

Monografia de Graduação

Tuma Nova Topologia para Geração de Malhas Utilizadas na Simulação Numérica do Escoamento em Bombas de Cavidades Progressivas

João Coringa dos Santos Neto

Natal, dezembro de 2011



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
PRÓ-REITORIA DE GRADUAÇÃO
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Uma Nova Topologia para Geração de Malhas
Utilizadas na Simulação Numérica do Escoamento
em Bombas de Cavidades Progressivas**

João Coringa dos Santos Neto

**Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal do
Rio Grande do Norte como parte dos
requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Mecânico.**

Área de Concentração:

Mecânica Computacional

Prof. Dr. João Alves de Lima
Orientador

*Natal – RN
Dezembro de 2011*

RESUMO

A elevação artificial de óleos pesados ainda é um desafio para a engenharia de petróleo e, atualmente, o bombeio por cavidades progressivas se tornou um dos métodos de melhor desempenho, em virtude, principalmente, da sua alta eficiência mecânica, baixo investimento inicial e baixo consumo de energia. Uma **Bomba de Cavidades Progressivas**, comumente denominada BCP (ou PCP, do inglês *Progressing Cavity Pump*), consegue bombear fluidos com areia e maiores quantidades de gás do que as bombas alternativas convencionais. Entretanto, o uso extensivo de BCPs tem sido limitado, uma vez que fatores como temperatura do poço, incompatibilidade química com gases e líquidos produzidos, e grandes diferenciais de pressão aplicados à bomba durante sua operação afetam sua vida útil e reduzem sua eficiência mecânica e volumétrica. Assim, estudos experimentais e numéricos são necessários para se alcançar um melhor entendimento da dinâmica do escoamento e do comportamento da bomba.

Dessa forma, o principal objetivo do presente trabalho é desenvolver uma nova topologia para geração de malhas móveis e deformáveis, baseada nas características geométricas e cinemáticas da bomba, que possam ser empregadas para a realização de estudos numéricos da interação fluido-estrutural no interior de BCPs. A malha tridimensional de elementos hexaédricos representa o domínio fluido no interior da bomba e a sua descrição topológica é desenvolvida a partir de um sistema de coordenadas cilíndricas de tal maneira que, para uma dada seção transversal da bomba, as arestas angulares desses elementos são linhas radiais centradas no centro do rotor (e por isso móveis) e as arestas radiais são linhas equidistantes entre as paredes do estator e do rotor (e por isso também se modificam, de acordo com a posição do rotor). As arestas longitudinais são caracterizadas pelas diversas fatias que seguem o eixo ao longo da bomba (a discretização que gera as faces longitudinais).

A presente topologia de geração de malha é ainda implementada internamente no *software* CFX/ANSYS de dinâmica dos fluidos computacional como uma biblioteca dinâmica, DLL (*dynamic linkage library*), escrita em linguagem FORTRAN 90, podendo assim ser empregada para realização de simulações computacionais do escoamento no interior de BCPs. Com tal implementação, será possível fornecer informações detalhadas dos campos de pressão e velocidade dentro da bomba e, assim, determinar diversas características do seu escoamento, como vazão versus diferencial de pressão aplicado à bomba, por exemplo, e prever a performance de uma BCP. Modelos de malhas típicas são apresentados e os resultados são validados através da comparação com resultados experimentais reportados pela literatura.

Palavras-chaves: Bomba de Cavidades Progressivas (BCP), Geração de Malhas, Nova Topologia, Simulação Computacional.

ABSTRACT

Artificial lifting of heavy oils is still a challenging task for the petroleum engineering and, currently, progressing cavity pump (PCP) has become one of the best performing methods in this field of engineering, due mainly to its high mechanical efficiency, low initial investment and energy consumption. Additionally, a PCP can pump fluids with sand and with larger quantities of gas than conventional reciprocating pumps. However, the extensive use of PCP has been limited, since factors like well temperature, chemical incompatibility with gases and liquids produced and high differential pressure applied to the pump during operation affect its life and reduce its mechanical and volumetric efficiency. Thus, experimental and numerical studies are required in order to acquire a better understanding of the flow dynamics and pump behavior.

Therefore, the main goal of the present work is to develop a new topology for generation of moving and deformable meshes, based on pump geometry and kinematics, which can be employed to perform numerical studies of fluid-structure interaction within PCPs. The three-dimensional mesh of hexahedron elements represents the fluid domain inside the pump and its topological description is developed from a cylindrical coordinate system so that, for a cross section of the pump, the angular edges of these elements are radial lines centered at the center of the rotor (and therefore mobile) and the radial edges are lines equidistant between the walls of the stator and the rotor (and therefore also change according to the position of the rotor). The longitudinal edges are characterized by several slices that follow along the axis of the pump (which generates the discretization longitudinal sides).

This mesh generation topology is also implemented internally in the computational fluid dynamics software CFX / ANSYS as a DLL (dynamic linkage library), written in FORTRAN 90 and can therefore be used to perform computer simulations of the flow inside PCPs. With this implementation it will be possible to provide detailed information of pressure and velocity fields inside the pump, and then determine various characteristics of its flow, as flow rate versus differential pressure applied to the pump, for example, and predict the performance of a PCP. Typical mesh models are presented and the results are validated by comparing with experimental results reported in the literature.

Keywords: Progressing Cavity Pumps (PCPs), Mesh Generation, New Topology, Computational Simulation.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
CAPÍTULO 1: Introdução	1
1.1. Histórico	2
1.2. Motivação	3
1.3. Objetivos.....	4
1.4. Estrutura do texto.....	4
CAPÍTULO 2: Revisão Bibliográfica	5
2.1. Elevação artificial por bombeio de cavidades progressivas (BCP)	6
2.2. Simulação do escoamento em bombas de cavidades progressivas (BCP)	9
CAPÍTULO 3: Metodologia de Geração da Malha	12
3.1. Descrição da topologia	13
3.2. Desenvolvimento das equações descritivas da malha	14
3.3. Desenvolvimento do algoritmo de geração da malha	19
3.4. Geração da malha	20
CAPÍTULO 4: Resultados e Discussão	23
4.1. Validação e comparação com topologia anterior	24
CAPÍTULO 5: Conclusões e Perspectivas Futuras	30
CAPÍTULO 6: Referências Bibliográficas	32

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1: Rotor e estator de uma BCP	2
Figura 2.1: Sistema de elevação por BCP e seus principais componentes	6
Figura 2.2: Relação entre os passos do estator e do rotor	7
Figura 2.3: Dimensões características da seção transversal de uma BCP de um lóbulo	8
Figura 3.1: Representação das linhas de base para o traçado da malha da região fluida gerada através da topologia proposta	13
Figura 3.2: Representação das linhas de base para o traçado da malha da região fluida gerada através da melhor topologia desenvolvida por Almeida (2010)	14
Figura 3.3: Principais variáveis envolvidas na determinação das coordenadas dos pontos da malha	15
Figura 3.4: Fluxograma do algoritmo das sub-rotinas de geração de malhas. Pessoa (2010)	20
Figura 3.5: Arquivo de entrada	22
Figura 3.6: Tela de Execução do Programa	22
Figura 4.1: Malha 3D gerada utilizando a nova topologia desenvolvida no presente trabalho	25
Figura 4.2: Comparação entre as malhas geradas para a seção transversal da BCP na posição de máximo deslocamento do rotor	25

Figura 4.3: Validação numérica e comparação dos resultados do presente trabalho com os de Pessoa (2009) e Almeida (2010) e Gamboa <i>et al.</i> (2002) para vazão volumétrica versus gradiente de pressão	27
Figura 4.4: Erro relativo da simulação com relação aos resultados experimentais de Gamboa (2002).....	28
Figura 4.5: Campos de Pressão ao longo da Bomba para Diferentes Posições do Rotor	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Parâmetros geométricos	21
Tabela 3.2: Parâmetros da malha espacial	21
Tabela 3.3: Parâmetros da malha temporal	22
Tabela 4.1: Valores da vazão bombeada em função do diferencial de pressão calculados no presente trabalho e os valores experimentais apresentados no trabalho experimental de Gamboa <i>et al.</i> (2002), para a rotação de 200 RPM	30
Tabela 4.2: Valores da vazão bombeada em função do diferencial de pressão calculados no presente trabalho e os valores experimentais apresentados no trabalho experimental de Gamboa <i>et al.</i> (2002), para a rotação de 300 RPM	30

LISTA DE SÍMBOLOS

Alfabeto Latino

C_0	Circunferência que representa a seção transversal do rotor.
C_1, C_2	Arcos de circunferência representando as partes circulares da seção do estator.
C_{SR}	Centro da Seção do Rotor.
d_R	Menor Diâmetro do Rotor (Diâmetro da Seção do Rotor).
d_{HR}	Maior Diâmetro do Rotor (Diâmetro da Hélice do Rotor).
d_S	Menor Diâmetro do Estator.
d_{SM}	Maior Diâmetro do Estator.
d_{ti}	Diâmetro do Tubo do Estator.
E	Excentricidade.
$NPST$	Número de Passos do Estator.
NPT_L	Número de Pontos ao longo de uma Linha “Circular” em uma Seção Transversal da BCP.
NL_Z	Número de Linhas “Circulares” em uma Seção Transversal da BCP.
NFZ_{PST}	Número de Seções Transversais, ou Faces, por Passo da BCP.
NPT_{TOT}	Número Total de Pontos na BCP.
NPT_{FZ}	Número de Pontos por Face/Seção Transversal.
NFZ_{TOT}	Número Total de Faces ao Longo da BCP.
NEL	Número de Total de Elementos Hexaédricos na BCP.

