

Monografia de Graduação

Estudo da Influência da Folga Rotor/Estator sobre o Escoamento em Bombas de Cavidades Progressivas Metálicas via Simulação Computacional

por

Oto Lima de Albuquerque 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

*Natal – Rio Grande do Norte
Janeiro de 2015*



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
NUPEG – PRH-14
ENGENHARIA DE PROCESSOS EM PLANTAS DE PETRÓLEO E GÁS
NATURAL**

**Estudo da Influência da Folga Rotor/Estator sobre o
Escoamento em Bombas de Cavidades Progressivas
Metálicas via Simulação Computacional**

Oto Lima de Albuquerque 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

*Natal – RN
Janeiro de 2015*



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
NUPEG – PRH-14
ENGENHARIA DE PROCESSOS EM PLANTAS DE PETRÓLEO E GÁS
NATURAL

Estudo da Influência da Folga Rotor/Estator sobre o
Escoamento em Bombas de Cavidades Progressivas
Metálicas via Simulação Computacional

Oto Lima de Albuquerque Neto

Banca Examinadora do Trabalho de Conclusão de Curso

Prof. Dr. João Alves de Lima
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Orientador

Prof. Dr. Sandi Itamar Schafer de Souza
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Prof. Dr. Cleiton Rubens Formiga
Universidade Federal do Rio Grande do Norte - Avaliador Interno

Natal – RN

Janeiro de 2015

“Dedico este trabalho aos meus pais
Oto Petison de Albuquerque e
Marília Coriolano de Albuquerque e
a minha namorada Isabel Cavalcanti
Cabral, por todo amor e carinho que
eles sempre me deram”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por estar sempre presente e pelas bênçãos que me tem concedido em todos os momentos da minha vida.

A minha namorada Isabel Cavalcanti Cabral, que me acompanhou em todos os momentos difíceis que passamos nestes longos 5 anos de graduação. Com seu apoio e companheirismo, me reergueu nos momentos em que foram decisivos para continuar a prosseguir no curso.

Ao meu pai Oto Petison de Albuquerque, por ser um exemplo de homem a ser seguido, pois seu amor e dedicação a nossa família sempre irão me inspirar.

A minha mãe Marília Coriolano de Albuquerque, por sempre estar presente em minha vida sendo companheira e amiga, educando e ensinando com muito amor a mim e aos meus irmãos o caminho que deveríamos seguir em todos os momentos das nossas vidas.

Aos meus irmãos Oto Petison de Albuquerque Filho e Rebeca Maria Coriolano de Albuquerque que me ensinaram na pratica o significado da palavra partilhar, pelo apoio e por torcer pelo meu sucesso.

Ao meu avô Oto Lima de Albuquerque (*in memoriam*), as lembranças são vagas, mas sei que foi um grande homem e que contribuiu de maneira direta para a educação e amor que meu pai aprendeu a ter e que reflete em nossa família até hoje.

Ao meu tio Emanuel Coriolano Júnior (*in memoriam*) que sempre foi como um segundo pai enquanto esteve conosco, com seu jeito alegre e divertido de ser, sempre prezando pela minha educação e a dos meus irmãos. Saudades eternas.

Ao professor Dr. João Alves de Lima pela amizade e por toda a contribuição para a realização do presente trabalho.

Ao professor Dr.Sandi Itamar Schafer de Souza por disponibilizar o Laboratório de Mecânica Computacional para realização do presente trabalho e por acreditar que este projeto era viável.

Ao professor Dr. Osvaldo Chiavone, a Maria Brunet e a todos os colegas da NUPEG.

A Petrobras e PRH-ANP 14 pelo apoio e suporte financeiro para a realização deste trabalho.

Enfim, agradeço a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta para realização do presente trabalho e finalização do curso.

“Só existem dois dias no ano que nada pode ser feito. Um se chama ontem e o outro se chama amanhã, portanto hoje é o dia certo para amar, acreditar, fazer e principalmente viver.” – Dalai Lama.

Estudo da Influência da Folga Rotor/Estator sobre o Escoamento em Bombas de Cavidades Progressivas Metálicas via Simulação Computacional

RESUMO

O escoamento de óleos pesados é um dos desafios encontrados pela indústria de petróleo em todo o mundo. Normalmente, para poços que produzam óleos com estas características, o sistema de elevação artificial de bombeio por cavidades progressivas (BCP) é o mais indicado, devido ao seu baixo custo inicial e à sua maior eficiência de bombeamento em relação aos demais métodos de elevação. Originalmente, as bombas de cavidades progressivas foram projetadas tendo como elementos principais um rotor metálico e um estator elastomérico. No entanto, em virtude da alta viscosidade dos óleos de alguns campos de produção, projetos onde o estator elastomérico foi substituído por um metálico estão cada vez mais sendo desenvolvidos e testados, e os resultados obtidos tem demonstrado sua boa aplicabilidade. Por outro lado, estudos experimentais têm indicado que a eficiência destas novas bombas é fortemente afetada pela folga existente entre o rotor e o estator. Desta forma, a partir da interação entre o "*software*" de dinâmica dos fluidos computacional CFX/Ansys e uma subrotina própria especialmente desenvolvida para geração instantânea de malhas tridimensionais de BCPs, o presente trabalho tem como principal objetivo estudar a influência da folga entre o rotor o estator em BCPs sobre o comportamento operacional do escoamento no interior dessas bombas, em várias condições de teste. Comparações com resultados experimentais, para fins de validação do modelo computacional, e análises de convergência foram realizadas para diversas situações de operação das bombas. Com relação ao comportamento numérico do modelo, verificou-se uma grande dificuldade de convergência dos resultados em função das características das malhas numéricas empregadas (número de nós e razão de aspecto). As simulações realizadas com o rotor parado (para estudo inicial do retorno do fluido no interior da bomba) apresentaram, paradoxalmente, as maiores dificuldades de simulação. Por outro lado, as simulações realizadas em regime transiente (com o rotor em movimento para estudo da performance de bombeamento da BCP), apresentaram as menores diferenças entre os resultados numéricos e experimentais e as maiores taxas de convergência. Não obstante, para um ou outro regime, foram testadas malhas de diferentes tamanhos, para se comprovar a convergência dos resultados e possibilitar a comparação com os resultados experimentais. Por outro lado, com relação à eficiência do processo de bombeamento, confirmou-se a grande sensibilidade da bomba com a folga entre o rotor e o estator, isto é, pequenas variações positivas nos valores de folga resultam em grande redução na performance das BCPs. Assim, qualquer projeto de otimização e de intensificação do uso desse tipo de bomba deve levar em consideração esse parâmetro.

Palavras-chaves: Bombeio por Cavidades Progressivas, Simulação Computacional, Influência da Folga Rotor/Estator, Otimização de BCPs.

Computational Simulation of the Rotor/Stator Clearance Effect on Metallic Progressing Cavity Pump Flow Performance

ABSTRACT

The flow of heavy oils is one of the challenges encountered by the oil industry all over the world. Typically, for wells that produce oil with these characteristics, the system of artificial lift for progressive cavity pumping (PCP) is the most suitable due to its low initial cost and its higher pumping efficiency compared to other lifting methods. Originally, progressive cavity pumps are designed with the main elements are the metallic rotor and a stator elastomer. However, due to the high viscosity of the oils of some production fields, where the elastomeric stator designs has been replaced by a metal are increasingly being developed and tested, and the results have shown a good applicability. Furthermore, experimental studies have indicated that these new pump efficiency is strongly affected by the clearance between the rotor and the stator. Thus, from the mutual interaction between the software of computational fluid dynamics CFX/Ansys and a proprietary subroutine specially developed for instantaneous generation of three-dimensional PCPs meshes, the present work aims to study the influence of the clearance between the rotor and stator on the operational behavior of the flow in BCPs in various test conditions. Comparisons with experimental results for validation of the computational model, and analyzes the convergence were performed for various situations of operation of the pumps. With respect to the numeric behavior of the model, we found great difficulty in convergence of results depending on the characteristics of the numerical mesh employed (number of nodes and aspect ratio). The simulations performed with the rotor stopped (for initial study of the return of the fluid inside the pump) had, paradoxically, the greatest difficulties simulation. Moreover, the simulations in transient (with the moving rotor to study the pumping performance of PCP), showed the smallest differences between numerical and experimental results and higher rates of convergence. Nevertheless, for one or another regime, were tested different mesh sizes to prove the convergence of the results and allow comparison with experimental results. On the other hand, with respect to the efficiency of the pumping process, confirmed the high sensitivity of the pump with clearance between the rotor and stator, that is, positive small variations in the clearance resulting in greatly reduced performance of PCPs. So any design optimization and intensification of the use of this type of pump should take into consideration this parameter.

Keywords: Progressing Cavity Pump (PCP), Computational Computational, Clearance Rotor/Stator Influence, PCP Optimization, Flow Performance

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. MOTIVAÇÃO	17
1.2. OBJETIVOS	18
1.3. ESTRUTURA DO TEXTO	18
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
2.1. TEORIA E CONCEITOS DA ELEVAÇÃO ARTIFICIAL POR BCP	20
2.2. COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE ELEVAÇÃO ARTIFICIAL	22
2.3. TERMINOLOGIAS DA BCP	23
2.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	27
2.4.1. ESTUDO DA CINEMÁTICA	29
3. MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1. DADOS EXPERIMENTAIS	37
3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA	39
3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO	40
3.4. TOPOLOGIA DA MALHA EMPREGADA	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1. ROTOR ESTÁTICO	46
4.1.1. ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA	46
4.1.2. RESULTADOS P/ FLUIDO COM 134 CENTIPOISE	49
CASO 1 - ROTOR 1	49
CASO 2 - ROTOR 2	51
4.1.3. RESULTADOS P/ FLUIDO COM 75CENTIPOISE	53
4.1.4. INFLUÊNCIA DA FOLGA	55
4.2. ROTOR DINÂMICO	57
4.2.1. VAZÃO X DIFERENCIAL DE PRESSÃO	57
4.2.2. EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA	60
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	63
5.1. CONCLUSÕES	64
5.2. SUGESTÕES	65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

APÊNDICE

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Modelo Computacional da BCP.	17
Figura 2.1 - Princípio de funcionamento de uma BCP (Assmann, 2008).	20
Figura 2.2 - Sistema da BCP e seus componentes (Assmann, 2008).	21
Figura 2.3 - Seção frontal da BCP: Parâmetros principais e a área efetivo escoamento (Sanchez Marin, 2002).	24
Figura 2.4 - Tipos de geometrias do conjunto rotor/estator (Assman, 2012).	25
Figura 2.5 - Consumo da potência de uma BCP (Sanchez Marín, 2002).	26
Figura 2.6 - Visão geométrica da secção transversal de uma BCP (Almeida, 2010).	28
Figura 2.7 - Representação do passo do estator.	29
Figura 2.8 - Representação do passo do rotor.	29
Figura 2.9 - Vazão versus diferencial de pressão na bomba, para diferentes rotações e tipo de BCP (Almeida, 2010).	30
Figura 2.10 - Análise de Convergência (vazão em função da razão do número de nós da malha), para as razões de aspecto máxima de ~71,0 e ~35,0 (Almeida, 2010).	31
Figura 2.11 - Análise de Convergência (vazão em função da razão de aspecto da malha), para um número de nós de ~ 665.020 (Almeida, 2010).	31
Figura 2.12 - Malha de uma seção transversal de uma BCP com interferência, rotor na posição limite (Assman, 2011).	32
Figura 2.13 - Malha de uma seção transversal de uma BCP com interferência, rotor na posição central (Assman, 2011).	32
Figura 2.14 - Representação 3D da Malha de uma BCP com interferência (Assman, 2011).	33
Figura 2.15 - Conceito de Razão de aspecto da malha (Souza, 2011).	33
Figura 2.16 - Convergência da vazão volumétrica em função do número de nós. (Rotação de 300 RPM, óleo de 42 cP e diferencial de pressão de 120 psi - Souza, 2011).	34
Figura 2.17 - Convergência da vazão volumétrica em função do número de nós. (Rotação de 300 RPM, óleo de 42 cP e diferencial de pressão de 0 psi - Souza, 2011).	34
Figura 3.1 - Posições relativas do rotor no estator nos testes estáticos (Sanchez Marín, 2002).	39
Figura 3.2 - Domínio computacional e condições de contorno da BCP.	40

Figura 3.3 - Linhas de base para traçado da malha da região fluida considerando a topologia centrada no estator, para duas posições do rotor (Almeida, 2010).	42
Figura 3.4 - Malhas em 3D com a topologia centrada no estator (Almeida, 2010).	42
Figura 3.5 - Linhas de base para traçado da malha da região fluida (centrada na seção do rotor), para duas posições do rotor (Santos Neto, 2011).	43
Figura 3.6 - Malha em 3D com topologia centrada na seção do rotor (Santos Neto, 2011).	43
Figura 4.1 - Vazão em função do número de nós da malha. Pressão de 108,09 psi e folga 5.	46
Figura 4.2 - Vazão pela razão de aspecto. Pressão de 108,09psi e folga 5.	47
Figura 4.3 - Vazão em função do número de nós da malha. Pressão de 24,46 psi e folga 5.....	48
Figura 4.4 - Vazão pela razão de aspecto. Pressão de 24,46 psi e folga 5.	48
Figura 4.5 - Vazão versus diferencial de pressão para as posições 1 e 2, e folga 1 (maior).	50
Figura 4.6 - Vazão versus diferencial de pressão para a posição 1, e folga 3 (menor). .	50
Figura 4.7 - Vazão versus diferencial de pressão para as posições 1 e 2, e folga 5 (intermediária).	51
Figura 4.8 - Vazão versus diferencial de pressão para as posições 1 e 2, folga 2 (maior).	52
Figura 4.9 - Vazão versus diferencial de pressão para a posição 1, folga 4 (menor).	52
Figura 4.10 - Vazão versus diferencial de pressão para as posições 1 e 2, folga 6 (intermediária).	53
Figura 4.11 - Vazão versus diferencial de pressão para as posições 1 e 2, e folga 5 (fluido 75 cp).	54
Figura 4.12 - Vazão versus diferencial de pressão para as posições 1 e 2, e folga 6 (Fluido 75 cp).....	54
Figura 4.13 - Vazão versus diferencial de pressão na posição 2 do rotor, para as folgas 5 e 6, Fluidos com 134 e75 cp, respectivamente.	55
Figura 4.14 - Vazão volumétrica versus folga rotor/estator na bomba, para os diferentes fluidos.	56
Figura 4.15 - Vazão versus diferencial de pressão para 4 rotações. Fluido com 134cP, folga 5.	58
Figura 4.16 - Vazão versus diferencial de pressão para 4 rotações. Fluido com 134cP, folga 6.	58
Figura 4.17 - Comparação da vazão versus diferencial de pressão em função da folga, Fluido com 134 cP, folgas 5 e 6 e quatro rotações.	59

Figura 4.18 - Vazão versus diferencial de pressão para 4 rotações. Fluido com 75 cP, folga 5.	60
Figura 4.19 - Eficiência volumétrica versus diferencial de pressão em função da rotação. Fluido de 134 cp e folga 5	61
Figura 4.20 - Eficiência volumétrica versus diferencial de pressão em função da rotação. Fluido de 134 cp e folga 6	61
Figura 4.21 - Eficiência volumétrica versus diferencial de pressão em função da rotação. Fluido de 75 cp e folga 5	62

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS ROTORES E DO ESTATOR (SANCHEZ MARIN, 2002)	39
TABELA 2 - RAIOS DOS ROTORES E DOS ESTADORES	40
TABELA 3 - FOLGAS (EM MM) DEFINIDAS A PARTIR DAS DIMENSÕES DO ROTOR E DO ESTATOR	40
TABELA 4 - CONFIGURAÇÃO DO COMPUTADOR UTILIZADO NAS SIMULAÇÕES	43
TABELA 5 - CARACTERÍSTICAS NUMÉRICAS DAS MALHAS EMPREGADAS PARA CADA FOLGA NA BOMBA	46

LISTA DE SÍMBOLOS

d_{SM}	Maior diâmetro do Estator	[mm]
d_{HR}	Maior diâmetro do Rotor	[mm]
d_R	Menor diâmetro do Rotor	[mm]
d_S	Menor diâmetro do Estator	[mm]
d_{ti}	Diâmetro do tubo do Estator	[mm]
D	Deslocamento	[mm]
E	Excentricidade	[mm]
n	Rotação do rotor	[r.p.s]
$NPST$	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	
N_{MESHT}	Número de Passos de Tempo por Rotação do Rotor	

P_{desc}	Pressão de descarga	[PSI]
P_{suc}	Pressão de sucção	[PSI]
P_H	Potência hidráulica	[PSI]
P_I	Potência interna requerida pela bomba em seu eixo de transmissão	[PSI]
P_E	Perdas devido ao escoamento	[PSI]
P_A	Perdas devido ao atrito	[PSI]
P_{ST}	Passo do Estator	[mm]
P_R	Passo do Rotor	[mm]
Q_r	Vazão real	[BPD]
Q_t	Vazão teórica	[BPD]
R_{SR}	Raio da seção transversal do rotor	[mm]
R_{ST}	Raio menor da seção transversal do estator	[mm]
S	Escoamento que ocorre entre as folgas internas da BCP	[BPD]
T^{Turb}	Tensor Tensão Turbulenta	
W	Folga ou Interferência entre o Rotor e o Estator	[mm]
η_v	Eficiência volumétrica	
ΔP	Diferença de pressão entre a descarga e a sucção da bomba	[PSI]

η_i Eficiência interna

CAPÍTULO 1

Introdução

INTRODUÇÃO

Sabe-se que desde a última década até os dias atuais, o petróleo vem sendo a principal fonte de energia e abastecimento em vários setores, desde os industriais até os residenciais. Face à dificuldade de sua obtenção e produção, diversos métodos de extração e elevação artificial são atualmente empregados e desenvolvidos. Como exemplo citam-se, o método Gas-Lift (contínuo e intermitente), o Bombeio Mecânico por Hastes e o Bombeio por Cavidades Progressivas. Cada um desses métodos possui características próprias, as quais definem, de certa forma, as características do óleo produzido no poço (Karassik *et al.*, 2001; Assmann, 2008).

O escoamento de óleos pesados é um dos desafios encontrados pela indústria de petróleo em todo o mundo. Por exemplo, nos últimos anos, a produção de petróleo venezuelana tem registrado 72% de petróleo cru e 28% de petróleo médio e pesado. Em médio prazo, estas porcentagens tendem a se inverter para 29% de petróleo leve e 71% de petróleo pesado (Sanchez Marin, 2002). Números semelhantes são encontrados nos poços de petróleo terrestres no Brasil. A produção de óleos pesados e extra-pesados é caracterizada pelo escoamento de fluidos com viscosidades muito altas (maior do que 300 cP (0,3 Pa.s) à 66 °C), elevadas frações de vazios (maior do que 40%) e misturas de óleo, gás, água e areia. Assim, os custos de produção destes óleos são maiores do que os custos de produção de óleos crus médios e leves. Em adição a isto, as novas técnicas de produção com injeção de vapor fazem aparecer o problema do escoamento de fluidos com temperaturas acima de 150 °C (Assmann, 2008).

Nessa situação, o custo de elevação é alto, e em adição, o petróleo extraído é de baixa valorização (aproximadamente 30% menor do que o de óleos médios e leves). Logo, o desafio de se produzir óleos pesados e extra-pesados é obter uma melhora apreciável no processo de extração. Isto deverá implicar em uma maior eficiência do sistema de extração, que permita a redução do consumo de energia, um acréscimo no volume de produção, redução de custos devido à substituição de equipamentos e extensão da vida de operação de equipamentos usados para a extração subterrânea. Normalmente, para esses poços, o sistema de elevação artificial de bombeio por cavidades progressivas (BCP) é o mais indicado, devido à sua grande capacidade de bombeamento de fluidos com tais características, o seu baixíssimo custo inicial frente aos demais métodos de elevação, bem como à sua grande eficiência. No entanto, apesar desses fatores, pouco se conhece, de maneira mais detalhada e aprofundada, de suas características dinâmicas, tanto na parte operacional quanto na parte do escoamento no seu interior (Dunn *et al.*, 1994).

1.1. MOTIVAÇÃO

O bombeio por cavidades progressivas é, conforme comentado anteriormente, um dos sistemas indicados e empregados para a extração desses 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 rotodinâmicos, 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.

Por requerer menores custos, a simulação computacional é bastante utilizada nos dias atuais para se desenvolver estudos sobre fenômenos e problemas reais. O modelo computacional de uma BCP (conforme Figura 1.1.) pode ser empregado, por exemplo, para se estudar o seu comportamento operacional real em relação aos principais parâmetros envolvidos como eficiência volumétrica, perdas por atrito, campos de pressão e velocidade no interior da bomba, entre outros.

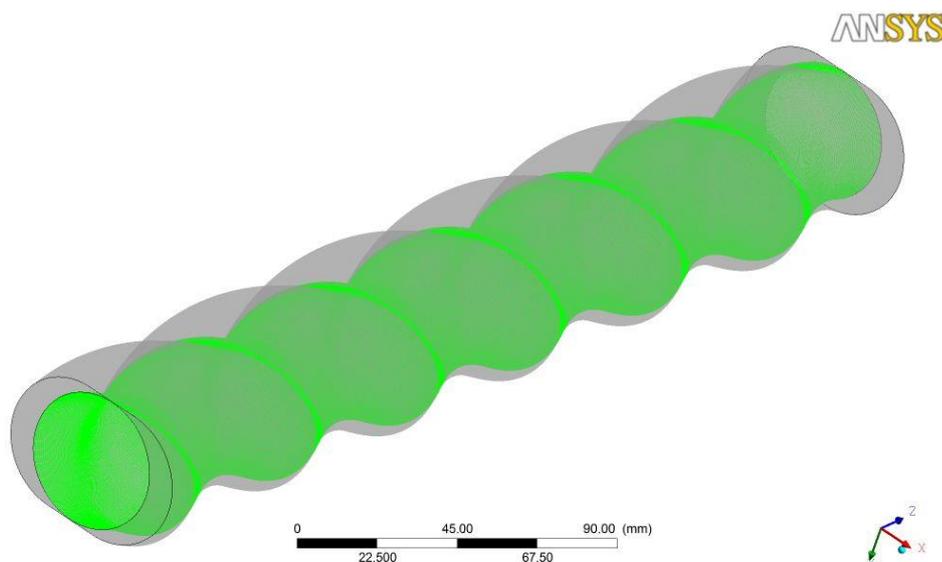


FIGURA 1.1. MODELO COMPUTACIONAL DA BCP.

Apesar do modelo desenvolvido possibilitar as vantagens citadas, existe um cuidado que deve ser tomado em relação aos parâmetros de geração da malha, pois existe uma sensibilidade dos resultados com relação ao tamanho e ao formato da malha, fatores estes que estão intimamente ligados ao tamanho da folga rotor/estator. O presente trabalho é voltado ao estudo computacional do comportamento operacional de BCPs sob a influência desses fatores.

1.2. OBJETIVOS

Seguindo assim o exposto, este trabalho tem como objetivo inicial o estudo do refino e do comportamento de convergência de malhas de BCPs, apoiando-se em sub-rotinas em linguagem Fortran 90 que descrevem instantaneamente a sua geometria, em conjunto com o *software* de dinâmica dos fluidos computacional Ansys/CFX para obtenção da dinâmica do escoamento no interior destas bombas. Posteriormente, o efeito da folga entre o rotor e o estator sobre a performance das bombas é estudado para as situações de regime permanente e transiente, e comparações com resultados experimentais são finalmente efetuadas para validação dos resultados obtidos com a presente metodologia. O objetivo global é descrever em detalhes qual o comportamento operacional de uma BCP em função dos parâmetros estudados.

1.3. ESTRUTURA DO TEXTO

O presente trabalho foi dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução como explicitado anteriormente. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos relativos ao Bombeio por Cavidades Progressivas e dos parâmetros envolvidos que farão parte da análise do presente trabalho. No terceiro capítulo são descritas a metodologia experimental e computacional de como proceder-se-á o estudo da influência da folga . O quarto capítulo apresenta os resultados de todas as simulações para o rotor em situação estática e dinâmica, a convergência da malha e a validação dos resultados computacionais com os resultados reais. O quinto capítulo apresenta as conclusões baseadas nos resultados do capítulo quatro e oferece uma perspectiva de desenvolvimento de trabalhos futuros. Por último, o sexto capítulo apresenta as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

CAPÍTULO 2

Fundamentação Teórica

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentado o princípio de funcionamento do sistema de bombeio por cavidades progressivas, além das principais vantagens e desvantagens que a BCP apresenta. Também são apresentadas equações e análises das principais variáveis que irão servir de base para o estudo da influencia da folga.

2.1. TEORIA E CONCEITOS DA ELEVAÇÃO ARTIFICIAL POR BCP

Uma bomba de cavidades progressiva é uma bomba rotativa de deslocamento positivo, conhecida como bomba de parafuso. Seu princípio de funcionamento é criar cavidades em que o líquido é deslocado axialmente de uma zona de baixa pressão para uma zona de alta pressão, como resultado do movimento relativo entre seus componentes principais (o rotor e o estator). A zona de baixa pressão é entendida como a região de sucção da bomba e a zona de alta pressão é a região da descarga (Figura 2.1).

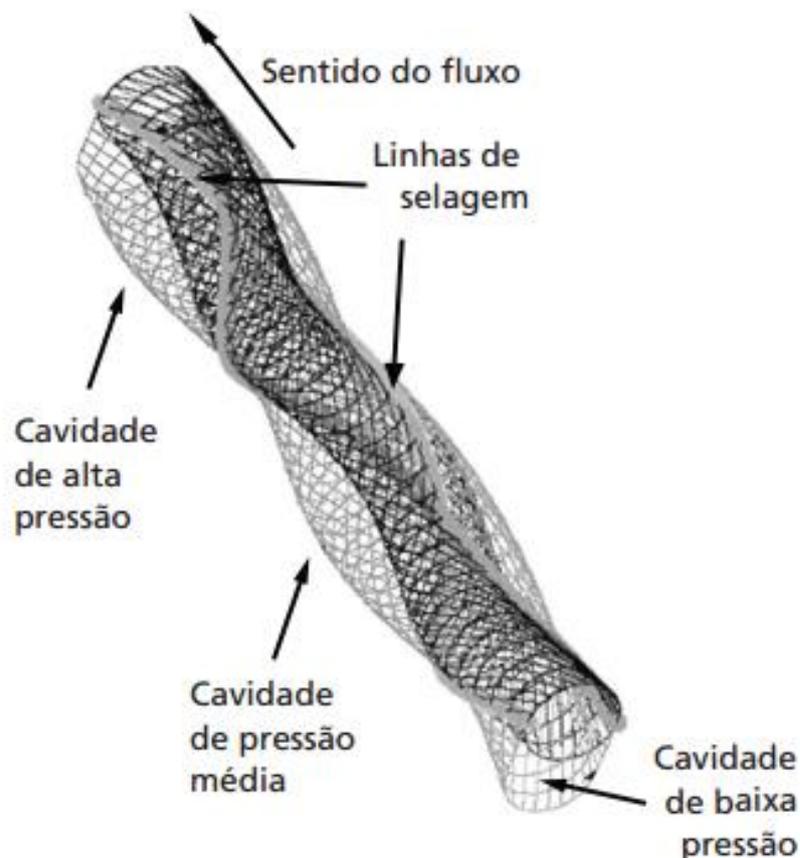


FIGURA 2.1. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE UMA BCP (ASSMANN, 2008).

