida definidos em ângulos de 90º em 90º



Fonte: elaborada pela autora (2015).

3.2.1 Estudo da Torção

Com o objetivo de identificar o posicionamento dos vórtices do escoamento secundário, foi realizado um breve estudo da torção, com cinco simulações. Variou-se o valor da distância entre cada volta (H_c), de 0,02 m a 0,10 m, tendo como parâmetros geométricos constantes em todas as simulações: o número de voltas igual a 5, o diâmetro interno do tubo (d) igual a 0,0129 m e o diâmetro da hélice (Dc) igual a 1,0129 m.

De acordo com a bibliografia estudada, a separação devido à formação de escoamentos secundários, também denominado migração parcial baseada no tamanho das partículas, se dá para escoamentos com $Re_{crit} < 8000$ e $De < 5000$. Dessa forma, as simulações realizadas encontram-se dentro da faixa esperada.

A modelagem, as condições de contorno, as propriedades dos fluidos e as especificações numéricas das simulações encontram-se resumidas na Tabela 09.

Tabela 9 - Condições de contorno, propriedades dos fluidos e opções adotadas nas simulações.

Tipo de *Solver*	Baseado na Pressão
Simulação da Velocidade	Absoluta
Regime de Tempo	Pseudo-Transiente
Gravidade	Ativa
Aceleração da Gravidade	x = 0 m/s^2; y = -9,81 m/s^2; z = 0 m/s^2.
Modelo de Turbulência	k-ε Standard
	Constantes: Cmu = 0,09; C1- ε = 1,44; C2- ε = 1,92; TKE = 1 e TDR = 1,3.
Material	Água
	densidade = 998,2 kg/m^3
	Viscosidade = 0,0010003 kg/m.s
Regiões	líquida – Tipo: fluida
Condições de contorno	
Zona	Tipo
entrada	*velocity-inlet** = 2,414 m/s
saída	*pressure-outlet*** = 0 Pa.
parede	Estacionária e com aderência
Pressão Total	Calculada para cada caso
Pressão Inicial	0 (Pa)
Turbulência – Método k e ε	Calculada para cada caso
Método de Solução	
Acoplamento Pressão Velocidade	
Esquema	*Coupled*
Discretização Espacial – esquemas de interpolação	
Gradiente	*Least Squares Cell Based*
Pressão	*PRESTO!*
Momento	*Second Order Upwind*
Energia Cinética Turbulenta	*Second Order Upwind*
Taxa de Dissipação Turbulenta	*Second Order Upwind*
Método de Inicialização	Híbrida

**velocity-inlet* é uma condição de contorno onde se informa velocidade de entrada.
***pressure-outlet* é uma condição de contorno onde se informa pressão relativa de saída, neste caso, aberta para atmosfera. 1atm = 0 Pa.

A Tabela 10 apresenta as configurações das cinco geometrias, com cinco voltas denominadas H2, H4, H6, H8 e H10 e passo (p), curvatura (k), curvatura adimensional (Ɛ), número de Dean (De), torção (τ), torção adimensional (λ) e número de Germano (Gn) para cada geometria. Os valores dos respectivos números de Reynolds (Re) e números de Reynolds crítico (Re_{crit}) não aparecem na tabela pois são iguais em todos os experimentos, com valores de 30.940 e 4.962, respectivamente.

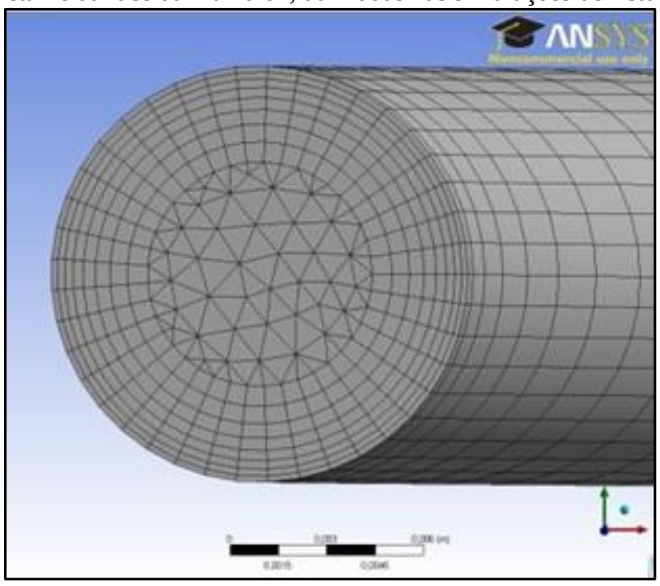
Tabela 10 - Configurações das cinco geometrias do Estudo da Torção.

Exp	H (m)	p (m)	k (m^{-1})	Ɛ	De	τ (m^{-1})	λ	Gn
H 2	0,020	0,0314	1,967	0,0127	3484,992	0,122	0,062	3,903
H 4	0,040	0,0628	1,945	0,0125	3465,146	0,241	0,124	7,718
H 6	0,060	0,0942	1,909	0,0123	3432,808	0,355	0,186	11,362
H 8	0,080	0,126	1,860	0,0120	3389,019	0,461	0,248	14,765
H 10	0,100	0,157	1,801	0,0116	3335,107	0,558	0,310	17,873

Fonte: elaborada pela autora (2015).

Começou-se pela geométrica com H = 0,10m e para esta, fez-se um teste de malha, com o objetivo de encontrar a malha adequada com o menor número de elementos. Três malhas com diferentes tamanhos foram elaboradas e seus números de elementos e nós são mostrados na Tabela 11. As malhas foram compostas por oito camadas de prisma na parede e com apenas elementos tetraédricos no centro. A Figura 22 apresenta a malha 02 na face da geometria.

Figura 22 - Detalhe da face da malha 02, utilizadas nas simulações de Estudo da Torção



Fonte: elaborada pela autora (2015).

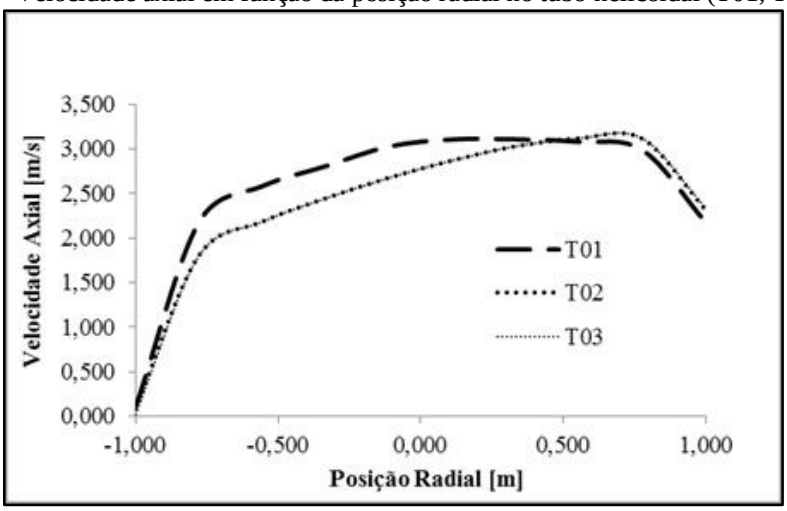
Tabela 11 - Números de elementos e nós das malhas testadas

Malha	Número de elementos	Número de nós
01	845.736	808.265
02	1.386.504	1.276.870
03	2.772.567	2.552.928

Fonte: elaborada pela autora (2015).

O teste de malha foi realizado com as condições da Tabela 09. Para comparar os resultados das três malhas, avaliou-se o perfil da velocidade axial, na quinta volta, na posição 1800º da Figura 21, do lado direito do separador tubular helicoidal. Pode-se observar, na Figura 23, que as curvas das malhas 02 e 03 são praticamente coincidentes. Optou-se, então, pela malha 02 em virtude da mesma apresentar um menor número de elementos que a malha 03 e fornecer o mesmo resultado. A malha 02, que possui 1.276.870 nós, é suficiente para obter uma solução independente da malha numérica e foi então a malha utilizada nas demais simulações desta seção.

Figura 23 - Velocidade axial em função da posição radial no tubo helicoidal (T01, T02 e T03).



Fonte: elaborada pela autora (2015).

3.2.2 Reprodução de Experimento

Tendo como objetivo validar uma simulação com fluidodinâmica computacional, da separação óleo/água num separador tubular helicoidal, a fim de que esta ferramenta possa ser utilizada no futuro para projeto e/ou otimização deste equipamento, reproduziu-se numericamente um dos experimentos realizados no planejamento experimental.

O experimento selecionado foi aquele com H = 0,15 m e P = 0,5 kgf/cm^2, pois este foi o que apresentou melhor eficiência de separação, apesar de ainda muito aquém do desejado para um separador.

Diferentemente das simulações do Estudo de Torção, estas simulações são bifásicas, contendo 20% de óleo. A modelagem utilizada foi a Euleriana e foram feitas três simulações, variando-se o tamanho das gotas de óleo: 5, 10 e 50 µm.

O teste de malha foi feito para uma geometria com cinco voltas e H_c= 0,10m e com simulação monofásica, sem óleo, apenas para validar o perfil de velocidade da fase principal. Três malhas com diferentes tamanhos foram elaboradas e seus números de elementos e nós estão apresentados na Tabela 12. As malhas foram compostas por seis camadas de prisma na parede e com apenas elementos hexaédricos no centro. O refino foi feito apenas com relação ao número de elementos longitudinais, como pode-se ver nas Figuras 24a, 24b e 24c. O refino na seção transversal foi mantido inalterado para as três malhas e está apresentado na Figura 24d.

O teste de malha foi realizado com as condições da Tabela 13, porém como monofásico. Para comparar os resultados das três malhas, avaliou-se o perfil da velocidade axial, na quarta volta (1440º) e terceira volta (900º), indicadas anteriormente na Figura 21, do separador tubular helicoidal.

Nota-se, na Figura 25a, que a concavidade do gráfico está voltada para cima, e na Figura 25b, ao contrário, está para baixo. Isso é devido à posição de coleta dos dados. O ângulo de 900º (Figura 25a) situa-se do lado direito da hélice e apresenta seu ponto de máxima velocidade à direita. Já a posição 1440º (Figura 25b) está no lado esquerdo do tubo helicoidal. Pode-se observar, na Figura 25, que as curvas das malhas 04, 05 e 06 são praticamente coincidentes. Optou-se, então, pela malha 04 em virtude da mesma apresentar o menor número de elementos e fornecer o mesmo resultado. A malha 04, que possui 1.012.162 nós, é suficiente para obter uma solução independente da malha numérica e foi então a malha utilizada nas demais simulações da seção 3.2.2.