NEL_{CAS}	Número de Elementos por Fatia: Estator/Rotor.
NEL_{FZ}	Número de Elementos por Fatia: Entrada/Saída.
N_{MESHT}	Número de Passos de Tempo por Rotação do Rotor
P_1	Ponto de intersecção entre a linha radial e a circunferência da seção transversal do rotor no instante t .
P_2	Ponto de intersecção entre a linha radial e a curva que representa a superfície do estator no instante t .
R_0	Reta radial utilizada para determinar os nós dos elementos extremos através da intersecção com as retas R_1 e R_2 e os arcos C_0 , C_1 e C_2 .
R_1, R_2	Retas que representam as partes retilíneas da seção transversal do estator.
R_{SR}	Raio da seção transversal do rotor.
P_S	Passo do Estator.
R_{ST}	Raio menor da seção transversal do estator.
w	Folga ou Interferência entre o Rotor e o Estator.
X_{CSR}	Abssiça do Centro da Seção do Rotor.
Y_{CSR}	Ordenada do Centro da Seção do Rotor.
Z_0	Face transversal na Entrada da Bomba.
Z_i	Face Transversal Localizada na Posição i ao Longo do Eixo Longitudinal da Bomba.

Alfabeto Grego

ΔP	Diferencial de Pressão Aplicado à Bomba.
γ	Posição angular da linha radial.
θ_s	Posição angular do estator, caracterizando uma posição longitudinal/face Z.



CAPÍTULO 1
Introdução



INTRODUÇÃO

Este capítulo introdutório apresenta um rápido histórico da evolução do Bombeio por Cavidades Progressivas, desde a concepção desse método de elevação artificial até os últimos avanços; as razões que motivaram o desenvolvimento deste trabalho e os objetivos a serem alcançados, tendo em vista a melhoria desse sistema de bombeamento. Este capítulo se encerra com a apresentação da estrutura do texto do presente trabalho.

1.1. Histórico

O principal componente do sistema de Bombeio por Cavidades Progressivas (BCP) é a Bomba de Cavidades Progressivas (também chamada de BCP), a qual é composta principalmente por um rotor metálico com uma forma semelhante à de um parafuso, cujo centro da hélice é deslocado do centro de sua seção (sua excentricidade) e por um estator de aço cuja superfície interna possui o formato de dupla hélice, feita também de aço ou de material elastomérico (elastômero). A figura 1.1 apresenta esse dois componentes. Esse sistema foi inventado na década de 1920 pelo francês Rene Moineau e patenteado em 1930, mas a primeira bomba somente foi fabricada em 1933.

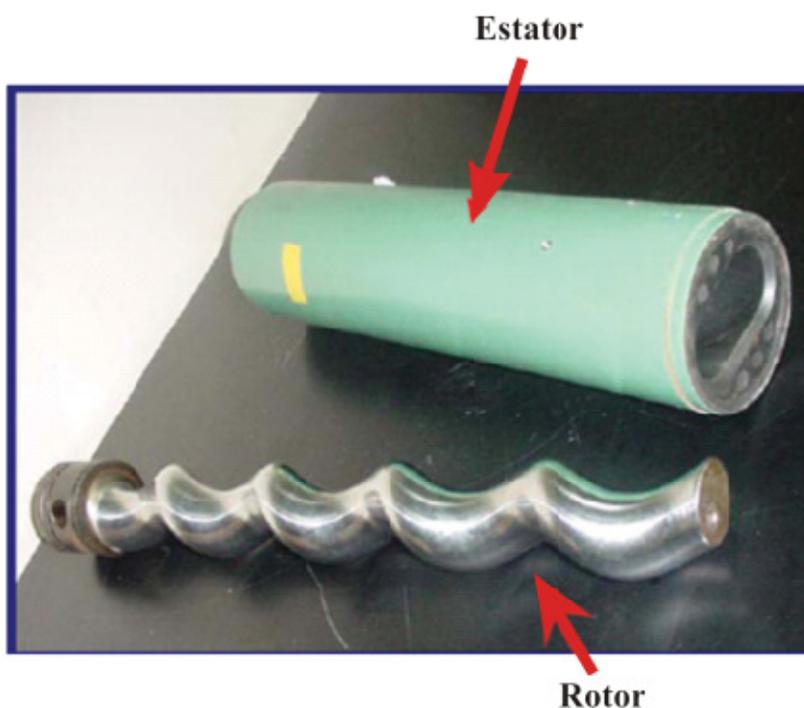


Figura 1.1. Rotor e estator de uma BCP (Assmann, 2005)

O primeiro aperfeiçoamento realizado no sistema foi a substituição da borracha natural pela borracha sintética ou elastômero que possui uma capacidade maior de deformação elástica possibilitando a utilização da BCP em situações de maior temperatura e pressão (Assmann, 2008).

Inicialmente, esse sistema foi utilizado para bombear fluidos em geral. Na década de 60 foi testado pela primeira vez na elevação de petróleo, mas seu uso com esse fim só foi possível em meados da década de 70 graças ao aperfeiçoamento dos materiais utilizados e do processo de fabricação.

A sua utilização no Brasil foi iniciada no ano de 1982, no nordeste do país, mais precisamente no estado do Ceará no campo de Fazenda Belém, depois se expandindo para outras regiões, como: bacia potiguar, Sergipe, Alagoas, Bahia e Espírito Santo (Assmann, 2008). Com o sucesso obtido no uso deste sistema e dos avanços no desenvolvimento de novos equipamentos na década de 90, foram ampliados os seus limites de aplicação, atendendo assim uma faixa maior de vazão e pressão e com isso se tornando um método mais competitivo em relação aos outros sistemas de elevação artificial comumente utilizados (Carvalho, 1999).

A última inovação nesse sistema se deu em 1997, quando o acionamento elétrico de fundo aplicado ao BCP possibilitou a sua utilização em poços direcionais e desviados.

1.2. Motivação

O Bombeio por Cavidades Progressivas é um dos sistemas indicados e empregados para a extração de óleos altamente viscosos. Atualmente, têm-se buscado ampliar a utilização de tal sistema nesta aplicação, uma vez que as Bombas de Cavidades Progressivas (BCP) têm demonstrado uma eficiência mecânica mais elevada do que os sistemas de bombeamento rotodinâmico, além do menor investimento inicial e consumo de energia. Além disso, uma BCP pode bombear fluidos com areia e com maiores quantidades de gás do que o sistema convencional de bombeio recíproco de hastes.

No entanto, apesar destes fatores, o uso extensivo do Bombeio por Cavidades Progressivas tem sido limitado pelo pouco conhecimento teórico e prático desse sistema, especialmente em relação ao comportamento do escoamento multifásico, e mesmo monofásico, no interior da bomba. Um maior entendimento desses escoamentos é importantíssimo e forneceria valiosas informações para projeto, operação e controle desse sistema.

Alguns autores propuseram modelos simplificados para caracterizar o escoamento no interior de BCPs como Moineau (1930), Vetter *et al.* (1993, 2000), Robello e Saveth (1998) e Andrade (2008) e estudos experimentais foram realizados por Gamboa *et al.* (2002). Pessoa (2009) e Almeida (2010) desenvolveram modelos computacionais que solucionam a equação de Navier-Stokes tridimensional transiente considerando o movimento relativo entre o rotor e o estator da BCP para descrever completamente o escoamento no interior de BCPs.

Almeida (2010) inicialmente utilizou pacotes comerciais de construção de malha em sua simulação e percebeu que esse método era inadequado em virtude da geometria complexa da BCP. Então, Pessoa (2009) e Almeida (2010) desenvolveram uma metodologia própria alternativa para a geração de malhas da BCP que superava os problemas encontrados anteriormente. Ainda assim, foram identificados alguns inconvenientes na topologia por ele empregada, como grande distorção dos elementos e limitação geométrica, que impossibilitavam o uso dessa metodologia em BCPs de quaisquer dimensões. Mais detalhes dessa metodologia serão apresentados no capítulo seguinte.

Portanto, o melhoramento do processo de criação de malhas para a simulação de BCPs se mostra como a principal motivação para o desenvolvimento do presente trabalho e, assim, alcançar o entendimento detalhado do comportamento do escoamento no interior de duas bombas.

1.3. Objetivos

De acordo com o exposto anteriormente, este trabalho se propõe a desenvolver, a partir do trabalho desenvolvido por Pessoa (2009) e Almeida (2010), um gerador de malhas computacionais otimizadas que possam representar da melhor maneira possível o domínio fluido dinâmico no interior de Bombas de Cavidades Progressivas (BCPs). Com essas malhas serão realizadas simulações do escoamento dentro de BCPs e obtidas soluções dinâmicas em diversas condições de operação, como rotação e diferencial de pressão.

Depois de implementado e validado através da comparação com resultados experimentais e os resultados numéricos obtidos por Pessoa (2009) e Almeida (2010), o modelo desenvolvido no presente trabalho se tornará uma ferramenta valiosíssima para um melhor entendimento dos fenômenos físicos que governam o sistema de bombeio por cavidades progressivas.

1.4. Estrutura do texto

O presente texto foi dividido em seis capítulos. No próximo capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica dos conceitos relativos ao Bombeio por Cavidades Progressivas e dos principais estudos relacionados ao escoamento de fluido nesse método de elevação. No Capítulo 3 são descritas a metodologia de desenvolvimento e discretização das equações que representam a topologia proposta e a metodologia de geração da malha. No Capítulo 4 os resultados obtidos na simulação do escoamento utilizando a nova topologia são apresentados, validados e comparados com os resultados numéricos obtidos por outros autores que utilizaram a mesma metodologia, mas topologias diferentes. O Capítulo 5 apresenta as conclusões e perspectivas futuras e, por fim, o Capítulo 6 apresenta as referências bibliográficas utilizadas no presente trabalho.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esse capítulo se inicia com a apresentação de um estudo realizado acerca do princípio de funcionamento do sistema de Bombeio por Cavidades Progressivas, das vantagens e desvantagens do seu uso, dos seus principais componentes e dos parâmetros geométricos característicos de uma BCP. O conhecimento em profundidade desses parâmetros é fundamental para o método de construção de malhas desenvolvido neste trabalho.