Os principais componentes de uma BCP são o rotor e o estator ambos com formato helicoidal. O estator é o componente estático e seu passo equivale ao dobro do passo do rotor que é o componente móvel. O rotor é construído, normalmente, de liga de aço, carboneto de tungstênio ou de cerâmica, enquanto que o estator pode ser construído de vários materiais, os mais utilizados são ligas de aço, ligas de bronze e elastômeros. Quando o rotor se move excêntrica ao estator, linhas de selo se criam entre os mesmos, formando-se as cavidades dentro da bomba, que vão progressivamente da zona de sucção para a zona de descarga. À medida que uma cavidade diminui em volume, a cavidade oposta cresce exatamente a mesma proporção, pelo qual a soma do volume nas zonas de descargas é constante (Figura 2.2).

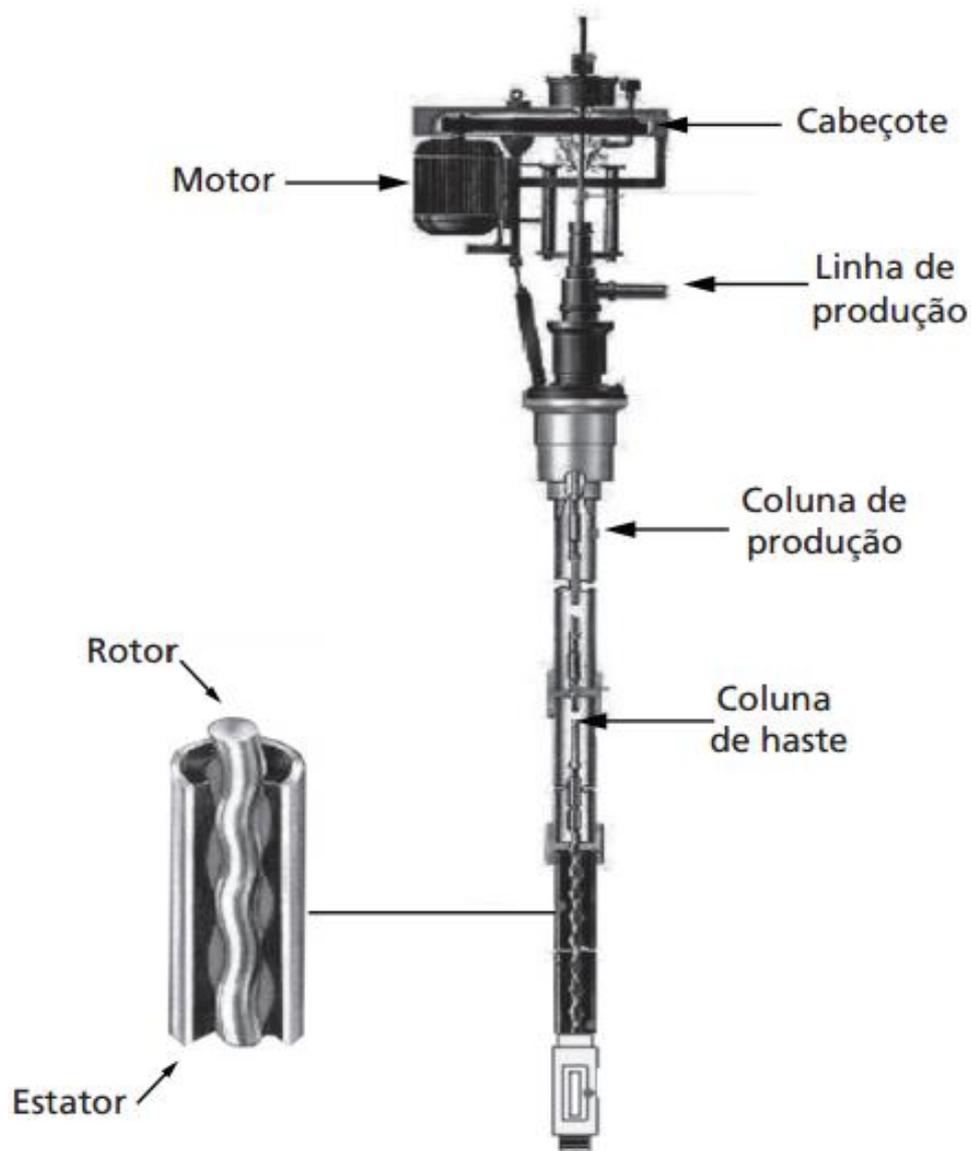


FIGURA 2.2. SISTEMA DA BCP E SEUS COMPONENTES (ASSMANN, 2008).

2.2. COMPARAÇÃO COM OUTROS MÉTODOS DE ELEVAÇÃO ARTIFICIAL

As bombas de cavidade progressiva possuem características únicas que proporcionam vantagens em comparação com outros métodos de elevação artificial de hidrocarbonetos. Uma das características mais relevantes é a sua eficiência que alcança de 50% a 60%, a qual é maior do que qualquer outro tipo de sistema de elevação artificial. Outras vantagens são:

- A capacidade de bombear fluidos de alta viscosidade, grandes concentrações de areia e gás;
- Não necessita do uso de válvulas de controle;
- Baixo custo em relação a investimento, manutenção;
- Instalação simples;
- Baixo ruído.

Apesar da BCP apresentar diversas vantagens, ainda assim possuem suas desvantagens. As desvantagens mais relevantes (para as do tipo elastoméricas) são a limitação em relação a capacidade de bombeio, compatibilidade do elastômero, elevação. Outras dificuldades e limitações da BCP são:

- Taxas de produção limitadas, em torno de 500m³/d;
- A elevação alcança no máximo 2000 metros;
- A temperatura de serviço alcança 170°C;
- Sensibilidade em relação aos ambientes em fluidos bombeados (o elastômero pode deteriorar-se em contato prolongado com alguns tipos de fluidos);
- Pode ocorrer um dano permanente no estator se a BCP bombear elevadas frações de gases sem a presença de líquido.

As bombas de estator metálicas não sofrem todas as limitações acima, principalmente com relação à temperatura de operação, no entanto, o fluido a ser bombeado deve possuir viscosidade relativamente alta, o que implica indiretamente, na limitação da temperatura de serviço.

Estas limitações atraem um rápido desenvolvimento de novos produtos, melhoramento de materiais e equipes de projetos. Se aplicado corretamente, o bombeio de cavidade providenciará maior economia, e em alguns casos, é o único método de levantamento de hidrocarbonetos.

2.3. TERMINOLOGIAS DA BCP

A grande diversidade de modelos e tipos de bombas rotativas tem levado organizações tais como o Instituto Hidráulico Americano (HI, 1992), o Instituto Hidráulico Alemão (VDA, 1995) e o Instituto Nacional de Padrões Norte-Americano (ANSI, 1994), estabelecerem um conjunto de nomenclaturas que permite descrever tanto a operação como a geometria de uma bomba rotativa, de maneira que ao analisar o comportamento de uma bomba, permita utilizar a terminologia utilizada por esta. As terminologias mais comuns são:

- Câmara de bombeio: se define como o espaço que o fluido pode ocupar dentro da bomba quando a mesma esta operando. Este espaço é onde o fluido é deslocado da zona de sucção até a zona de descarga.
- Corpo do estator: é o componente externo da bomba, se localiza ao redor da câmara de bombeio. O estator é, geralmente, composto por um tubo de aço e um elemento de borracha interno “elastômero”.
- Rotor: é o componente que se move dentro da câmara de bombeio movendo assim o fluido a ser bombeado.
- Selos estáticos: as vedações estáticas são aquelas que fornecem o isolamento através de uma fina camada de líquido entre as partes estáticas da câmara de bombeio e as partes móveis, evitando assim o contato entre elas.
- Selos dinâmicos: são usadas nas fronteiras da câmara de bombeio para isolar partes móveis que se estendem através dele (tal como eixos de transmissão) e impedir a fuga do fluido a partir da câmara para o ambiente.
- Deslocamento: em uma bomba rotativa o deslocamento se define como o volume de fluido deslocado por revolução do rotor. Este deve ser calculado a partir das dimensões dos elementos da bomba, ou pode ser determinado empiricamente como o volume bombeado por revolução a uma diferença de pressão igual a zero.
- Vazão teórica: o deslocamento por unidade de tempo se denomina vazão teórica, na qual a unidade é expressa da em metros cúbicos por hora. A vazão teórica se calcula como o produto do deslocamento pela velocidade de giro da bomba (Equação 1).

$$Q_t = V \cdot n; \quad V = A \cdot P_{st} \quad (1, 2)$$

onde, Q_t é a vazão teórica da bomba, V é o volume deslocado, n é a rotação do rotor, A é a área efetiva do escoamento e P_{st} é o passo do estator.

Na Figura 2.3, pode-se identificar a área efetiva do escoamento do fluido, A , como sendo a soma da área de um círculo de raio igual ao do estator com a área de um retângulo (no qual um dos lados é igual a quatro vezes a excentricidade da bomba, E , e o outro é o diâmetro do estator, D_{st}) e, finalmente, da subtração da área circular do rotor.

$$A = [4 * E * D_{rt} - 8 * E * w - \pi * (D_{rt} * w - w^2)] \quad (3)$$

Assim, manipulando as equações (1), (2) e (3) obtém-se a vazão teórica:

$$Q_t = [4 * E * D_{rt} - 8 * E * w - \pi * (D_{rt} * w - w^2)] * P_{st} * n \quad (4)$$

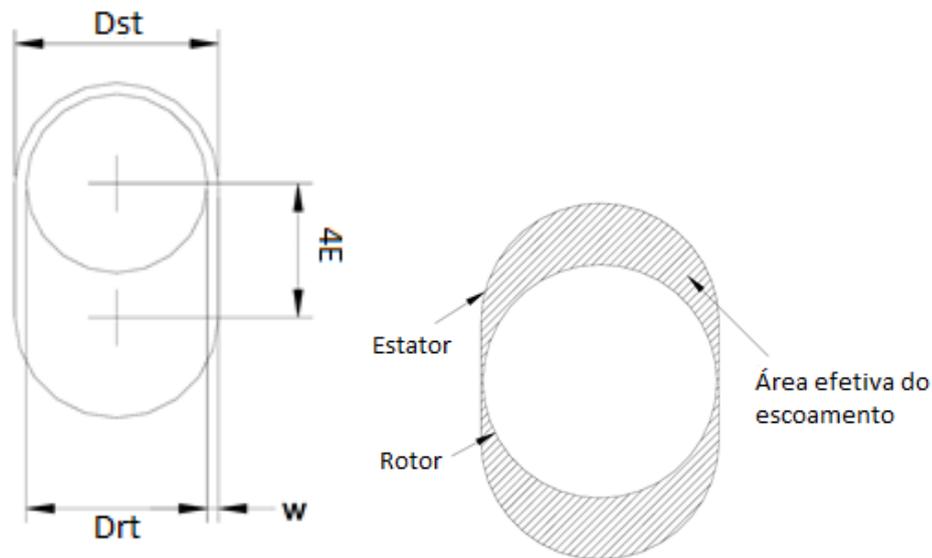


FIGURA 2.3 - SEÇÃO FRONTAL DA BCP: PARÂMETROS PRINCIPAIS E A ÁREA EFETIVO DO ESCOAMENTO (SANCHEZ MARIN, 2002).

As outras variáveis que aparecem nas equações anteriores são o diâmetro do rotor, D_{rt} , e a folga entre o rotor e o estator, w , a qual é definida por:

$$w = \frac{D_{st} - D_{rt}}{2} \quad (5)$$

A folga é a diferença entre o raio do estator e do rotor, sendo um parâmetro de grande importância para o presente trabalho. A folga pode ser entendida através da Figura 2.4 e pela Equação (5).

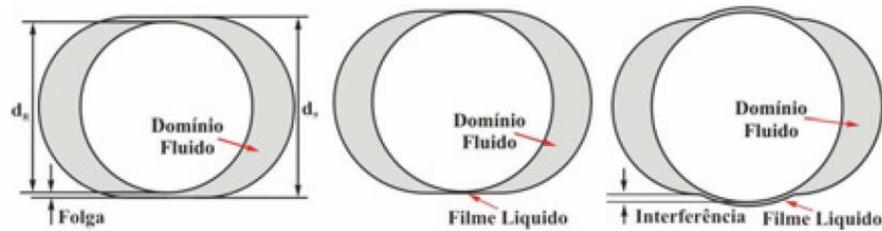


FIGURA 2.4 - TIPOS DE GEOMETRIAS DO CONJUNTO ROTOR/ESTATOR (ASSMAN, 2012).

- Vazão real: a vazão é o volume de fluido deslocado por unidade de tempo nas condições de operação, este volume deve incluir tanto o líquido bombeado como qualquer quantidade adicional de gás dissolvido ou retido nas condições de operação.
- Deslizamento: a quantidade de fluido que escapa através das folgas internas da bomba por unidade de tempo é chamado de deslizamento. Esta é função da geometria das folgas internas da bomba, a diferença de pressão, as características do fluido bombeado, em alguns casos, a velocidade de operação (maiores que 400 rpm). O deslizamento pode ser calculado pela diferença algébrica da vazão teórica da bomba e sua vazão real (Eq. 6).

$$S = Q_t - Q_r \quad (6)$$

onde, S é o deslizamento/escorregamento e Q_r é a vazão real.

- Eficiência volumétrica: se define pela relação entre a vazão real bombeada e o volume deslocado por unidade de tempo. A eficiência volumétrica, η_v , caracteriza o comportamento da bomba, ou seja, se a eficiência volumétrica for igual a 100% significa que a vazão real é igual ao deslocamento por unidade de tempo, enquanto que se for igual a zero significa que a vazão real é zero e o deslizamento é igual ao deslocamento da bomba (Equação 3).

$$\eta_v = \frac{Q_r}{Q_t} \quad (7)$$

- Diferença de pressão: a diferença algébrica entre a pressão de descarga e a pressão de sucção é definida pela Equação (8).

$$\Delta P = P_{desc} - P_{suc} \quad (8)$$

onde, P_{desc} é a pressão de descarga, P_{suc} é a pressão de sucção e ΔP é a diferença de pressão.

- Potência Hidráulica: é a potência transferida pela bomba ao fluido para condições de operação, expressada em watts (W). É calculado pelo produto da diferença de pressão e a vazão real da bomba. Ver equação 9.

$$P_H = \Delta P \cdot Q_r \quad (9)$$

Onde, P_H é a potência hidráulica.

- Potência interna: é a potência requerida pela bomba em seu eixo de transmissão. A potência interna inclui a energia hidráulica das máquinas e a energia consumida pelo atrito entre o rotor e estator.
- Consumo de potência e eficiência: quando a bomba trabalha com um líquido puro, a potência que entra na bomba (P_i) é consumida como a soma das potências hidráulicas (P_H), perdas pelo deslizamento (P_E) e perdas por atrito (P_{At}). A potência hidráulica e as perdas por deslizamento dependem da geometria da bomba, da velocidade de giro e da diferença de pressão. A potência de atrito depende do coeficiente de atrito entre os elementos da bomba e das propriedades lubrificantes do fluido bombeado (Figura 2.5).

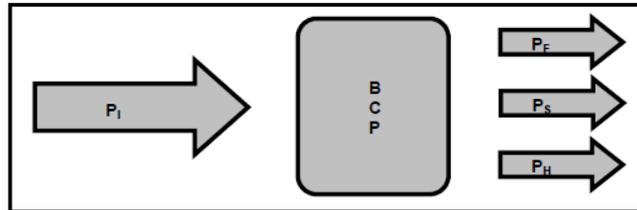


FIGURA 2.5 - CONSUMO DA POTÊNCIA DE UMA BCP (SANCHEZ MARÍN, 2002).

Em uma bomba sem folga, o deslizamento interno é significativo e a potência hidráulica é menor que a potência interna. O consumo de potência por atrito resulta principalmente pelo atrito do fluido e é menor que aquela causada pelo atrito mecânico dos seus componentes (Equação 9).

$$P_i = P_H + P_E + P_{At} \quad (10)$$

Logo,

$$P_i = (Q_r \cdot \Delta P) + (S \cdot \Delta P) + P_{At} \quad (11)$$

Em uma bomba com fluxo monofásico a eficiência volumétrica (η_V) se calcula dividindo a vazão real pela vazão teórica, enquanto que a eficiência interna (η_I) se calcula dividindo a potência efetiva consumida pelo fluido bombeado (P_C) pela potência interna (P_I). Assim as equações para calcular estas eficiências são:

$$\eta_V = \frac{Q_r}{Q_t} = \frac{Q_t - S}{Q_t} \quad (12)$$

$$\eta_I = \frac{P_C}{P_I} = \frac{Q_r - S}{(Q_r \cdot \Delta P) + (S \cdot \Delta P) + P_A} \quad (13)$$

2.4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção serão apresentados alguns trabalhos já realizados por autores do Laboratório de Mecânica Computacional da UFRN, os quais terão a finalidade de direcionar o presente trabalho, fornecendo toda a teoria e conceito necessários para tal realização.

O trabalho de Almeida (2010) teve como principal objetivo, o desenvolvimento de um modelo computacional tridimensional transiente do processo dinâmico da interação fluido-estrutura (FSI) que ocorre no interior de BCPs metálicas e elastoméricas. Através do modelo desenvolvido, foi possível avaliar as características dinâmicas da eficiência de bombeio por BCP's em função de informações locais e instantâneas detalhadas dos campos de velocidade, pressão e deformação no seu interior. Utilizou-se uma metodologia própria para geração de malhas computacionais dinâmicas, que utiliza sub-rotinas em linguagem Fortran 90, as quais interagem dinamicamente com o "software" de dinâmica dos fluidos computacional ANSYS/CFX.

De acordo com Almeida (2010), para que seja possível estudar a dinâmica de uma BCP, deve-se inicialmente parametrizar as equações que descrevem a sua cinemática como função de suas variáveis geométricas. Assim foi considerado um segmento de reta $\overline{P_A P_B}$ que faz a ligação entre os centros das duas hélices do estator (P_A e P_B). O centro da seção do rotor (P_{SR}) se desloca exclusivamente sobre a direção deste segmento, de maneira periódica enquanto o centro da hélice do rotor (P_{HR}) se desloca realizando a trajetória de um círculo cujo raio é igual a sua excentricidade. A rotação da hélice do rotor ocorre no sentido contrário ao movimento do centro da seção do rotor e da rotação do centro de sua seção, ver Figura 2.5.

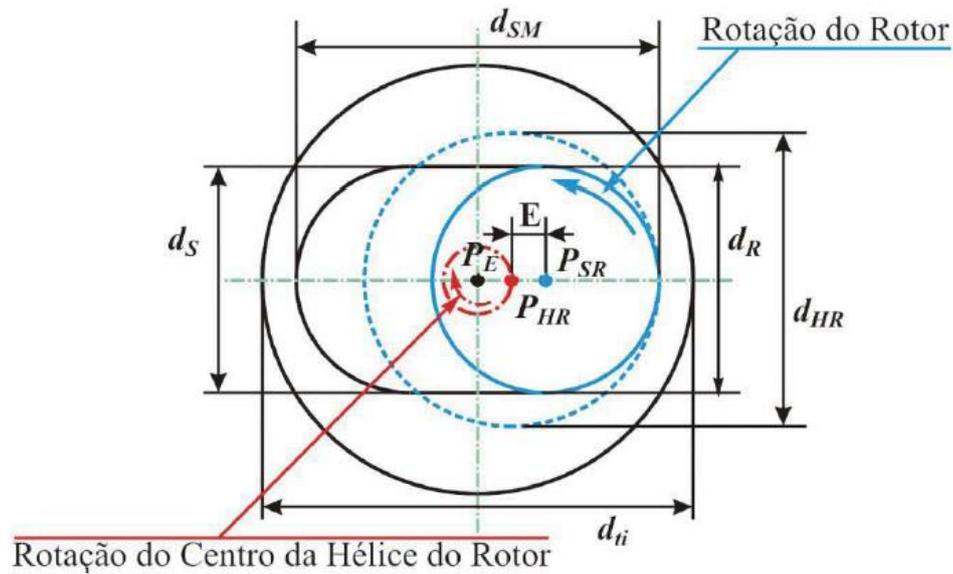


FIGURA 2.6 – VISÃO GEOMÉTRICA DA SECÇÃO TRANSVERSAL DE UMA BCP (ALMEIDA, 2010).

As variáveis explicitadas na Figura 2.6 são definidas como:

d_{SM} – Diâmetro Maior do estator ($d_{SM} = 4E + d_S$);

d_{HR} – Diâmetro Maior do rotor ($d_{HR} = 2E + d_R$);

E – Excentricidade;

d_R – Diâmetro Menor do rotor;

d_S – Diâmetro Menor do estator;

d_{ti} – Diâmetro do tubo do estator.

Nas bombas de cavidade progressivas, os passos do rotor (P_r) e do estator (P_s) são relacionados pela equação:

$$P_r = \frac{R}{R+1} \cdot P_s \quad (14)$$

onde R é o número de lóbulos da bomba. Para uma bomba de único lóbulo, como as que são simuladas no presente trabalho, o passo do estator (Figura 2.7) equivale ao dobro do passo do rotor (Figura 2.8). O fluido bombeado é inserido no interior de cavidades isoladas formadas entre o estator e o rotor. Quando o rotor se movimenta, o fluido desloca-se axialmente fazendo as cavidades ganharem movimento e promovendo a ação de bombeio do fluido.

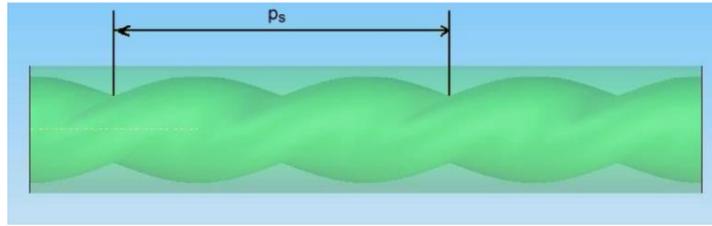


FIGURA 2.7 – REPRESENTAÇÃO DO PASSO DO ESTATOR.

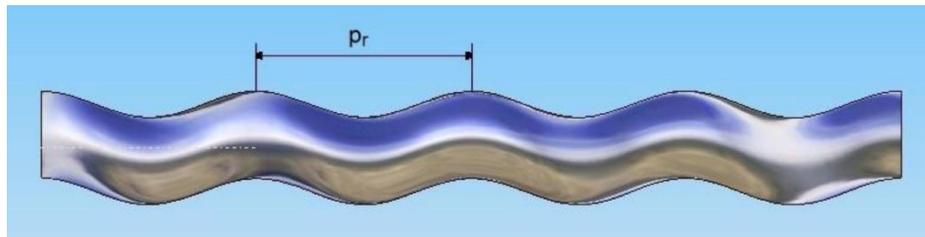


FIGURA 2.8 – REPRESENTAÇÃO DO PASSO DO ROTOR.

2.4.1. ESTUDO DA CINEMÁTICA

Analisando a Figura 2.6, observa-se que as coordenadas do ponto P_{HR} nos eixos x e y são dependentes de uma variação do ângulo θ , que, por sua vez, também depende do movimento de rotação do rotor. Dessa figura, as coordenadas desse ponto são definidas como:

$$x = E \cdot \cos\theta \quad (15)$$

$$y = -E \cdot \sin\theta \quad (16)$$

onde, θ é o ângulo de rotação.

As equações (15) e (16) representam a forma parametrizada da equação do círculo com centro na origem (P_{HR}) e representa a trajetória do centro da hélice do rotor como função do ângulo de rotação (θ). Então, a distância entre o centro da seção do rotor e o centro do estator $\overline{P_E P_{SR}}$ pode ser calculada pela Equação (17).

$$dc = \overline{P_A P_B} = 2E \cos\theta \quad (17)$$

As equações (15), (16) e (17) formam a base do procedimento desenvolvido e empregado por Almeida (2010) para a descrição completa da cinemática de BCPs. A Figura 2.9, a qual mostra o comportamento da vazão de uma BCP com a pressão diferencial total na bomba, para duas rotações e um óleo de 481 cp como fluido de trabalho, foi obtida a partir das simulações utilizando tal procedimento (Almeida, 2010).

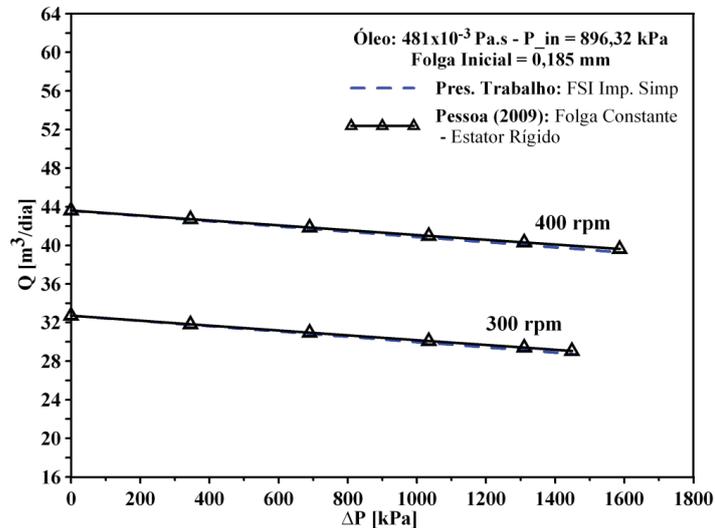


FIGURA 2.9 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO NA BOMBA, PARA DIFERENTES ROTAÇÕES E TIPO DE BCP (ALMEIDA, 2010).

As Figuras 2.10 e 2.11 mostram a característica de convergência dos resultados como função da sua razão de aspecto e do número de nós, respectivamente. Dessas figuras, nota-se facilmente a grande dependência da convergência da vazão com esses parâmetros, principalmente, com a razão de aspecto. Para as razões de aspecto adotadas, a Figura 2.9 mostra que a convergência desse campo está diretamente relacionada ao refinamento (número de nós) da malha. Esse comportamento é esperado para valores de razão de aspecto menores do que 100, valor limite recomendado pelo Ansys/CFX. Por outro lado, a Figura 2.10 ilustra que para baixíssimas razões de aspecto, malhas relativamente grosseiras podem ser utilizadas com confiança, o que não é garantido quando as razões de aspecto se tornam mais elevadas (se aproximando de 100).

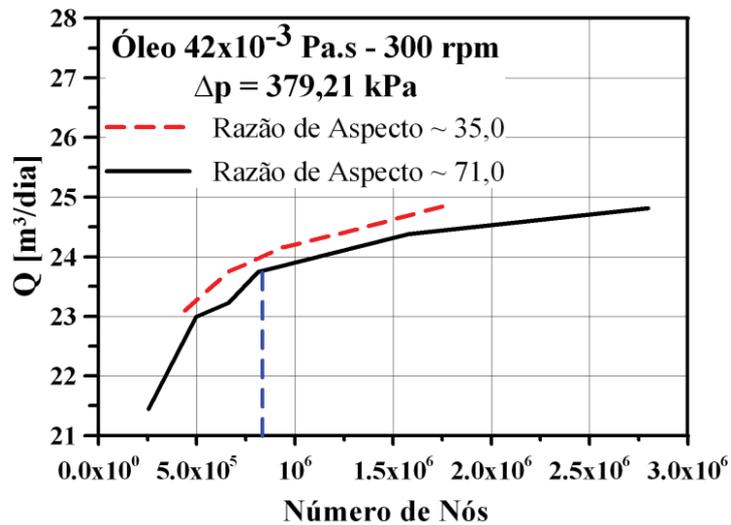


FIGURA 2.10 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA (VAZÃO EM FUNÇÃO DA RAZÃO DO NÚMERO DE NÓS DA MALHA), PARA AS RAZÕES DE ASPECTO MÁXIMA DE $\sim 71,0$ E $\sim 35,0$ (ALMEIDA, 2010).