Tabela 12 - Número de elementos e nós das malhas testadas

Malha	Número de elementos	Números de nós
04	973.800	1.012.162
05	1.893.500	1.967.562
06	2.705.000	2.810.562

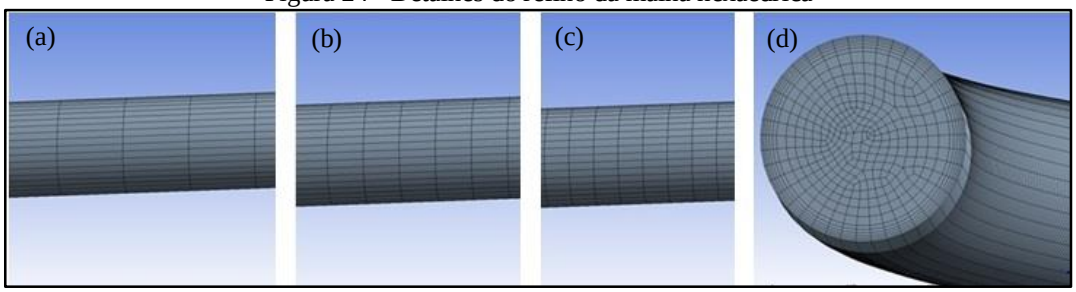
Fonte: elaborada pela autora (2015).

A modelagem, as condições de contorno, as propriedades dos fluidos e as especificações numéricas das simulações encontram-se resumidas na Tabela 13.

Tabela 13- Condições de contorno, as propriedades dos fluidos e as especificações numéricas

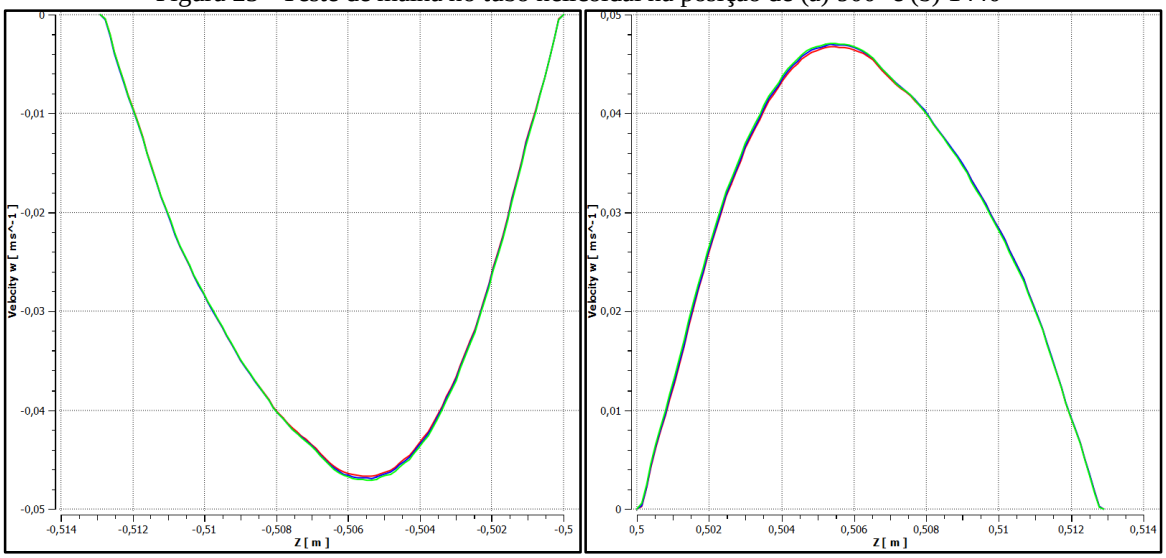
Tipo de *Solver*	Baseado na Pressão
Simulação da Velocidade	Absoluta
Regime de Tempo	Pseudo-Transiente
Gravidade	Ativa
Aceleração da Gravidade	x = 0 m/s^2; y = -9,81 m/s^2; z = 0 m/s^2.
Abordagem multifásica	Multifásico: Euleriano – Fases 1: água+sal – Fase 2:óleo – Diâmetro: 5 ou 10 ou 50 µm.
Modelo de Turbulência	Viscoso: Tensores de Reynolds (7eqn) - Mistura
Material - fluido	Água+sal - densidade = 1026 kg/m^3 - Viscosidade = 0,0044 kg/m.s
	Óleo - densidade = 882,5 kg/m^3 - Viscosidade = 0,108 kg/m.s
Regiões	líquida – Tipo: fluida – Fase 1 e Fase 2
Condições de contorno	Tipo
entrada	velocity-inlet = 1,69 m/s (Fase 1 e Fase 2)
interior	líquido = (Fase 1 e Fase 2)
saída	*pressure-outlet* = 0 Pa.
parede	Estacionária e com aderência (Fase 1 e Fase 2)
Métodos de Solução	
Acoplamento Pressão Velocidade	*Coupled*
Discretização Espacial – esquemas de interpolação	
Gradiente	*Least Squares Cell Based*
Momento	*First Order Upwind*
Fração Volumétrica	*First Order Upwind*
Energia Cinética Turbulenta	*First Order Upwind*
Taxa de Dissipação Turbulenta	*First Order Upwind*
Tensores de Reynolds	*First Order Upwind*
Método de Inicialização	Padrão

Figura 24 - Detalhes do refino da malha hexaédrica



Fonte: elaborada pela autora (2015).

Figura 25 - Teste de malha no tubo helicoidal na posição de (a) 900º e (b) 1440º



(a) (b)

Fonte: elaborada pela autora (2015).

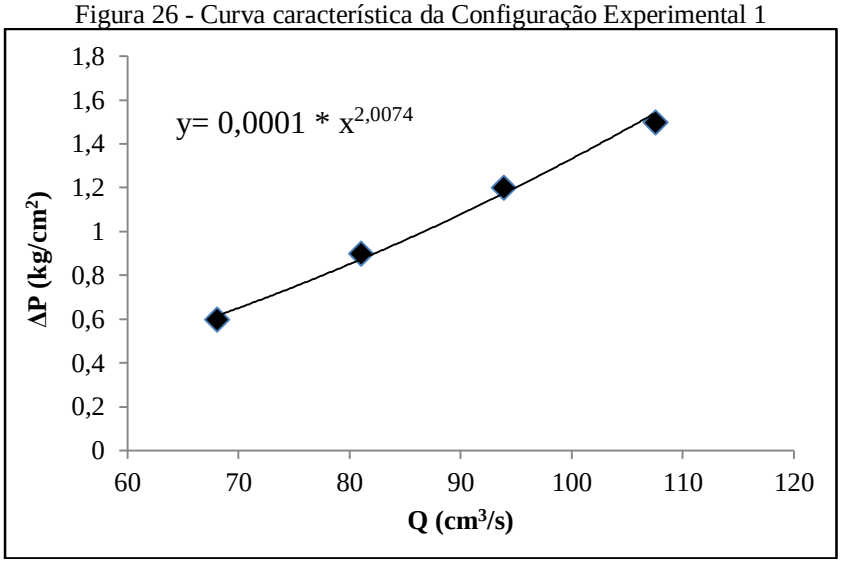
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos experimentos e das simulações realizados, serão apresentados e discutidos nesta seção.

4.1 Experimentos com Configuração Experimental 1

Alguns equipamentos apresentam uma curva característica obtida pela relação de queda de pressão e vazão. O STH desta Tese apresenta na Figura 26 sua curva característica: gráfico de queda de pressão versus vazão de entrada. Deste, é possível obter a equação que prevê o comportamento dos valores nesta faixa trabalhada, podendo ser extrapolada para valores inferiores e superiores. Conforme esperado em um tubo, tem-se que a perda de carga é proporcional à vazão de entrada ao quadrado. Estes dados foram obtidos no separador tubular helicoidal com 10 voltas.

Figura 26 - Curva característica da Configuração Experimental 1



Fonte: elaborado pela autora (2015).

A Tabela 14 apresenta os dados experimentais referentes aos experimentos feitos para se obter a curva característica, além do número de Reynolds e de Dean para os quatro pontos obtidos. Cada experimento foi realizado três vezes (triplicata), de modo que se considerou a queda de pressão e vazão médias.

Tabela 14 - Experimentos com variação da diferença de pressão vazão e velocidade de entrada, número de Reynolds e de Dean, na configuração experimental 1.

ΔP (kg/cm^2)	**coleta**	**Q (cm^3/s)**	**<V> (m/s)**	**Re**	**De**
1,5	1	108,62	0,82	2476,42	279,33
	2	107,08			
	3	106,94			
1,2	1	94,99	0,72	2162,42	243,91
	2	92,82			
	3	93,92			
0,9	1	80,09	0,62	1866,08	210,49
	2	81,38			
	3	81,64			
0,6	1	66,91	0,52	1567,46	176,80
	2	68,64			
	3	68,67			

Fonte: elaborado pela autora (2015).

A influência do número de voltas na eficiência de separação está apresentada na Tabela 15, onde os experimentos foram feitos a 1,2 kg/cm^2, implicando em Re= 2162,42, Re_{crit}= 4962,17e De= 243,91, ambos dentro da faixa esperada para haver separação (Re_{crit}< 8000 e De< 5000).

Tabela 15 - Dados obtidos variando o número de voltas: TOG em cada saída (S1 e S2) eficiência da configuração experimental 1

voltas	**Ponto de coleta**	**<TOG> (ppm)**	**E_T S2conc**
10º	S1	535,95	0,50
	S2	527,00	
9º	S1	2245,97	0,51
	S2	2235,36	
8	S1	1858,88	0,51
	S2	1896,04	
7	S1	3108,70	0,52
	S2	3236,55	
6	S1	747,11	0,53
	S2	827,64	
5	S1	2218,07	0,51
	S2	2259,79	

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Pode-se observar, na Tabela 15, que a eficiência de separação está muito baixa e praticamente não varia com o número de voltas, não justificando a utilização de muitas voltas.

Assim, os próximos experimentos, bem como as simulações numéricas foram feitas para 5 voltas. Ainda na Tabela 15, percebe-se que não há uma regularidade de comportamento no que se refere ao TOG das saídas S1 e S2, para que se pudesse chamar uma de concentrado e a outra de diluído. Nos experimentos com 10 e 9 voltas, foi observado que a saída S1 era a concentrada. Nos experimentos com 8, 7, 6 e 5 voltas, a saída S2 apresentou maior valor de TOG. Isso confirma a dificuldade de definir qual o comportamento de cada corrente e corrobora com a baixa eficiência total de separação. Observa-se então que o tubo helicoidal está atuando como um divisor de correntes e não um separador bifásico, já que não há saída apresentando característica de concentrado e de diluído.