Posteriormente, são apresentados os principais estudos acerca do escoamento no interior de tais bombas realizados por vários pesquisadores que desenvolveram modelos teóricos para descrever o seu comportamento em diversas condições de operação. Ênfase maior será dada aos trabalhos de Pessoa (2009) e de Almeida (2010), cuja metodologia própria de criação de malhas para simulação de BCPs será objeto de aperfeiçoamento no desenvolvimento do presente trabalho.

2.1. Elevação artificial por Bombeio de Cavidades Progressivas (BCP)

A Bomba de Cavidades Progressivas é uma bomba de deslocamento positivo que trabalha imersa em poço de petróleo (Thomas, 2001). A figura 2.1 apresenta os quatro principais componentes de um sistema de elevação por BCP, quais sejam:

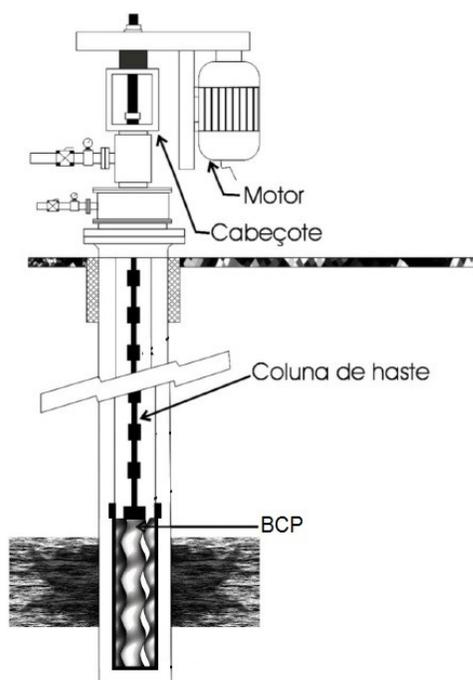


Figura 2.1. Sistema de elevação por BCP e seus principais componentes (Vidal, 2005).

-
- Motor elétrico ou de combustão interna com faixa de rotação entre 300 e 600 RPM.
 - Cabeça de acionamento ou cabeçote que reduz a rotação do motor para a rotação específica da bomba.
 - Coluna de hastes que recebe o movimento do cabeçote e o transmite para a Bomba de Cavidades Progressivas (BCP).
 - Finalmente, a própria BCP, cujo rotor recebe o movimento da coluna de hastes e cria regiões de diferentes pressões no interior da bomba, desenvolvendo assim o bombeio do fluido (Almeida, 2010).

Como mencionado no Capítulo 1, uma BCP é composta principalmente por um rotor metálico com uma forma semelhante à de um parafuso, cujo centro da hélice é deslocado (sua excentricidade) do centro de sua seção e por um estator de aço cuja superfície interna possui o formato de dupla hélice e pode ser feita também de aço ou de material elastomérico (elastômero). O passo do estator é igual ao dobro do passo do rotor de modo que este, quando inserido naquele, cria cavidades isoladas e o movimento rotacional do rotor faz com que essas cavidades ganhem movimento axial e o fluido seja assim transportado. A figura 2.2 mostra a relação entre o passo do estator e do rotor.

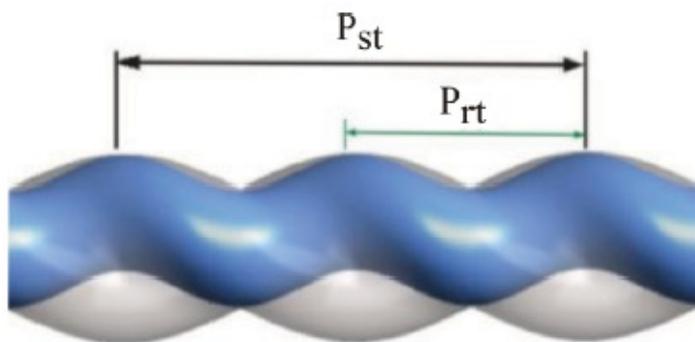


Figura 2.2. Relação entre os passos do estator e do rotor (Almeida, 2010).

A figura 2.3 mostra um esquema da seção transversal de uma BCP com os seus elementos geométricos característicos. As linhas cheias de cor preta representam o contorno do estator e a linha cheia azul representa o contorno do rotor. A linha tracejada azul representa o contorno da hélice do rotor e a linha traço-ponto vermelha representa o movimento efetuado pelo centro da hélice do rotor, extremamente importante para descrever as equações usadas no modelo de geração de malhas desenvolvido neste trabalho.

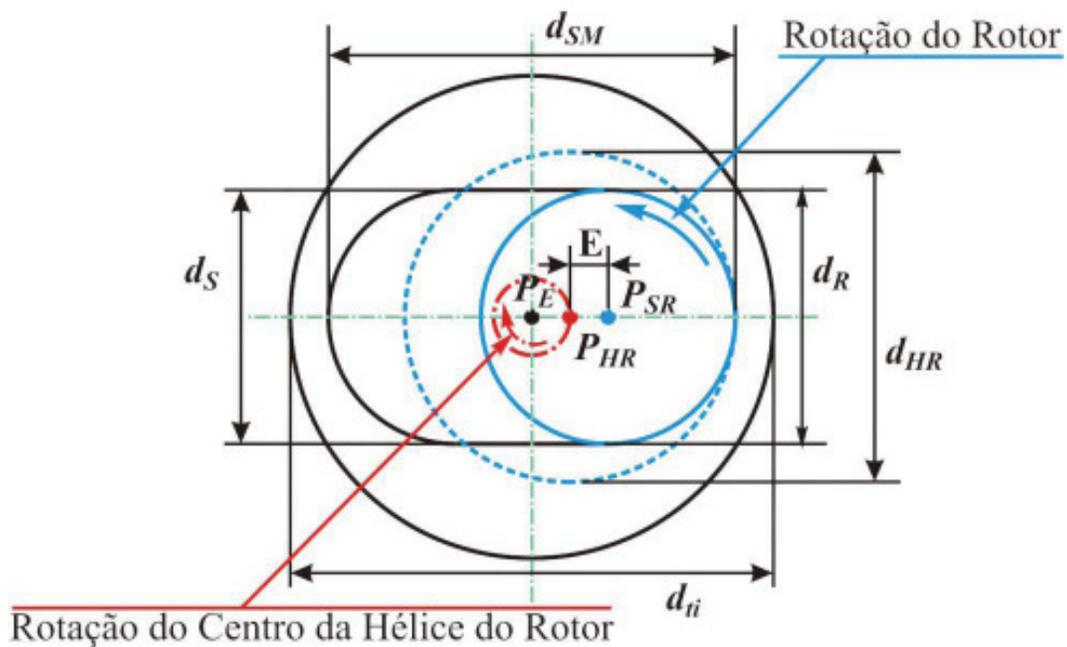


Figura 2.3. Dimensões características da seção transversal de uma BCP de um lóbulu
(Almeida, 2010)

Os pontos PE , PHR e PSR representam os centros do estator, da hélice do rotor e da seção transversal do rotor, respectivamente. Pode-se observar, também na figura 2.3, os principais elementos geométricos característicos de uma BCP:

E	-	Excentricidade
d_R	-	Menor Diâmetro do Rotor (Diâmetro da Seção do Rotor)
$d_{HR} = d_R + 2E$	-	Maior Diâmetro do Rotor (Diâmetro da Hélice do Rotor)
d_S	-	Menor Diâmetro do Estator
$d_{SM} = 4E + d_S$	-	Maior Diâmetro do Estator
d_{ti}	-	Diâmetro do Tubo do Estator (estator com elastômero de espessura variável)

Como descrito por Almeida (2010), as principais vantagens e desvantagens do sistema de elevação por BCP, em relação a outros sistemas, são:

Vantagens:

- Elevada eficiência mecânica: entre 50 a 70%.
- Maior aplicação em tipos de fluidos altamente viscosos, com grande concentração de areia e com alta concentração de gás livre.
- Menor investimento: custo de operação e manutenção.
- Instalação e operação simples.
- Boa resistência a abrasão.
- Equipamentos de subsuperfície de dimensões reduzidas.

Desvantagens:

- Diferencial de pressão limitado.
- Vazão limitada.
- Desgaste e fadiga em poços desviados.
- Sensível a composição química do petróleo.

2.2. Simulação do escoamento em bombas de cavidades progressivas (BCP)

Existem vários trabalhos descrevendo aplicações e controle de BCPs em sistemas de elevação artificial, mas poucas referências foram encontradas objetivando a caracterização do escoamento no interior de tais bombas.

Logo após elaborar e construir a BCP, Moineau (1930) criou um modelo simplificado para descrever o escoamento em seu interior. Ele relacionou a vazão com o diferencial de pressão aplicado na bomba através da subtração do escorregamento de fluido através das linhas de selo da vazão teórica calculada. O seu modelo apenas calculava o escorregamento em função do diferencial de pressão, pois a vazão teórica dependia apenas das características geométricas da BCP.

Robello e Saveth (1998) descreveram a influência dos parâmetros geométricos da BCP no escoamento deslocado, mas não mencionaram a influência do diferencial de pressão sobre a vazão.

Olivet *et al.* (2002) realizaram um estudo experimental e obtiveram curvas características e perfis de pressão transientes ao longo de bombas de estator rígido para condições de escoamentos tanto monofásico quanto multifásico.