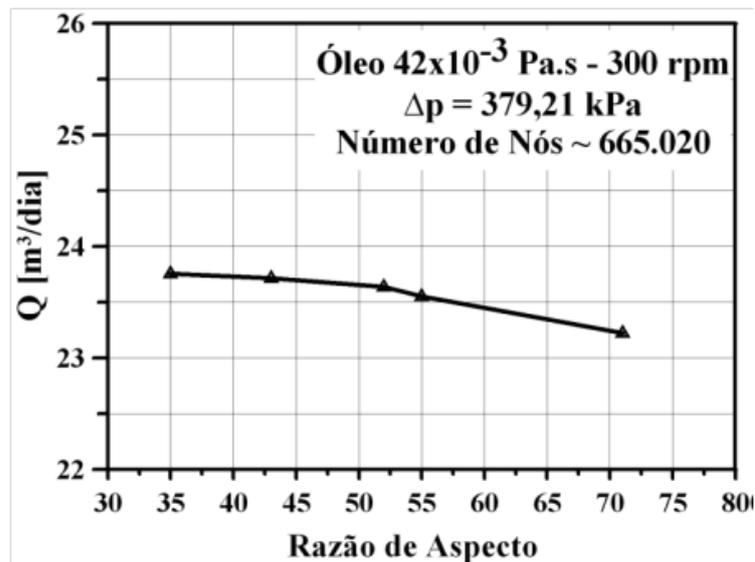


FIGURA 2.11 - ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA (VAZÃO EM FUNÇÃO DA RAZÃO DE ASPECTO DA MALHA), PARA UM NÚMERO DE NÓS DE ~ 665.020 (ALMEIDA, 2010).

O trabalho de Assman (2011) consistiu na elaboração de uma metodologia para geração da malha computacional que representa a região do fluido de uma BCP elastomérica com interferência, desenvolvida através de um modelo matemático baseado na geometria e na cinemática do rotor no interior do estator deformável.

A malha é gerada utilizando uma topologia onde as linhas radiais são fixas, com origem no centro do estator (topologia centrada no estator). Esse trabalho representa a primeira iniciativa na direção de simulação de bombas com estator elastomérico com interferência. As Figuras 2.12 e 2.13 ilustram as malhas numéricas obtidas com o procedimento desenvolvido para duas posições do rotor na bomba. A Figura 2.14 mostra o resultado da geração da malha em uma vista isométrica.

O trabalho de Souza (2011), baseando-se nos trabalhos anteriormente desenvolvidos no Laboratório de Mecânica Computacional, avaliou em maior detalhe a influência da qualidade da malha gerada sobre os resultados obtidos, através de vários estudos de convergência, com interesse principal na razão de aspecto da malha adotada.

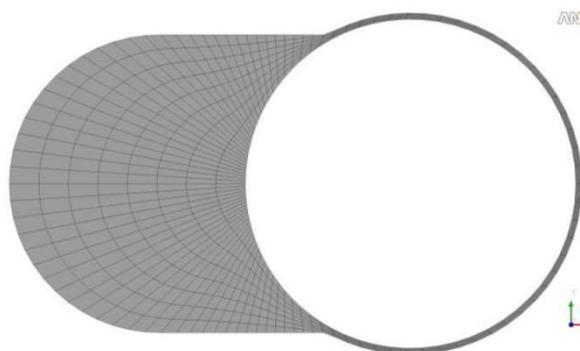


FIGURA 2.12 – MALHA DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA BCP COM INTERFERÊNCIA, ROTOR NA POSIÇÃO LIMITE (ASSMAN, 2011).

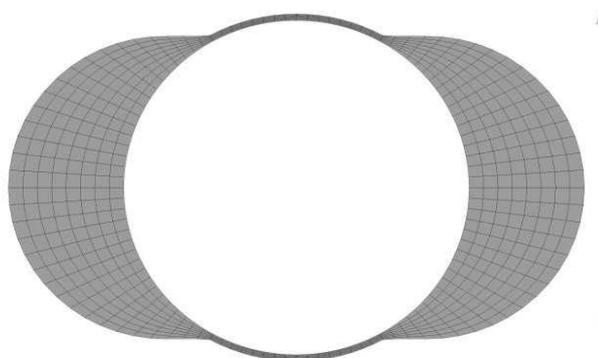


FIGURA 2.13 – MALHA DE UMA SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA BCP COM INTERFERÊNCIA, ROTOR NA POSIÇÃO CENTRAL (ASSMAN, 2011).

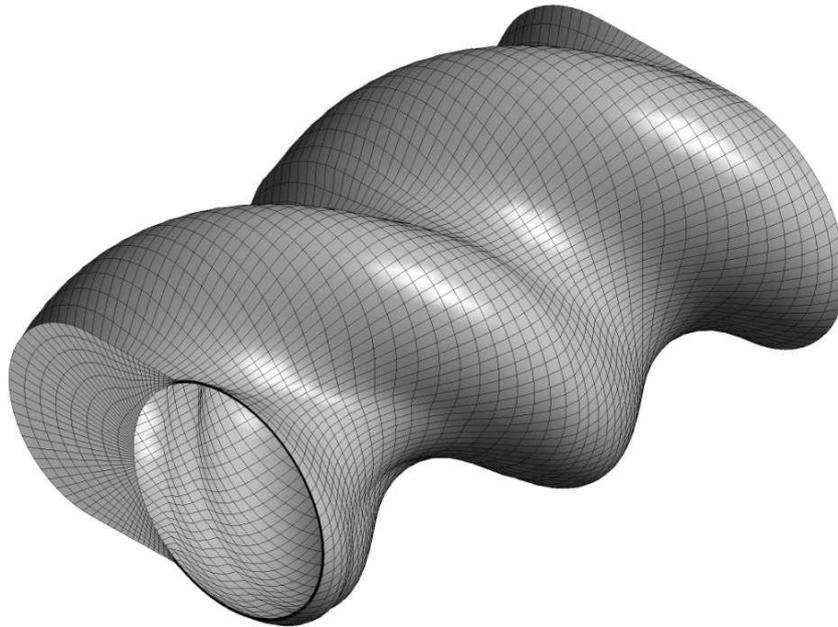


FIGURA 2.14 - REPRESENTAÇÃO 3D DA MALHA DE UMA BCP COM INTERFERÊNCIA (ASSMAN, 2011).

O conceito de razão de aspecto de uma malha é relacionado ao grau com que os elementos da malha se deformam. A razão de aspecto envolve a razão entre máxima e mínima área das superfícies de todos os elementos. Um esquema dessa medida pode ser visualizado na Figura 2.15.

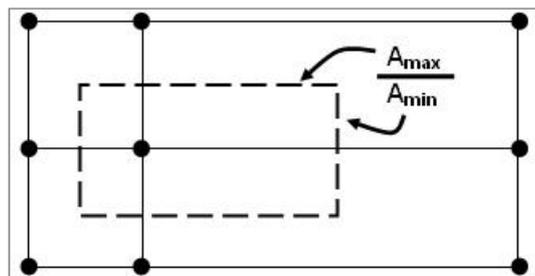


FIGURA 2.15 – CONCEITO DE RAZÃO DE ASPECTO DA MALHA (SOUZA, 2011).

O desejável é que esta razão seja tão pequena quanto for possível, se aproximando da unidade. De acordo com Souza (2011), em simulações numéricas, usualmente se sugere que o valor máximo da razão de aspecto seja inferior a 100, para evitar problemas de mau-condicionamento da matriz de coeficientes do sistema linear resultante da discretização das equações governantes do fenômeno. No limite de uma razão máxima muito elevada o *solver* geralmente diverge ou apresenta erros de execução. Desse modo, ressalta-se a necessidade de um controle rígido sobre este fator.

Os gráficos das Figuras 2.16 e 2.17 mostram o comportamento de convergência da vazão volumétrica em função do número de nós da malha adotada. As curvas com símbolos representam os resultados obtidos na simulação, enquanto que as curvas sem símbolos representam o dado experimental. Uma comparação entre as figuras revela a influência do diferencial de pressão total da bomba sobre a convergência dos resultados: quanto maior o diferencial de pressão, maior é a dificuldade de convergência dos resultados.

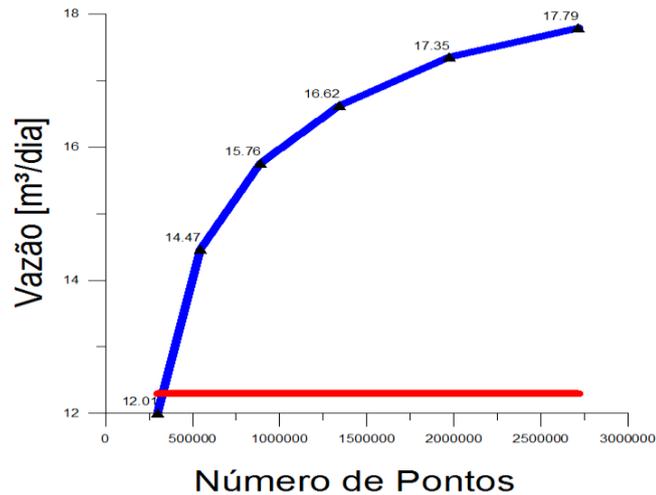


FIGURA 2.16 – CONVERGÊNCIA DA VAZÃO VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE NÓS. (ROTAÇÃO DE 300 RPM, ÓLEO DE 42 CP E DIFERENCIAL DE PRESSÃO DE 120 PSI - SOUZA, 2011).

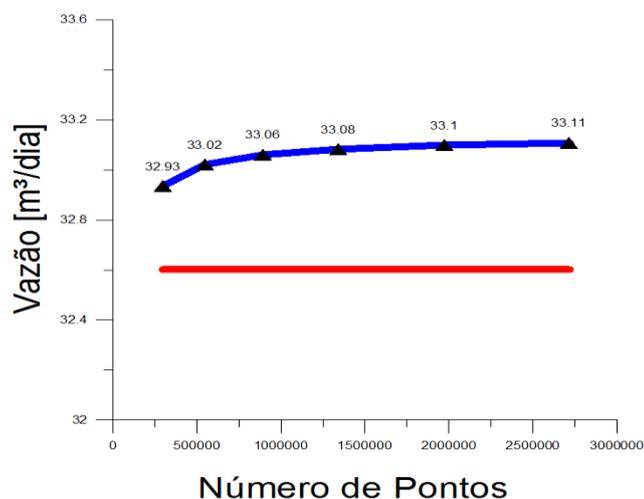


FIGURA 2.17 – CONVERGÊNCIA DA VAZÃO VOLUMÉTRICA EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE NÓS. (ROTAÇÃO DE 300 RPM, ÓLEO DE 42 CP E DIFERENCIAL DE PRESSÃO DE 0 PSI - SOUZA, 2011).

Nota-se que para o diferencial de pressão nulo, necessita-se de cerca de apenas um milhão de pontos na malha para a convergência, mesmo empregando-se malhas com maior razão de aspecto (mas ainda, menores que 100); diferentemente da situação de elevado diferencial de pressão, onde mesmo com mais de três milhões de nós e baixas razões de aspecto os resultados podem não ser considerados totalmente convergidos.

Então os valores simulados apresentam sensibilidade quanto à razão de aspecto e o tamanho da malha (quantidade de pontos), sendo necessário um controle dos parâmetros da malha e um estudo do refino da mesma, para se reduzir os erros de discretização.

CAPÍTULO 3

Materiais e Métodos

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentadas as informações experimentais empregadas como dados de entrada na presente metodologia computacional, bem como as características básicas e os tipos das malhas utilizadas pelo código computacional.

3.1. DADOS EXPERIMENTAIS

O presente trabalho se baseou nos experimentos realizados por Sanchez Marín (2002) utilizando uma BCP de estator metálico. Dois fluidos, à 20 °C, foram usados nos testes monofásicos: um óleo com 75 cp de viscosidade ($\rho = 869 \text{ kg/m}^3$) e outro com 134cP ($\rho = 878 \text{ kg/m}^3$). De acordo com o autor Sanchez Marín (2002), a BCP possuía duas etapas completas e uma terceira que não completava os 360°.

Para a realização dos testes, dois rotores com diâmetros diferentes e um estator, todos de aço ferramenta, foram empregados para se avaliar a influência da folga sobre a performance da BCP. Devido à dificuldade de medição dos parâmetros característicos do estator, a Tabela 1 abaixo, mostra as dimensões informadas por Sanchez Marín (2002):

Tabela 1 - Características geométricas dos rotores e do estator (Sanchez Marin, 2002).

<i>Medidas em mm</i>		
ROTOR	Rotor 1	d_R/E 9,87421384
	Rotor 2	9,78616352
ESTATOR	P_{ST}/E	E 4,0386
	d_{ST}/E	E 3,99508
		3,99816
		4,05091
Média	10,117109	4,01472

Os valores dos diâmetros dos rotores podem ser facilmente obtidos a partir das informações da Tabela 1. Por outro lado, devido à incerteza das medições, três valores (além da média) são possíveis para o diâmetro do estator, o qual será um das variáveis de entrada no código implementado. A Tabela 2 mostra os valores obtidos para esses parâmetros.

A partir dos valores dos diâmetros dos rotores e do estator, seis possibilidades de folga (Equação 14) na BCP podem ser avaliadas, conforme as combinações da Tabela 3.

Tabela 2 – Raios dos rotores e dos estatores.

	Raio (mm)
Rotor 1	19,9390
Rotor 2	19,7612
Estator 1	20,1813
Estator 2	20,4306
Estator 3	20,0619

Tabela 3 – Folgas (em mm) definidas a partir das dimensões do rotor e do estator.

	Folga -w	
	Rotor 1	Rotor 2
Estator 2	$w_1 = 0,4916$	$w_2 = 0,6694$
Estator 3	$w_3 = 0,1229$	$w_4 = 0,3007$
Estator 1	$w_5 = 0,2423$	$w_6 = 0,4201$

Os experimentos foram realizados na seguinte seqüência de execução e avaliação de resultados (lembrando que, experimentalmente, a bomba possui apenas um estator):

- Testes de escoamento estático para a primeira folga estudada (Rotor 1);
- Testes de escoamento estático para a segunda folga estudada (Rotor 2);
- Testes do comportamento dinâmico para a primeira folga (Rotor 1);
- Testes do comportamento dinâmico para a segunda folga (Rotor2).

Os testes estáticos consistem na obtenção de uma curva da vazão pela diferença de pressão, quando o rotor não se encontra em operação, ou seja, a velocidade de operação do rotor em rotações por minuto é igual à zero. O interesse é, assim, avaliar o deslizamento/escorregamento do fluido na condição estática. Para estes testes, posicionou-se o rotor de três maneiras distintas no interior do estator, de acordo com o ilustrado na Figura 3.1.

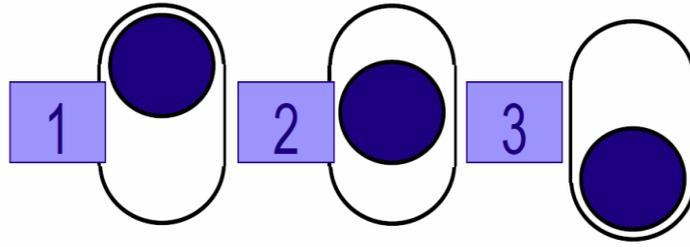


FIGURA 3.1 - POSIÇÕES RELATIVAS DO ROTOR NO ESTATOR NOS TESTES ESTÁTICOS (SANCHEZ MARÍN, 2002).

Nos testes dinâmicos, são ilustrados gráficos da vazão volumétrica versus diferencial de pressão na bomba, para diferentes velocidades de rotação (de 100rpm a 400rpm) e para os dois fluidos considerados.

3.2. MODELAGEM MATEMÁTICA

Para a simulação computacional do escoamento no interior de BCPs, empregou-se o *software* de dinâmica dos fluidos computacional CFX/Ansys (ANSYS, 2008). Este *software* é baseado na discretização das equações de governo (nesse problema apenas as equações de Navier-Stokes) usando o método de Volumes Finitos baseado em Elementos (Baliga, 1980; Ferziger, 2001) e um procedimento direto para a solução do acoplamento pressão/velocidade (Raw, 1985).

Assumiu-se, no presente momento, que o escoamento era monofásico, isotérmico e incompressível, de maneira que apenas as equações de conservação da massa e de quantidade de movimento são empregadas:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (18)$$

$$\frac{\partial \rho \mathbf{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mathbf{T} + \mathbf{T}^{Turb}) \quad (19)$$

Não obstante, uma vez que malhas computacionais adequadas são geradas e o seu movimento imposto (o que representa o principal desafio dos trabalhos relacionados à simulação de BCPs), o modelo pode ser estendido para situações mais complexas (escoamento multifásico, propriedades de transporte variáveis, com transferência de calor, entre outros).

A Equação 18 torna-se a restrição de volume constante para um escoamento incompressível ($\nabla \cdot \mathbf{V} = 0$), sendo apresentada para o caso geral, como implementada no CFX/Ansys. Esta equação é

transformada em uma equação para a pressão, pela substituição das velocidades das equações discretas da quantidade de movimento utilizando a interpolação de Rhie-Chow (Rhie, 1983) para expressar as velocidades nos pontos de integração (localizados nas faces dos volumes de controle) como função das velocidades e pressões nodais. O sistema linear resultante, que inclui a pressão e as três componentes de velocidade, é resolvido seguindo o procedimento acoplado incorporado no CFX/Ansys.

Na equação de conservação de quantidade de movimento, Eq. 19, T^{Turb} representa o tensor tensão turbulenta. Para os fluidos empregados no presente trabalho, de média à altas viscosidades, o escoamento pode ser considerado laminar, e tal tensor é desprezado. Caso essa condição não seja verdadeira, o CFX/Ansys possui diversos modelos de turbulência, desde os mais simples até os mais gerais e complexos, que podem ser empregados na simulação.

3.3. CONDIÇÕES DE CONTORNO

O domínio computacional que representa a região fluida das BCPs é representado na Figura 3.6. Quatro superfícies definem o domínio de cálculo e as condições de contorno do problema: entrada (sucção), saída (descarga), rotor e estator.

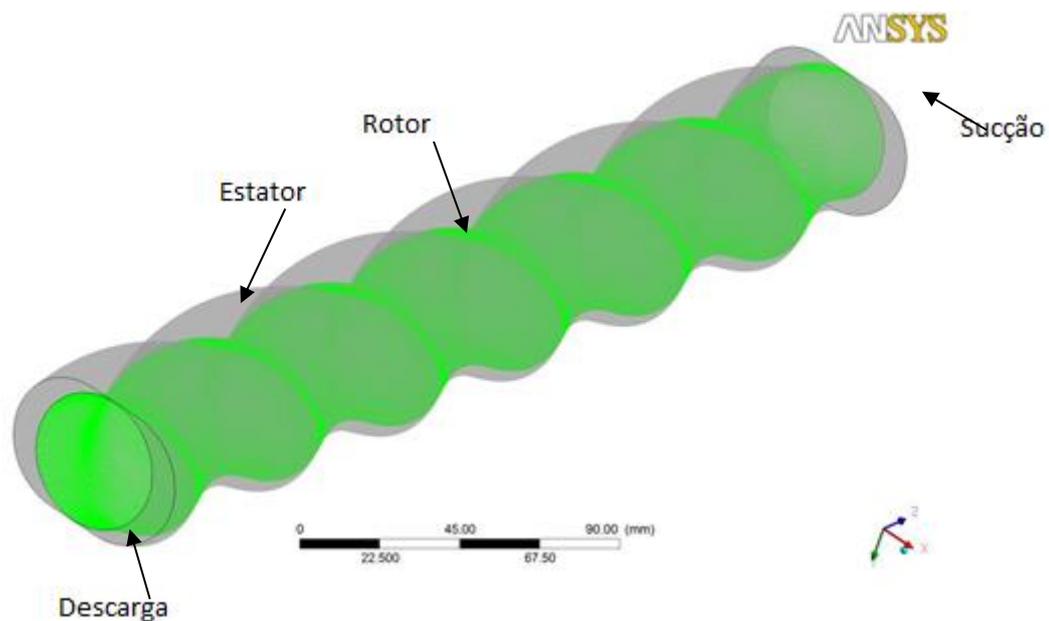


FIGURA 3.2 - DOMÍNIO COMPUTACIONAL E CONDIÇÕES DE CONTORNO DA BCP.

As regiões de entrada e saída foram modeladas como contornos de abertura (“*opening*”) para levar em consideração os efeitos do contra-fluxo devido ao movimento periódico do rotor. Na

entrada impôs-se uma pressão conhecida, $P_{in} = 30$ psi (mantida fixa em todos os experimentos de Sanchez Marin, 2002), enquanto que na saída impôs-se uma pressão dada por $P_{out.} = P_{in.} + DP$, onde DP é o diferencial total aplicado à bomba em cada teste.

O rotor e o estator foram modelados como contornos de parede (“*wall*”). O estator se comporta como uma parede estática, enquanto o rotor se comporta como uma parede em movimento (transladando e rotacionando).

A discretização do tempo, i.e, o passo de tempo empregado foi avaliado como o tempo gasto para o rotor realizar uma volta completa no interior do estator (o qual depende da rotação) dividido por 840 intervalos (um número verificado como ideal para as rotações empregadas nas simulações, isto é, uma discretização em que o número de Reynolds de malha não era elevado).

As simulações foram realizadas em um computador com as características dadas na Tabela 4. As simulações para cada situação levaram cerca de 4 horas para serem executados no regime permanente, e em média 72 horas, para o regime transiente.

Tabela 4 – Configuração do computador utilizado nas simulações.

Dados Técnicos do Computador
Modelo: HP Z220 CMT BR Workstation
Memória RAM: 16 GB
Processador: Intel Xeon 3.6 GHz
Sistema Operacional: Windows 7 - 64 Bits

3.4. TOPOLOGIA DA MALHA EMPREGADA

Diversas possibilidades para geração de malha numérica estão disponíveis no mercado, desde as mais simples até as mais complexas. Módulos comerciais específicos para geração de malhas estão disponíveis nos *softwares* de dinâmica dos fluidos computacional, entre outros. Apesar da geometria de uma BCP ser extremamente simples, a necessidade de malhas dinâmicas (móveis e com passem por grandes deformações) torna o processo de simulação do escoamento no interior de BCPs praticamente inexecuível. Quando realizado automaticamente, grandes distorções

nos elementos da malha surgem devido a essas características dinâmicas, levando a instabilidade ao núcleo de cálculo dos *softwares* de CFD (Almeida, 2010e Gamboa *et al.*, 2011).

Para evitar a rigidez introduzida pela avaliação automática das malhas geradas dinamicamente no CFX, Almeida (2010) elaborou uma subrotina específica para geração de malhas instantâneas, a qual se comunica internamente com o núcleo de cálculo do CFX. A cada instante de tempo, uma configuração de malha, que leva em conta a posição relativa do rotor/estator, é transmitida para e usada pelo CFX. A topologia final adotada por Almeida (2010), e no presente trabalho adotada, é aquela em que o centro do estator é empregado como centro das coordenadas radial da malha, independente da posição do rotor (diz-se da topologia centrada no estator, Figura 3.3 e 3.4).

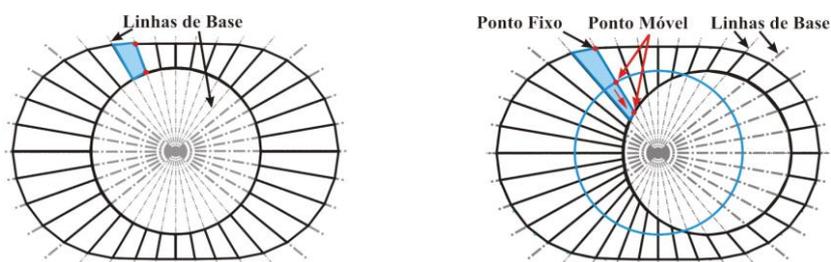


FIGURA 3.3 - LINHAS DE BASE PARA TRAÇADO DA MALHA DA REGIÃO FLUIDA CONSIDERANDO A TOPOLOGIA CENTRADA NO ESTATOR, PARA DUAS POSIÇÕES DO ROTOR (ALMEIDA, 2010).

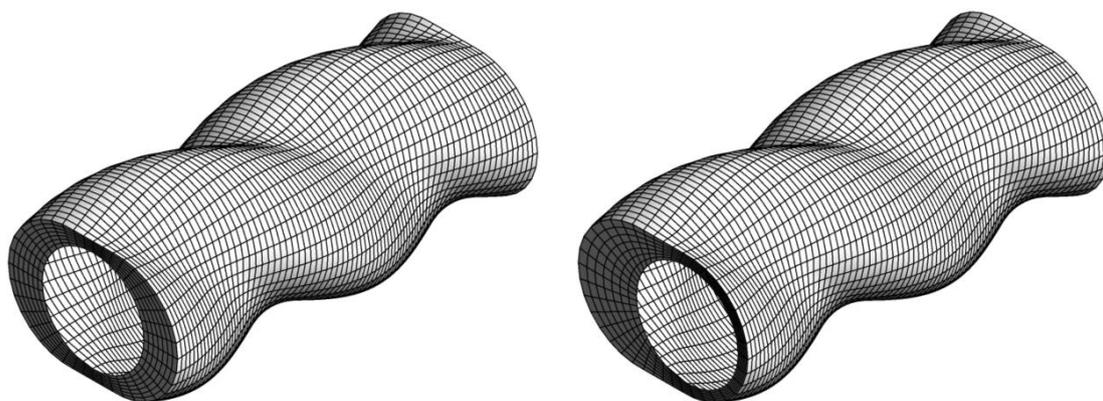


FIGURA 3.4 - MALHAS EM 3D COM A TOPOLOGIA CENTRADA NO ESTATOR (ALMEIDA, 2010).

Posteriormente, face à limitações geométricas impostas por essa topologia, Santos Neto (2011) implementou uma nova topologia (denominada de topologia centrada no rotor) que uniformizava a razão de aspecto dos elementos da malha. Não obstante, uma vez essa topologia não foi criticamente testada, avaliações numéricas mais detalhadas se fazem necessárias para a

determinação de sua qualidade, de maneira que a mesma não será empregada no presente trabalho. As Figuras 3.5 e 3.6 ilustram as características desta topologia.

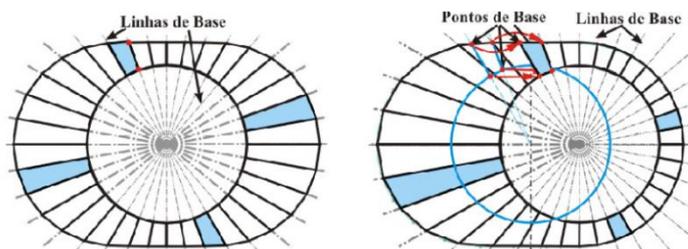


FIGURA 3.5 - LINHAS DE BASE PARA TRAÇADO DA MALHA DA REGIÃO FLUIDA(CENTRADA NA SEÇÃO DO ROTOR), PARA DUAS POSIÇÕES DO ROTOR (SANTOS NETO, 2011).