Pode-se ressaltar que a temperatura da água + sal, não sofreu alteração, permanecendo na faixa 30 ± 1ºC. Em contrapartida, a temperatura do Tanque APSM manteve-se numa faixa de 42 ± 8ºC. Estas variações, são devido ao fato da planta de trabalho estar localizada na área externa do Laboratório de Tecnologias Alternativas (LTA/NUPETRO/UFS), com incidência direta de raios solares, e também pelo cisalhamento promovido pelas bombas. Esses dados estão apresentados no Apêndice B.

A hipótese que explica o ocorrido é que pode ter havido retenção de óleo na parte interna do tubo devido à ter-se usado petróleo sem nenhum aditivo químico. Além disso, a mistura formada não foi bem controlada, por não haver ponto de amostra na entrada. Por fim, a mistura água+sal+petróleo pode também não ter sido devidamente agitada, por ter sido produzida apenas na junção das tubulações provenientes dos tanques que armazenavam a solução água+sal e água produzida sintética mãe (Tanque APSM).

4.2 Experimentos com Configuração Experimental 2

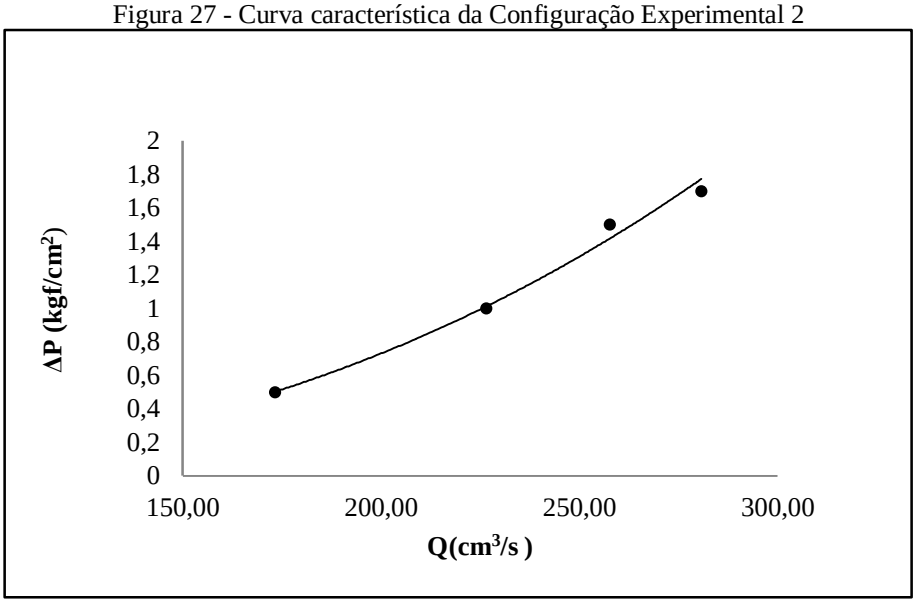
Para este novo equipamento, também foi construída a curva característica, queda de pressão versus vazão, cujos dados experimentais estão apresentados na Tabela 16 e os resultados resumidos na Figura 27. O perfil obtido indica que a perda de carga é proporcional à vazão de entrada elevada a 2,6, o que é moderadamente diferente da potência esperada para um tubo, onde a potência deveria ser 2. Porém, uma vez que este é um tubo helicoidal, o resultado é aceitável e não é improvável. Vale ressaltar que a distância entre as voltas nesta configuração é de 0,2 m. Na configuração anterior, com H_c= 0,1 m, a potência obtida foi de 2, indicando que a distância entre as voltas afeta a curva característica.

Tabela 16 - Valores dos números de Reynolds e Dean da Configuração Experimental 2

ΔP (kg/cm^2)	Q (cm^3/s)	V (m/s)	Re	De
0,50	173,38	1,69	5083,23	572,53
1,00	226,62	2,21	6644,18	748,34
1,50	257,77	2,51	7557,32	851,18
1,70	280,75	2,74	8231,14	927,08

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Figura 27 - Curva característica da Configuração Experimental 2



Fonte: elaborado pela autora (2015).

Caracterizado o equipamento, o Planejamento Experimental foi executado para se estudar a influência da distância entre as voltas. Na Tabela 17, encontram-se resumidos os parâmetros geométricos e operacionais e as eficiências total e reduzida de separação, associada a cada experimento.

Foram feitas triplicatas de todos os experimentos. Vale ressaltar que a temperatura no Tanque 1, que armazena a mistura água+sal+óleo, imediatamente antes de iniciar cada experimento, foi de 37,3 ± 3,7ºC. Ao fim de cada experimento, a temperatura neste tanque estava em 41,6 ± 0,6ºC. No final de cada experimento, a temperatura do Tanque de Saída era de 37,3 ± 1,7ºC e do ambiente de 29,6 ± 0,4ºC. Todas as temperaturas estão expostas no Apêndice C. Esta diferença encontrada deve-se ao fato de as bombas, tanto de agitação como de elevação, naturalmente aquecerem os fluidos que passam por elas.

Tabela 17 - Parâmetros geométricos e operacionais com as respectivas Eficiências Total e Reduzida da Configuração Experimental 2

Exp	H_c (m)	P (kgf/cm^2)	p_c (m)	τ	λ	ϕ	Re	De	Gn	E_T (%)	E'_T (%)
1	0,15	0,5	0,024	0,094	0,047	0,047	5083,23	573,02	3,00	54,7	9,5
2	0,25	0,5	0,040	0,157	0,079	0,079	5083,23	571,894	5,02	50,9	1,9
3	0,15	1,5	0,024	0,094	0,047	0,047	7557,32	851,917	3,00	51,5	2,9
4	0,25	1,5	0,040	0,157	0,079	0,079	7557,32	850,243	5,02	52,8	5,5
5	0,20	1,0	0,032	0,125	0,063	0,063	6644,178	748,336	4,01	51,7	3,4
6	0,20	1,0	0,032	0,125	0,063	0,063	6644,178	748,336	4,01	50,7	1,4

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Analisando a Tabela 17, pode-se observar que as eficiências de separação obtidas, ainda não são satisfatórias, porém são melhores que aquelas obtidas com a configuração 1. Claramente, para H_c= 0,15m e P= 0,5 kgf/cm^2, que fornece o menor Re e Gn segundo menor De trabalhado (sendo este De muito próximo ao menor De), obteve-se a melhor eficiência de separação.

Deve-se comentar que a melhora nos resultados da Configuração Experimental 2 está associada às várias modificações, citadas na Metodologia, especificamente na seção 3.1.2.1.

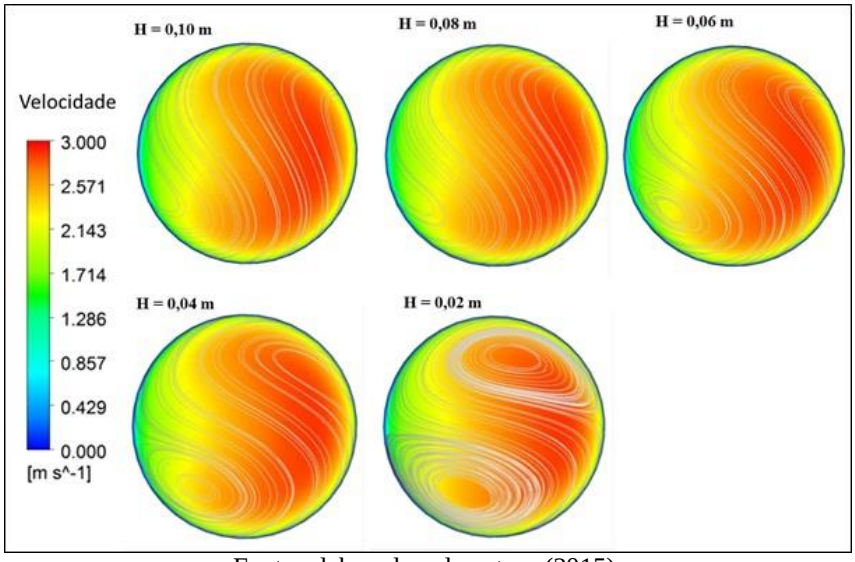
4.3 Simulações para Estudo da Torção

Nestas simulações, a velocidade do fluido foi mantida constante (2,414 m/s) e não houve alteração nos números de Reynolds (tanto o convencional quanto o crítico). A alteração da distância entre as voltas (H_c) exerceu influência apenas nos números de Dean e de Germano. O número de Reynolds (Re) foi de 30.940, considerado escoamento turbulento. Foi realizada desta maneira, somente com a variação de um parâmetro geométrico, com o objetivo de visualizar a formação do escoamento secundário.

A Figura 28 apresenta as linhas de corrente e os contornos de velocidade axial. Pode-se perceber a formação de dois vórtices em direções opostas para os menores valores de distância entre as voltas (H_c= 0,02 m), o que é consistente com ter-se obtido experimentalmente melhor eficiência de separação para o menor H_c da Configuração Experimental 2. Essa recirculação é responsável pela separação de líquidos com densidades aparentes diferentes. Percebe-se que a mudança na torção influencia no campo de ação da força centrífuga, já que os perfis de escoamento secundário em geometrias helicoidais dependem da diferença de momento axial. Os contornos de velocidade apresentam a mesma forma em todos experimentos, com a região

de mais alta velocidade no lado direito da imagem que equivale à parede externa do separador tubular helicoidal.

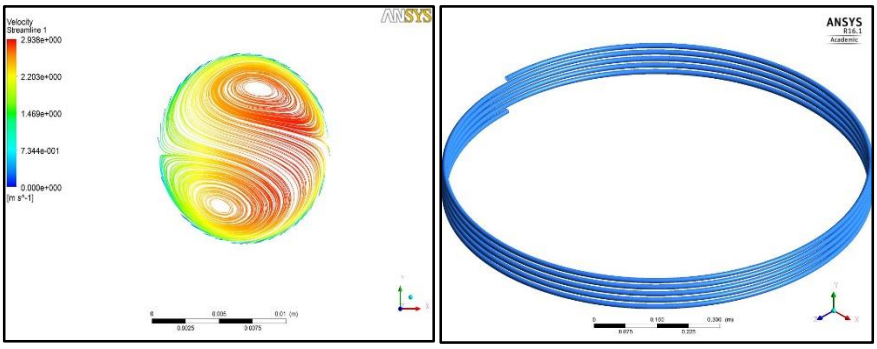
Figura 28 - Linhas de corrente e contornos de velocidade dos experimentos



Fonte: elaborado pela autora (2015).