Gamboa *et al* (2002) desenvolveram simulações computacionais para modelar o escoamento no interior de uma BCP, mas não obtiveram êxito em virtude da complexidade da geometria e do movimento da malha. A partir daí Gamboa *et al.* (2003) propuseram um modelo simplificado para

escoamento monofásico considerando a possibilidade de uma área de escorregamento variável devido à deformação do estator. Com esse modelo era possível reproduzir o comportamento linear da vazão volumétrica em função do diferencial de pressão numa BCP com estator elastomérico.

Pessoa (2009) e Almeida (2010) desenvolveram um modelo para resolver a equação de Navier-Stokes tridimensional transiente para o escoamento no interior de BCPs baseado na discretização das equações governantes usando o método dos volumes finitos baseado em elementos. O principal desafio encontrado por tais pesquisadores foi a geração da malha utilizada na simulação e a imposição do seu movimento. Como primeira alternativa, após criar a malha inicial, eles impuseram o movimento da malha diretamente no *solver* usado para as simulações (CFX/ANSYS). Nessa metodologia, foi observado o problema que, quando a posição dos nós internos era calculada internamente pelo *solver* através da equação de Poisson, os efeitos de difusividade numérica provocavam o aparecimento de histerese, levando à distorção de cada elemento ao longo da revolução do rotor, e, conseqüentemente a falha do *solver* devido à geração de elementos com volume negativo depois de algumas revoluções do rotor (Pessoa, 2009).

Almeida (2010) também simulou o escoamento no interior de BCPs através da discretização e resolução da equação de Navier-Stokes usando o método dos volumes finitos. Ele também constatou que a maior dificuldade era a geração da malha em virtude da complexa geometria da bomba. Sua primeira metodologia de geração de malhas partia da construção de um modelo sólido 3D representativo do domínio fluido que era importado para o *software* de geração de malha. O mesmo problema de histerese na deformação dos elementos com a rotação do rotor observado por Pessoa (2009) também estava presente nesse método, provocando divergência no processo de solução.

Tanto Pessoa (2009) como Almeida (2010), numa segunda alternativa, utilizaram sub-rotinas do próprio *software* no qual realizaram as simulações, que faziam a leitura de vários arquivos de malhas previamente geradas de uma única vez, para diferentes posições do rotor distribuídas ao longo de uma rotação da BCP (Almeida, 2010). Com essa alternativa o escoamento pode ser melhor representado, mas dela acarretava um custo computacional muito elevado, necessário para a geração e leitura das malhas. Além disso, a simulação de casos realísticos como casos de folga muito pequena, casos com contato perfeito entre rotor e estator (folga nula) e casos com interferência era dificultada.

Para resolver esses problemas Almeida (2010) desenvolveu uma metodologia de geração de malha através da qual não era necessária a geração de um modelo sólido, pois a malha associada a cada posição do rotor era gerada através da determinação das coordenadas (x , y , z) de cada nó, realizada por um programa escrito em linguagem FORTRAN para cada passo de tempo da simulação. A determinação das coordenadas dos pontos que representarão os nós da malha computacional segue o que se chama de topologia, que representa geometricamente como o domínio fluido é dividido em várias partes.

Duas topologias foram utilizadas por Almeida (2010). A primeira delas foi a topologia na qual a distribuição dos pontos no rotor é guiada pelas linhas radiais concêntricas na seção do rotor, enquanto nos pontos do estator, é guiada pelas linhas radiais concêntricas na seção do estator (Almeida, 2010). Essa topologia introduzia fortes distorções angulares nos elementos em certas posições do rotor, o que impossibilitava a simulação de bombas com pequenas folgas entre o estator e o rotor. A segunda e definitiva topologia utilizada por Almeida (2010) era baseada em linhas radiais fixas, centradas apenas na origem da seção do estator. Essa metodologia apresentava a vantagem de gerar pequenas distorções nos elementos e melhor distribuição dos nós, mas também apresentava como limitação o fato de não gerar malhas para geometrias com excentricidade maior do que ou igual à metade do raio da seção do rotor. Com essa segunda topologia, Almeida (2010) estudou ainda a interação fluido-estrutural no interior de uma BCP. Para resolver o problema estrutural, ele adotou um comportamento elástico linear para a deformação do elastômero, não necessitando assim de nenhum *software* para análise estrutural.

O estudo aprofundado dessas topologias e do método de geração de malhas utilizados por esses últimos autores se mostrou de fundamental importância para a execução do principal objetivo deste trabalho, que é a criação de uma topologia ótima com a qual seja possível gerar malhas com distorções lineares e angulares mínimas e nenhuma limitação quanto a sua aplicação.

CAPÍTULO 3

Metodologia de Geração da Malha

METODOLOGIA DE GERAÇÃO DA MALHA

Este capítulo apresenta toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento e implementação da nova topologia proposta neste trabalho e que foi utilizada na geração de malhas computacionais deformáveis do domínio fluido no interior da bomba.

3.1. Descrição da topologia

Como mencionado na Revisão Bibliográfica e repetido aqui, a determinação das coordenadas dos pontos que representarão os nós da malha computacional segue o que se chama de topologia, que representa a maneira como o domínio fluido é dividido em várias partes.

A malha tridimensional, de elementos hexaédricos, representa o domínio fluido no interior da bomba e a sua descrição topológica é desenvolvida a partir de um sistema de coordenadas cilíndricas de tal maneira que, para uma dada seção transversal da bomba, as arestas angulares desses elementos são linhas radiais centradas no centro do rotor (e por isso móveis) e as arestas radiais são linhas equidistantes entre as paredes do estator e do rotor (e por isso também se modificam, de acordo com a posição do rotor). As arestas longitudinais são definidas pelas diversas fatias que seguem o eixo ao longo da bomba (a discretização que gera as faces longitudinais).

Para essa topologia, os pontos sobre a aresta do rotor são sempre os mesmos em relação ao rotor, embora sejam móveis devido ao movimento do rotor, enquanto os pontos sobre a aresta do estator são móveis, acompanhando o movimento das linhas radiais sobre o rotor. As Figuras 3.1 (a) e (b) ilustram as linhas de base dessa topologia para as duas posições limites do rotor.

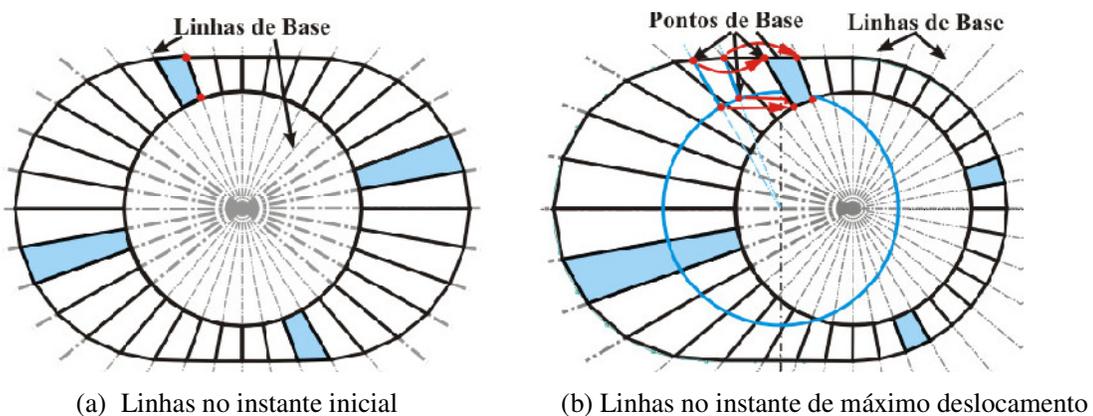


Figura 3.1. Representação das linhas de base para o traçado da malha da região fluida gerada através da topologia proposta.

As figuras 3.2 (a) e (b) representam as linhas de base da melhor topologia desenvolvida por Almeida (2010) que é mostrada aqui para efeito de comparação. Comparação esta que justifica o desenvolvimento da nova topologia proposta neste trabalho.

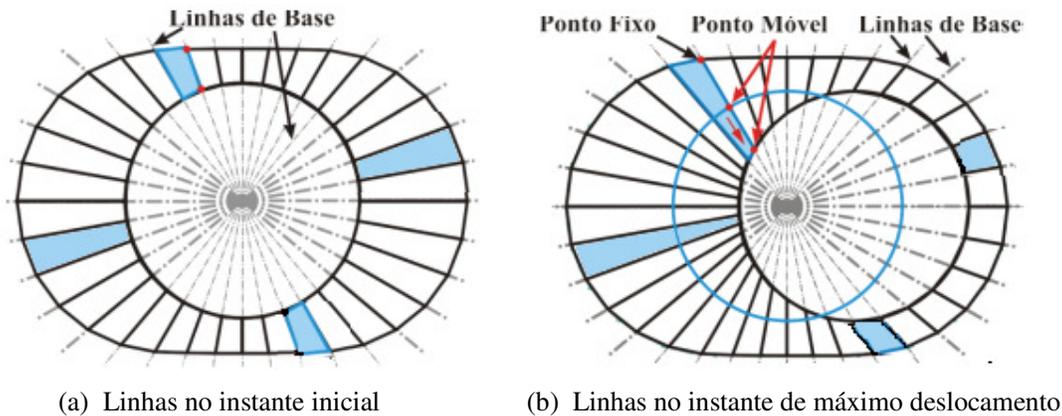


Figura 3.2. Representação das linhas de base para o traçado da malha da região fluida gerada através da melhor topologia desenvolvida por Almeida (2010).

Comparando as figuras 3.1 e 3.2 percebe-se que, na topologia proposta no presente trabalho, as distorções tanto angulares como lineares são fortemente reduzidas, apenas as razões de aspectos geométricas são influenciadas, mas dentro dos limites geométricos. Além disso, essa nova topologia não apresenta nenhuma restrição geométrica, como apresentou a melhor topologia desenvolvida por Almeida (2010).