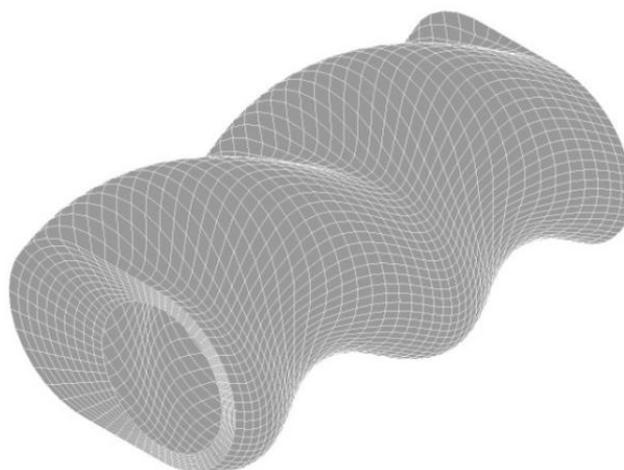


FIGURA 3.6 - MALHA EM 3D COM TOPOLOGIA CENTRADA NA SEÇÃO DO ROTOR (SANTOS NETO, 2011).

Independentemente da topologia empregada, os seguintes parâmetros de entrada devem ser especificados para a sub-rotina:

NPL – Número de pontos ao longo de uma linha “circular” em uma seção transversal da BCP (discretização angular).

NLZ – Número de linhas “circulares” por seção transversal da BCP (discretização radial)

NFZPST – Número de seções transversais, ou faces, por passo da BCP (discretização longitudinal).

ITOP - "Flag" indicando o tipo de topologia selecionada.

Após a escolha da topologia para geração da malha, o passo seguinte é a avaliação do número de nós/elementos que seja suficiente para produzir resultados com convergência satisfatória, dentro de uma tolerância adotada.

Em função da experiência adquirida com os trabalhos anteriores, foram selecionadas quatro malhas espaciais, com diferentes parâmetros, para a realização da análise do efeito da folga sobre o escoamento na bomba. A primeira configuração, aqui denominada de malha zero, será a mais grosseira, ou seja, com menor quantidade de nós e maior razão de aspecto. A malha três é mais refinada, ou seja, com maior quantidade de número de nós e menor razão de aspecto. Certamente, os resultados obtidos para essa configuração são os mais confiáveis. As malhas dois e um são malhas intermediárias entre a mais grosseira e a mais refinada.

As características (número de nós e razão de aspecto) das malhas para cada situação de folga da bomba são mostradas na Tabela 5 abaixo. Note-se que seis diferentes razões de aspecto são obtidas para uma malha com o mesmo número de nós/elementos. Este fato se deve às folgas do conjunto rotor/estator estudado, as quais mudam a geometria da bomba, alterando conseqüentemente as razões de aspecto.

Simulações numéricas serão realizadas para as seis situações mostradas na Tabela 3 (combinações de rotor e estator). Testes de convergência serão realizados fazendo-se uso das malhas descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Características numéricas das malhas empregadas para cada folga na bomba.

Malha	Número de Nós	Razão de Aspecto					
		Folga					
		w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
Malha 0	662 200	27	20	108	44	31	31
Malha 1	3 964 400	9	7	35	13	18	10
Malha 2	7 429 950	6	5	25	10	16	7
Malha 3	11 865 550	5	4	16	8	13	5

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os dados simulados a partir da metodologia computacional através de gráficos e tabelas. Análises de convergência dos resultados simulados e comparações com resultados experimentais são efetuadas para validação do modelo desenvolvido.

4.1. ROTOR ESTÁTICO

4.1. 1. ANÁLISE DE CONVERGÊNCIA

Para se demonstrar que os resultados obtidos estão convergidos, uma análise do comportamento da vazão volumétrica em função das características numéricas das malhas empregadas será efetuada para o caso da folga 5. Essa análise é efetuada apenas para o regime permanente, uma vez que como já comentado, essa situação é traduzida como a mais crítica em termos numéricos.

As Figuras 4.1 e 4.2 ilustram o comportamento de convergência da vazão em relação ao número de nós e à razão de aspecto das malhas utilizadas, respectivamente. O fluido empregado na simulação foi o óleo de 134 cp e para um diferencial de pressão de 108,09 psi.

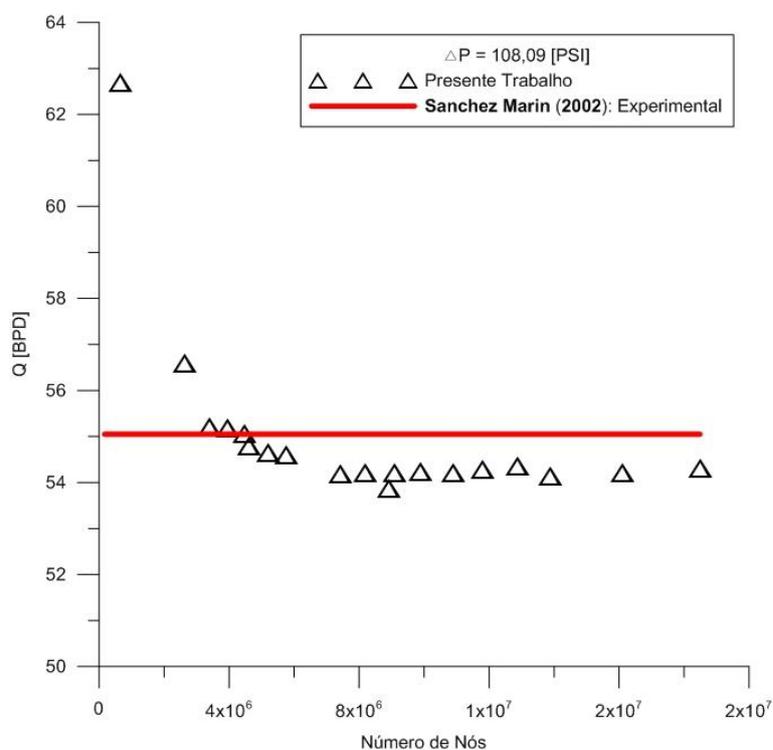


FIGURA 4.1 - VAZÃO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE NÓS DA MALHA. PRESSÃO DE 108,09 PSI E FOLGA 5.

Da Figura 4.1, nota-se que os valores de vazão obtidos com a simulação representam bem os dados experimentais, principalmente quando malhas com maiores quantidades de nós são empregadas. Por outro lado, nota-se também uma pequena oscilação nos resultados numéricos com números de nós cada vez mais crescentes, diferentemente do que seria esperado nas situações mais simples. Esse comportamento se deve à variação da razão de aspecto dos elementos, a qual não foi mantida constante nas simulações.

Dessa forma, um estudo do comportamento da vazão com a razão de aspecto é efetuada e ilustrada na Figura 4.2. Essa figura mostra, claramente, o efeito da razão de aspecto sobre a convergência dos resultados numéricos. Nota-se que quanto menor a razão de aspecto, maior é a repetibilidade dos resultados, mesmo para malhas com diferentes números de nós (os quais não foram controlados nas simulações).

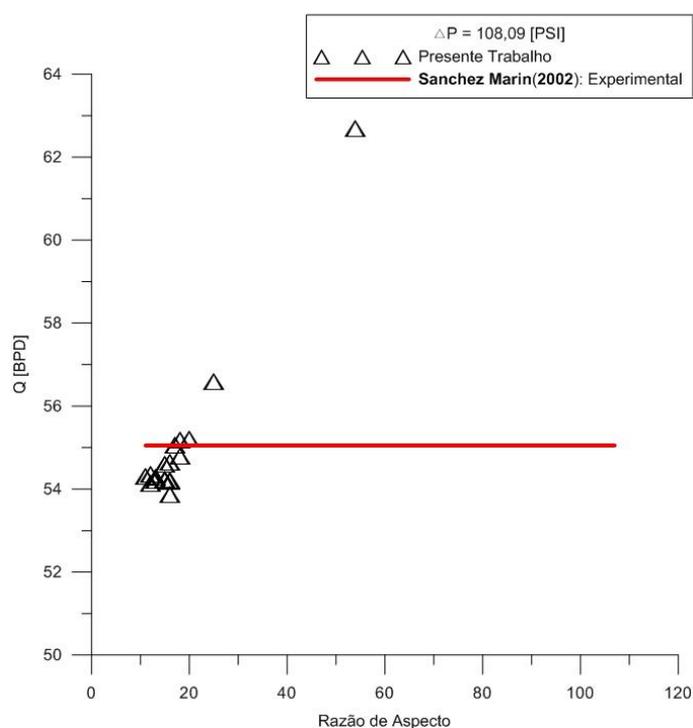


FIGURA 4.2 - VAZÃO PELA RAZÃO DE ASPECTO. PRESSÃO DE 108,09PSI E FOLGA 5.

Análises idênticas são efetuadas para uma pressão diferencial na bomba de 24,46 psi, sob a mesma condição de folga entre o rotor e o estator (folga 5). A Figura 4.3 ilustra a convergência da vazão com o número de nós e a Figura 4.4 ilustra com a razão de aspecto.

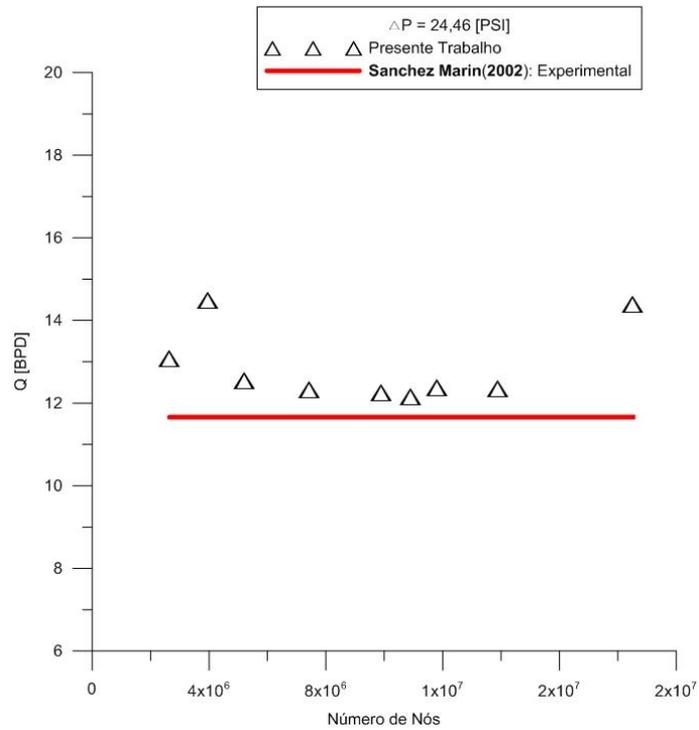


FIGURA 4.3 - VAZÃO EM FUNÇÃO DO NÚMERO DE NÓS DA MALHA. PRESSÃO DE 24,46 PSI E FOLGA 5.

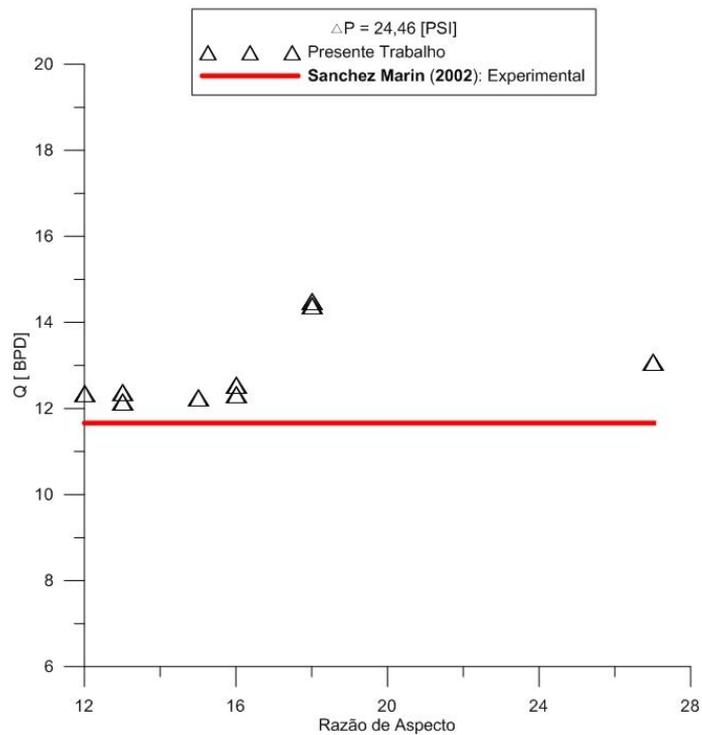


FIGURA 4.4 - VAZÃO PELA RAZÃO DE ASPECTO. PRESSÃO DE 24,46 PSI E FOLGA 5.

O mesmo comportamento observado nas Figuras 4.1 e 4.2 se repete nas Figuras 4.3 e 4.4. A conclusão, que confirma o já esperado, é de que não apenas o número de nós da malha é importante para a convergência dos resultados, mas também a razão de aspecto dos elementos dessa malha, cujo valor recomendado deve ser menor do que 100. Para a simulação em BCPs, essas figuras indicam uma condição ainda mais restrita, isto é, resultados satisfatórios só foram obtidos com razões de aspecto em torno, ou abaixo, de 15.

4.1.2. RESULTADOS P/ FLUIDO COM 134 CENTIPOISE

Como citado na metodologia, o ensaio para o escoamento estático foi realizado para três posições estáticas do rotor. As situações para as duas dimensões dos rotores são denominadas de caso 1 (rotor 1) e caso 2 (rotor 2). Ao se adotar essa nomenclatura, o processo de avaliação da incerteza na dimensão do estator ficará mais fácil.

CASO 1 - ROTOR 1

De acordo com as dimensões adotadas para o estator, três situações de folga são possíveis. A Tabela 3 mostra que as opções de folga associadas a esse caso são as folgas 1 (w_1), 3 (w_3) e 5 (w_5). Em função da posição relativa do rotor, para cada folga analisada três opções podem ser visualizadas.

A Figura 4.5 ilustra uma comparação dos resultados experimentais com os simulados, para as posições 1 e 2 do rotor, assumindo a folga 1 entre o rotor e o estator (a maior). De maneira geral, a posição 3 do rotor é praticamente equivalente à posição 1, de maneira que resultados para essa posição não são mostrados. Todas as quatro opções de malha foram empregadas com a finalidade de mostrar a convergência dos resultados apresentados.

Dessas figuras, percebe-se que a malha 1 (3.964.400 nós) já é suficiente para se produzir resultados com precisão gráfica, de maneira que futuros gráficos serão construídos empregando-se apenas essa malha.

A Figura 4.6 realiza a mesma comparação das figuras anteriores, mas agora para a folga 3 (a menor) e a posição 2 do rotor apenas. Uma vez que a malha 1 é suficiente para a análise, apenas essa configuração de malha foi empregada.

Um exame nessas figuras revela grandes diferenças entre os resultados experimentais e os resultados simulados. Essas diferenças não podem ser entendidas como erro, no sentido restrito da palavra, entre o modelo computacional e o modelo experimental, pois elas se devem ao desconhecimento da folga real entre o rotor e o estator.

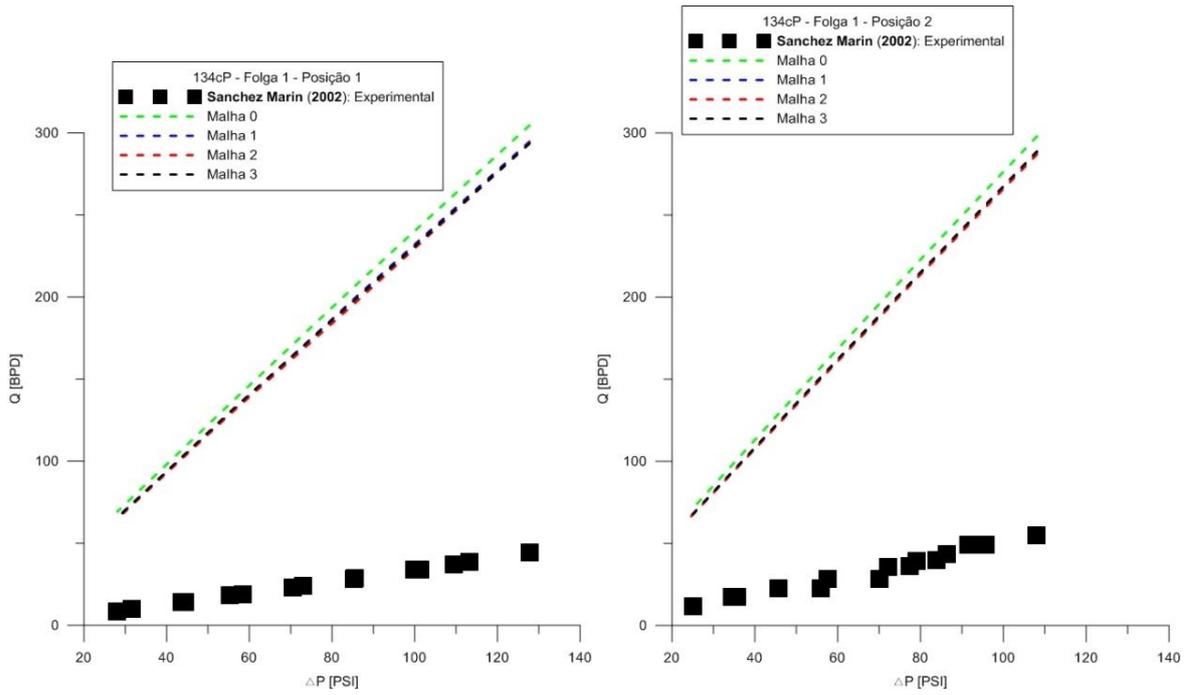


FIGURA 4.5 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA AS POSIÇÕES 1 E 2, E FOLGA 1 (MAIOR).

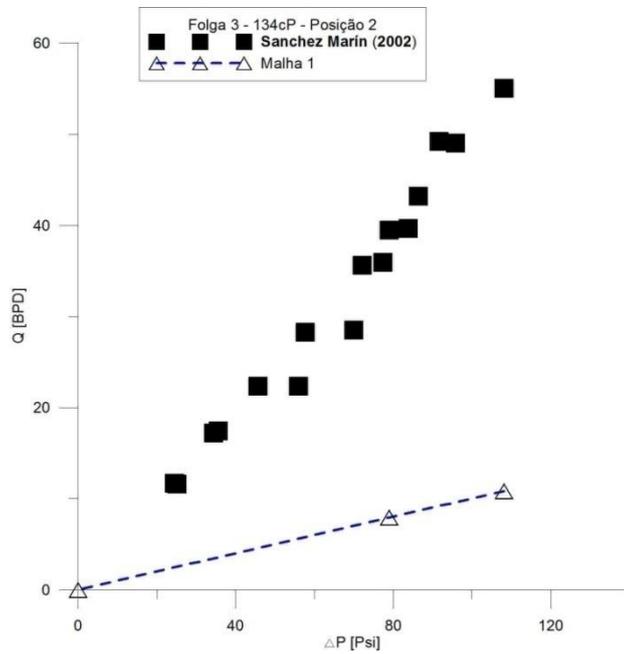


FIGURA 4.6 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA A POSIÇÃO 1, E FOLGA 3 (MENOR).

O que se pode concluir é que os valores das folgas adotadas nas simulações são muito maiores do que o valor da situação real (Figura 4.5), uma vez que as vazões obtidas com a simulação são todas maiores do que os dados experimentais. Contrariamente, a Figura 4.6 mostra que a folga empregada na simulação é menor do que a folga real, uma vez que os resultados obtidos por simulação são todos menores do que os experimentais.

Simulações realizadas com um valor intermediário de folga podem confirmar essas assertivas. A Figura 4.7 realiza essas comparações para essa situação intermediária (folga 5).

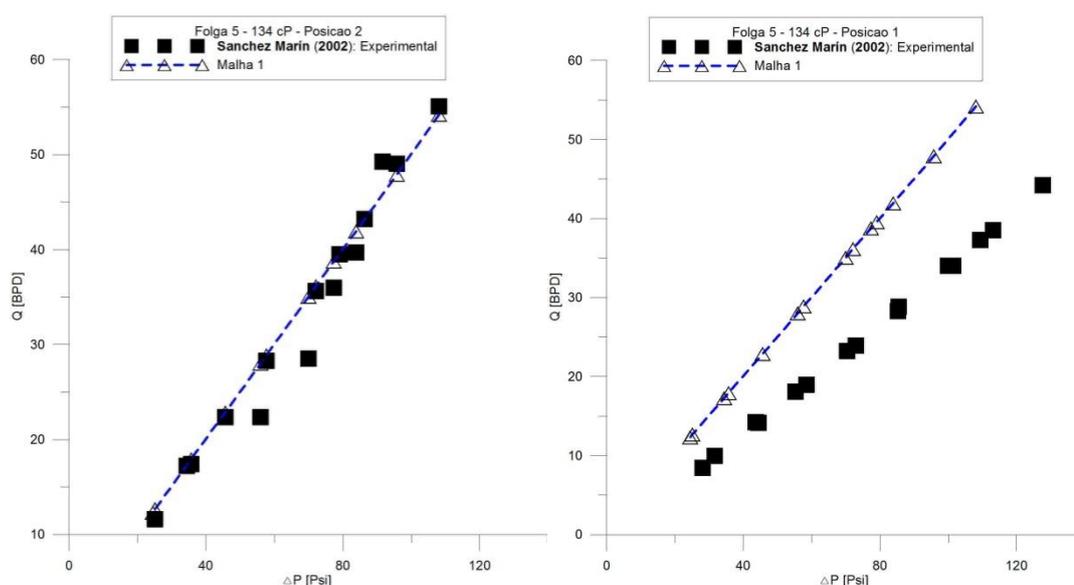


FIGURA 4.7 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA AS POSIÇÕES 1 E 2, E FOLGA 5 (INTERMEDIÁRIA).

Os resultados apresentados na figura acima confirmam as conclusões obtidas das análises das Figuras 4.5 e 4.6. A Figura 4.7 demonstra ainda a grande sensibilidade da vazão em relação às dimensões do estator. Novamente, a folga empregada na simulação não representa, completamente, a configuração geométrica real da bomba, pois sabe-se que o quadrado da vazão em um "duto" é uma variável que depende da quinta potência do diâmetro hidráulico.

CASO 2 - ROTOR 2

Para esse caso, a Tabela 3 mostra que as opções de folga são a 2 (w_2), a 4 (w_4) e a 6 (w_6). Em função da posição relativa do rotor, para cada folga analisada três opções podem ser novamente visualizadas. Uma vez que a malha 1 se mostrou suficiente nas análises anteriores, apenas essa configuração de malha foi empregada. Uma vez que o rotor 2 é o de menor dimensão, o problema relacionado às diferenças entre os resultados numéricos e experimentais deve ser mais evidente.

A Figura 4.8 ilustra uma comparação dos resultados experimentais com os simulados, para as posições 1 e 2 do rotor, assumindo a folga 2 entre o rotor e o estator (a maior). Novamente, percebe-se que a posição 3 do rotor é praticamente equivalente à posição 1, de maneira que resultados para essa posição não são mostrados. A Figura 4.9 realiza a mesma comparação, mas agora para a folga 4 (a menor) e a posição 2 do rotor apenas.

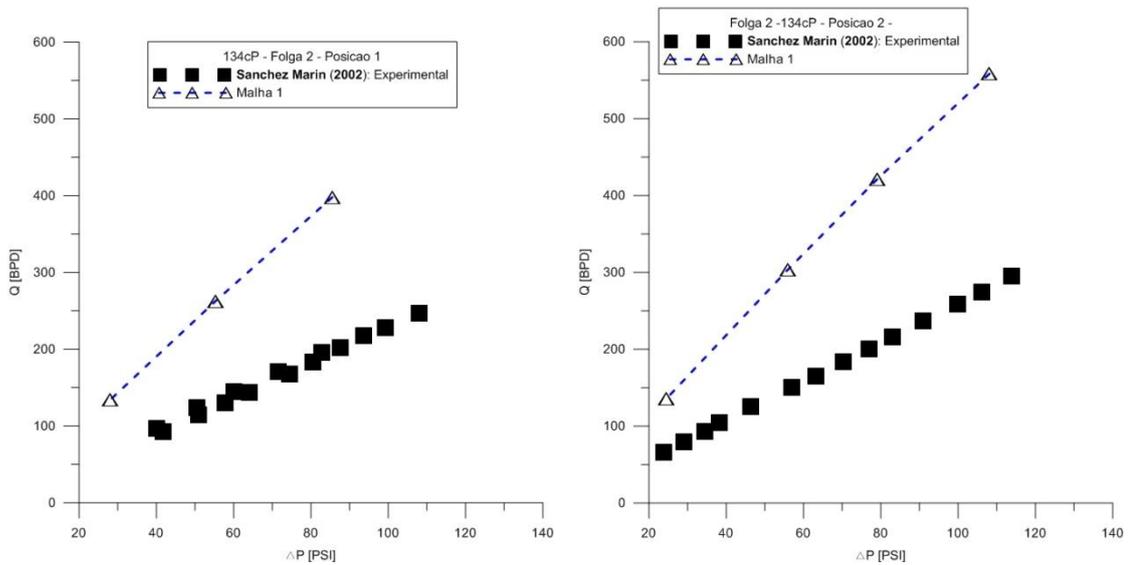


FIGURA 4.8 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA AS POSIÇÕES 1 E 2, FOLGA 2 (MAIOR).

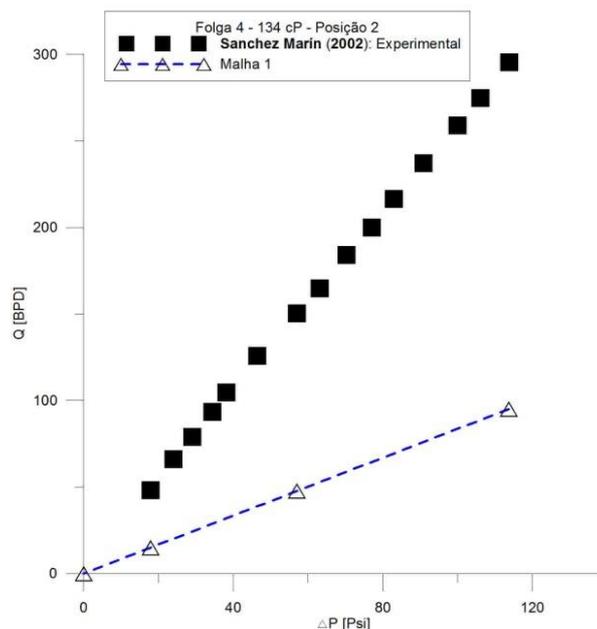


FIGURA 4.9 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA A POSIÇÃO 1, FOLGA 4 (MENOR).

As mesmas tendências das figuras do caso 1 são visualizadas no caso 2. Para finalizar esse estudo para a viscosidade de 134 cp, a Figura 4.10 mostra a comparação para uma folga intermediária, nas duas posições do rotor. Novamente, uma melhor relação entre os resultados numéricos e experimentais é esperada. Os resultados apresentados na figura confirmam as conclusões obtidas das análises anteriormente desenvolvidas na Figuras 4.5 a 4.9.