Na Figura 29 (a) e (b) destaca-se o caso em que formou-se mais fortemente os escoamentos secundários, apresentando a geometria com H_c = 0,02m. Os dois vórtices são opostos diametralmente e giram em direção contrária.

Figura 29 - Linhas de corrente coloridas com velocidade axial e hélice com H=0,02m



(a) (b)

Fonte: elaborado pela autora (2015).

4.4 Simulações para Reprodução de Experimento

Essas simulações reproduziram o experimento 1 da Tabela 17, o qual apresentou a melhor eficiência de separação experimental. Nas simulações, realizadas com a abordagem multifásica euleriana, variou-se o tamanho das gotas de óleo.

Para todas as simulações o balanço de massa foi fechado, a equação da continuidade convergiu com resíduo RMS menor que 10^{-4} e as demais equações de conservação, com resíduo menor que 10^{-6}.

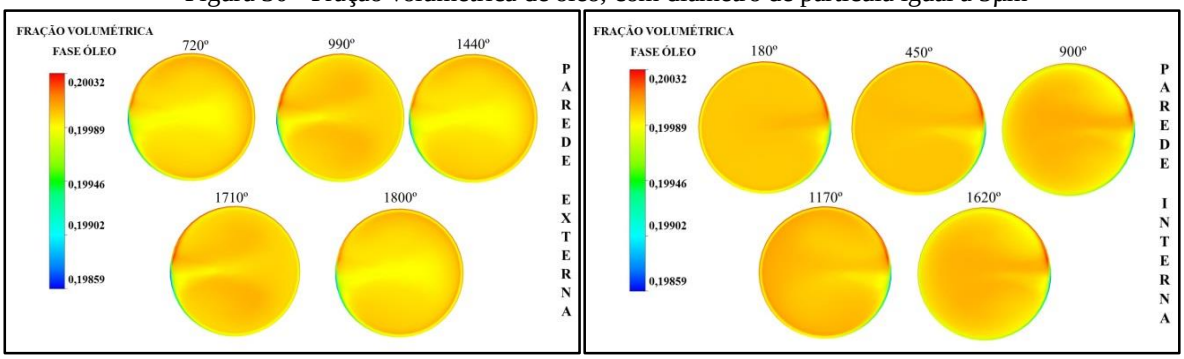
Nas Figuras 30 (a) e (b), 31 (a) e (b) e 32 (a) e (b), estão apresentados os perfis de fração volumétrica de óleo nas posições indicadas na Figura 21, para os tamanhos de gota de 5, 10 e 50 µm, respectivamente.

Pode-se observar que os perfis praticamente não variam com o aumento do número de voltas e que não está havendo separação, pois a fração volumétrica de óleo está em torno de 20% do valor de entrada do separador helicoidal, em todo o plano, de forma quase homogênea.

Pode-se notar que há uma ligeira tendência à concentração, conforme se aumenta o tamanho da gota, pois na Figura 32 (a) e (b), observa-se que há algumas regiões com fração volumétrica em 22% e outras com 16%.

Essa simulação não conseguiu reproduzir o resultado experimental, que apresentou eficiência total de separação de 54%. Porém, uma vez que esta eficiência é muito próxima de 50%, que seria simplesmente um divisor de fluxo, pode-se considerar que a simulação está consistente com o experimento.

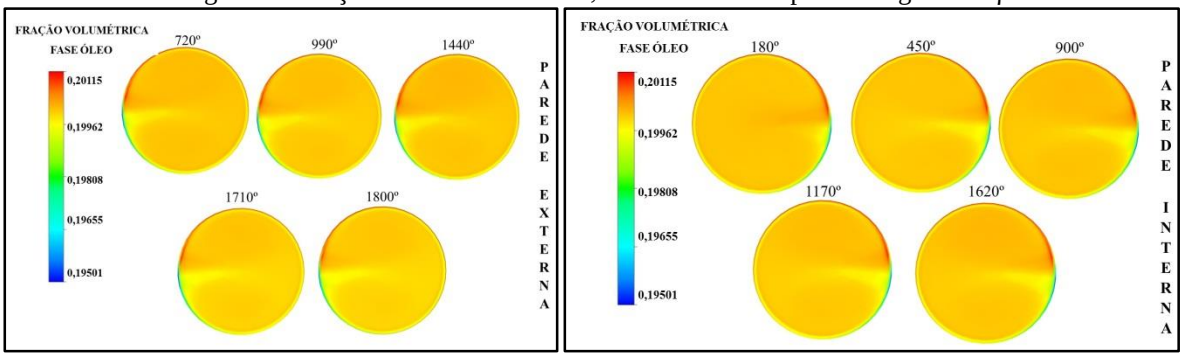
Figura 30 - Fração volumétrica de óleo, com diâmetro de partícula igual a 5µm



(a) (b)

Fonte: elaborado pela autora (2015).

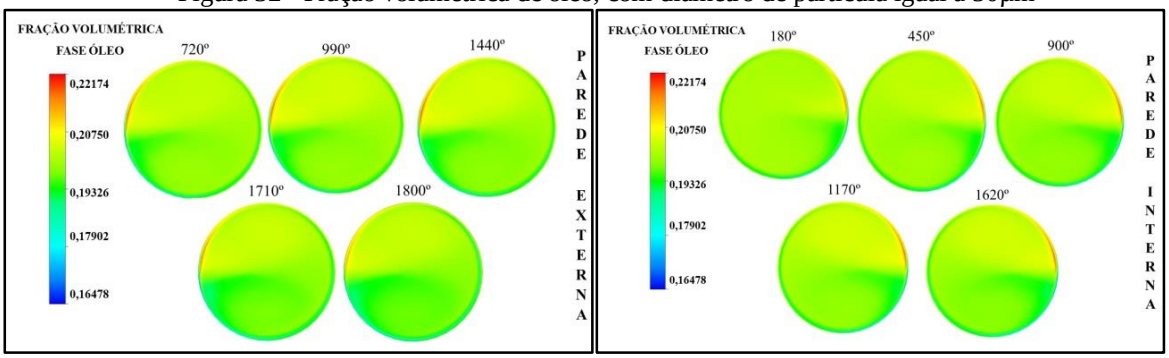
Figura 31 -Fração volumétrica de óleo, com diâmetro de partícula igual a 10µm



(a) (b)

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Figura 32 - Fração volumétrica de óleo, com diâmetro de partícula igual a 50µm

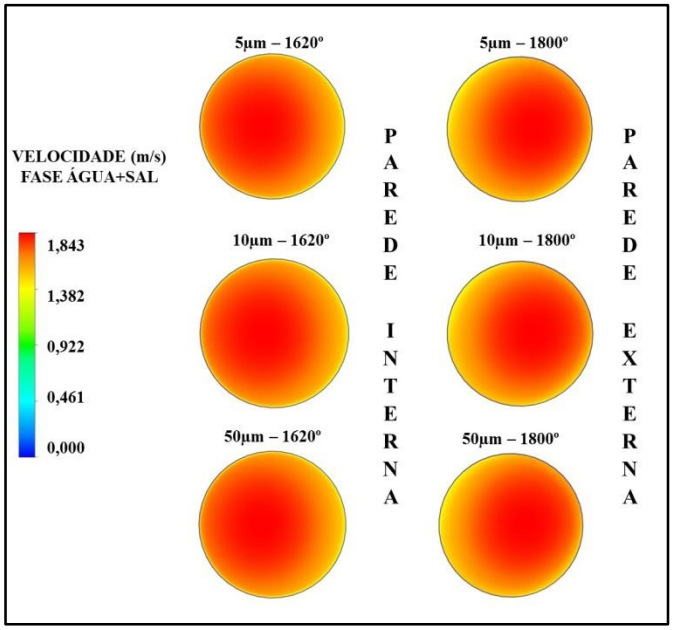


(a) (b)

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Na Figura 33, pode-se ver o perfil de velocidade na última volta do tubo helicoidal, que compreende as posições 1620º e 1800º da Figura 21. Conforme esperado, a velocidade máxima encontra-se na parede externa. Porém, há uma grande região com velocidade alta, indicando pouca torção do escoamento, o que é consistente com a distância entre as voltas H_c = 0,15m, utilizada na simulação.

Figura 33 - Perfis de velocidade na última volta do tubo helicoidal, nos vários diâmetros simulados.



Fonte: elaborado pela autora (2015).

Todos os resultados obtidos expandem os horizontes no sentido da aplicação de um novo equipamento no tratamento de efluentes líquidos. Apesar de não se obter significativos resultados de eficiência de separação, nas condições executadas, dos experimentos e simulações, a partir deste estudo - duas configurações experimentais, dois tipos de óleo testados, várias formas da agitação para a preparação da emulsão água-óleo, aqui denominada água produzida sintética, dois testes de malha com disposições diferentes de elementos tetraédricos,

hexaédricos e prismáticos, apresentação de um planejamento experimental na forma de experimentos avaliando a eficiência de separação e simulações apresentando distribuição radial da fração volumétrica de óleo - adquire-se novas indicações para seguir com outros experimentos. Sem dúvidas, a ciência disporá de um novo equipamento, o Separador Tubular Helicoidal, que terá objetivo de contribuir para a preservação do meio ambiente.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo inicial para o desenvolvimento de um separador tubular helicoidal para o tratamento da água oleosa, oriunda da indústria de petróleo, com o intuito de reuso deste efluente, através de experimentos e simulações numéricas com fluidodinâmica computacional.

A revisão bibliográfica realizada forneceu parâmetros adimensionais e faixas operacionais, os quais serviram de base para a realização deste trabalho. As características operacionais e geométricas foram definidas, com o objetivo de garantir o escoamento lento e, consequentemente, a ocorrência do escoamento secundário, principal responsável pela separação da água oleosa no separador tubular helicoidal em desenvolvimento.

Com os experimentos, foi possível perceber a influência da distância entre as voltas na curva característica do equipamento, bem como a influência do tipo de mistura utilizada. Notou-se que há uma tendência ao aumento da eficiência de separação com a redução da distância entre as voltas e números de Reynolds (Re), Dean (De) e Germano (Gn) baixos.