3.2. Desenvolvimento das equações descritivas da malha

O primeiro passo para a implementação do código representativo da topologia otimizada em linguagem FORTAN 90 é a determinação das equações que estabelecem as coordenadas espaciais X, Y e Z dos nós da malha. O modo como essas equações são determinadas foi desenvolvido por Almeida (2010) e consiste em partir do conceito de interseção entre uma reta (linha radial) e um círculo (nó sobre o rotor), da interseção entre uma reta (linha radial) e outro círculo (nó sobre a parte circular do estator), bem como da interseção entre duas retas (linhas radial e parte reta do estator). As retas (linha radial e partes retas do estator) e as partes circulares dos estator, bem como o rotor, são caracterizadas pelas suas respectivas equações lineares ou equações do círculo. A Figura 3.3 ilustra as principais variáveis envolvidas nesse conceito.

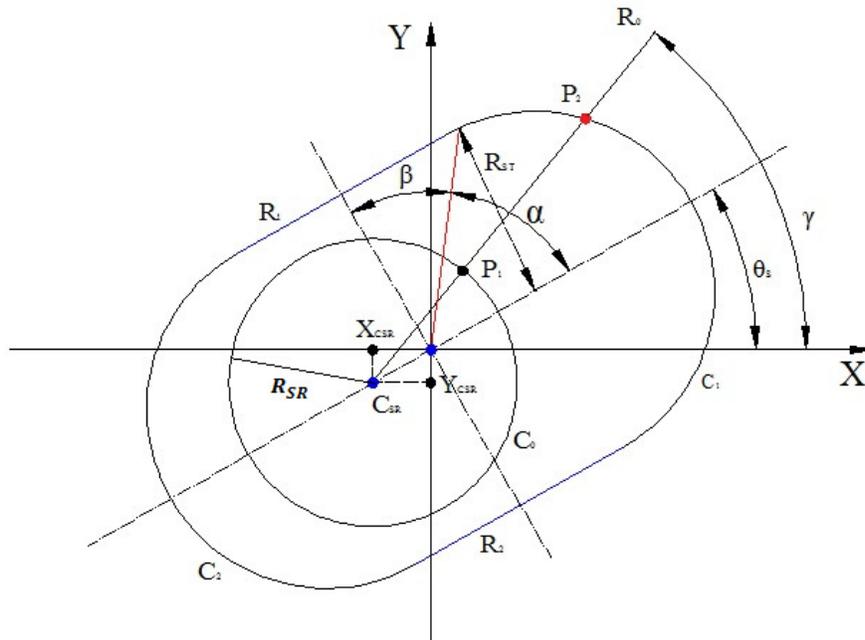


Figura 3.3. Principais variáveis envolvidas na determinação das coordenadas dos pontos da malha.

Na figura 3.3 as variáveis são definidas como:

- γ Posição angular da linha radial.
- θ_s Posição angular do estator, caracterizando uma posição longitudinal/face Z.
- C_0 Circunferência que representa a seção transversal do rotor.
- C_1, C_2 Arcos de circunferência representando as partes circulares da seção do estator.
- R_0 Reta radial utilizada para determinar os nós dos elementos extremos através da intersecção com as retas R_1 e R_2 e os arcos C_0, C_1 e C_2 .
- R_1, R_2 Retas que representam as partes retilíneas da seção transversal do estator.
- P_1 Ponto de intersecção entre a linha radial e a circunferência da seção transversal do rotor no instante t .
- P_2 Ponto de intersecção entre a linha radial e a circunferência da seção transversal do estator no instante t .

R_{SR} Raio da seção transversal do rotor.

R_{ST} Raio menor da seção transversal do estator.

Seguindo essa metodologia, os pontos de interseção P_1 e P_2 são determinados como se segue:

- **Interseção Reta/Círculo**, $\begin{cases} \text{Nó sobre o rotor} - P_1 (R_0/C_0) \\ \text{Nó sobre o estator} - P_2 (R_0/C_1 \text{ e } R_0/C_2) \end{cases}$

Reta Radial - R_0 :

$$\begin{cases} y = Ax + B \\ A = \tan(\gamma) \\ B = X_{CSR}(\tan \theta_s - \tan \gamma) \end{cases} \quad (3.1)$$

Círculo, Rotor e estator - C_0, C_1 e C_2 :

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = R^2 \quad (3.2)$$

Substituindo uma equação na outra, obtém-se a equação de 2º grau:

$$ax^2 + bx + c = 0 \quad (3.3)$$

Onde:

$$\begin{cases} a = A^2 + 1 \\ b = -2 \cdot (x_0 - AB + Ay_0) \\ c = x_0^2 - 2By_0 + y_0^2 - R^2 + B^2 \end{cases} \quad (3.4)$$

$$\text{Rotor (C}_0\text{)} \begin{cases} x_0 = X_{CSR} \\ y_0 = Y_{CSR} \\ R = R_{SR} \end{cases} \quad (3.5)$$

$$\text{Estator (C}_1\text{)} \begin{cases} x_0 = 2E \cos \theta_s \\ y_0 = 2E \sin \theta_s \\ R = R_{ST} \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\text{Estator } (C_2) \begin{cases} x_0 = -2E \cos \theta_S \\ y_0 = -2E \sin \theta_S \\ R = R_{ST} \end{cases} \quad (3.7)$$

A solução dessa equação fornece a coordenada espacial x , a qual deve ser utilizada na Eq. (3.1) para se obter a coordenada espacial y :

$$x = \frac{-b \pm S\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (3.8)$$

Onde:

$$S = \begin{cases} \text{SINAL} [1, \cos \gamma] & \text{para } C_0 \\ \text{SINAL} [1, x_0] & \text{para } C_1 \text{ e para } C_2 \end{cases} \quad (3.9)$$

Aqui, "SINAL" é uma função utilizada na linguagem FORTRAN para dar à variável o sinal do argumento utilizado na função. No caso acima para C_0 a função SINAL atribui a variável S o valor unitário com o sinal do cosseno do ângulo γ .

- OBS.: Quando $\gamma = \left\{ \frac{\pi}{2} \text{ ou } \frac{3\pi}{2} \right\}$:

$$\begin{cases} x = X_{CSR} \\ y = \frac{-b \pm S\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \end{cases} \quad (3.10)$$

Onde:

$$\begin{cases} a = 1 \\ b = -2y_0 \\ c = X_{CSR}^2 - 2X_{CSR}x_0 + x_0^2 + y_0^2 - R^2 \\ S = \text{SINAL} [1, \sin \gamma] \text{ para } C_0 \\ S = \text{SINAL} [1, y_0] \text{ para } C_1 \text{ e para } C_2 \end{cases} \quad (3.11)$$

- Interseção Reta/Reta, R_0/R_1 e R_0/R_2 - Nós sobre as retas do estator

Reta radial - R_0 :

$$\begin{cases} y = Ax + B \\ A = \tan(\gamma) \\ B = X_{CSR}(\tan \theta_S - \tan \gamma) \end{cases} \quad (3.1)$$

Reta do Estator - R_1/R_2 :

$$\begin{cases} y = Cx + D \\ C = \tan \theta_S \\ D = \frac{R_{ST}}{\cos \theta_S}, \text{ para } R_1 \text{ e } D = \frac{-R_{ST}}{\cos \theta_S} \text{ para } R_2 \end{cases} \quad (3.12)$$

Substituindo uma equação na outra, obtém-se a coordenada espacial x :

Para R_1 :

$$x = \frac{D-B}{A-C} \quad (3.13)$$

e para R_2 :

$$x = \frac{-(D+B)}{A-C} \quad (3.14)$$

Tais equações devem ser substituídas na Eq. (3.1) para obtenção da coordenada y .

Para os casos em que $\gamma = \left\{ \frac{\pi}{2} \text{ ou } \frac{3\pi}{2} \right\}$ e $\theta_S \neq \left\{ \frac{\pi}{2} \text{ ou } \frac{3\pi}{2} \right\}$ temos :

$$x = X_{CSR} \quad (3.15)$$

Substituindo o valor de x na equação 3.1 determina-se o valor da coordenada y .

Já para os casos em que $\gamma \neq \left\{ \frac{\pi}{2} \text{ ou } \frac{3\pi}{2} \right\}$ e $\theta_S = \left\{ \frac{\pi}{2} \text{ ou } \frac{3\pi}{2} \right\}$ temos :

Os valores das coordenadas x e y são dados por:

$$\begin{cases} x = S \cdot R_{ST} \\ y = A \cdot x + B \end{cases} \quad (3.16)$$

Onde:

$$\text{para } R_1: \begin{cases} B = Y_{CSR} \\ S = \text{SINAL}[1, -\sin \theta_S] \end{cases} \text{ e } \text{para } R_2: \begin{cases} B = X_{CSR} \\ S = \text{SINAL}[1, \sin \theta_S] \end{cases} \quad (3.17)$$

3.3. Desenvolvimento do algoritmo de geração da malha

As equações desenvolvidas na seção anterior são implementadas em linguagem FORTRAN 90 para o desenvolvimento do algoritmo de geração da malha. Vale salientar que essas equações representam a principal diferença entre o trabalho desenvolvido por Almeida (2010) e o presente trabalho, que, ao apresentar uma nova e melhorada topologia, desenvolve novas equações. Uma vez desenvolvidas as equações, o restante do processo de implementação e de desenvolvimento do algoritmo de geração da malha é idêntico ao executado por Almeida (2010).

O processo de criação da malha se dá através da discretização dos pontos sobre o segmento de reta formado pelos pontos P_1 e P_2 , da discretização do ângulo de giro (ou posição angular) γ da reta radial R_0 e da discretização longitudinal ao longo da direção z . Esta última discretização é feita de forma simples como se segue:

$$Z_i = Z_0 + (i - 1) \cdot \Delta Z \quad (3.18)$$

Onde i representa a posição da face Z_i , ao longo do eixo longitudinal da bomba.