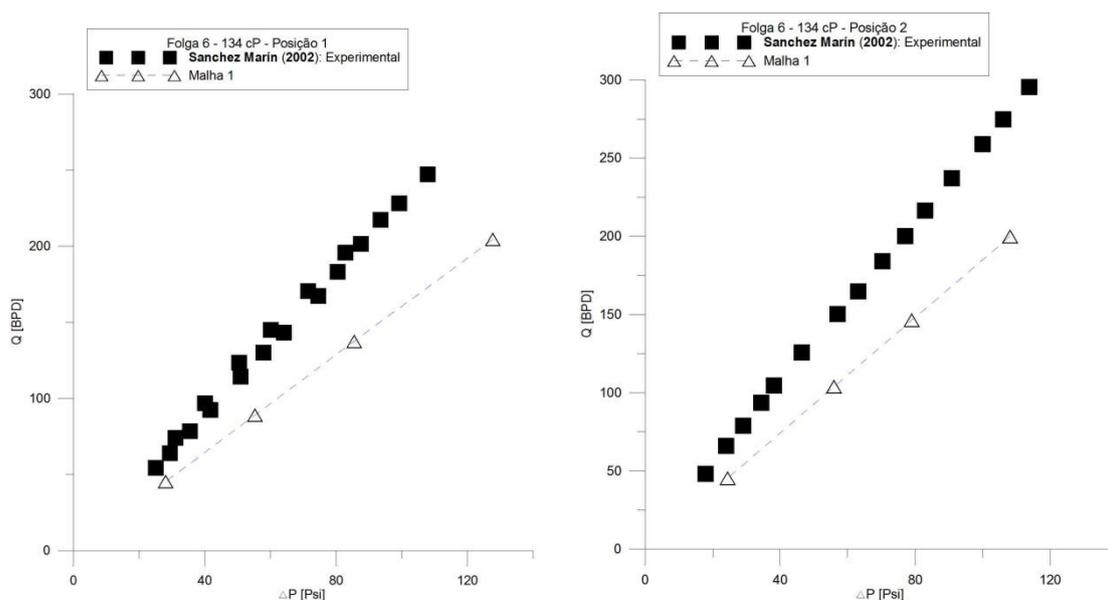


FIGURA 4.10 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA AS POSIÇÕES 1 E 2, FOLGA 6 (INTERMEDIÁRIA).

4.1.3. RESULTADOS P/ FLUIDO COM 75CENTIPOISE

As análises efetuadas para o fluido com essa viscosidade foram definidas a partir das melhores situações de folga para os dois casos tratados anteriormente para o fluido com 134 cp. Assim, apenas as folgas 5 e 6 (relativas aos rotores 1 e 2, respectivamente, em combinação com o estator intermediário) serão estudadas nessa seção. As Figura 4.11 e 4.12 ilustram essas comparações.

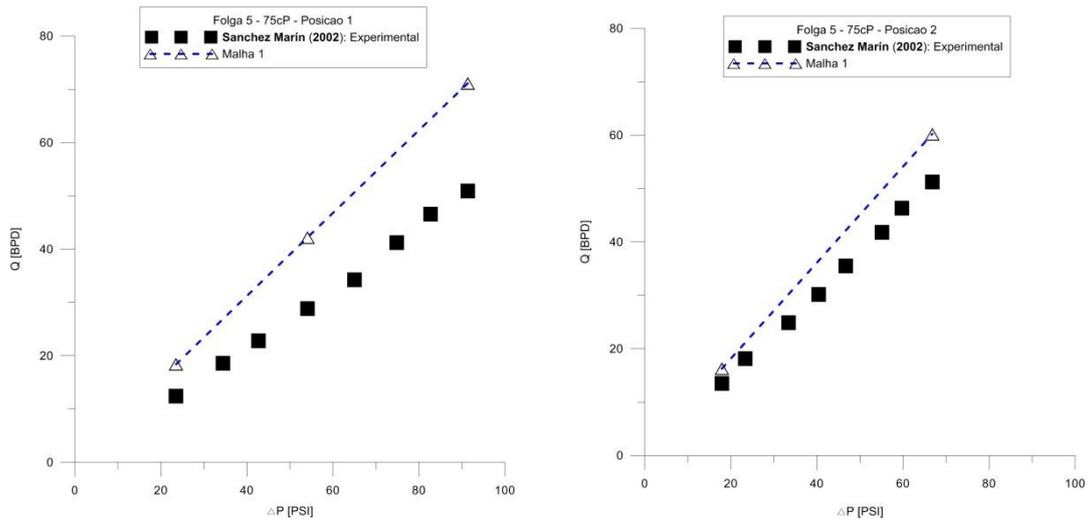


FIGURA 4.11 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA AS POSIÇÕES 1 E 2, E FOLGA 5 (FLUIDO 75 CP).

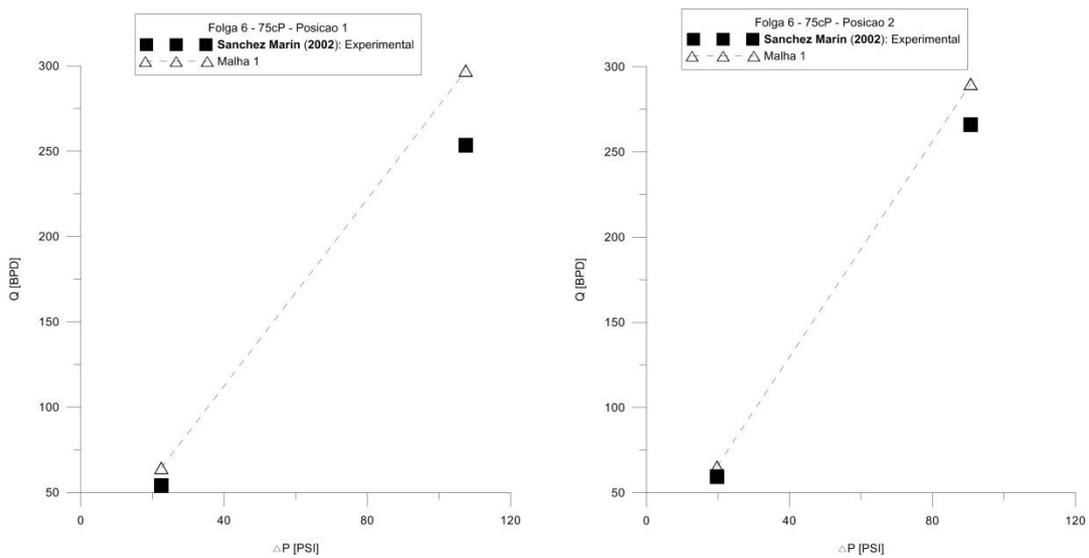


FIGURA 4.12 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA AS POSIÇÕES 1 E 2, E FOLGA 6 (FLUIDO 75 CP).

De maneira geral, o comportamento da vazão com o diferencial de pressão segue as mesmas tendências das Figuras 4.7 e 4.10, para as folgas 5 e 6 (as folgas intermediárias). Novamente, apesar da melhor comparação com relação aos dados experimentais para essas duas folgas, ainda não se pode dizer que as dimensões da bomba são aquelas relacionadas à essas folgas, mas apenas que se aproximam nessas duas condições.

4.1.4. INFLUÊNCIA DA FOLGA

Para tornar mais claros os estudos sobre a influência da folga rotor/estator sobre a performance da bomba, na condição estática, a Figura 4.13 ilustra, de maneira direta, os resultados mostrados nas Figuras 4.7 (folga 5) e 4.10 (folga 6) para o fluido de 134 cp, e nas Figuras 4.9 (folga 5) e 4.12 (folga 5) para o fluido de 75 cp, ambos com o rotor na posição 2.

Nota-se, dessas figuras, que a vazão volumétrica apresenta um comportamento linear com o diferencial de pressão sobre a bomba, independente da folga existente entre o rotor e o estator. A folga (e, de maneira inversa, a viscosidade do fluido) atua no sentido de aumentar a vazão da bomba sob uma mesma condição de diferencial de pressão (um comportamento esperado).

A Figura 4.14 ilustra, de maneira conclusiva, a influência da folga sobre o comportamento da bomba, ao se relacionar diretamente a vazão volumétrica com a folga sobre a mesma. A figura foi construída a partir dos resultados obtidos para as seis condições de folga estabelecidas na Tabela 3, o rotor posicionado na posição 2, duas situações de pressão diferencial (24,46 psi e 108,09 psi) e fluido de 134 cp.

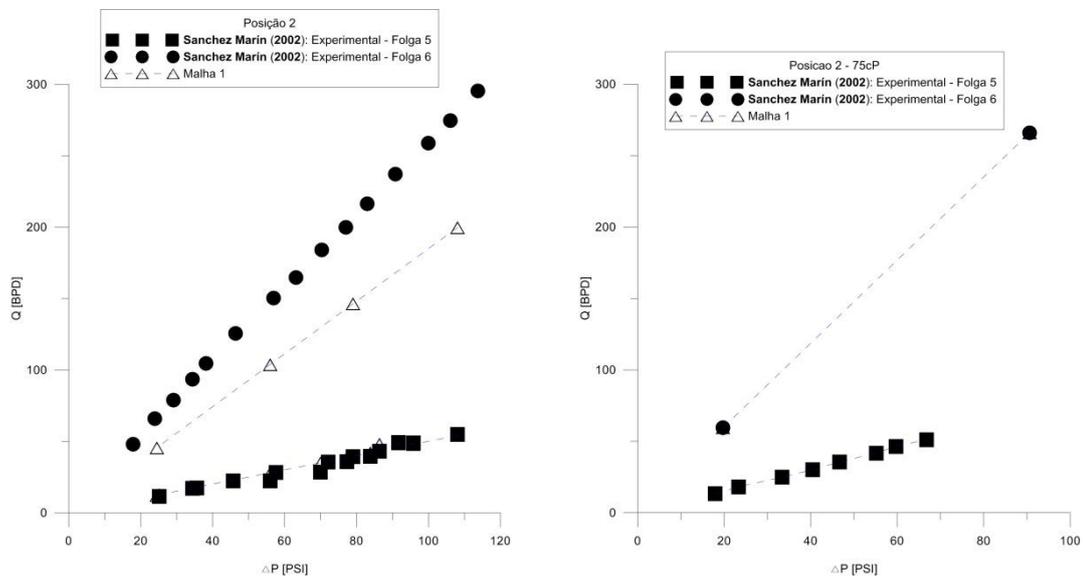


FIGURA 4.13 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO NA POSIÇÃO 2 DO ROTOR, PARA AS FOLGAS 5 E 6. FLUIDOS COM 134 E 75 CP, RESPECTIVAMENTE.

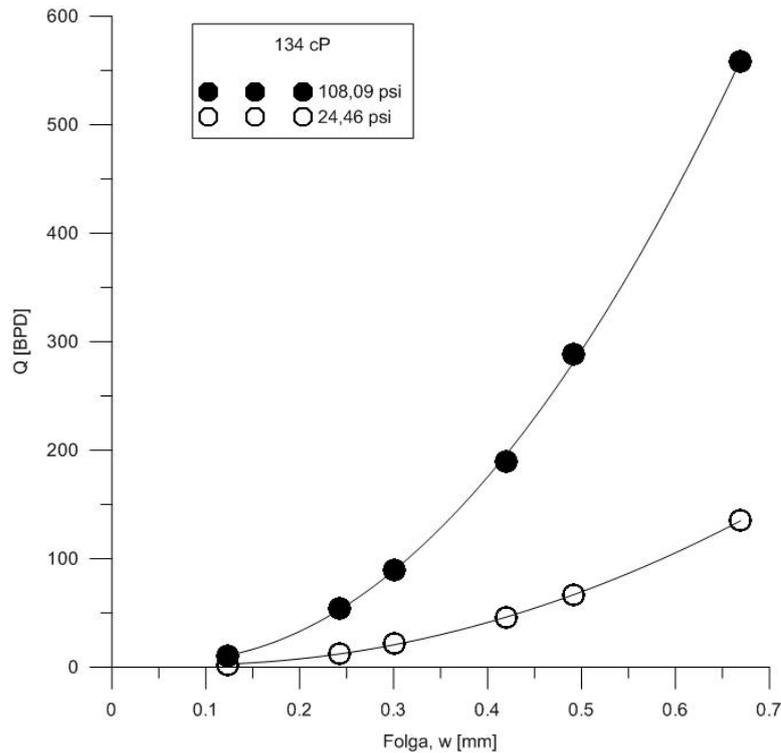


FIGURA 4.14 - VAZÃO VOLUMÉTRICA VERSUS FOLGA ROTOR/ESTATOR NA BOMBA, PARA OS DIFERENTES FLUIDOS.

Nota-se, das Figuras 4.13, que a vazão volumétrica apresenta um comportamento linear com o diferencial de pressão na bomba, para as duas folgas estudadas. Assim, assumindo-se tal comportamento, as seguintes equações lineares foram obtidas a partir dos resultados simulados:

a) Fluido 134 cp

$$Q_{w5} = 0,516 \Delta p - 0,521 \quad (20)$$

$$Q_{w6} = 1,845 \Delta p + 0,522 \quad (21)$$

a) Fluido 75 cp

$$Q_{w5} = 0,773 \Delta p - 0,444 \quad (22)$$

$$Q_{w6} = 2,911 \Delta p + 2,242 \quad (23)$$

Dois ajustes polinomiais também foram efetuados sobre os dados para os dois diferenciais de pressão estudados na Figura 4.14. Claramente, percebe-se o comportamento quadrático da vazão volumétrica com a folga entre o rotor e o estator. Os resultados foram ajustados aos seguintes polinômios de segundo grau:

$$Q_{24,46} = 4,87 - 62,65 w + 384,06 w^2 \quad (24)$$

$$Q_{108,09} = 12,43 - 201,02 w + 1.521,26 w^2 \quad (25)$$

As expressões para os ajustes obtidos devem ser empregadas apenas dentro da faixa (de pressões e de folga) para as quais elas foram obtidas. Assim, as condições de folga nula e diferencial de pressão nulo não podem ser obtidas empregando-se tais equações. Expressões mais gerais, que correlacionem a vazão com todas as variáveis envolvidas (folga, diferencial de pressão e viscosidade), e para faixas maiores, devem ser futuramente desenvolvidas a partir das ideias apresentadas no presente estudo.

4.2. ROTOR DINÂMICO

Após a realização dos testes estáticos, Sanchez Marin (2002) realizou ensaios de comportamento volumétrico dinâmico em quatro velocidades de rotação do rotor (100, 200, 300 e 400rpm). A temperatura média de trabalho do fluido durante o experimento foi de aproximadamente $21^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Os experimentos se realizaram mantendo constante a velocidade de giro do rotor, enquanto a diferença de pressão foi controlada através de um estrangulador de fluxo na descarga da bomba. Assim, foram realizadas as simulações computacionais para o rotor em situação dinâmica, para as duas folgas e os dois fluidos de viscosidade de 134 cP e 75cP.

4.2.1. VAZÃO X DIFERENCIAL DE PRESSÃO

As Figuras 4.15 e 4.16 ilustram o comportamento dinâmico da vazão volumétrica versus o diferencial de pressão na bomba para as duas condições de folga (5 e 6), respectivamente, considerando-se as quatro condições operacionais de rotação e o fluido com viscosidade de 134 cp.

As figuras revelam que, nas situações dinâmicas, as diferenças entre as dimensões da geometria real e da simulada não são tão importantes quanto nas condições estáticas. Isso se deve ao processo de mediação das incertezas associadas à folga quando do deslocamento do rotor no interior do estator. Os resultados experimentais são reproduzidos pela metodologia computacional, mostrando o seu poder como ferramenta de análise de escoamentos em BCPs. As figuras também ilustram um fator interessante no bombeamento por BCPs: o escorregamento (retorno de fluido) independe da rotação do rotor, mas depende apenas do diferencial de pressão (todas as curvas são paralelas, mantendo-se assim o escorregamento constante em qualquer rotação).

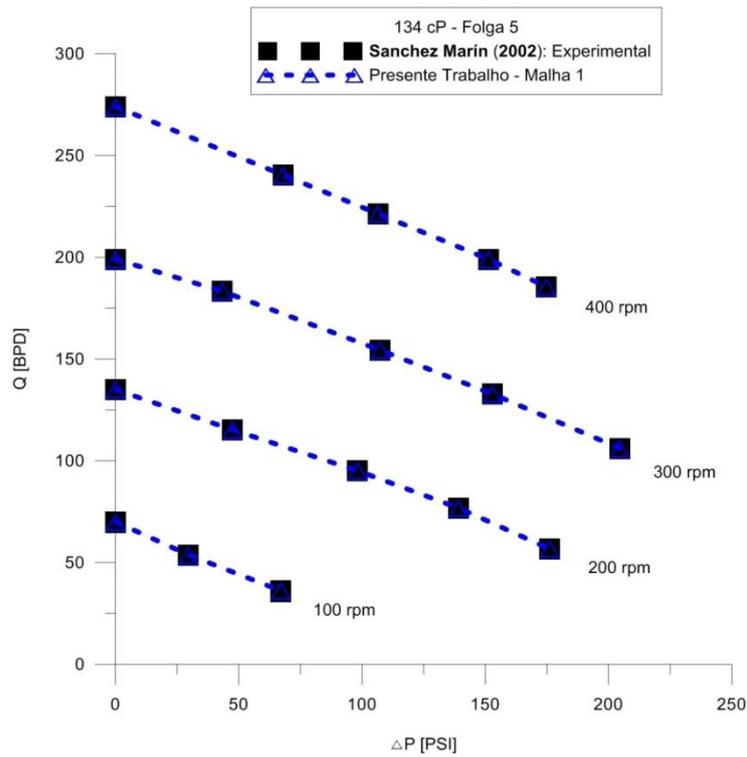


FIGURA 4.15 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA 4 ROTAÇÕES. FLUIDO COM 134cP, FOLGA 5.

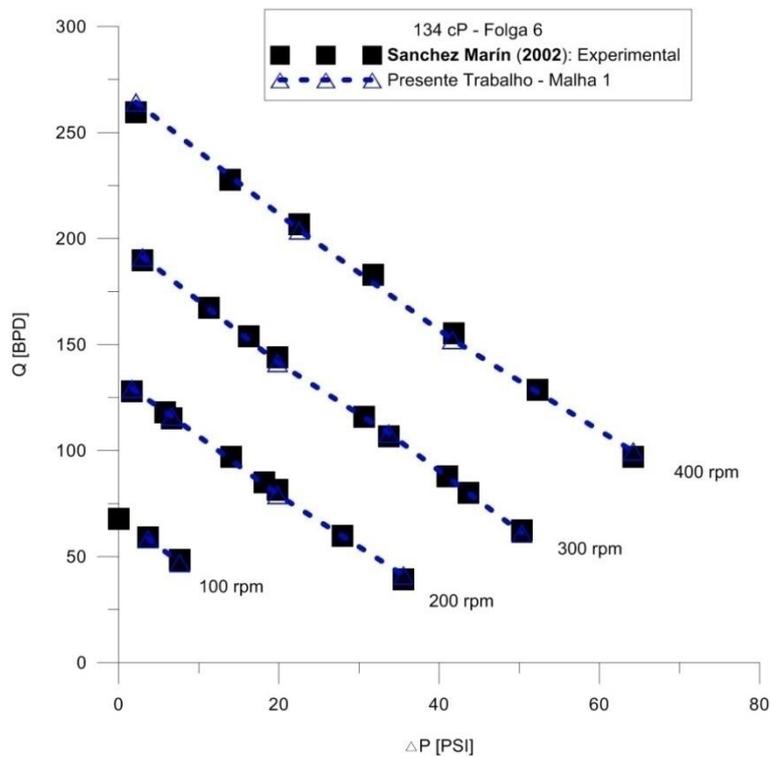


FIGURA 4.16 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA 4 ROTAÇÕES. FLUIDO COM 134cP, FOLGA 6.

Finalmente, uma comparação entre as Figuras 4.15 e 4.16, a qual é diretamente ilustrada na Figura 4.17, mostra a grande influência da folga entre o rotor e o estator sobre a eficiência da bomba: para um diferencial de pressão de 50 psi e rotação de 300 rpm, por exemplo, um incremento de cerca de 73% na folga (de w_5 para w_6 , em milímetros!) leva a um decréscimo da capacidade de bombeamento da BCP de 65% (185 bpd para 65 bpd, isto é, a vazão para a folga w_5 é cerca de 285% maior do que a vazão para a folga w_6 !).

O comportamento dinâmico da vazão volumétrica versus o diferencial de pressão na bomba para a condição de folga 5, nas quatro condições operacionais de rotação, é avaliado na Figura 4.18 para o fluido com uma viscosidade de 75 cp. As mesmas tendências observadas anteriormente são repetidas para o fluido de menor viscosidade.

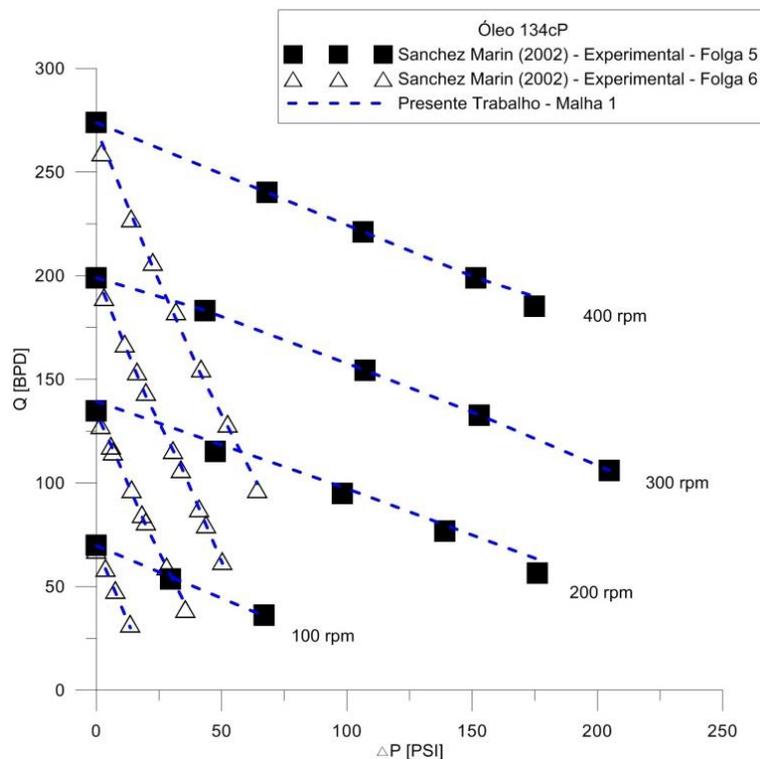


FIGURA 4.17 - COMPARAÇÃO DA VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DA FOLGA. FLUIDO COM 134 CP, FOLGAS 5 E 6 E QUATRO ROTAÇÕES.

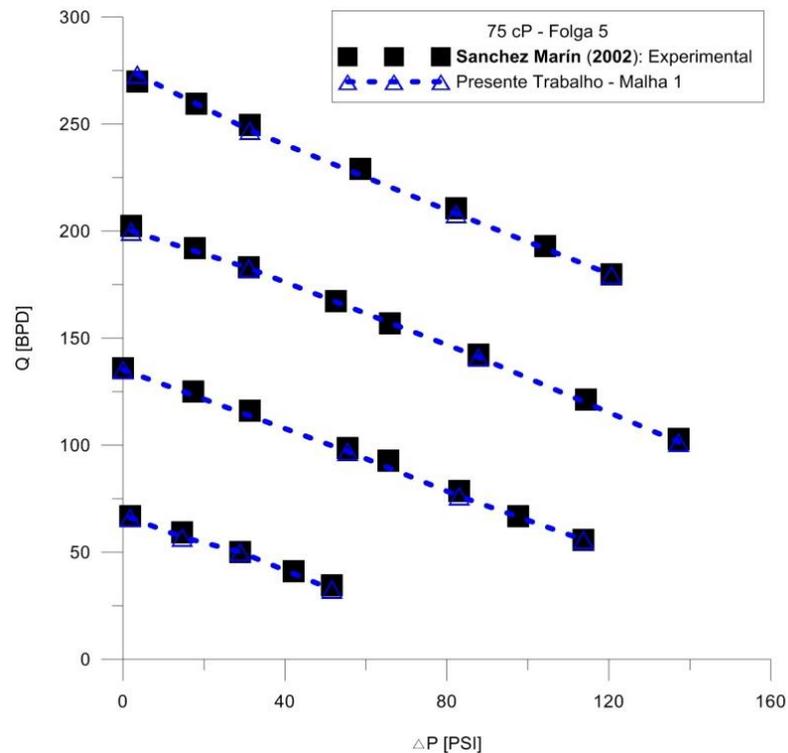


FIGURA 4.18 - VAZÃO VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO PARA 4 ROTAÇÕES. FLUIDO COM 75 CP, FOLGA 5.

4.2.2. EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA

Os resultados apresentados na seção anterior permitem avaliar a eficiência volumétrica da bomba para as configurações típicas simuladas. Assim, a partir da definição da eficiência volumétrica podem ser traçados os gráficos das Figuras 4.19 e 4.20, as quais demonstram o efeito do diferencial de pressão e da rotação da bomba sobre a sua eficiência, para as folgas 5 e 6, respectivamente. A mesma ilustração é realizada na Figura 4.21 para o fluido com 75 cp de viscosidade, considerando-se a folga 5 apenas.

Dessas figuras, nota-se claramente que as maiores eficiências volumétricas estão associadas às maiores velocidades de rotação do rotor. Esse comportamento se deve às maiores vazões obtidas na bomba quando as rotações são aumentadas, e ao mesmo tempo, ao escorregamento que se mantém constante com a rotação (ver Figuras 4.17 a 4.20). Por outro lado, como já esperado, quanto maior a folga, menor é a eficiência volumétrica da bomba, uma vez que maior será o seu escorregamento. Essas figuras também revelam que a eficiência volumétrica de uma BCP aumenta com elevação da viscosidade do fluido, justificando assim o uso de BCP em campos de petróleo com óleos de viscosidade elevada.

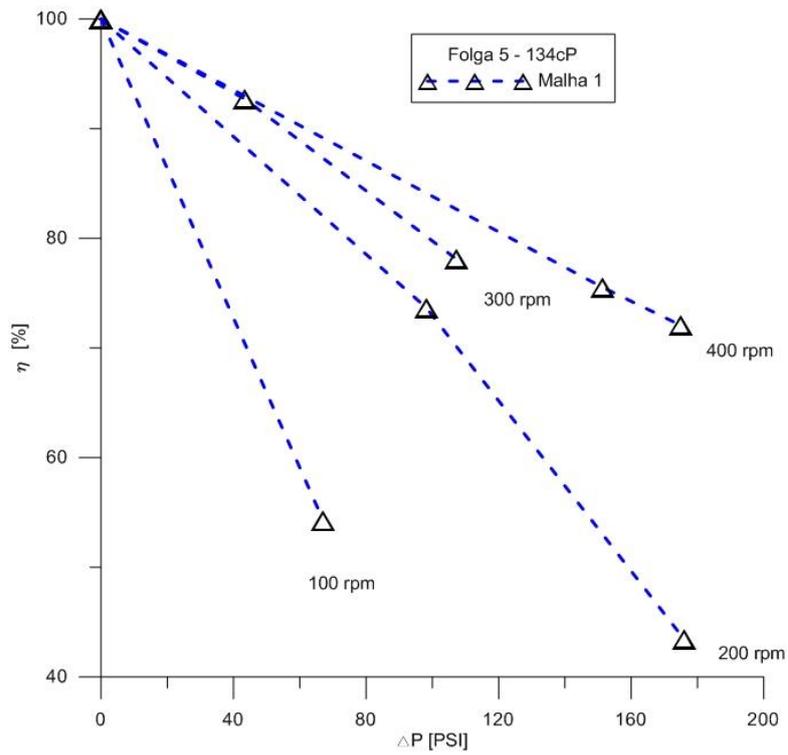


FIGURA 4.19 - EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO. FLUIDO DE 134 CP E FOLGA 5.