A configuração experimental 2 mostrou-se mais adequada para a avaliação da separação de água oleosa em separador tubular helicoidal, incluindo a nova saída em Y, o arranjo dos tanques e das bombas e a própria mistura, utilizando óleo mineral lubrificante.

Nas simulações, apresentadas no item Estudo da Torção, na Figura 28, há o indicativo de que para o menor valor de distância entre as voltas (H = 0,02 m), tem-se a formação de dois vórtices em direções opostas, que indica o escoamento secundário. Essa recirculação é responsável pela separação de líquidos com densidades aparentes diferente. No item Reprodução de Experimento não foi realizada a observação da eficiência de separação nos dados simulados, optou-se por observar a distribuição radial da fração volumétrica de óleo e variar o tamanho médio de gota.

Os resultados obtidos com a simulação numérica foram consistentes com os dados experimentais obtidos, indicando que a modelagem utilizada está coerente. Houve também uma ligeira indicação de que maiores tamanhos de gota favorecem a separação do óleo, o que é esperado uma vez que o processo de separação é favorecido quando as partículas são maiores. Neste trabalho, a variação no tamanho das partículas foi efetuada de modo a encontrar qual valor se aproximaria mais dos dados experimentais, uma vez que não foi feita uma caracterização do tamanho das gotas nos experimentos.

Há uma série de investigações ainda necessárias, parte delas já em andamento, para efetivamente alcançar a geometria ideal do separador tubular helicoidal para a separação de água oleosa.

Dentre as propostas de trabalhos futuros, pode-se citar um Planejamento Experimental mais completo, englobando outras faixas do Número de Dean e Germano e possivelmente Reynolds. Esses experimentos devem ser inicialmente realizados em laboratório de modo a se obter eficiências de separação significativas. Com a geometria encontrada, pode-se fazer um novo Planejamento Experimental Computacional (CFD), objetivando otimizar a eficiência de separação, com auxílio da Fluidodinâmica Computacional, para simulações bifásicas, tendo como fase contínua água+sal e, fase dispersa gotículas de óleo, com características similares às deste trabalho. Além disso, o estudo nas simulações bifásicas dos diâmetros das gotas da fase dispersa de óleo pode ser útil, sendo interessante a utilização de uma distribuição de tamanho típico, ou de preferência, obtida experimentalmente.

Assim, conclui-se que este trabalho apresentou um resultado novo na literatura científica trazendo a utilização de tubos helicoidais para separação de água oleosa, contribuindo para a pesquisa acadêmica, para o desenvolvimento de um equipamento que possa vir a ser utilizado na indústria e contribuirá para a preservação do meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGRAWAL, S.; NIGAM, K. D. P. Modelling of a coiled tubular chemical reactor. **Chemical Engineering Journal**. V. 84, n. 3, p. 437-444, 2001.

ALAM, M. M.; OTA, M.; FERDOWS, M.; ISLAMV, M. N.; WAHIDUZZAMAN, M., YAMAMOTO, K. Flow through a rotating helical pipe with a wide range of the Dean number. **Arch. Mech**., 59, 6, pp. 501–517, Warszawa 2007.

ALVES, J. V. B.; **Hidrociclone para a Separação do Óleo Residual de Água em Refinarias**, Rio de Janeiro, 2012, 90f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

BERGER, S. A.; TALBOT, L.; YAO, L. S., Flow in curved pipes. **Ann. Rev. Fluid Mech**. V. 15, p. 461-512, 1983.

BHAGAT, A. A. S., KUNTAEGOWDANAHALLI, S. S., PAPAUTSKY, I. Continuous particle separation in spiral microchannels using dean flows and diferential migration. The Royal Society of Chemistry, **Lab on a Chip**, v. 8, 1906-1914, 2008.

BOLINDER, C. J.; SUNDEN, B. Flow visualization laminar and LDV measurements of laminar flow in a helical square duct with finite pitch. **Experimental Thermal an Fluid Science** V. 11, p. 348-363, 1995.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Prentice Hall, 2005.

CARISSIMI, E. **Reator Gerador de Flocos - RGF**: concepção e desenvolvimento básico. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

CARISSIMI, E. **Desenvolvimento de um Reator Gerador de Flocos** - RGF: aspectos teóricos e aplicações no tratamento e reuso de águas e efluentes. Tese (Doutorado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

CARVALHO, P. C. A. P. **Caracterização de água produzida na indústria de petróleo para fins de descarte e otimização do processo de separação óleo/água**. Natal, 2011, 122 f. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011.

COELHO, D. B. **Desempenho de um hidrociclone para separação de águas oleosas**. Natal, 2011.52 f. Monografia (Graduação) Departamento de Engenharia Química. Centro de Tecnologia. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2011.

COSTA, G. G. O. **Um procedimento inferencial para análise fatorial utilizando as técnicas Bootstrap e Jackknife**: construção de intervalos de confiança e testes de hipóteses. – Rio de Janeiro PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006. 196 f.; 30 cm. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

COULSON, J. M., RICHARDSON, J. F. **Tecnologia Química**. 2ªed. Vol. III. Lisboa: Calouste Gulbenkian, 1982. Tradução de C. Ramalho Carlos.

CUMMING, I. W.; HOLDICH, R. G.; SMITH, I. D.; The rejection of oil by microfiltration of a stabilised kerosene/water emulsion, **Journal of Membrane Science**, vol. 169, p. 147-155, 2000.

CURBELO, F. D. S. **Estudo da Remoção de Óleo em Águas Produzidas na Indústria de Petróleo, por Adsorção em Coluna Utilizando a Vermiculita Expandida e Hidrofobizada**. Natal, 2002, 102f. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química, Natal – RN, 2002.

DEAN, W. R. Fluid Motion on a Curved. **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A v. 121, n. 787, p. 402–420, 1928.

DEAN, W. R. Note on the slow motion of fluid. **Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society.** p. 598-613, 1936.

EUSTICE, J. Flow of Water in Curved Pipes. **Proceedings of the Royal Society of London**, v. 84. n. 568. p. 107-118, 1910

EUSTICE, J. Experiments on Stream-Line Motion in Curved Pipes. **Proceedings of the Royal Society of London,** v. 85. n. 576. p. 119-131, 1911.

FAKHRU-RAZI, A.; ALIZERA, P.; LUQMAN, C. A.; DAYANG. R. A. B.; SAYED, S. M.; ZURINA, Z. A. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. **Journal of Hazardous Materials.** v.170, p. 530-551, 2009.

FALCÃO, M. V. S. **Análise de Vazamento de Óleo em Águas a Grandes Profundidades** : um Estudo com Fluidodinâmica Computacional. Rio de Janeiro, 2015 101 f. (Monografia) – Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.

FERNG, Y. M., LIN, W. C., CHIENG, C.C. Numerically investigated effects of different Dean number and pitch size on flow and heat transfer characteristics in a helically coil-tube heat exchanger. **Applied Thermal Engineering** v.36 p. 378-385, 2012.

FONTES, C. E.; SILVA, L. F. L. R.; LAGE, P. L. C.; RODRIGUES, R. C. **Introdução a Fluidodinâmica Computacional**. Escola Piloto Virtual. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia (COPPE). Programa de Engenharia Química (PEQ). Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). 2005.

FORTUNA, A. O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos**. São Paulo: Editora da Universidade Federal de São Paulo, 2000.

FOX, R. W.; MACDONALD, A. T. **Introdução à Mecânica dos Fluidos**. 4ª ed. LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., Rio de Janeiro. p.662 1998.

FRANCESCHINI, G., MACCHIETTO, S. Model-based design of experiments for parameter precision: State of the art. **Chemical Engineering Science**. v. 63. p. 4846 – 4872, 2008.

FREITAS, A. G. B., **Modelagem e simulação do tratamento de água oleosa usando hidrociclone**. Dissertação de Mestrado. Núcleo de Pós-Graduação em Engenharia Química. Universidade Federal de Sergipe. São Cristóvão, 2009.

GERMANO, M. On the effect of torsion on a helical pipe flow. **Journal of Fluid Mechanics**. p. 1-8, 1982.

GERMANO, M. The Dean equations extended to a helical pipe flow. **Journal of Fluid Mechanics**, v. 203, p. 289-305, 1989.

GERMANO, M. Turbulence: the filtering approach. **Journal of Fluid Mechanics**. v. 238. p. 325-336, 1992.

GUPTA, R., WANCHOO, R. K., JAFAR ALI, T. R. M. Laminar Flow in Helical Coils: A Parametric Study. **Ind. Eng. Chem. Res**. v.50. p, 1150–1157, 2011.

HUTTL, T. J.; FRIEDRICH, R. Numerical simulation of turbulent flows in curved and helically coiled pipes. **Computers & Fluids**. v. 30. p. 591-605, 2001.

ISLABÃO, G. I. **Estudo em CFD de polimerização em reator tubular**. Rio de Janeiro, 2011. 147p. Tese (doutorado em Química) - Instituto Militar de Engenharia.

KLEIN, T. S. **Estudo de um Novo Modelo de Turbulência**. (Dissertação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, p. 204.2007.

KO, T. H.; TING, K. Optimal Reynolds number for the fully developed laminar forced convection in a helical coiled tube. **Energy** v. 31, n. 12, p. 2142-2152, 2006.

KONG, J., LI, K.; Oil removal from oil-in-water emulsions using PVDF membranes. **Separation and Purification Technology**, vol. 16, p. 83-93, 1999.

MALALASEKERA, W. e VERSTEEG, H.K. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics** – The Finite Volume Method. Longman Group Ltd, England, 1995.

McCONALOGUE, D. J.; SRIVASTAVA, R. S. Motion of a fluid in a curved tube. **Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences** v. A 307, p. 37–53, 1968.

MOLL, R.; VEYRET, D., CHARBIT, F., MOULIN, P. Dean vortices applied to membrane process. Part I: Experimental approach. **Journal of Membrane Science** v. 288, n. 1-2, p. 307–320, 2007a.

MOLL, R. VEYRET, D., CHARBIT, F., MOULIN, P. Dean vortices applied to membrane process. Part II: Numerical approach. **Journal of Membrane Science** v. 288, n. 1-2, p. 321–335, 2007b.

MOTA, F. R. M**. Contribuições para o Desenvolvimento de um Sistema de Medição Multifásica com Estágio de Separação Parcial**. Florianópolis, 2011. 250 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Automação e Sistemas). Universidade Federal de Santa Catarina.