A figura 3.4 apresenta o fluxograma do algoritmo de geração de malhas desenvolvido por Almeida (2010) e utilizado na implementação da topologia proposta neste trabalho. Para uma completa descrição de cada sub-rotina que faz parte do algoritmo, consultar o trabalho do referido autor.

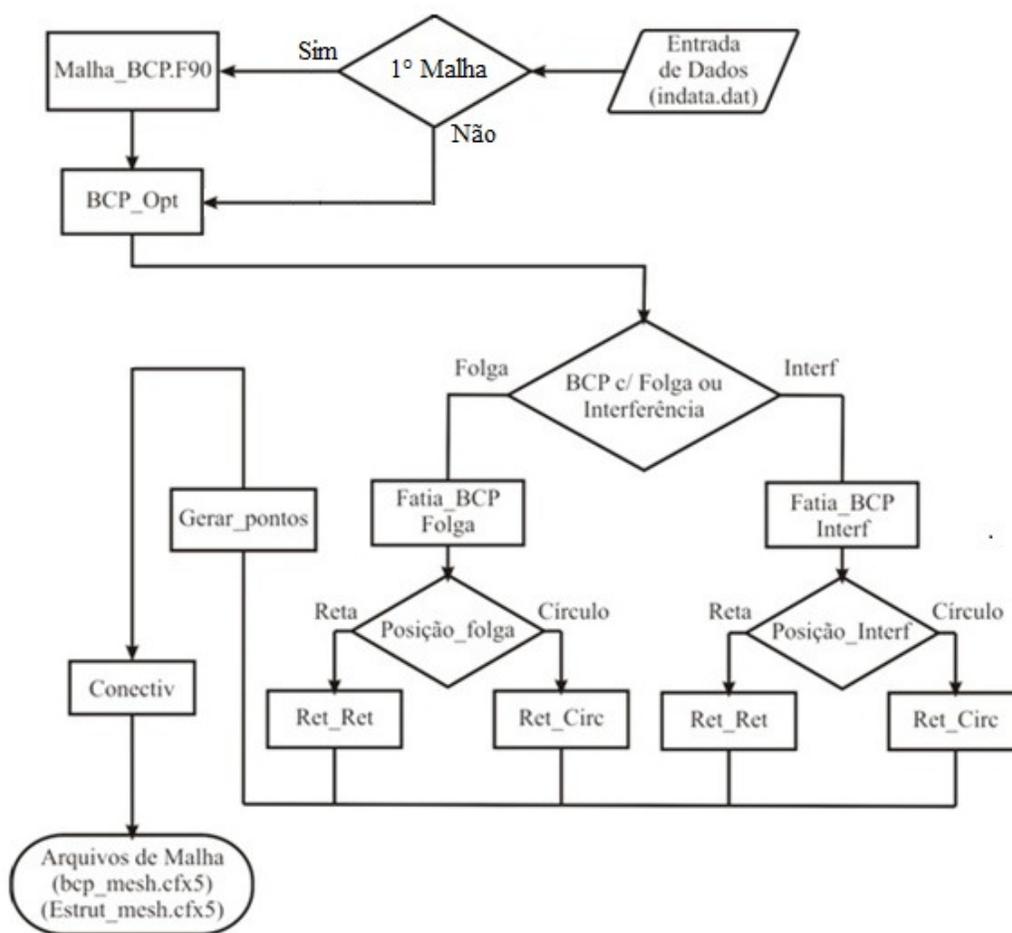


Figura 3.4. Fluxograma do algoritmo das sub-rotinas de geração de malhas. Pessoa (2010).

3.4. Geração da malha

Como mencionado anteriormente, uma vez implementadas as equações que descrevem a topologia, o processo restante de geração da malha neste trabalho, bem como as etapas descritas a seguir são idênticos aos encontrados no trabalho de Almeida (2010). Ainda assim, estas etapas são aqui apresentadas, por serem consideradas de suma importância para o entendimento dos resultados e para evitar consultas freqüentes às referências.

Para dar início a geração computacional da malha deve-se inserir no programa os parâmetros geométricos da bomba, bem como os parâmetros referentes à qualidade da malha. Os parâmetros geométricos utilizados são os mesmos da bomba utilizada no experimento de Gamboa *et al.*(2002) e apresentados na tabela 3.1. Os parâmetros das malhas, tanto espacial como temporal são os mesmos utilizados por Almeida (2010) e apresentados nas tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente. Para obter detalhes sobre o cálculo desses parâmetros, consultar Almeida (2010).

Tabela 3.1. Parâmetros geométricos.

Número de Lóbulos		1
Excentricidade	E	4,039 mm
Raio da Seção Rotor	R_{SR}	19,939 mm
Menor Raio do Estator	R_{ST}	20,124 mm
Folga/Interferência	w	0,185 mm
Passo do Estator	P_s	119,990 mm
Posição Angular do Rotor no Instante Inicial	θ_0	$\pi/2$
Número de Passos do Estator	NPST	3

Tabela 3.2. Parâmetros da malha espacial.

Parâmetros de Entrada		
Número de Pontos ao longo de uma Linha “Circular” em uma Seção Transversal da BCP	NPT_L	200
Número de Linhas “Circulares” em uma Seção Transversal da BCP	NL_Z	11
Número de Seções Transversais, ou Faces, por Passo da BCP	NFZ_{PST}	101
Parâmetros de Saída		
Número Total de Pontos na BCP	NPT_{TOT}	662.200
Número de Pontos por Face/Seção Transversal	NPT_{FZ}	2.200
Número Total de Faces ao Longo da BCP	NFZ_{TOT}	301
Número de Total de Elementos Hexaédricos na BCP	NEL	600.000
Número de Elementos por Fatia: Estator/Rotor	NEL_{CAS}	60.000
Número de Elementos por Fatia: Entrada/Saída	NEL_{FZ}	2.000

Tabela 3.3. Parâmetros da malha temporal.

Número de Passos de Tempo por Rotação do Rotor		N_{MESHT}	420
Cálculos			
Rotação	Tempo para Rotor Efetuar uma Rotação/Volta	Passo de Tempo	
RPM	t_{volta} (s)	dt (s)	
100	0,6000	0,0014	
200	0,3000	0,0007	
300	0,2000	0,0005	
400	0,1500	0,0004	

Esses parâmetros são inseridos através da leitura de um arquivo de entrada de dados **INDATA.DAT** mostrado na figura 3.5, a seguir, e apresentados ao usuário através da tela de execução do programa, mostrada na figura 3.6, também a seguir.

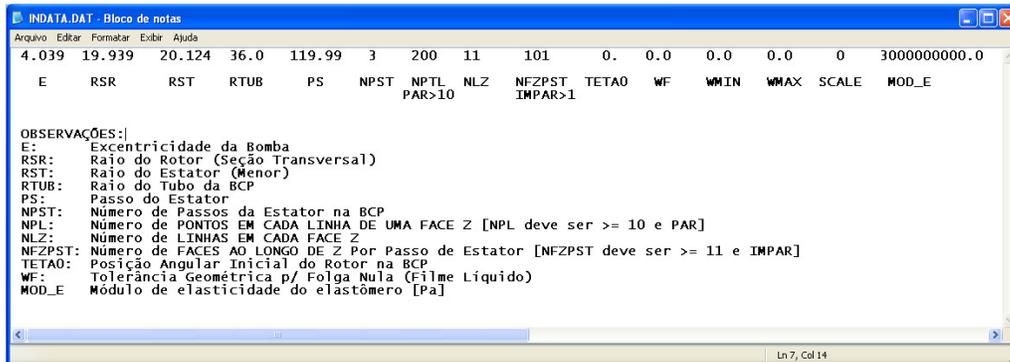


Figura 3.5. Arquivo de entrada.

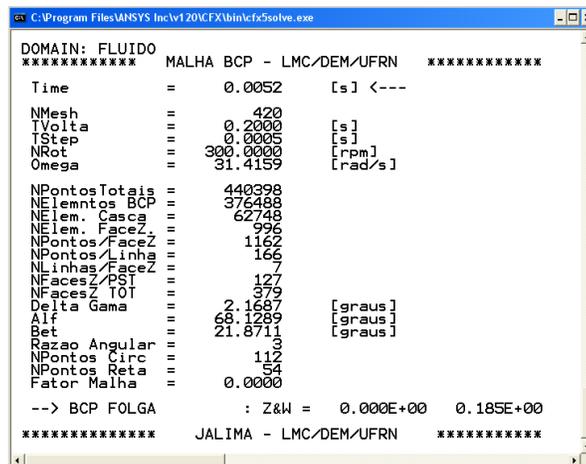


Figura 3.6. Tela de Execução do Programa.



CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão



RESULTADOS E DISCUSSÃO

O presente capítulo apresenta a validação do procedimento de geração de malhas computacionais utilizando a nova topologia proposta, através da comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e os resultados experimentais e numéricos reportados pela literatura. Além de validar o procedimento, os resultados apresentados mostram a sua eficiência, vantagens e desvantagens em relação às topologias utilizadas anteriormente por outros pesquisadores.

4.1. Validação e comparação com topologia anterior

Resultados numéricos para a vazão volumétrica bombeada foram utilizados para validar o uso da topologia proposta neste trabalho. Assim como fizeram Pessoa (2009) e Almeida (2010), os resultados do presente trabalho foram comparados com os obtidos experimentalmente por Gamboa *et al.* (2002), que estudaram o comportamento dinâmico de BCPs metálicas para escoamento monofásico sob diversas condições operacionais. Pessoa (2009) e Almeida (2010) utilizaram três e dois fluidos para comparação, respectivamente. Porém, em virtude da menor complexidade inerente aos trabalhos de conclusão de curso em nível de graduação, neste trabalho foi utilizado apenas um fluido, para o qual foram construídas curvas de vazão volumétrica versus diferencial de pressão aplicado à BCP. Além de validar os resultados por meio da comparação com os resultados experimentais obtidos por Gamboa *et al.*(2002), os resultados do presente trabalho também foram comparados com os obtidos por Pessoa (2009) e Almeida (2010), que utilizaram a topologia centrada no estator.