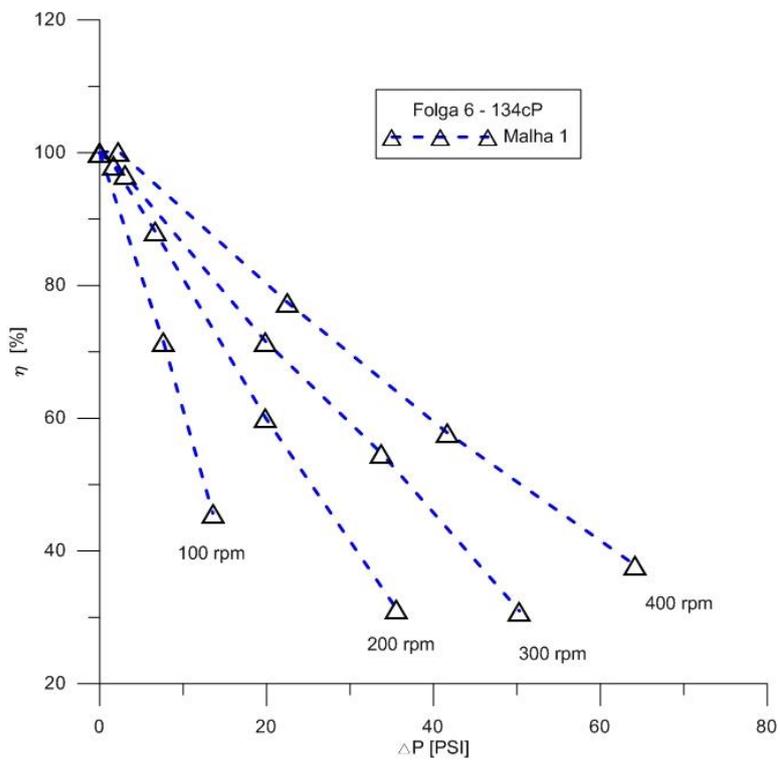


FIGURA 4.20 - EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO. FLUIDO DE 134 CP E FOLGA 6.

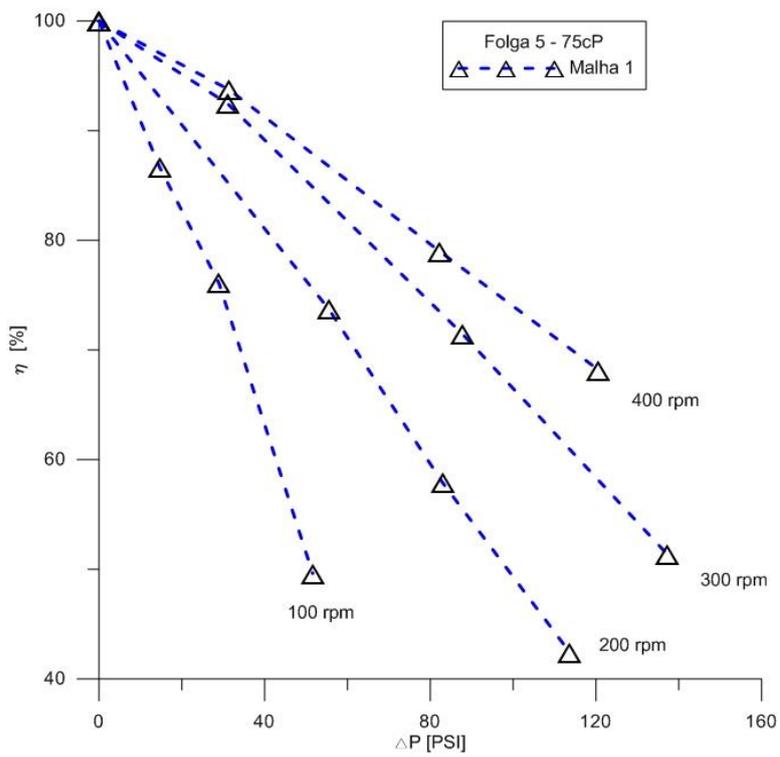


FIGURA 4.21 - EFICIÊNCIA VOLUMÉTRICA VERSUS DIFERENCIAL DE PRESSÃO EM FUNÇÃO DA ROTAÇÃO. FLUIDO DE 75 CP E FOLGA 5.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões

5.1. CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados no Capítulo 4 e seguindo os objetivos descritos no Capítulo 1 do presente trabalho, são apresentadas as seguintes conclusões:

1. Apesar de se empregar uma malha menos refinada para a qual os resultados, principalmente para a situação estática, não estão totalmente convergidos (dentro de uma tolerância mais restrita), os resultados obtidos foram satisfatórios, uma vez que representaram bem os dados experimentais, validando o código computacional.
2. A razão de aspecto e o número de nós das malhas são parâmetros que possuem grande influência nos resultados obtidos na simulação. Observa-se que mesmo uma malha com elevado número de nós pode não ser uma boa alternativa numérica se a razão de aspecto de seus elementos não for adequada (menor que 15, aproximadamente). O oposto também acontece, isto é, uma malha não refinada pode produzir resultados satisfatórios se a razão de aspecto de seus elementos estiver abaixo desse valor.
3. Os resultados para a situação dinâmica são muito menos sensíveis à malha numérica empregada. Esse fato deve ao processo de média das folgas da bomba, quando o rotor se desloca no interior do estator. Os resultados experimentais são reproduzidos com erros muito pequenos, quando comparados à situação de rotor estático.
4. Dos testes estáticos, a situação de folga adotada que se apresentou mais adequada, isto é, cujos resultados computacionais melhor representaram os dados experimentais, foi a situação denominada folga 5, quando se emprega o rotor 1, e folga 6, quando se emprega o rotor 2. Os resultados para a situação dinâmica são apresentados para essas situações.
5. Para a situação estática, quanto maior a folga entre o rotor e o estator, maior será a vazão obtida. Isto se traduz em maior escorregamento da bomba, quando em operação.
6. Com o aumento da viscosidade, a vazão da bomba na situação estática diminui (o escorregamento na situação dinâmica). Conseqüentemente, na situação dinâmica a bomba que eleva um fluido com maior viscosidade tem sua eficiência aumentada. Por esse motivo a BCP é bastante aplicável na indústria do petróleo.

5.2. SUGESTÕES

Como se pode inferir, este é o primeiro trabalho que foi realizado com o intuito de se verificar a potencialidade do código computacional desenvolvido nas mais diversas condições operacionais. Assim, muitas ações foram deixadas abertas para a continuidade do trabalho:

1. Sugere-se realizar um estudo mais aprofundado em relação à sensibilidade das malhas a serem empregadas nas simulações com o rotor estático. Apenas após a conclusão dessa fase é que se pode ganhar mais confiança e conhecimento para a simulação das situações dinâmicas.
2. Apesar da validação do modelo computacional desenvolvido, análises de convergência mais rigorosas também deverão ser efetuadas após o aprofundamento do conhecimento da sensibilidade e adequação das malhas.
3. Além da vazão e da eficiência volumétricas, outras variáveis relacionadas às BCP devem ser estudadas. Cita-se, por exemplo, a análise das potências hidráulicas envolvidas no bombeamento.
4. Correlações, as quais se constituem na principal meta para o desenvolvimento do código computacional, deverão ser desenvolvidas para uso operacional.

Referências Bibliográficas

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) Almeida, R. F. C., 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) ANSYS. Site: <http://www.ansys.com>
- 3) Arrelano, J.A., 1998. Field Study for Predicting PC Pump Performance. Society of Petroleum Engineers. Tulsa, USA.
- 4) Assmann, B. W., 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.
- 5) Azevedo, V.W.F., 2012, "Simulação Computacional do Escoamento Multifásico em Bombas de Cavidades Progressivas Metálicas,. M.Sc. Thesis, PPGEM/UFRN, Natal, Brazil.
- 6) Belcher, I., 1991. An Investigation into the Operating Characteristics of the Progressive Cavity Pump. Doctoral Thesis at The British Library. Cranfield Institute of Technology, Cranfield, United Kingdom.
- 7) Carvalho, P., 1999, “Gerenciamento do Bombeio de Cavidades Progressivas”, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas/SP.
- 8) Dillon, M. & Vullings, K., 1999. Applying the NPSHR Standard to Progressing Cavity Pumps. Pumps Magazine, USA.
- 9) Dunn, L., Matthews, C. e Zahacy, T., 1994, “Progressing Cavity Pumping Systems: Design, Operation and Performance Optimization”, Course Notes, C-FER, Edmonton, Alberta, Canada.
- 10) Ferziger, J. H. e Peric, M., 2001, "Computational Methods for Fluid Dynamics", Springer-Verlag, 3rd Edition.
- 11) Gamboa, J., 2000. Simulation Computacional de uma BCP Sin Interferência. Master Thesis. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.
- 12) Karassik, I.J. et., 2001. Pump Handbook, 3rd Edition. McGraw-Hill, New York, USA.
- 13) Lima, J.A., Assmann, V.P.M. and Assmann, F.P.M., 2012, "Mesh Generation Algorithm for Elastomeric Progressing Cavity Pumps (PCP) with Interference", VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2012, São Luís/MA - Brazil, July 31-August 03.
- 14) Maliska, C. R., 2004, "Transferência De Calor e Mecânica Dos Fluidos Computacional", LTC Editora, 2ª Edition.
- 15) Olivet, J., 2002. Estudio Experimental del Desempeño de Una BCP de Estator Rígido com Flujo Bifásico. Master Thesis. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.

- 16) Paladino, E.E., Lima, J.A. and Pessoa, P.A.S. and Almeida, R.F.C., 2009, "Computational 3D Simulation of the Flow within Progressing Cavity Pumps", 20th International Congress of Mechanical Engineering - XX COBEM, Gramado/RS, Brazil, 15-20 November.
- 17) Pessoa, P. A. S., 2009, "Simulação Computacional do escoamento em Bombas de Cavidades Progressivas", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal/RN.
- 18) 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.
- 19) Robles, J. & Ercolino, J., 1992. Análisis de Fuerzas Internas em Bombas de Cavidades Progressivas. Technical Report. PDVSA Intevep S.A., Los Teques, Venezuela.
- 20) Samuel, G. R., 1997. Progressing Cavity Pump (PCP): New Performance Equations for Optimal Design. Society of Petroleum Engineers, SPE 39786.
- 21) Santos Neto, J.C., 2011, "Uma nova topologia para geração de malhas utilizadas na simulação numérica do escoamento em bombas de cavidades progressivas, Trabalho de Conclusão de Curso, UFRN, Natal, Brazil.
- 22) Sanchez Marin, C.A., 2002. "Estudio Experimental del Efecto de la Interferencia sobre el Comportamiento de una Bomba de Cavidad Progressiva de Estator Rígido". 162 f. TCC (Graduação) - Curso de Ingeniería de Petróleo, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- 23) Vetter, G. & Paluchowski, D., 1997. Modeling of NPSHR for Progressing Cavity Pumps. ASME Fluids Engineering Division, Summer Meeting, Vancouver.

APÊNDICE

RELATÓRIO DE ESTÁGIO SUPERVISIONADO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CEM1003 – ESTÁGIO CURRICULAR

RELATÓRIO DE ESTÁGIO: MANUTENÇÃO PREDITIVA

Estagiário: Oto Lima de Albuquerque Neto

Curso: Engenharia Mecânica

Empresa: Petrobras – Petróleo Brasileiro S/A

Supervisor de Estágio: Eng. Júlio César dos Santos

Prof. Orientador: Dr. João Telésforo Nóbrega de Medeiros

Natal/RN

Janeiro/2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CEM1003 – ESTÁGIO CURRICULAR

**RELATÓRIO DE ESTÁGIO:
MANUTENÇÃO PREDITIVA**

Oto Lima de Albuquerque Neto

Relatório de estágio apresentado à Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos para finalização da disciplina “CEM01003 – Estágio Curricular Obrigatório” do curso de Engenharia Mecânica.

Natal/RN

Janeiro/2015



Sumário

1.	Identificação	75
2.	Responsabilidade pelas Informações e Termo de Compromisso	76
3.	Introdução	77
4.	A Empresa	79
4.1.	Áreas de Atuação	80
4.2.	Estrutura Organizacional.....	81
4.3.	A UO-RNCE – Unidade de Operações do RN e CE	83
4.4.	A EMI – Engenharia de Manutenção e Inspeção	85
5.	Fundamentação Teórica.....	89
5.1.	Tribologia	89
5.1.1.	Condições de Lubrificação	91
5.2.	Manutenção Industrial.....	92
5.3.	Análise de Óleo Lubrificante.....	94
5.3.1.	Principais Parâmetros de Monitoramento	95
5.3.1.1.	Análises Físico-químicas	95
5.3.1.1.1.	Viscosidade Cinemática.....	95
5.3.1.1.2.	Índice de Viscosidade.....	96
5.3.1.1.3.	Ponto de Fulgor	96
5.3.1.1.4.	Número Total de Acidez (TAN) e Número Total de Basicidade (TBN)	96
5.3.1.2.	Análise de Contaminação	96
5.3.1.2.1.	Teor de Água.....	97
5.3.1.2.2.	Insolúveis em Pentano	97
5.3.1.2.3.	Espectrometria por Emissão Atômica	97
5.4.	Armazenamento e Manuseio dos Tambores de Óleo Lubrificante.....	98
5.4.1.	Quanto ao Manuseio dos Tambores	98
5.4.2.	Posição correta dos tambores no armazenamento	99
5.4.3.	Exposição dos tambores em locais abertos	100
5.4.4.	Contaminação dos Tambores com Água	101
6.	Atividades Desenvolvidas	101
6.1.	Auxílio na organização estrutural dos padrões de contratos da disciplina da Mecânica da UO-RNCE. 101	
6.1.1.	Objetivo Geral.....	102
6.1.2.	Objetivo Específico.....	102
6.1.3.	Método 102	
6.1.4.	Desenvolvimento.....	102
6.1.5.	Conclusão 103	
6.2.	Auxílio na especificação do conjunto Parafuso-Porca-Arruela.	103
6.2.1.	Objetivo Geral.....	104
6.2.2.	Objetivo Específico.....	104
6.2.3.	Método 105	
6.2.4.	Desenvolvimento.....	105
6.2.5.	Conclusão 106	
6.3.	Participação do projeto piloto de monitoramento da vibração em um compressor de Guamaré. 106	
6.3.1.	Objetivo Geral.....	111
6.3.2.	Objetivo Específico.....	111
6.3.3.	Método 112	



6.3.4. Desenvolvimento.....	112
6.3.5. Conclusão	114
6.4. Trabalho de confiabilidade utilizando um software da empresa ReliaSoft aplicado ao Sistema de Injeção de Água do Canto do Amaro.....	114
6.4.1. Objetivo Geral.....	116
6.4.2. Objetivo Específico.....	116
6.4.3. Método	117
6.4.4. Desenvolvimento.....	117
6.4.5. Conclusão	121
6.5. Parada Programada da Estação Compressora e Coletora de Upanema.....	121
6.5.1. Objetivo Geral.....	121
6.5.2. Objetivo Específico.....	122
6.5.3. Metodologia	122
6.5.4. Desenvolvimento.....	122
6.5.5. Conclusão	123
6.6. Participação nas Ações do Comitê Técnico de Manutenção Preditiva.....	123
6.6.1. Objetivo Geral.....	124
6.6.2. Objetivos Específicos.....	124
6.6.3. Método	125
6.6.4. Desenvolvimento.....	125
6.6.5. Conclusão	126
6.7. Análise de Óleo Lubrificante.....	126
6.7.1. Objetivo Geral.....	127
6.7.2. Objetivo específico.....	127
6.7.3. Método	127
6.7.4. Desenvolvimento.....	128
6.7.4.1. Treinamento com a Maleta.....	128
6.7.4.1.1. Conclusão.....	129
6.7.4.2. Planilhas de dados referentes à análise de óleo.....	130
6.7.4.2.1. Conclusão.....	132
6.7.4.3. Visita nos campos do Canto do Amaro e Alto do Rodrigues para verificação da condição de Armazenamento e Manuseio dos Tambores de Óleo lubrificante.....	132
6.7.4.3.1. Conclusões.....	134
6.7.4.4. Coleta e troca do óleo lubrificante do redutor em uma das unidades de bombeio do canto do amaro.	134
7. Conclusão	139
8. Referências	140



1. IDENTIFICAÇÃO

- **Do Estagiário**

Nome: Oto Lima de Albuquerque Neto
Identidade: 002.111.649
CPF: 079.621.324-00
Matrícula: 50214329
Telefone: (84) 3217-5683/8807-4357
E-mail: oto_lima@hotmail.com

- **Da Empresa**

Nome: Petrobras – Petróleo Brasileiro S/A
Setor: UO-RNCE/ENGP/EMI – Unidade de Operações do Rio Grande do Norte e Ceará / Engenharia de Produção / Engenharia de Manutenção e Inspeção
Endereço: Rua Euzébio Rocha, 1000 - Cidade da Esperança. CEP 59000 - 000.
Cidade: Natal/RN.
Telefone: (84) 3235-3709

- **Da Instituição de Ensino**

Nome: Universidade Federal do Rio Grande do Norte
GET – Grupo de Estudos de Tribologia
Endereço: Campus Universitário – Lagoa Nova. CEP 59072 - 970.
Cidade: Natal/RN.
Telefone: (84) 3215-3746/ 3215-3744

- **Do Supervisor de Estágio**

Nome: Júlio César dos Santos
Cargo: Engenheiro de Equipamentos Pleno
Telefone: (84) 3235-3741
E-mail: santosjul@petrobras.com.br

- **Do Estágio**

Início: 02 de setembro de 2013
Término: 05 de outubro de 2014
Local: Petrobras UO-RNCE
Ramo: Manutenção Preditiva.



2. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES E TERMO DE COMPROMISSO

As informações submetidas neste relatório são da autoria e responsabilidade do aluno Oto Lima de Albuquerque Neto.



3. INTRODUÇÃO

Desde décadas passadas, a manutenção industrial em equipamentos vem sofrendo grandes mudanças devido a necessidade de otimização do tempo e custo de manutenção. A manutenção corretiva antigamente era bastante aplicada, esta consistia no reparo do equipamento que apresentasse falha, ou seja, somente após o equipamento falhar era que ocorria a intervenção da equipe de manutenção. Este tipo de manutenção provocava elevados custos para a empresa (PALLEROSI, 2006).

A evolução da manutenção industrial influenciou na criação de alguns tipos de manutenção e o conceito de confiabilidade. Assim o principal foco das empresas atualmente é possuir equipamentos com a máxima disponibilidade e confiabilidade (SILVA, 2007).

A manutenção industrial se divide basicamente em três tipos:

- Manutenção Corretiva;
- Manutenção Preventiva;
- Manutenção Preditiva.

Visando a redução de custo e a otimização do tempo de manutenção adotar a manutenção preditiva é estratégia da gestão de ativos. O conceito de manutenção preditiva trata-se de um processo que auxilia na estimativa do tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos sendo intrínseco o aumento da confiabilidade e integração do processo produtivo, obtendo assim, condições para que este tempo de vida seja prolongado e bem aproveitado (SILVA, 2007).

Deseja-se que um equipamento possua um elevado tempo de vida útil apresentando o mínimo de falhas possíveis, nesta visão deve-se aplicar a análise de confiabilidade, ou seja, uma avaliação probabilística do risco/falha de um sistema ou produto que caracteriza o aspecto fundamental desta análise. Assim a confiabilidade pode ser definida como a confiança que podemos ter em um produto, equipamento ou projeto nos quais não apresente falha (SANTOS, 2011).

Este relatório apresenta a descrição das atividades desenvolvidas e visitas técnicas nos ativos desta unidade de operação da Petrobras (UO-RNCE) e descreve as visitas a campo que foram realizadas durante o período de estágio. Apresentam informações da empresa, organograma da unidade de operação (UO-RNCE), a devida fundamentação teórica utilizada para realização do estágio, as atividades desenvolvidas, e, por fim, as conclusões, referências utilizadas no relatório e anexos.



Relatório de Estágio – Oto Lima de Albuquerque Neto



Em geral, descreve as atividades desenvolvidas na Empresa Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A., até a data de 05 de outubro de 2014, realizados durante o período contratual de estágio de 02 de setembro a 02 de janeiro de 2015, com carga horária de 30 horas semanais, cumprindo os requisitos da atividade de Estágio Curricular.



4. A EMPRESA

A Petróleo Brasileiro S.A. ou simplesmente Petrobras é uma empresa de capital aberto (sociedade anônima), cujo acionista majoritário é o Governo do Brasil (União). É, portanto, uma empresa estatal de economia mista. Instituída em 3 de outubro de 1953 por Getúlio Vargas e sediada no Rio de Janeiro, opera hoje em 27 países, no segmento de energia, prioritariamente nas áreas de exploração, produção, refino, comercialização e transporte de petróleo e seus derivados (Portal Petrobras, site interno).

Ficou famosa mundialmente por ter efetuado em outubro de 2010 a maior capitalização em capital aberto de toda história da humanidade: US\$ 72,8 bilhões (R\$ 127,4 bilhões),¹¹ praticamente o dobro do recorde até então, a dos correios do Japão (Nippon Telégrafos e Telefonía), com US\$ 36,8 bilhões capitalizados, em 1987 (Site Oficial da Petrobras, site externo).

A empresa experimentou um grande salto tecnológico ao longo destas décadas, que representou a exploração em águas profundas e têm descoberto atualmente imensas reservas de óleo e gás na camada pré-sal, com início de sua exploração, passando pela conquista da autossuficiência e, impulsionando assim, o crescimento do país durante estas décadas (Site Oficial da Petrobras, site externo).

A Petrobras atua nos seguintes setores: exploração e produção E&P, refino, comercialização e transporte de óleo e gás natural, petroquímica, distribuição de derivados, energia elétrica, biocombustíveis e outras fontes renováveis de energia (Portal Petrobras, site interno).

Várias dessas atividades são desenvolvidas pelas cerca de 300 subsidiárias, coligadas e controladas, que compõem o Sistema Petrobras, sendo a Petrobras – Petróleo Brasileiro S.A, a controladora. Esse grupo de empresas está distribuído por diferentes regiões do Brasil e localidades no exterior. A companhia também tem participação em negócios com diversas outras empresas, dentro e fora do país (Site Oficial da Petrobras, site externo).

Até chegar a alcançar o status de grande empresa que é hoje, a companhia foi marcada por uma trajetória de superação de desafios que a conduziu a avanços tecnológicos significativos, tais como a conquista da liderança em exploração e produção de petróleo em águas profundas e a descoberta de óleo e gás na camada pré-sal, sendo, atualmente, a maior companhia da América Latina (Site Oficial da Petrobras, site externo).



4.1. ÁREAS DE ATUAÇÃO

Como empresa de energia, a Petrobras atua em várias áreas desse setor, desde a exploração de gás e petróleo, refino, abastecimento até a distribuição. Podemos dividir as atividades da Companhia em:

Exploração e Produção - É o órgão da Petrobras que atua em pesquisa, localização, identificação, desenvolvimento, produção e incorporação de reservas de óleo e gás natural dentro do território nacional.

Seu principal objetivo é descobrir acumulações de petróleo e gás natural, desenvolver reservas e produzi-las, disponibilizando o óleo cru e gás natural devidamente tratado e especificado para as áreas de Abastecimento e Gás & Energia processarem e/ou comercializarem seus derivados.

Abastecimento - É responsável, de acordo com a Petroleum Intelligence Weekly, pela Petrobras ser considerada a nona maior companhia no setor downstream - refino, transporte e comercialização. A Companhia abastece quase toda a demanda do mercado brasileiro por derivados de petróleo, e busca sempre aumentar sua capacidade de produção.

O pleno funcionamento dessa Área de Negócios se dá pela atuação das Gerências Executivas Corporativa, Logística, Marketing e Comercialização, Refino, Petroquímica e Programas de Investimento. A ação integrada dessas gerências garante a consolidação dos objetivos da Petrobras e o fornecimento de produtos da mais alta qualidade, que reúnem praticidade, tecnologia e respeito ao meio ambiente.

Gás e Energia - É a área responsável pela comercialização do gás natural nacional e importado, além da implantação de projetos, em parceria com o setor privado, que irão garantir a oferta deste combustível e de energia em todo o país.

Além disso, a área de negócio também é responsável pelos projetos que tratam do gás natural na forma líquida: o gás natural liquefeito (GNL). São ativos do G&E os dois Terminais Flexíveis de GNL, em Pecém (CE) e na Baía de Guanabara (RJ). Também estão sob a responsabilidade da área a construção de um terceiro terminal na Bahia.

Internacional - A Petrobras desenvolve diversas atividades no exterior, em países do continente Europeu, Africano, Asiático e praticamente em toda a América Latina, mantendo uma



consistente atividade internacional, desde a exploração até a compra e a venda de petróleo, além de outros atributos em várias áreas.

Fonte: Portal da Petrobras, Site Interno.

4.2. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL

A estrutura organizacional da Petrobras está descrita e definida no Plano Básico de Organização (PBO), documento aprovado pelo Conselho de Administração. O detalhamento da estrutura organizacional está armazenado no banco de dados chamado Sistema de Gerenciamento da Estrutura Organizacional da Petrobras (SGEOP), que define os processos realizados, as denominações e atribuições das funções gerenciais, assim como seus vínculos.

O Plano Básico de Organização tem por objetivo definir as diretrizes de organização, governança e gestão da Petrobras, os modelos de organização e de governança corporativa, bem como a estrutura geral da companhia, as atribuições de suas unidades, a competência de seus titulares e as áreas de contato dos membros da Diretoria Executiva.

Ajuste organizacional consiste na criação, extinção, fusão, desmembramento ou transformação de unidades organizacionais e funções gerenciais integrantes da estrutura geral, básica ou complementar da companhia. Entende-se por transformação organizacional as alterações de denominação, vínculo administrativo, de porte ou de atribuição de unidade organizacional ou função gerencial.

O organograma de estrutura organizacional geral da Empresa está apresentado na Figura 1, abaixo.