MOTA, F. R. M. da, PAGANO, D. J. Simulation and Experimental Study of Phase Segregation in Helical Pipes: a new method for flow conditioning. **Flow Measurement and Instrumentation**. v.35, p.99–108, 2014.

OLIVEIRA, D. S. **Avaliação da eficiência de remoção de turbidez em função de variações no comprimento de floculadores tubulares helicoidais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2008. 116 f.

OLIVEIRA, J. F., GONZALEZ, G., OLIVEIRA, R. C. G.; Interfacial studies on dissolved gas flotation of oil droplets for water purification, Colloids and Surfaces: **Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 154, p. 127-135, 1999.

PELISSARI, L. M. T. **Influência de parâmetros de projeto no desempenho do floculador tubular helicoidal aplicado ao tratamento de água de abastecimento**. Vitória, 2006. 119f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo.

POTTER, M. C.; SCOTT, E. P., **Ciências Térmicas: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor**. Thomson Learning, São Paulo, 2007.

REGO, F. C. A. **Estudo do Hidrociclone Cilíndrico de uma Unidade de Flotação Centrífuga com Auxílio de Fluidodinâmica Computacional**. Rio de Janeiro, 2008. 107f. Dissertação (Mestrado em Ciências) Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.

RESOLUÇÃO CONAMA N 393, 8 de agosto de 2007. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). Diário Oficial. 2007

RIBEIRO, G. A. S. M., LOPES, G., VALE, O. R., FRANÇA, F. A., ROSA, E. S., PRADO, M. G. Petróleo S/A – Petrobrás. **Separador Helicoidal Aperfeiçoado**. Brasil nº PI9704499-7A. 07 dez 1999.

SARTORI, M. **Caracterização Hidrodinâmica de Floculadores Tubulares Helicoidais por Meio de Simulação Numérica Tridimensional**. Vitória, 2006.106 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo.

SCHWAAB, M., PINTO, J.C., **Análise de Dados Experimentais II**. Planejamento de Experimentos. Rio de Janeiro, E-Papers, 2011.

SCHWAAB, M. **Desenvolvimento e Implementação de Novas Técnicas de Estimação de Parâmetros e Planejamento Sequencial de Experimentos**. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Tese de Doutorado, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, R. C. **Avaliação da influência da geometria e dinâmica do escoamento de floculadores helicoidais na redução de turbidez utilizando modelagem física**. PPGEA. 2007.

SILVEIRA NETO, A. **Turbulência nos Fluidos Aplicada**. Uberlândia, 156 p. Trabalho não publicado, 2003.

TAYLOR, G. I. The criterion for turbulence in curved pipes. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A** v. 124, n. 794, p. 243–249, 1929.

WHITE, C. M. Streamline flow through curved pipe. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character**, v. 123, n. 792, p. 645–663, 1929.

XIE, D. G. Torsion effect on secondary flow in a helical pipe. **Int. J. Heat and Fluid Flow**, Vol. 11, nº 2, p. 114-119, 1990.

YAMAMOTO, K.; YANASE, S.; YOSHIDA, T. Torsion effect on the flow in a helical pipe. **Fluid Dynamics Research** v.14, p. 259-273, 1994.

YAMAMOTO, K.; ALAM, M. M.; YASUHARA, J.; ARIBOWO, A. Flow through a rotational helical pipe with circular cross-section. **International Journal of Heat and Fluid Flow**. v. 21, p. 213-220, 2000.

YAMAMOTO, K.; ARIBOWO, A.; HAYAMIZU, Y.; HIROSE, T.; KAWAHARA, K. Visualization of the flow in a helical pipe. **Fluid Dynamics Research** V. 30. p. 251-267, 2002.

YANG, G., DONG, Z. F., EBADIAN, M. A. Laminar forced convection in a helicoidal pipe with finite pitch. **Int. J. Heat Transfer**. v. 38, n.5, p. 853-862, 1995.

YU, B.; ZHENG, B.; LIN, C. X.; PEÑA, O. J.; EBADIAN, M. A. Laser Doppler anemometry measurements of laminar flow in helical pipe. **Experimental Thermal and Fluid Science** V. 27 p. 855-865, 2003.

ZHANG, J.; GUO, J.; GONG, D.-T.; WANG, L.-Y.; TANG, C.; ZHENG, Z.-C. An investigation on oil/water separation mechanism inside helical pipes. **Journal of Hydrodynamics**, Ser. B, Volume 18, Issue 3, Supplement 1, Pages 343-347, July 2006.

ZHANG, J., ZHANG, B. Fluid Flow in a helical pipe. **Acta Mechanica Sinica** (English Series), v.15, n.4, p. 299-312, 1999.

ZHAO, L., XU, L., HUA Z., MA, Z., CAO, H. Numerical Simulation and Experimental Study on Helical Pipe Oil-Water Separator for Deoiling. **3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering (ICBBE)**. p.1-4, 2009.

ZHAO, L., XU, B., JIANG, M., LI, F., HUA Z. Flow-field distribution and parametric-optimization analysis of spiral-tube separators. **Chemical Engineering Research and Design**. v. 90, .p. 1011–1018, 2012.

APÊNDICES

APÊNDICE A - CONSTRUÇÃO DAS CURVAS PADRÕES

A.1-Preparo das Soluções Padrões (1000, 800, 600, 400, 200, 100, 50, 0 ppm de óleo):

a) Em um balão de 100 ml, diluir com clorofórmio 0,1000 g de petróleo, obtendo o padrão de 1000 ppm. Determinado como segue abaixo.

$$1000\ \text{ppm} = 1000\frac{\text{mg}}{\text{L}} \cdot \frac{1\text{g}}{1000\text{mg}} \cdot \frac{1\text{L}}{1000\text{ml}} \quad \text{(A.1)}$$

$$1000\ \text{ppm} = \frac{1\text{g}}{1000\text{ml}} \quad \text{(A.2)}$$

$$1000\ \text{ppm} = \frac{0{,}1\text{g}}{100\text{ml}} \quad \text{(A.3)}$$

b) Separar 6 balões volumétricos de 25ml e procede-se com a diluição. A Tabela A1 abaixo apresenta os volumes de solução padrão de 1000 ppm para a preparação das outras soluções padrões.

$$C_1 \cdot V_{1=} C_2 . V_2 \quad \text{(A.4)}$$

$$V_1 = \frac{C_2 . V_2}{C_1} \quad \text{(A.5)}$$

TABELA –A.1–Volumes da solução de 1000 ppm para preparar cada solução padrão.

Concentração (ppm)	Volume da solução de 1000 ppm (ml)
800	20
600	15
400	10
200	5
100	2,5
50	1,25
0	0

Fonte: elaborado pela autora (2015).

A.2-Construção da Curva Padrão: Solvente Tetracloroetileno

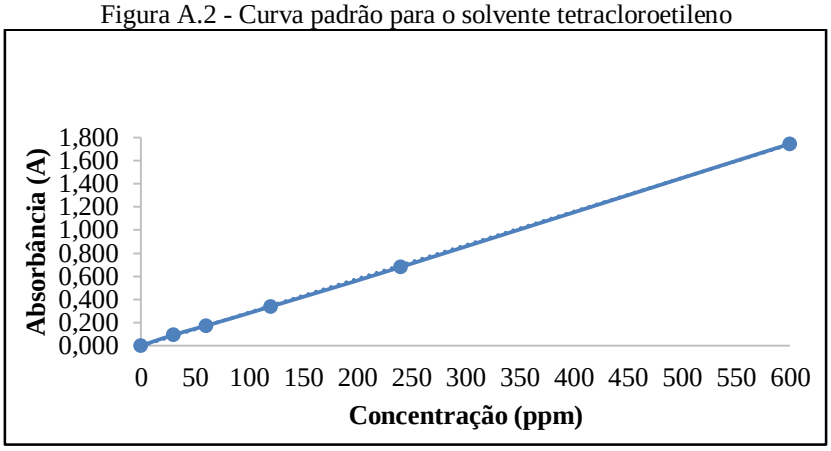
Foi utilizado o Espectrofotômetro Biospectro SP-220, para a leitura das absorbâncias no comprimento de onda igual a 400 nm. Na Tabela A.2 são demostradas as concentrações e suas respectivas leituras de absorbância, em seguida o gráfico, na Figura A.2 com os pontos desta tabela.

TABELA A.2 – Leitura das absorbâncias das soluções padrões preparadas, com tetracloroetileno

Concentração Padrão (ppm)	Absorbância (A)
0	0
240	0,680
120	0,339
60	0,173
30	0,095

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Figura A.2 - Curva padrão para o solvente tetracloroetileno



Fonte: elaborado pela autora (2015).

A.3-Construção da Curva Padrão: Solvente Clorofórmio

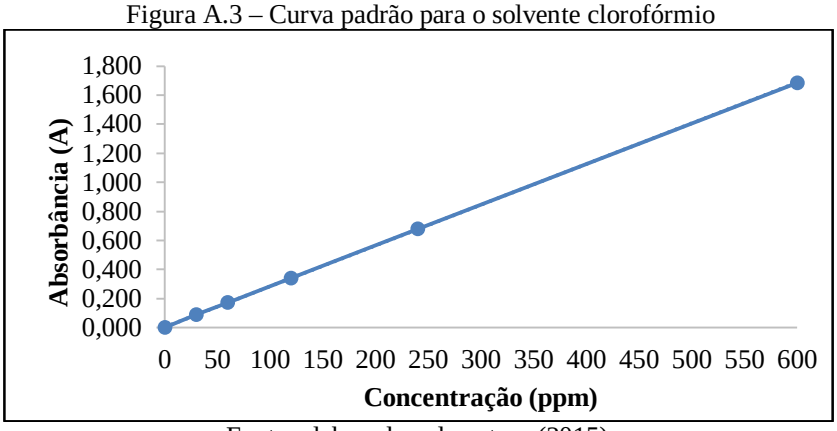
Separar 8 balões volumétricos de 25ml e procede-se com a diluição, conforme o item A.1, deste Apêndice. Foi utilizado o Espectrofotômetro Biospectro SP-220, para a leitura das absorbâncias no comprimento de onda igual a 400 nm. Na Tabela A.3 são demostradas as concentrações e suas respectivas leituras de absorbância, em seguida Figura A.3 apresenta a curva padrão para o solvente clorofórmio.

TABELA A.3 - Leitura das absorbâncias das soluções padrões preparadas com clorofórmio

Concentração Padrão (ppm)	Absorbância (A)
600	1,683
240	0,678
120	0,341
60	0,172
30	0,090
0	0

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Figura A.3 – Curva padrão para o solvente clorofórmio



Fonte: elaborado pela autora (2015).