Na figura 4.1, a seguir, é apresentada, como principal produto deste trabalho, a malha 3D gerada do domínio fluido, numa vista isométrica. Pode-se observar que na seção transversal as linhas acompanham o movimento do rotor e longitudinalmente acompanham o eixo Z ao longo do comprimento da bomba.

Já pra efeito de comparação, são apresentadas, na figura 4.2, também a seguir, as malhas geradas para uma seção transversal da bomba, tanto pela topologia utilizada por Pessoa(2009) e por Almeida (2010) como pela topologia desenvolvida no presente trabalho. Nessa figura o número de nós das malhas foi reduzido para facilitar a visualização.

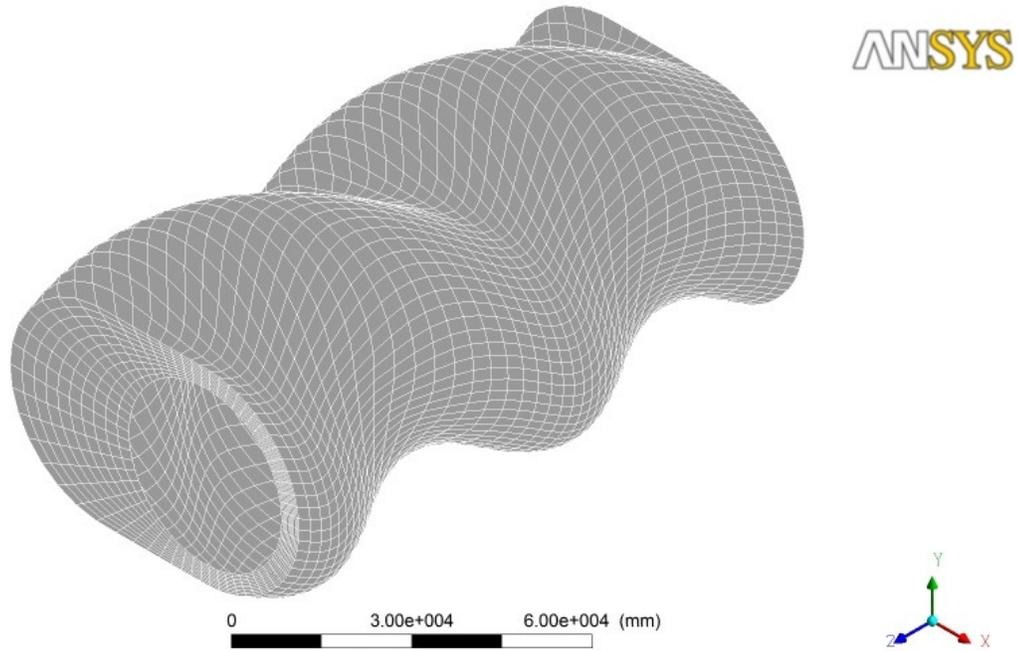


Figura 4.1. Malha 3D gerada utilizando a nova topologia desenvolvida no presente trabalho.

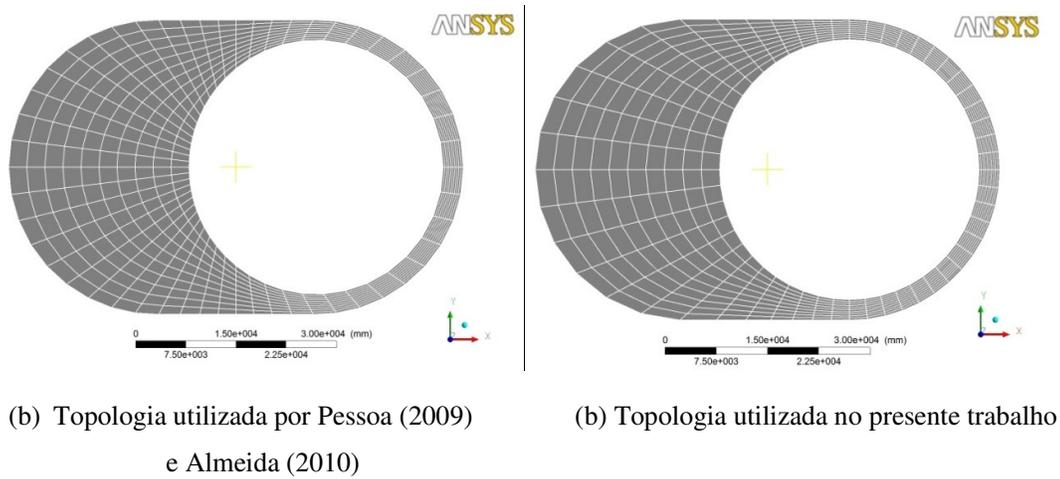


Figura 4.2. Comparação entre as malhas geradas para a seção transversal da BCP na posição de máximo deslocamento do rotor.

A comparação entre as malhas apresentadas na figura 4.2 confirma a análise feita com as representações das topologias no Capítulo 3 (figura 3.2). Na topologia proposta no presente trabalho, as distorções tanto angulares como lineares são fortemente reduzidas, apenas as razões de aspectos geométricas são influenciadas, mas dentro dos limites geométricos. Além disso, essa nova

topologia não apresenta nenhuma restrição geométrica, como apresentou a topologia desenvolvida por Almeida (2010).

Na figura 4.3 são comparados entre si os resultados experimentais de Gamboa *et al.* (2002), os obtidos por Pessoa (2009) e Almeida (2010) e os alcançados no desenvolvimento do presente trabalho. O fluido utilizado é um óleo com viscosidade igual à 42×10^{-3} Pa.s (42 cP) e a unidade da vazão apresentada é barris de óleo por dia, como função do diferencial de pressão aplicado à BCP, em PSI, para as rotações de 200 RPM e 300 RPM.

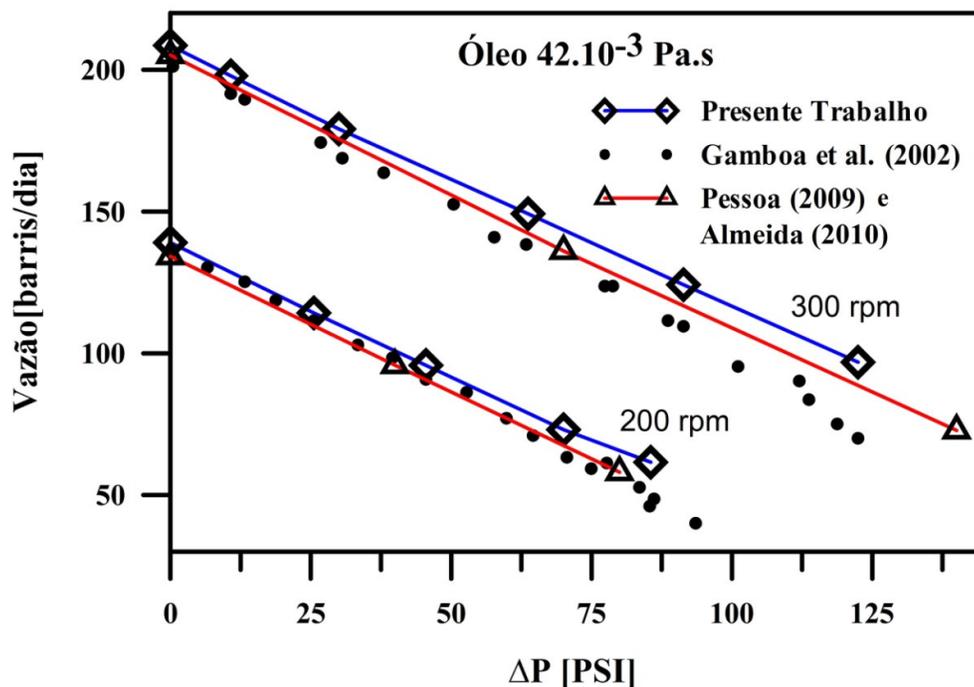


Figura 4.3. Validação numérica e comparação dos resultados do presente trabalho com os de Pessoa (2009) e Almeida (2010) e Gamboa *et al.* (2002) para vazão volumétrica versus gradiente de pressão.

Analisando-se a figura 4.3, constata-se a adequação dos resultados obtidos na simulação com os resultados experimentais e a clara validação da metodologia apresentada, para a simulação do bombeamento desse fluido nas condições de rotação empregadas.

O modelo utilizado neste trabalho é o mesmo desenvolvido por Pessoa (2009) e Almeida (2010) para resolver as equações de Navier-Stokes tridimensionais transientes, apresentadas a seguir, para o escoamento no interior de BCPs baseado na discretização das equações governantes usando o método dos volumes finitos baseado em elementos. Conforme descrito no Capítulo 6, a malha numérica empregada é caracterizada por possuir 662.200 pontos ($200 \times 11 \times 101$).

Os resultados obtidos no desenvolvimento do presente trabalho também estão disponibilizados no final deste capítulo em forma de tabelas, para que os valores numéricos possam ser consultados com facilidade.

Tal validação é melhor estabelecida a partir do estudo do comportamento de convergência das principais características numéricas da simulação, conforme está sendo realizado por Souza (2011) em um estudo do refino das malhas geradas pela topologia otimizada.

Para melhor compreensão da qualidade dos resultados, são apresentadas a seguir as curvas dos erros relativos da simulação realizada neste trabalho em relação aos resultados experimentais utilizados na validação.