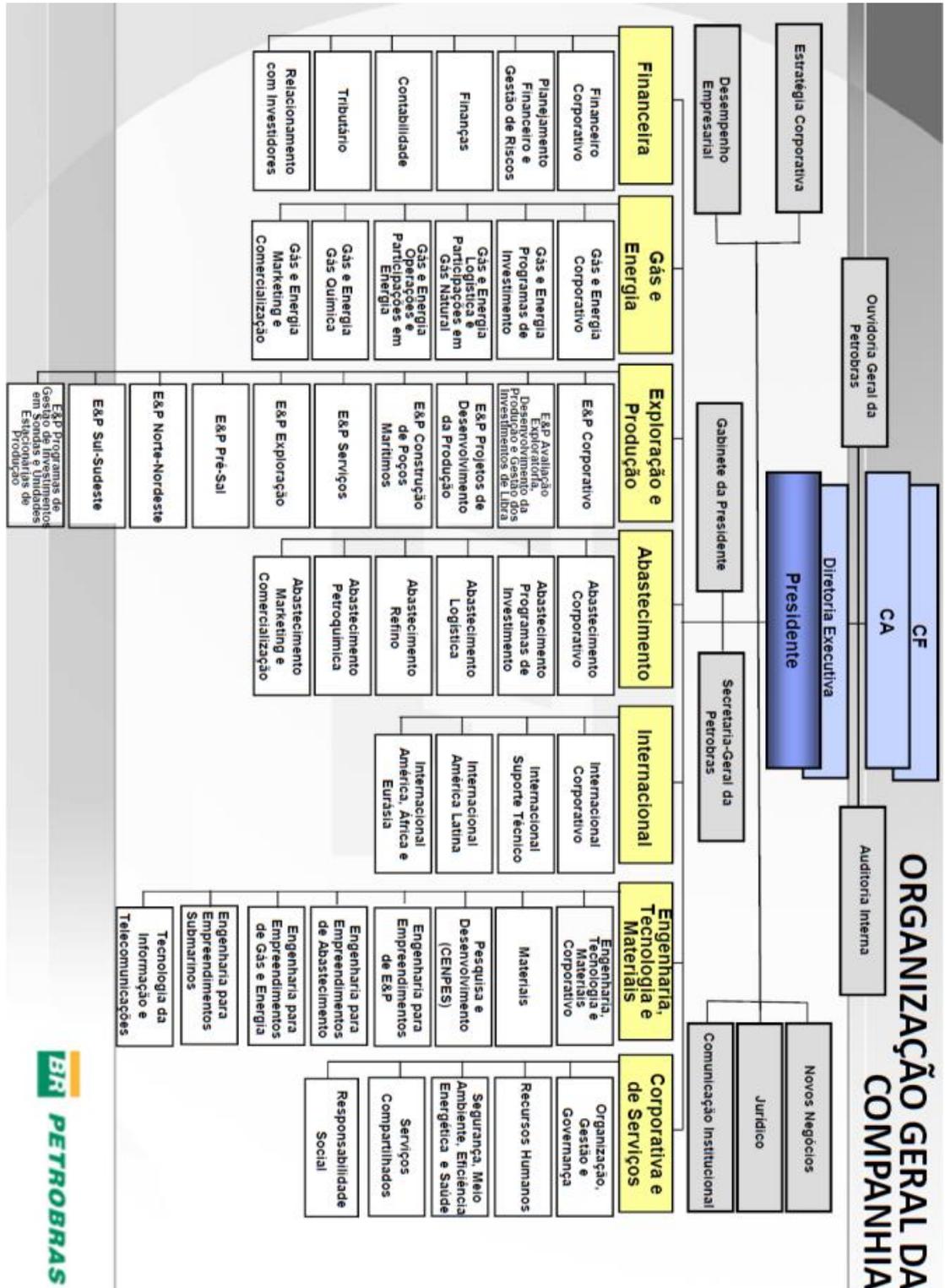


Figura 1 - Organograma da Estrutura Organizacional da Petrobras.

*CF – Conselho Fiscal, CA – Conselho de Administração.



No contexto do organograma, *Exploração e Produção (E&P)* é um dos seis segmentos de organização da Petrobras, que se divide em nove setores, sendo um deles, o E&P – NNE, Exploração e Produção na região Norte-Nordeste. O E&P – NNE é responsável por gerir, controlar e avaliar a produção das unidades de operação dessas regiões, entre elas, a Unidade de Operações de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará (UO-RNCE).

Fonte: Portal da Petrobras, Site Interno.

4.3. A UO-RNCE – UNIDADE DE OPERAÇÕES DO RN E CE

A Unidade de Operações de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará (UO-RNCE) está ligada a Gerência Executiva de E&P Norte e Nordeste. A UO-RNCE tem sede em Natal, e na sua estrutura possui uma Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos instalada no Pólo Industrial Petrobras de Guamaré, além de três Ativos de Produção - Mossoró, Alto do Rodrigues e Mar.

A produção de petróleo e gás ocorre, em 71 campos produção, sendo 61 terrestres e dez marítimos, na Bacia Potiguar. No Ceará são dois campos terrestres e quatro marítimos.

É no Rio Grande do Norte, na região do Vale do Açu, que está em operação o Projeto de Injeção Contínua de Vapor (Vaporduto), sendo considerado o maior do mundo, com uma extensão de aproximadamente 30 km, e o primeiro a operar com vapor superaquecido.

Na Figura 2 é mostrado um organograma da Unidade de Operações do Rio Grande do Norte e Ceará (UO-RNCE).

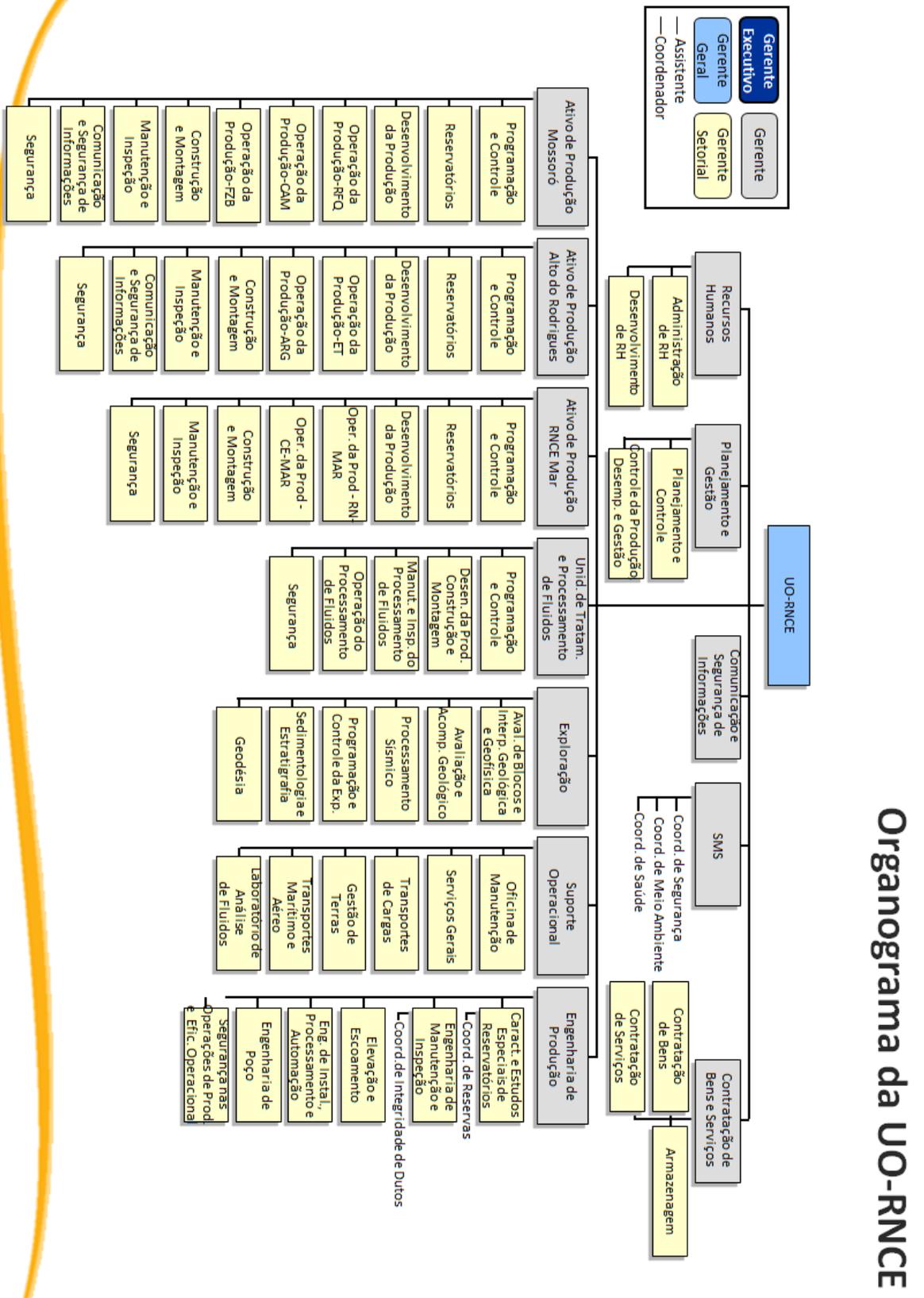


Figura 2 - Organograma Organizacional da Unidade de Operação de Exploração e Produção do Rio Grande do Norte e Ceará (UO-RNCE).



Nomenclaturas e siglas de reconhecimento na UO-RNCE:

- **ATP-ARG** Ativo de Produção de Alto do Rodrigues
- **UTPF** Unidade de Tratamento de Fluidos
- **UPGN** Unidade de Processamento de Gás Natural
- **EMI** Engenharia de Manutenção e Inspeção
- **ATP-M** Ativo de Produção RNCE MAR
- **ATP-MO** Ativo de Produção de Mossoró
- **SOP** Suporte Operacional
- **ENGP** Engenharia de Produção
- **RH** Recursos Humanos

Fonte: Portal da Petrobras, Site Interno.

4.4. A EMI – ENGENHARIA DE MANUTENÇÃO E INSPEÇÃO

O EMI é responsável por coordenar o Comitê Funcional de Manutenção e Inspeção da UO-RNCE, estabelecendo políticas e diretrizes técnicas conforme as orientações locais e corporativas, além de promover continuamente a capacitação nas melhores técnicas de manutenção e inspeção de equipamentos e instalações, consolidar e acompanhar os indicadores relativos à manutenção e inspeção da Unidade, monitorar a corrosão dos dutos e gerenciar suas informações, coordenar a realização de inspeções especiais de dutos e dos planos para manutenção da certificação do SPIE, representando a Unidade junto ao órgão certificador.

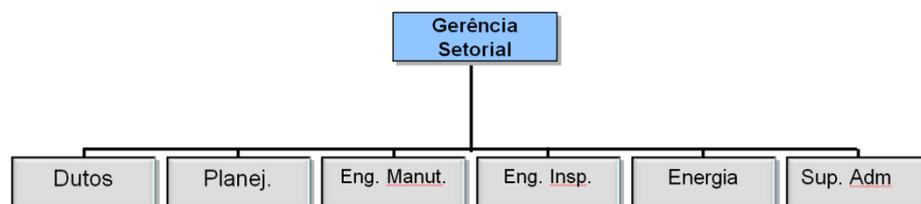


Figura 3 - Organograma da EMI.

Algumas das suas atribuições são:



- Estabelecer políticas e diretrizes técnicas de manutenção e de inspeção;
- Promover continuamente a capacitação nas melhores técnicas de manutenção e inspeção de equipamentos e instalações e no transporte duto-viário;
- Prover suporte técnico de engenharia de manutenção, inspeção de equipamentos e dutos;
- Consolidar e acompanhar os indicadores relativos à manutenção, à inspeção e à Integridade da malha de dutos;
 - Monitorar e controlar a corrosão dos dutos e gerenciar suas informações;
 - Manter o cadastro dos dutos;
 - Avaliar a integridade estrutural dos dutos;
 - Representar o SPIE – Serviço Próprio de Inspeção de Equipamentos, junto ao Órgão Certificador;
- Executar o gerenciamento energético;
- Planejar paradas de grandes equipamentos e instalações;
- Gerenciar o processo de inspeção de fabricação;
- Auditar as atividades de manutenção, inspeção e transferência de fluidos.

A EMI é subdividida nas seguintes áreas: Engenharia de Manutenção, Dutos, Inspeção de Fabricação e Gerenciamento de Energético. Abaixo, estão mostradas as funções de cada área.

Engenharia de Manutenção - Viabilizar a realização de melhorias técnicas em máquinas e instalações industriais do sistema de operação e produção. Promover continuamente a manutenções e inspeção de equipamentos e instalações bem como capacitação e aperfeiçoamento na elaboração de planos de manutenção para a mesma.

Dutos - Viabilizar as técnicas de manutenção e inspeção nas instalações industriais e no sistema dutoviário, através do suporte técnico de engenharia

Inspeção de Fabricação - Avaliação e inspeção de produtos (matéria prima) e grandes máquinas adquirido pela empresa, bem como inspeções periódicas em determinadas áreas.

Gerenciamento de Energético - Controle do consumo de energético de cada ativo, grandes máquinas e unidades produtoras, devido a empresa ter uma parte da sua energia auto produtiva.



Relatório de Estágio – Oto Lima de Albuquerque Neto



Fonte: Site Interno da Petrobras.

Plano de Estágio

De acordo com o plano de estágio, foram realizadas atividades relacionadas com a manutenção preditiva e outras atividades extras. O plano de atividades do estágio segue abaixo:



Plano de Atividades														
CRONOGRAMA - Setembro/2013 à Outubro/2014														
Estagiário:	Oto Lima de Albuquerque Neto													
DESCRIÇÃO	2013				2014									
	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out
Leitura das Referências Bibliográficas baseadas em Análise de Óleo.	x													
Estudar e entender os Laudos de análise de óleo pela empresa contrata.	x													
Alimentação das planilhas de cada equipamento referentes a análise de óleo.	x	x	x	x	x									
Padronização dos contratos de serviços da disciplina de Mecânica da UO-RNCE.						x	x							
Auxílio na proposta de implantação do comitê técnico de manutenção preditiva.									x	x	x	x		
Estudo comparativo das normas e especificação do conjunto porca-parafuso-arruela.								x	x					
Acompanhamento de uma parada programada em uma das estações da UO-RNCE.				x										
Acompanhamento da coleta de óleo lubrificante em campo.								x		x				
Análise RAM do SIA-AM: Alimentar a planilha de dados de vida de equipamentos.							x	x	x	x				
Criação do Passo-a-Passo para alimentação da planilha de dados de vida de equipamentos.										x				
Auxílio na organização das equipes que farão o treinamento para analista de máquinas.									x					
Ministrar treinamento baseado na Manutenção Preditiva para alunos do CT-Gás.												x		
Elaboração da apresentação para a empresa contratada de Análise de Óleo para fins de discussões internas.												x		
Consolidação dos indicadores de manutenção de maneira padronizada para todos os ativos de produção da UO-RNCE.												x		
Estudo sobre a análise de graxa lubrificante.												x	x	
Analisar e Padronizar os fluxogramas da manutenção preditiva nos ativos de produção.												x	x	
Criação de Padrão para auditoria de campo.										x				
Cálculo do prejuízo financeiro devido à degradação de óleo em decorrência do mau condicionamento dos tambores e afins.													x	x
Projeto de implantação da Metodologia A3.														x
Levantamento da situação atual de cada ativo em relação ao quantitativo de pessoas que trabalham diretamente ou indiretamente com a manutenção preditiva e o quantitativo de equipamentos.													x	

Tabela 1 – Plano de atividades do estágio.



5. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1. TRIBOLOGIA

Tribologia é a ciência que estuda os fenômenos relacionados ao atrito, ao desgaste e à lubrificação. O atrito ocorre quando duas superfícies estão em contato, no qual existirá uma resistência ao movimento relativo entre as partes. Para que este movimento relativo aconteça é preciso exercer sobre uma destas partes uma força superior à força de atrito. A força de atrito é o somatório da força de adesão, devido à atração molecular, e da força mecânica necessária para vencer as interferências entre as rugosidades superficiais das partes em contato (HUTCHINGS, 1994).

De acordo com a Lei de Coulomb, a força de atrito (F_A) entre duas superfícies é equivalente ao produto do coeficiente de atrito (μ) pela força normal atuante (F_N).

$$F_A = \mu F_N \quad (1)$$

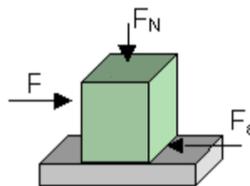


Figura 4 - Força de atrito.

Pela figura 5, se a força F for maior que a força F_A , o corpo se moverá. Na situação oposta, ou seja, caso a força F seja menor do que a força F_A , então o corpo permanece parado (CURSO de Desgaste e Tribologia, TESTMAT).

Quando existe o contato “seco” entre duas superfícies, as moléculas próximas à superfície de um metal reagem com as moléculas próximas à superfície do outro metal, compondo assim a força de adesão entre as superfícies, devido à atração molecular. A figura x mostra o contato “seco” entre duas superfícies. A área de contato será influenciada pelas características da peça, como o



perfil, a rugosidade, as ondulações e os erros de forma (HUTCHINGS, 1994).

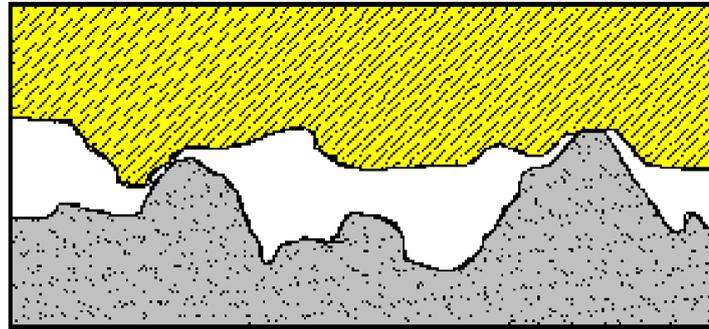


Figura 5 - Contato seco entre duas superfícies.

Para materiais iguais, devido à formação atômica similar, a adesão será ainda mais forte. Por isso é muito comum utilizar-se materiais diferentes em materiais sujeitos ao atrito dinâmico, como por exemplo, utilizando-se mancal de bronze para eixos de aço a adesão será minimizada (CURSO de Desgaste e Tribologia, TESTMAT).

Em materiais iguais, de baixa rugosidade superficial, ao retirar-se os gases e a umidade entre eles, a adesão será muito grande (contato íntimo), como exemplo, os blocos padrões de Metrologia que parecem imantados ao serem colocados em contato íntimo. Logo, para materiais iguais, devido à formação atômica similar, a adesão será ainda mais forte. Por isso é muito comum utilizar-se materiais diferentes em materiais sujeitos ao atrito dinâmico, como por exemplo, utilizando-se mancal de bronze para eixos de aço a adesão será minimizada (STACHOWIAK, 1996).

Em materiais iguais, de baixa rugosidade superficial, ao retirar-se os gases e a umidade entre eles, a adesão será muito grande (contato íntimo), como exemplo, os blocos padrões de metrologia que parecem imantados ao serem colocados em contato íntimo (STACHOWIAK, 1996).

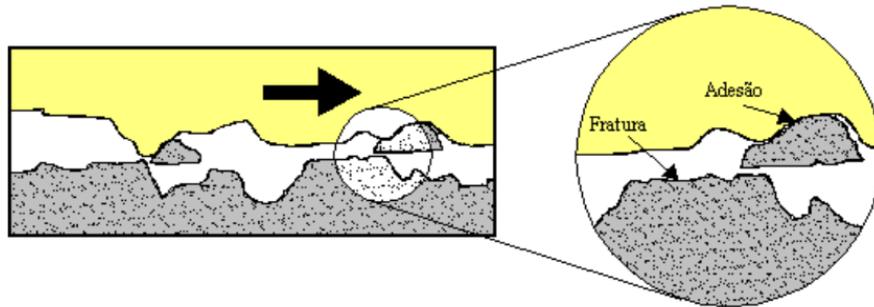


Figura 6 - Fenômeno conhecido como micro-solda. Fonte: CURSO de Desgaste e Tribologia, TESTMAT.

5.1.1. CONDIÇÕES DE LUBRIFICAÇÃO

O movimento relativo entre superfícies em contato podem acontecer sob as seguintes condições de lubrificação:

1. Vácuo;
2. Seco (atmosfera);
3. Lubrificação limítrofe;
4. Lubrificação misturada (elasto-hidrodinâmica);
5. Lubrificação hidrodinâmica;

Sendo que nos dois primeiros casos o movimento acontece sem ação de lubrificação.

As condições de lubrificação variam a medida que variam as cargas e, as velocidades empregadas, bem como a viscosidade do lubrificante. Variando as condições de lubrificação o coeficiente de atrito também variará. O diagrama de Stribbeck (figura 8) relaciona o coeficiente de atrito com as condições de lubrificação (CARRETEIRO, 2009).

Onde:

Z – velocidade relativa

N° – viscosidade do lubrificante

P – carga sobre a unidade de área

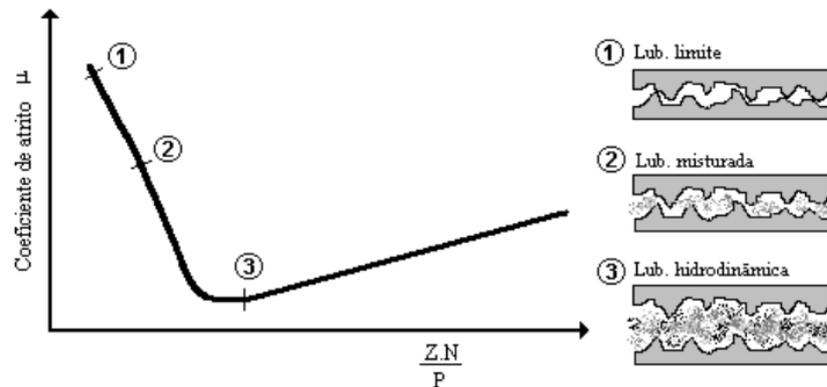


Figura 7 - Diagrama de Stribbeck - Relaciona o coeficiente de atrito com as condições de lubrificação (CARRETEIRO, 2009).

5.2. MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

As indústrias de grande porte buscam o desenvolvimento próprio, ou seja, ter máquinas modernas, planos de expansão, mercado cativo, tecnologia de ponta, produtos de qualidade, preços competitivos, ótimos funcionários e programas de qualidade se ela não contar com um eficiente programa de manutenção mecânica. A manutenção mecânica é a alma dos setores produtivos empresariais. De fato, sem a manutenção mecânica das máquinas e equipamentos não seria possível (ARATO, 2009):

- Cumprir os cronogramas de fabricação
- Obter produtos de qualidade
- Diminuir os custos de produção
- Aumentar a competitividade
- Manter a fidelidade dos clientes
- Conquistar novos clientes
- Reduzir as perdas de matéria-prima e energia
- Competir em igualdade de condições no mercado interno e externo

Diante deste contexto, os principais tipos de manutenção industrial são os seguintes:

Manutenção corretiva: É a forma mais óbvia e mais primária de manutenção; pode sintetizar-se pelo ciclo "quebra-repara", ou seja, o reparo dos equipamentos após a avaria. Constitui



a forma mais cara de manutenção quando encarada do ponto de vista total do sistema. Pura e simples conduz a (ARATO, 2009):

- Baixa utilização anual dos equipamentos e máquinas e, portanto, das cadeias produtivas;
- Diminuição da vida útil dos equipamentos, máquinas e instalações;
- Paradas para manutenção em momentos aleatórios e muitas vezes, inoportunos por corresponderem a épocas de ponta de produção, a períodos de cronograma apertado, ou até as épocas de crise geral.

Manutenção Preventiva: Como o próprio nome sugere, consiste em um trabalho de prevenção de defeitos que possam originar a parada ou um baixo rendimento dos equipamentos em operação. Esta prevenção é feita baseada em estudos estatísticos, estado do equipamento, local de instalação, condições elétricas que o suprem, dados fornecidos pelo fabricante (condições ótimas de funcionamento, pontos e periodicidade de lubrificação, etc.), entre outros. Dentre as vantagens, podemos citar (LAFRAIA, 2001):

- Diminuição do número total de intervenções corretivas, aligeirando o custo da corretiva;
- Grande diminuição do número de intervenções corretivas ocorrendo em momentos inoportunos como, por exemplo: em períodos noturnos, em fins de semana, durante períodos críticos de produção e distribuição, etc;
- Aumento considerável da taxa de utilização anual dos sistemas de produção e de distribuição.

Manutenção Preditiva: Manutenção preditiva é a atuação realizada com base em modificação de parâmetro de condição ou desempenho, cujo acompanhamento obedece a uma sistemática. As condições básicas necessárias para realização desta manutenção são as seguintes (ARATO, 2009):

- O equipamento, o sistema ou a instalação devem permitir algum tipo de monitoramento/medição;
- O equipamento, o sistema ou a instalação devem merecer esse tipo de ação, em função dos custos envolvidos;



- As falhas devem ser oriundas de causas que possam ser monitoradas e ter sua progressão acompanhada;
- Deve ser estabelecido um programa de acompanhamento, análise e diagnóstico, sistematizado;

É fundamental que a mão-de-obra da manutenção responsável pela análise e diagnóstico seja bem treinada. Não basta medir; é preciso analisar os resultados e formular diagnósticos (LAFRAIA, 2001).

Manutenção Detectiva: É a atuação efetuada em sistemas de proteção buscando detectar FALHAS OCULTAS ou não-perceptíveis ao pessoal de operação e manutenção. A identificação de falhas ocultas é primordial para garantir a confiabilidade. Em sistemas complexos, essas ações só devem ser levadas a efeito por pessoal da área de manutenção, com treinamento e habilitação para tal, assessorado pelo pessoal de operação (LAFRAIA, 2001).

5.3. ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE

A manutenção preditiva aplicada à análise de óleo lubrificante tem como objetivo detectar qualitativa e quantitativa os elementos com desgaste excessivo no equipamento, permitindo a identificação de uma falha no seu início. A análise das condições do óleo lubrificante é feita através do monitoramento das condições químicas e físicas do lubrificante, observando a presença de contaminação por moléculas de água, amônia e/ou presença de partículas ferrosas na amostra (CARRETEIRO, 2009).

A análise dos contaminantes de origem externa e de desgaste há muito vem auxiliando o setor de manutenção de várias empresas e indústrias, pois o controle da incidência de partículas presentes no óleo é de grande importância na manutenção preventiva e proativa, permitindo tecer conclusões acerca do sistema lubrificado (CARRETEIRO, 2009).

Vantagens da Análise de Óleo Lubrificante:

- Menor custo de manutenção;
- Economia de lubrificantes;



- Vida útil dos componentes ampliada;
- Redução dos custos de material de reposição;
- Maior disponibilidade dos equipamentos;
- Controle e análise do desgaste de equipamentos;

5.3.1. PRINCIPAIS PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

Como explicitado anteriormente, a manutenção preditiva aplicada à análise de óleo lubrificante utiliza o monitoramento como principal ferramenta, assim os parâmetros monitorados e suas definições serão apresentado nesta seção.

5.3.1.1. ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

A análise físico-química tem como objetivo principal a identificação das condições do lubrificante. Estas análises podem ser efetuadas de forma pontual, ou seja, medidas isoladas; ou análise periódica, ao longo do tempo, para o acompanhamento das condições do lubrificante (Projeto Lubrificantes de Alto Desempenho-GET, 2007).

5.3.1.1.1. VISCOSIDADE CINEMÁTICA

A viscosidade é a medida de resistência ao escoamento de um fluido, é a principal propriedade dos óleos lubrificantes. A medida é feita a 40oC ou 100oC. As principais normas utilizadas para a definição dos ensaios de viscosidade são: ASTM D445 e NBR 10441. A unidade de medida mais utilizada é o cSt, cm²/seg. A viscosidade diminui devido à contaminação por solvente ou óleos de menor viscosidade. A viscosidade aumenta devido à oxidação, presença de



insolúveis, água e contaminação por óleos de maior viscosidade (SUPREME LUBRIFICANTES, 2010).

5.3.1.1.2. ÍNDICE DE VISCOSIDADE

O Índice de Viscosidade é um número adimensional que mede a intensidade de variação da viscosidade em relação à temperatura. Quanto maior o Índice de Viscosidade, menor é a variação da viscosidade em função da temperatura. Os ensaios para determinação deste valor são previstos pelas normas ASTM D2270 e NBR 14358 (SUPREME LUBRIFICANTES, 2010).