A Equação A.6 foi obtida pela Curva padrão para o solvente clorofórmio, no comprimento de onda 400 nm.

$$y=0{,}0027x+0{,}0085 \qquad (A.6)$$

A.4-Construção da Curva Padrão: Solvente Hexano

Separar 8 balões volumétricos de 25ml e procede-se com a diluição, consoante a Tabela A.4, que apresenta os volumes de solução padrão de 1200 ppm para a preparação das outras soluções padrões. Para a solução padrão de 1.200 ppm, pesa-se 0,1200 g de petróleo OBA08052015 (Carmópolis - SE) para 100 ml de hexano.

TABELA A.4 – Volumes da solução de 1200 ppm para preparar cada solução padrão

Concentração (ppm)	Volume do padrão (mL)
1000	20,83
800	16,67
600	12,5
400	8,33
200	4,17
100	2,08
50	1,04
25	0,52
0 (Branco)	0

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Foi utilizado o Espectrofotômetro Biospectro SP-220, para a leitura das absorbâncias. Como o aparelho possui uma limitação de leitura de 2,500 para os valores de absorbância, optou-se por variar o comprimento de onda até que seja possível traçar a curva com todas as concentrações preparadas, inclusive, 1200 ppm.

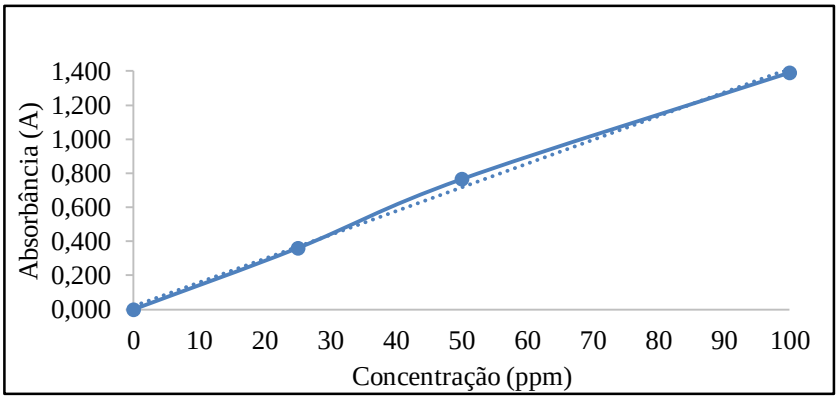
Para o comprimento de onda igual a 260 nm, as leituras foram até o padrão de 100 ppm, após essa concentração não houve mais leitura de absorbância. Na Tabela A.5 são apresentadas as leituras de absorbância das soluções padrão com hexano como solvente no comprimento de onda de 260 nm, em seguida a Figura A.5 com a curva padrão do hexano no comprimento de onda de 260 nm.

TABELA A.5 - Leituras de absorbância do hexano no comprimento de onda de 260 nm, para cada concentração padrão lida.

Concentração Padrão (ppm)	Absorbância (A)
400	2,500
200	2,500
100	1,391
50	0,765
25	0,360
0	0

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Figura A.5 - Curva padrão do hexano no comprimento de onda de 260 nm



Fonte: elaborado pela autora (2015).

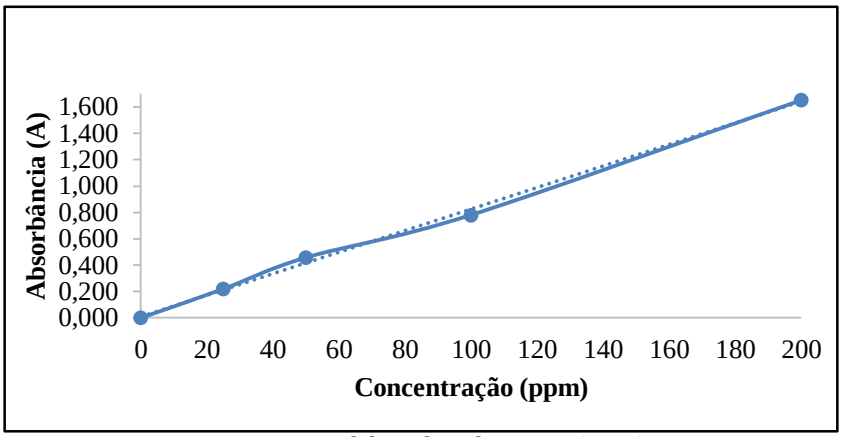
Para o comprimento de onda igual a 300 nm, as leituras foram até o padrão de 200 ppm, após essa concentração não houve mais leitura de absorbância. Na Tabela A.6 nota-se as leituras de absorbância das soluções padrão com hexano como solvente no comprimento de onda de 300 nm, em seguida a Figura A.6 com a curva padrão do hexano no comprimento de onda de 300nm.

TABELA A.6 - Leituras de absorbância das soluções padrão com hexano como solvente no comprimento de onda de 300 nm

Concentração Padrão (ppm)	Absorbância (A)
400	2,500
200	1,652
100	0,781
50	0,458
25	0,220
0	0

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Figura A.6 - Curva padrão do hexano no comprimento de onda de 300nm



Fonte: elaborado pela autora (2015).

Para o comprimento de onda igual a 400 nm, as leituras foram até o padrão de 1000 ppm, após essa concentração não houve mais leitura de absorbância. Na Tabela A.7 são mostradas as leituras de absorbância das soluções padrão com hexano como solvente no comprimento de onda de 400 nm.

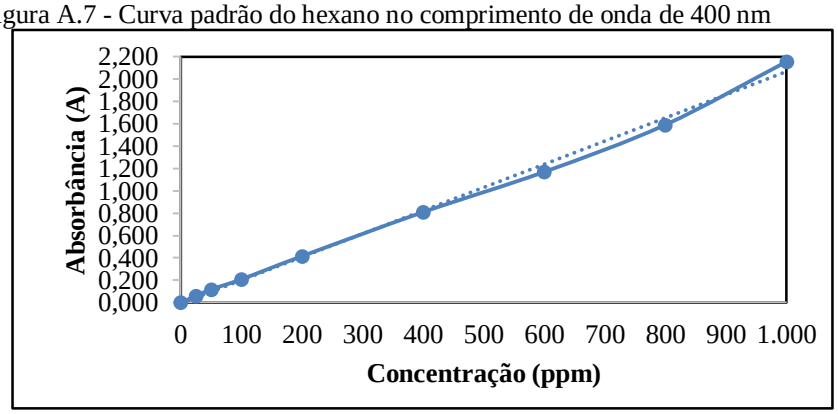
TABELA A.7 - Leituras de absorbância das soluções padrão com hexano como solvente no comprimento de onda de 400 nm

Concentração Padrão (ppm)	Absorbância (A)
0	0
25	0,059
50	0,118
100	0,208
200	0,415
400	0,809
600	1,169
800	1,590
1000	2,154
1200	2,500

Fonte: elaborado pela autora (2015).

A Figura A.7 apresenta a curva padrão do hexano no comprimento de onda de 400 nm.

Figura A.7 - Curva padrão do hexano no comprimento de onda de 400 nm



Fonte: elaborado pela autora (2015).

APÊNDICE B- COM A DIFERENÇA DE PRESSÃO CONSTANTE IGUAL A 1,2 (kg/cm^2), COM ÁGUA+SAL E ÓLEO.

Tabela B.1 - Tabela com os Valores de TOG, com Redução do Número de Voltas

Voltas	Ponto de coleta	VH_2O (mL)	$VCHCl_3$ (mL)	Absorbância (A)	Concentração (ppm)	TOG (ppm)	<TOG> (ppm)
10	S1-1	40	40	1,452	534,63	534,63	535,95
	S1-2	36	40	1,231	452,78	503,09	
	S1-3	32	40	1,240	456,11	570,14	
	S2-1	42	40	1,412	519,81	495,06	527,00
	S2-2	43	40	1,528	562,78	523,51	
	S2-3	42	40	1,603	590,56	562,43	
9	S1-1	43	40	1,669	2.460,00	2.288,37	2.245,97
	S1-2	40	40	1,523	2.243,70	2.243,70	
	S1-3	38	40	1,423	2.095,56	2.205,85	
	S2-1	34	40	1,241	1.825,93	2.148,15	2.235,36
	S2-2	43	40	1,697	2.501,48	2.326,96	
	S2-3	44	40	1,665	2.454,07	2.230,98	
8	S1-1	43	40	1,145	1.683,70	1.566,24	1.858,88
	S1-2	40	40	1,295	1.905,93	1.905,93	
	S1-3	38	40	1,358	1.999,26	2.104,48	
	S2-1	34	40	1,259	1.852,59	2.179,52	1.896,04
	S2-2	43	40	1,261	1.855,56	1.726,10	
	S2-3	44	40	1,332	1.960,74	1.782,49	
7	S1-1	43	40	1,858	2.740,00	2.548,84	3.108,70
	S1-2	40	40	2,050	3.024,44	3.024,44	
	S1-3	38	40	2,415	3.565,19	3.752,83	
	S2-1	34	40	2,018	2.977,04	3.502,40	3.236,55
	S2-2	43	40	2,111	3.114,81	2.897,50	
	S2-3	44	40	2,466	3.640,74	3.309,76	
6	S1-1	40	40	1,432	527,22	527,22	747,11
	S1-2	36	40	1,120	411,67	457,41	
	S1-3	32	40	2,723	1.005,37	1.256,71	
	S2-1	42	40	2,767	1.021,67	973,02	827,64
	S2-2	43	40	1,318	485,00	451,16	
	S2-3	42	40	3,010	1.111,67	1.058,73	
5	S1-1	43	40	1,588	2.340,00	2.176,74	2.218,07
	S1-2	40	40	1,665	2.454,07	2.454,07	
	S1-3	38	40	1,306	1.922,22	2.023,39	
	S2-1	34	40	1,590	2.342,96	2.756,43	2.259,79
	S2-2	43	40	1,472	2.168,15	2.016,88	
	S2-3	44	40	1,498	2.206,67	2.006,06	

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Com o intuito de visualizar melhor a diferença entre os valores de TOG de cada corrente de saída (S1 e S2), foi calculada a porcentagem de remoção. Para tal foi construída a Tabela B.2 que apresenta os valores de média, diferença e porcentagem de TOG para cada número de volta.