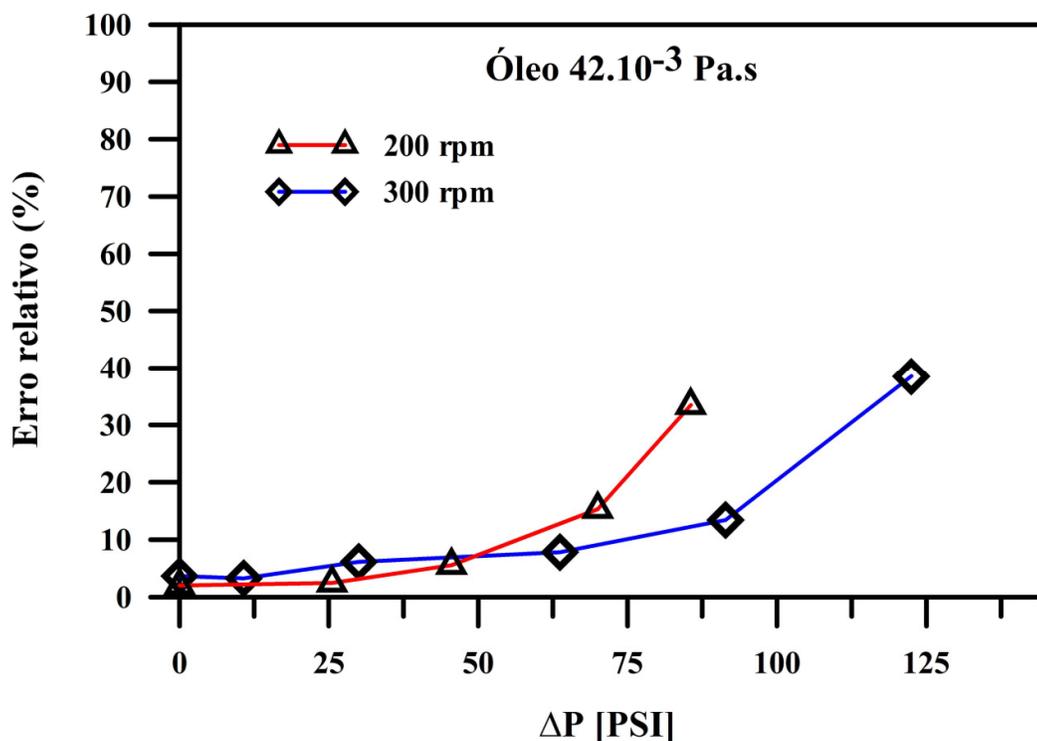


Figura 4.4. Erro relativo da simulação com relação aos resultados experimentais de Gamboa (2002)

Constata-se na figura 4.4 o crescimento do erro relativo com o aumento do diferencial de pressão aplicado na bomba. Isso acontece devido ao fato de que quanto maior o diferencial de pressão aplicado na bomba maior será o efeito da recirculação (passagem de fluido de uma determinada cavidade para a cavidade anterior, no sentido contrário ao sentido de bombeio). Nesses casos se faz necessário o uso de uma malha mais refinada para que esse efeito seja percebido.

Como mencionado anteriormente, com o uso da topologia desenvolvida no presente trabalho é possível realizar simulações do escoamento no interior das Bombas de Cavidades Progressivas e descrever informações detalhadas do escoamento como campos de velocidade e de pressão. Como exemplo desse uso a Figura 4.15 apresenta ilustrações dos contornos da pressão para escoamento de água, em diferentes posições angulares do rotor são apresentadas.

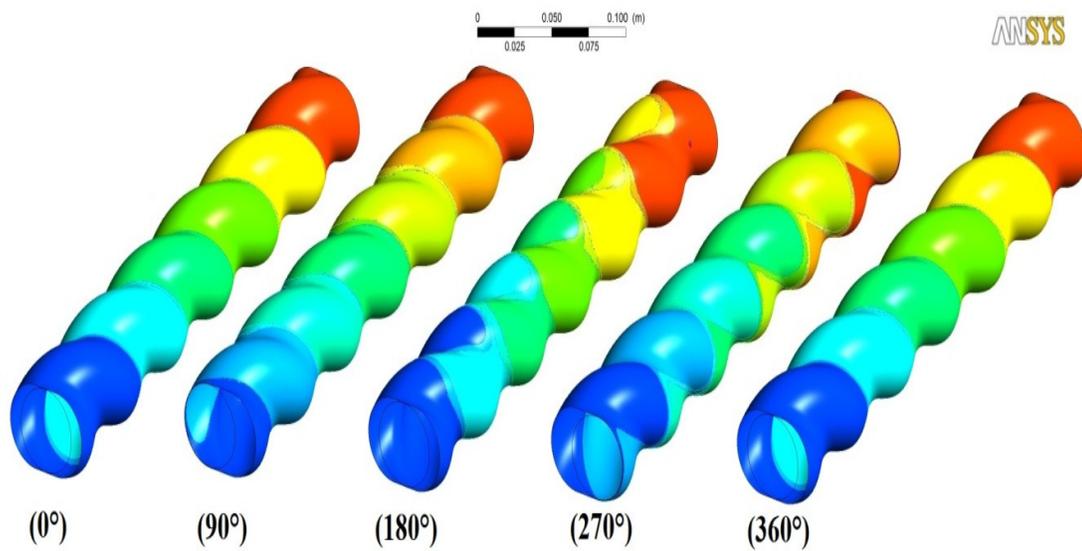


Figura 4.5. Campos de Pressão ao longo da Bomba para Diferentes Posições do Rotor.

Tabela 4.1. Valores da vazão bombeada em função do diferencial de pressão calculados no presente trabalho e os valores experimentais apresentados no trabalho experimental de Gamboa *et al.* (2002), para a rotação de 200 RPM.

200 RPM			
ΔP (PSI)	Vazão - Presente Trabalho (barris/ dia)	Vazão – Gamboa <i>et al.</i> (2002) (barris/ dia)	Erro relativo (%)
0	139,09	136,32	2,03
25,54	114,23	111,49	2,46
45,54	95,75	90,709	5,56
70,62	73,06	63,345	15,34
85,54	61,52	46,115	33,41

Tabela 4.2. Valores da vazão bombeada em função do diferencial de pressão calculados no presente trabalho e os valores experimentais apresentados no trabalho experimental de Gamboa *et al.* (2002), para a rotação de 300 RPM.

300 RPM			
ΔP (PSI)	Vazão - Presente Trabalho (barris/dia)	Vazão - Gamboa <i>et al.</i> (2002) (barris/dia)	Erro relativo (%)
0	208,56	201,18	3,67
10,77	197,83	191,55	3,28
30,62	179,11	168,75	6,14
63,39	149,17	138,34	7,83
91,39	124,16	109,46	13,43
122,46	96,84	69,932	38,48

CAPÍTULO 5
Conclusões e Perspectivas Futuras

CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Depois de analisados os resultados, comprova-se a eficiência da topologia proposta neste trabalho em gerar malhas que possam representar bem a geometria das Bombas de Cavidades Progressivas e produzir resultados satisfatórios e devidamente validados em relação à descrição do escoamento no interior de tais bombas.

Os problemas enfrentados por Pessoa (2009) e Almeida (2010), como as grandes distorções apresentadas pelos elementos durante a simulação e a impossibilidade de simular o escoamento em BCPs com excentricidade maior do que ou igual à metade do raio da seção do rotor foram sanados com o emprego da topologia desenvolvida no presente trabalho. Dessa forma, será possível, para bombas de quaisquer dimensões, fornecer informações detalhadas dos campos de pressão e velocidade dentro da bomba, determinar diversas características do seu escoamento e prever a performance de tais bombas.

Como perspectivas futuras, vislumbram-se o estudo do comportamento da convergência das principais características numéricas da simulação (estudo de refino de malha), o estudo da influência da velocidade do movimento da malha nos resultados e o desenvolvimento das equações desta topologia para aplicação em bombas com folga nula ou interferência entre o rotor e o estator. Estes os trabalhos estão sendo desenvolvidos por Souza (2011) e por Assmann (2011), respectivamente.

CAPÍTULO 6

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) ALMEIDA, R., 2010, “Simulação Computacional da Interação Fluido-estrutura em Bombas de Cavidades Progressivas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN
- 2) PESSOA, P., 2009, “Simulação Computacional do Escoamento em Bombas de Cavidades Progressivas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- 3) ANDRADE, S. F., 2008, "Modelo Assintótico Para Escoamento Monofásico Em Bomba De Cavidade Progressiva”, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio, Rio de Janeiro/RJ.
- 4) ASSMANN, B., 2005, “Curso de Bombeio de Cavidades Progressivas”, PETROBRAS.
- 5) ASSMANN, B., 2008, “Simulação, Controle Inteligente e Sistemas Especialista de Dimensionamento de Poços de Petróleo com Elevação por Bombeio de Cavidades Progressivas”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- 6) GAMBOA, J.; OLIVET, J.; IGLESIAS, J. e GONZALEZ, P., 2002, "Understanding the Performance of a Progressive Cavity Pump with a Metallic Stator", Proceedings of 20th International Pump Users Symposium.
- 7) GAMBOA, J.; OLIVET, J. e ESPIN, S., 2003, "New Approach for Modelling Progressive Cavity Pumps Performance", Proceedings of SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Denver, Colorado, USA.
- 8) MOINEAU, R., 1930, "Le Nouveau Capsulism", Tese de Doutorado, University of Paris, Paris.
- 9) ROBELLO, S. G. e SAVETH, K., 1998, "Progressing Cavity Pump (PCP): New Performance Equations for Optimal Design", Proceedings of SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, Texas, US, SPE 39786.
- 10) THOMAS, J. E., 2001, “Fundamentos de Engenharia de Petróleo”, Editora Interciência, Rio de Janeiro/RJ.