Tabela B.2 – Soma, percentagem e diferença entre os dados de TOG de cada saída para cada número de volta

voltas	**Ponto de coleta**	**<TOG> (ppm)**	**Soma**	**%**	**Diferença**
10	S1	535,95	1062,95	50,42	0,84
	S2	527,00		49,58	
9	S1	2245,97	4481,34	50,12	0,24
	S2	2235,36		49,88	
8	S1	1858,88	3754,92	49,51	-0,99
	S2	1896,04		50,49	
7	S1	3108,70	6345,26	48,99	-2,01
	S2	3236,55		51,01	
6	S1	747,11	1574,75	47,44	-5,11
	S2	827,64		52,56	
5	S1	2218,07	4477,86	49,53	-0,93
	S2	2259,79		50,47	

Fonte: elaborado pela autora (2015).

APÊNDICE C – TEMPERATURAS DO PETRÓLEO, ÓLEO E DA ÁGUA+SAL, NAS DUAS CONFIGURAÇÕES EXPERIMENTAIS CÁLCULOS DE VOLUME E ÁREA, DOS TANQUES.

Tabela C.1 – Temperaturas, na Configuração Experimental 1, instante e local de tomada

			TEMP (°C)	
DATA	**VOLTAS**	**INSTANTE**	**APSM**	**ÁGUA + SAL**
17/04/2015	10	Inicial	35	29
		Final	44	29
	9	-	44	30
	8	-	50	30
20/04/2015	7	Inicial	38	30
		Final	40	30
	6	-	48	31
	5	-	48	31

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Tabela C.2 – Temperaturas, na Configuração Experimental 2, instante e local de tomada

LOCAL	**TEMPERATURA (°C)**			
EXP	**TANQUE 1 INÍCIAL**	**TANQUE 1 FINAL**	**TANGUE DE SAÍDA**	**AMBIENTE**
1	29,5	42,0	38,0	30,0
2	41,5	40,0	39,0	29,5
3	41,0	42,0	37,0	30,0
4	40,0	41,5	40,0	30.0
5	34,0	42,0	35,0	29,0
6	38,0	42,0	35,0	29.0

Fonte: elaborado pela autora (2015).

Para cada tanque usado no experimento foi realizada a medida de raio e altura, com o objetivo de conhecer os volumes destes, para isso usa-se a Equação C.1.

$$V = \pi . r^2 . L \qquad (C.1)$$

Na Tabela C.2 são apresentados os raios, alturas e volumes de cada tanque.

Tabela C.2 - Volumes da cada tanque baseado na Equação C.1

	TANQUEAPSM	**TANQUE2**	**TANQUE1**
r (cm)	17	21,5	21
L (cm)	38	60	74
Volume (dm^3 = L)	34,5	87,1	102,5

Fonte: elaborado pela autora (2015).

APÊNDICE D–CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS E RAZÃO DE FLUIDO.

Tabela D.1 - Resultados das com variação do número de voltas

Num. de voltas	Ponto de Coleta	Q_T (cm^3/s)	R_f	Cv (ppm)	Qo (g/s)	Qo_T (g/s)	E_T S2conc	Q (g/s)	Q_T (g/s)	Rf S2conc	Rf S1conc
10	S1	187,63	50,89	535,95	4,94E-02	9,97E-02	0,50	94,54	192,51	0,51	0,49
	S2			527,00	5,03E-02			97,97			
9	S1	202,35	50,76	2.245,97	2,24E-01	4,53E-01	0,51	102,22	207,61	0,51	0,49
	S2			2.235,36	2,30E-01			105,39			
8	S1	211,76	50,31	1.858,88	1,96E-01	3,98E-01	0,51	107,95	217,26	0,50	0,50
	S2			1.896,04	2,02E-01			109,31			
7	S1	221,52	50,49	3.108,70	3,41E-01	7,03E-01	0,52	112,52	227,28	0,50	0,50
	S2			3.236,55	3,62E-01			114,76			
6	S1	230,43	50,33	747,11	8,55E-02	1,81E-01	0,53	117,43	236,42	0,50	0,50
	S2			827,64	9,60E-02			119,00			
5	S1	245,44	50,58	2.218,07	2,69E-01	5,50E-01	0,51	124,44	251,82	0,51	0,49
	S2			2.259,79	2,81E-01			127,38			

Fonte: elaborado pela autora (2015).

APÊNDICE E –CÁLCULO DAS EFICIÊNCIAS E RAZÃO DE FLUIDO DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.

Tabela E.1 - Resultados dos 6 experimentos do planejamento experimental

Experimento	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
Q (cm^3/s)	173,38	173,38	257,77	257,77	215,58	215,58
E- 1 - Fase 2	9,00	5,00	6,00	10,00	16,00	6,00
E- 1 - Total	40,00	25,00	33,00	60,00	82,00	27,00
E-2 - Fase 2	7,00	7,00	7,00	14,00	10,00	4,00
E-2 - Total	35,00	40,00	32,00	76,00	58,00	23,00
E-3 - Fase 2	8,00	2,00	7,00	15,00	8,00	3,00
E-3 - Total	40,00	29,00	30,00	77,00	40,00	32,00
fração vol.média	20,83	14,80	21,13	18,18	18,92	22,58
Qo_{Tent} (cm^3/s)	36,12	25,66	54,47	46,86	40,79	48,68
S1-1 - Fase 2	9,00	7,00	9,00	14,00	8,00	13,00
S1-1 - Total	40,00	38,00	41,00	77,00	65,00	79,00
S1-2 - Fase 2	9,00	7,00	8,00	14,00	14,00	15,00
S1-2 - Total	41,00	37,00	38,00	75,00	70,00	74,00
S1-3 - Fase 2	6,00	7,00	8,00	13,00	12,00	13,00
S1-3 - Total	37,00	36,00	46,00	72,00	68,00	74,00
fração vol.média	20,22	18,93	20,13	18,30	12,89	18,10
Qo_{S1} (cm^3/s)	17,53	16,41	25,94	23,59	13,89	19,51
S2-1 - Fase 2	9,00	8,00	8,00	14,00	13,00	15,00
S2-1 - Total	38,00	37,00	36,00	76,00	67,00	76,00
S2-2 - Fase 2	8,00	7,00	7,00	13,00	15,00	12,00
S2-2 - Total	38,00	38,00	31,00	68,00	74,00	71,00
S2-3 - Fase 2	9,00	7,00	9,00	15,00	12,00	15,00
S2-3 - Total	38,00	37,00	44,00	75,00	63,00	78,00
fração vol.média	22,8	19,65	21,75	19,18	19,57	18,62
Qo_{S2} (cm3/s)	19,77	17,03	28,03	24,72	21,09	20,07
E_{TS2}	54,73	50,93	51,47	52,75	51,72	50,71
E'_{TS2}	9,46	1,87	2,93	5,50	3,44	1,42

Fonte: elaborado pela autora (2015).

ANEXOS

ANEXO A - PRODUÇÃO CIENTÍFICA DERIVADA DA PESQUISA

O estudo do Separador Tubular Helicoidal possibilitou uma ampliação de conhecimentos, trocas de experiências e discussões em diversos eventos:

- ✓ Trabalho apresentado no VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM2014 – realizado de 10 a 15 de agosto de 2014 em Uberlândia – MG. Comunicação oral intitulada: ESTUDO DO ESCOAMENTO INTERNO DE UM SEPARADOR HELICOIDAL PARA POSTERIOR TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA. Palavras-chave: água produzida, separação, tratamento, tubos helicoidais. Autores: Isabela Magalhães de Oliveira, Yamara Matos Oliveira, Gabriel Francisco da Silva, Ricardo de Andrade Medronho, Andréa Gonçalves Bueno de Freitas, Wenna Raissa dos Santos Cruz.

- ✓ Trabalho apresentado no XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ2014, realizado de 19 a 22 de outubro de 2014, na cidade de Florianópolis-SC. Pôster intitulado: MODELAGEM MATEMÁTICA DO COMPORTAMENTO DE FLUIDOS EM TUBOS HELICOIDAIS. Na Área Temática: Fenômenos de Transporte e Sistemas Particulados. Palavras-chave: Escoamento interno, hélice, equações diferenciais ordinárias. Autores: Andréa G. B. Freitas, Yamara M. Oliveira, Isabela M. Oliveira, Gabriel Francisco da Silva, Ricardo de Andrade Medronho. Este evento resultou num ISSN: 2359-1757 e DOI:10.5151/chemeng-cobeq2014-1871-17093-175136. Disponível em:http://www.proceedings.blucher.com.br/article-details/modelagem-matemtica-do-escoamento-de-fluidos-em-tubos-helicoidais-17427.

- ✓ Trabalho apresentado no CONEPETRO2015 – I Congresso Nacional de Engenharia, Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – III Workshop de Engenharia de Petróleo, no período de 13 a 15 de maio, na cidade de Campina Grande - PB. Pôster intitulado: RISCO DE TRABALHOS REALIZADOS COM ÁGUA PRODUZIDA REAL. Na Área Temática: Engenharia de Poços. Palavras chaves: água produzida real (APR), água produzida sintética (APS), descartes, riscos ambientais. Autores: José Alan Costa Souza; Andrea Gonçalves Bueno de Freitas; Felipe Martins de Oliveira; Paloma dos Santos; Gabriel Francisco da Silva. Esse evento resultou na publicação nos Anais

CONEPETRO - V. 1, Nº 1, 2015, com ISSN 2446-8339. Disponível em: http://editorarealize.com.br/revistas/conepetro/trabalhos/Modalidade_4datahora_30_03_2015_23_42_28_idinscrito_1203_c973ea6494d376c295f58f0d5a68c5a2.pdf.

- ✓ Publicação na Revista GEINTEC – Gestão, Inovação e Tecnologias. Artigo intitulado EQUIPAMENTOS PARA TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO: ASPECTO TEMPORAL. Palavras-chave: separação, processo mecânico, água, óleo. Autores: Andréa Gonçalves Bueno de Freitas; Paloma Santos; Felipe Martins Oliveira; Carlos Antonio Cabral Santos; Ana Eleonora Almeida Paixão; Ricardo Andrade Medronho; Gabriel Francisco da Silva. ISSN: 2237-0722. São Cristóvão/SE. Disponível em:http://www.revistageintec.net/portal/index.php/revista/article/view/693/581.

- ✓ Monitoria do Curso de COMPUTACIONAL FLUID DYNAMICS (CFD) realizado durante as festividades comemorativas da 82ª Semana da Escola de Química, no período de 14 a 18 de setembro de 2015, na Universidade Federal do Rio de Janeiro, com carga horária de 8 h.