5.3.1.1.3. PONTO DE FULGOR

O Ponto de Fulgor representa a temperatura que o óleo deve atingir para que uma chama passada sobre a superfície inflame os vapores. O ensaio é definido pela ASTM D92 e o valor é medido em Graus Centígrados. O Ponto de Inflamação representa a temperatura que o óleo deve atingir para que uma chama passada sobre a superfície inflame os vapores formados e sustente a combustão. O ensaio é definido pela ASTM D92 e o valor são medidos em Graus Centígrados (SUPREME LUBRIFICANTES, 2010).

5.3.1.1.4. NÚMERO TOTAL DE ACIDEZ (TAN) E NÚMERO TOTAL DE BASICIDADE (TBN)

O TAN representa o número de acidez total, este valor indica a quantidade total de substâncias ácidas contida no óleo. As substâncias ácidas geradas pela oxidação do óleo podem atacar metais e produzir compostos insolúveis. As normas que definem este ensaio são ASTM D664 e ASTM D974, a unidade é mgKOH/g (SUPREME LUBRIFICANTES, 2010).

5.3.1.2. ANÁLISE DE CONTAMINAÇÃO



A contaminação do lubrificante ocorre devido à presença de substâncias externas que infiltram no sistema, pelo desgaste do equipamento ou por reações que ocorrem no próprio lubrificante (Projeto Lubrificantes de Alto Desempenho-GET, 2007).

5.3.1.2.1. TEOR DE ÁGUA

Os ensaios de Destilação e Karl Fisher são utilizados para identificar a presença de água. A água provoca a formação de emulsões, falha da lubrificação em condições críticas, precipitação dos aditivos, formação de borra e aumento da corrosão. As normas ASTM D1744 e a ASTM D95 definem os procedimentos para este ensaio, sendo o valor definido pela % de presença de óleo na amostra (CARRETEIRO, 2009).

5.3.1.2.2. INSOLÚVEIS EM PENTANO

Este ensaio determina a saturação do lubrificante por presença de insolúveis em pentano. Estes contaminantes são constituídos por partículas metálicas, óxidos resultantes da corrosão, material carbonizado proveniente da degradação do lubrificante e material resinoso oxidado (lacas, vernizes) (SUPREME LUBRIFICANTES, 2010).

5.3.1.2.3. ESPECTROMETRIA POR EMISSÃO ATÔMICA

A análise Espectrométrica de metais detecta até 24 metais, medindo menos de 8µm de tamanho, que podem estar presentes no óleo usado devido ao desgaste, contaminação ou aditivos. Os metais de desgaste incluem ferro, cromo, níquel, alumínio, cobre, chumbo, estanho, cádmio,



prata, titânio e vanádio. Metais contaminantes incluem silício, sódio, boro e potássio. Os metais aditivos incluem magnésio, boro, cálcio, bário, fósforo, molibdênio e zinco (SUPREME LUBRIFICANTES, 2010).

5.4. ARMAZENAMENTO E MANUSEIO DOS TAMBORES DE ÓLEO LUBRIFICANTE

A necessidade da lubrificação em componentes mecânicos atualmente se identifica como um fato primordial para garantir a não redução da vida útil dos sistemas mecânicos. A lubrificação, além de auxiliar na redução de desgaste dos componentes mecânicos também é utilizada como parâmetro de análise da manutenção preditiva (Apostila de Lubrificantes - BR Distribuidora, 2009).

Manusear e armazenar os tambores de óleo lubrificantes de forma incorreta pode provocar alterações físico-químicas nos óleos comprometendo a sua eficiência e provocando uma lubrificação deficiente nos componentes mecânicos (Apostila de Lubrificantes - BR Distribuidora, 2009).

5.4.1. QUANTO AO MANUSEIO DOS TAMBORES

Exemplos de manuseio incorreto:

- Descarregar os tambores jogando-os em pneus.



Figura 8 - Descarregamento incorreto dos tambores.



➤ Transportar os tambores rolando-os em terreno irregular provocando furos, amassamentos, desaparecimento da identificação, abertura da costura, provocando vazamentos e riscos de incêndios.

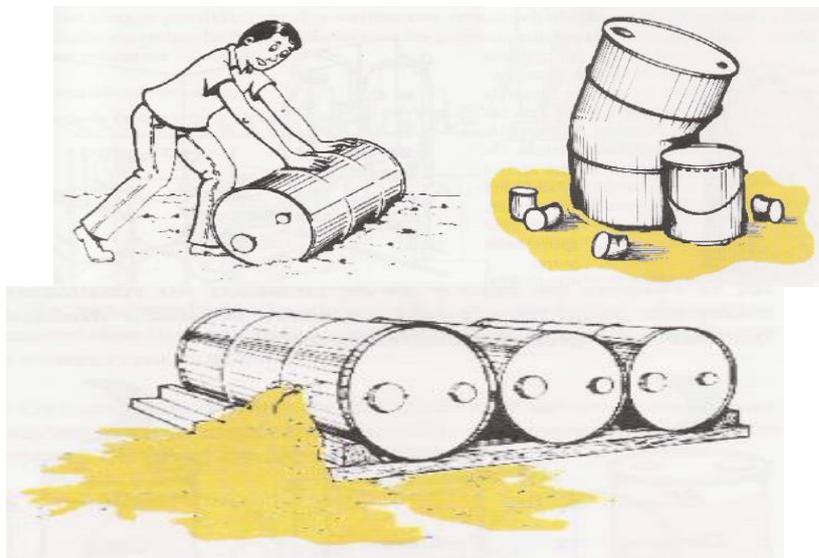


Figura 9 - Transporte incorreto dos tambores. *Fonte: Apostila de Lubrificantes - BR Distribuidora, 2009.*

5.4.2. POSIÇÃO CORRETA DOS TAMBORES NO ARMAZENAMENTO

Em relação à posição correta dos tambores, estes devem ser colocados de tal maneira que os bujões fiquem numa linha aproximadamente horizontal e abaixo no nível do óleo lubrificante, observar a figura 11 (Apostila de Lubrificantes - BR Distribuidora, 2009).

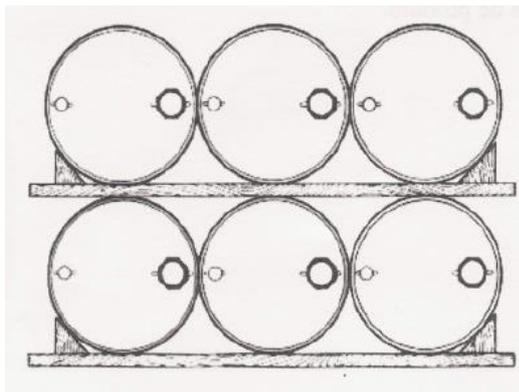


Figura 10 - Posição correta dos tambores.

5.4.3. EXPOSIÇÃO DOS TAMBORES EM LOCAIS ABERTOS

No caso da quantidade de tambores seja maior do que a capacidade do armazém, estes tambores residuais podem ser colocados em um abrigo (figura 12) ou cobertos por um encerado e colocados em pranchas de madeira (figura 13).

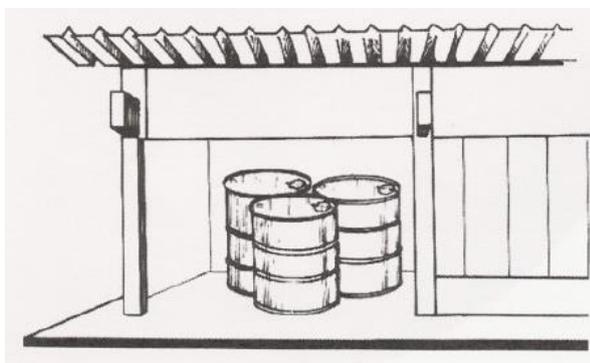


Figura 11 - Tambores protegidos por um abrigo.

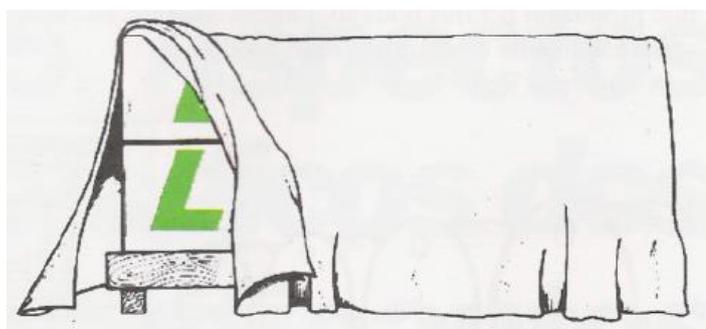


Figura 12 - Tambores cobertos por um encerado sobre prancha de madeira.



Fonte: Apostila de Lubrificantes - BR Distribuidora, 2009.

5.4.4. CONTAMINAÇÃO DOS TAMBORES COM ÁGUA

Com a exposição dos tambores no sol durante o dia e o clima com baixa temperatura durante a noite provoca a fadiga térmica do óleo lubrificante no interior do tambor. Essa fadiga térmica faz o tambor expandir e comprimir, absorvendo a umidade do ar no exterior e posteriormente esta umidade é condensada. A água gerada pela condensação contamina o óleo lubrificante gerando borras e alterando as propriedades físico-químicas do óleo (Apostila de Lubrificantes - BR Distribuidora, 2009).

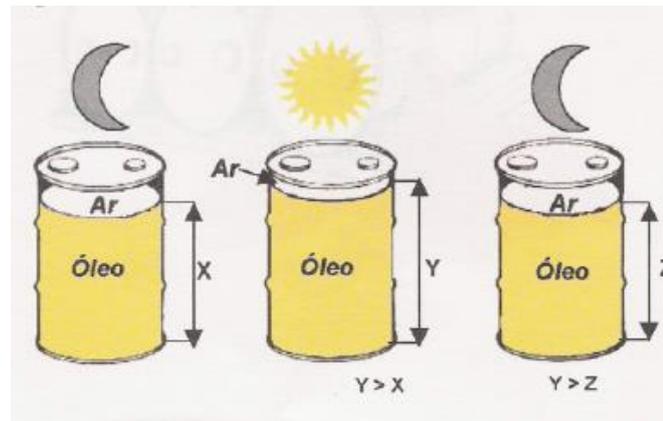


Figura 13 - Fadiga térmica do óleo lubrificante no tambor. Fonte: Apostila de Lubrificantes - BR Distribuidora, 2009.

6. ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

As atividades realizadas estão descritas e detalhadas nos tópicos abaixo.

6.1. AUXÍLIO NA ORGANIZAÇÃO ESTRUTURAL DOS PADRÕES DE CONTRATOS DA DISCIPLINA DA MECÂNICA DA UO-RNCE.



Uma das ferramentas de grande utilidade para as indústrias são os contratos de manutenção de equipamentos de produção de óleo e gás. Estes que firmam um vínculo jurídico entre ambas as partes, baseando-se pela vontade, responsabilidade do ato firmado de maneira que é possível criar, modificar ou extinguir direitos (wikipedia, “contrato”).

6.1.1. OBJETIVO GERAL

Auxiliar na padronização dos contratos de manutenção de equipamentos de produção de óleo e gás de serviços e produtos da UO-RNCE.

6.1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Compreender e auxiliar na organização (digitação e estruturação dos documentos) e dos arquivos anexos dos contratos de manutenção de equipamentos de produção de óleo e gás dos ativos da Petrobras UO-RNCE.

6.1.3. MÉTODO

A metodologia utilizada foram diversas reuniões feitas entre os representantes de cada ativo e da oficina mecânica, buscando o entendimento sobre a melhor forma de contratação de serviços de manutenção de equipamentos, além da total dedicação para finalização da organização dos contratos da disciplina da Mecânica baseando-se no padrão de contratos de outras disciplinas que já se encontrava pronta.

6.1.4. DESENVOLVIMENTO



- Reorganização do documento principal e os anexos que se referenciava a critérios de medição, tabela de preços, entre outros.
- Participação ativa das reuniões para discussões de melhorias sobre a estruturação dos textos.
- Dedicção total a padronização dos contratos.

6.1.5. CONCLUSÃO

Então, foi observada a importância da unificação de contratos de serviços e produtos de maneira que esta ação contribui diretamente para o desenvolvimento financeiro e geral da empresa. A não padronização dos contratos em uma indústria, pode provocar elevados custos devido as contratações não serem uniformes, ou seja, é possível contratar um mesmo serviço com valores diferentes.

6.2. AUXÍLIO NA ESPECIFICAÇÃO DO CONJUNTO PARAFUSO-PORCA-ARRUELA.

A importância de se obter especificações técnicas vem surgindo desde décadas passadas, de maneira que a normatização garante uma maior confiabilidade das ações pela equipe de manutenção. As especificações técnicas são documentos que por meio de dados técnicos especifica os valores mínimos requeridos, produtos, ou serviços, elementos, ou conjuntos específicos para a elaboração de uma norma.

A situação encontrada foi a necessidade de especificação dos parafusos de fixação da pista de giro de um guindaste de uma plataforma offshore, ver figura 15.



Figura 14 - Plataforma Offshore.

Este parafuso é de fabricação do fornecedor do guindaste, no qual o mesmo não se encontra mais no mercado. Devido esta situação, o conjunto de fixação precisa ser especificado para que seja encontrado um parafuso similar ao do antigo fabricante.

6.2.1. OBJETIVO GERAL

Criar uma especificação técnica para um conjunto de fixação de uma mesa de giro de um guindaste *offshore*.

6.2.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Realizar um levantamento das normas brasileiras e estrangeiras e compará-las para posterior análise e criação da especificação técnica para o devido equipamento.



6.2.3. MÉTODO

Foi verificado que não existia uma especificação técnica no banco de dados da Petrobras para a mesa de giro de um guindaste de uma plataforma *offshore*. A metodologia se baseou no acesso ao banco de dados das normas estrangeiras DIN e ASTM e nas normas brasileiras ABNT NBR e posterior análise das mesmas para verificar suas diferenças e igualdades de maneira que influenciou diretamente na especificação técnica do conjunto parafuso-porca-arruela.

6.2.4. DESENVOLVIMENTO

Alguns parafusos da mesa de giro de um guindaste de uma plataforma marítima da Petrobras apresentaram início de falhas, como trincas e deformação. Diante deste fato, foi realizada a busca por documentações técnicas internas com as informações da especificação do parafuso. Tendo em vista que não exista esta documentação, foi realizada a elaboração de uma nova especificação técnica voltada exclusivamente para esta situação utilizando normas estrangeiras como a ASTM e DIN. Foi feita também um estudo comparativo entre estas normas para se verificar qual seria a mais viável para se adotar na especificação.

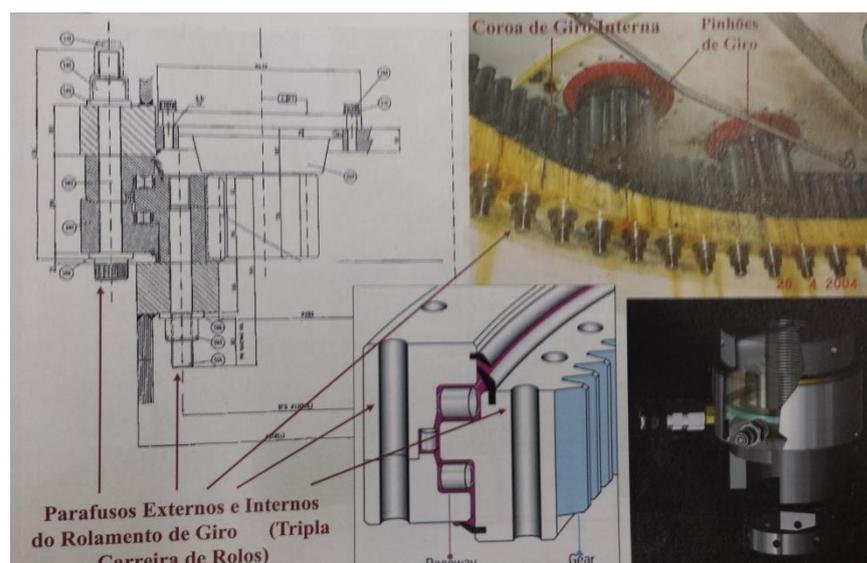


Figura 15 - Mesa de giro de um guindaste e seu desenho técnico. *Fonte: Imagem retirada da apostila de treinamento interno da Petrobras.*



A mesa de giro de um guindaste tem a função de rotacionar o guindaste em torno do seu próprio eixo. Possui um largo conjunto de fixação.

6.2.5. CONCLUSÃO

Após o presente trabalho, verificou-se a importância de se ter o conhecimento de normas estrangeiras e brasileiras, além de saber como funciona a documentação baseada numa especificação técnica de um componente específico. É de extrema importância que uma indústria possua as especificações técnicas dos seus equipamentos e demais componentes para evitar problemas no futuro.

6.3. PARTICIPAÇÃO DO PROJETO PILOTO DE MONITORAMENTO DA VIBRAÇÃO EM UM COMPRESSOR DE GUAMARÉ.

A manutenção preditiva surge como uma importante ferramenta para auxiliar as empresas que buscam reduzir custos por paradas não-programadas. Técnicas da manutenção preditiva podem ser por análise de óleo, análise de vibração, termografia, ensaios não destrutivos, entre outros. A análise de vibração surge como uma das principais técnicas de manutenção preditivas empregadas nas plantas industriais.

Visando a redução de custo com paradas de equipamentos por motivos de falha e a otimização do tempo de manutenção com enxugamento dos planos de preventiva, a decisão de adotar a manutenção preditiva é uma estratégia da gestão de ativos. O conceito de manutenção preditiva trata-se de um processo que auxilia na estimativa do tempo de vida útil dos componentes das máquinas e equipamentos sendo intrínseco o aumento da confiabilidade e integração do processo produtivo, obtendo assim, condições para que este tempo de vida seja prolongado e bem aproveitado.



Seguindo esta ideologia, este projeto nasceu da necessidade, identificada pela engenharia de campo da UTPF/RPCC, de pôr em funcionamento o sistema de monitoramento e proteção da empresa antiga instalados nos equipamentos da UO-RNCE. Foi solicitado à EMI suporte para solução do problema. Coincidentemente na mesma época ocorreu uma visita da engenharia da empresa antiga que apresentou uma proposta para reativação dos módulos inoperantes. Junto com uma atualização para versões mais modernas. O EMI junto com a equipe de engenharia de campo decidiram verificar a proposta da SKF devido a possibilidade dos problemas com a antiga tecnologia possa continuar ocorrendo.

Assim, no ano de 2013 e 2014 está sendo implantado um projeto piloto para monitoramento de parâmetros de operação, especificamente a análise de vibração, em um compressor centrífugo do polo de Guamaré (ver figura 16) através da empresa SKF.

A Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos localizada no polo de Guamaré é responsável pelas atividades de processamentos e tratamento de fluidos da UO-RNCE, prestando suporte ao processo produtivo da Unidade, visando à melhoria contínua na qualidade dos produtos e contribuindo para o desenvolvimento da região onde atua, de acordo com as políticas e diretrizes da Área de Negócio de E&P.



Figura 16 - Compressor Centrífugo localizado no polo de Guamaré.

O compressor centrífugo da figura 17 possui como principais parâmetros operacionais:

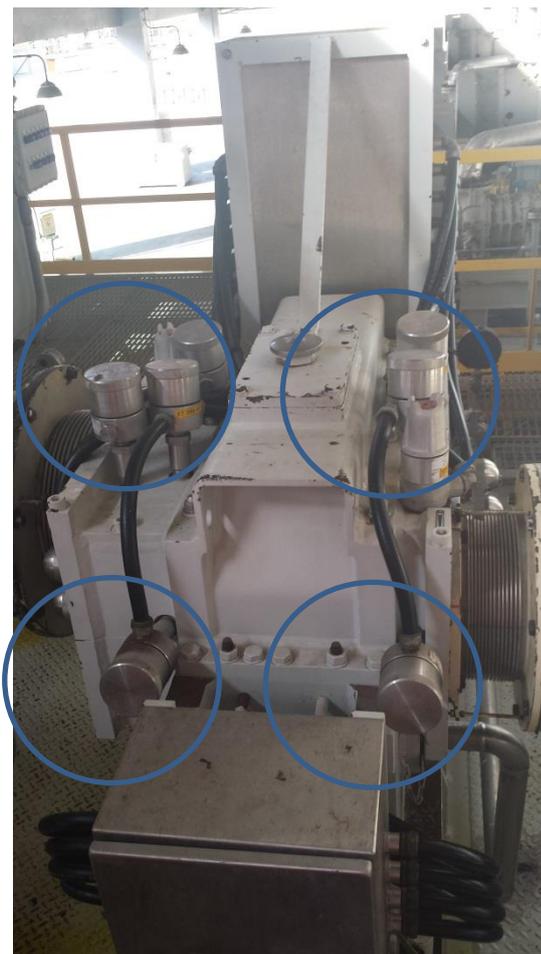


Figura 17 - Acelerômetros instalados no Compressor Centrífugo.

Pela figura 17, os acelerômetros são instalados na carcaça do compressor centrífugo de forma perpendicular à superfície do equipamento como mostra a figura 18, retirada da norma ABNT NBR 10082:2011. Este procedimento deve ser corretamente seguido de acordo com a norma para que não ocorram erros de leitura que comprometam na análise da vibração. Neste projeto participei das reuniões e acompanhei os trâmites para a implantação do mesmo.

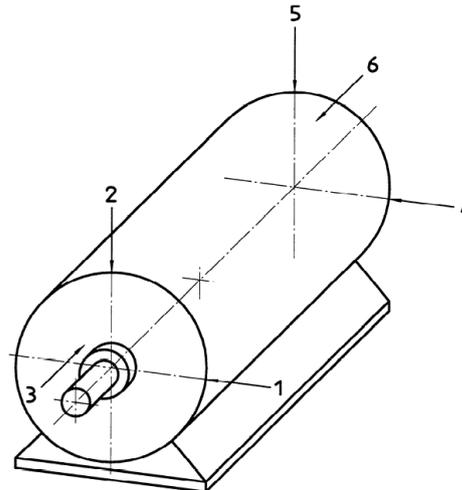


Figura 18 - Equipamento com as indicações dos pontos de coleta. Fonte: Imagem retirada da norma ABNT NBR 10082:2011.

A figura 18 mostra o desenho de um equipamento de médio porte com as indicações de pontos estratégicos para a correta implantação dos instrumentos de medição da vibração. Os principais problemas encontrados com a tecnologia anterior foram:

- Sistemas inoperantes;
- Falta de assistência técnica;
- Baixa utilização dos recursos
- Falta de equipe dedicada para tratamento dos dados;
- Falta de domínio sobre softwares.
- Obsolescência.

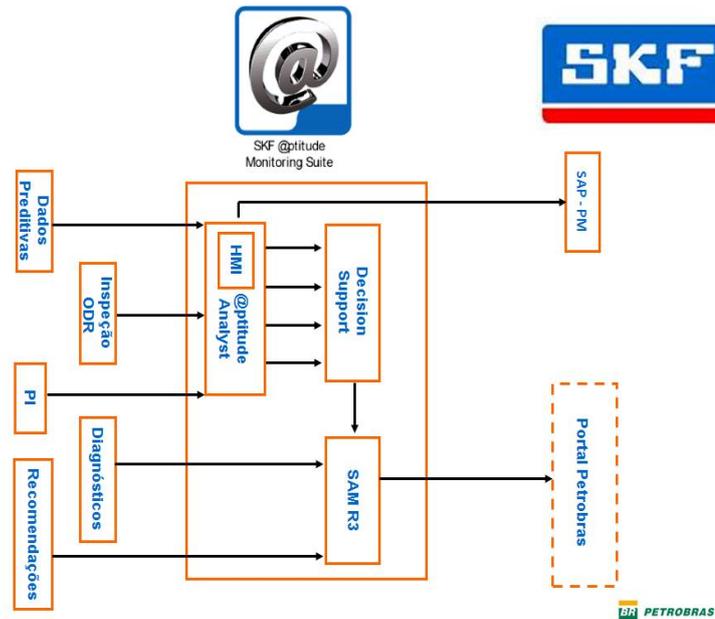


Figura 19 - Funcionamento do @ptitude Analyst da SKF.

O funcionamento do *@ptitude Analyst* está explicitado na figura 19 onde é possível observar os dados de entrada e saída de maneira que é possível aplicar diagnósticos a partir os resultados online. Os dados de entrada são recebidos pelo *@ptitude Analyst*, processados e enviados para o SAP e para o *Decision Support*. Este último realiza um pré-diagnóstico através de regras de diagnóstico, determinando padrões por um analista experiente. O *Decision Support* procura por esses padrões nas árvores dos equipamentos, e se encontrar ele emite o pré-diagnóstico. O pré-diagnóstico é então enviado a ferramenta *SAM-R3* na qual receberá as devidas recomendações e diagnósticos que serão posteriormente expostas em um portal da Petrobras para visualização.

6.3.1. OBJETIVO GERAL

Aprender sobre a manutenção sob condição através do módulo online, em uma planta de produção de gás.

6.3.2. OBJETIVO ESPECÍFICO



Aprender sobre a manutenção sob condição de máquinas, identificando os ganhos, a metodologia, os benefícios e auxiliar a engenharia do EMI na coordenação para implantação do projeto piloto.

A empresa SKF, especialista na fabricação de rolamentos, é responsável pela implantação deste projeto. Foi fornecido um cronograma que indica o período para instalação e testes do equipamento.

6.3.3. MÉTODO

Estudar sobre manutenção sob condição com foco em equipamentos de monitoramento de vibração, orbita, parâmetros operacionais (Temperatura, pressão, vazão, entre outros) analisando as correlações e identificando os desvios e quais as ações mitigadoras para problemas de máquinas.

O sistema de monitoramento será online utilizando um software chamado *@ptitude Analyst* que gerencia os dados de vibração e outros dados operacionais. A metodologia da análise qualitativa e quantitativa é a aquela fornecida pela empresa SKF, através dos equipamentos que terão a tecnologia do sistema de proteção e monitoramento online da condição do equipamento IMx-M da SKF instalados.

6.3.4. DESENVOLVIMENTO

Diante do exposto, foi realizada uma visita técnica a Unidade de Tratamento e Processamento de Fluidos (ver figura 21), com o objetivo de conhecer o moto-compressor que fará parte do projeto piloto.



Figura 20 - Polo de Guamaré.

Foi criado um dossiê no qual possui o objetivo de expor todo o histórico do comissionamento do projeto, bem como a proposta de implantação, financeiro, processos, principais parâmetros envolvidos, proposta da empresa Bentley Brasil, a proposta da SKF e a posição da Petrobras perante a fase atual do projeto.

Justificativa para a estratégia da Petrobras diante do projeto

A equipe da Petrobras analisou a proposta da empresa antiga e foi observado o histórico do fornecedor, especificamente para os equipamentos da UPGN, sob dois aspectos:

- Fornecimento de serviços: Dificuldade na logística na compra de materiais sobressalentes. Alto custo para aquisição.
- Assistência técnica: Dificuldade no atendimento as demandas da Petrobras (esclarecimento de dúvidas; visita técnicas periodicamente do fornecedor e capacitação das equipes de manutenção)

Com isso, verificamos que se aceitássemos a referida proposta a mesma poderia induzir a cometermos os mesmos equívocos quando da implantação do sistema embarcado, que foram:

- Sistemas inoperantes;
- Falta de assistência técnica;
- Baixa utilização dos recursos;



- Falta de equipe dedicada para tratamento dos dados;
- Falta de domínio sobre softwares;
- Obsolescência.

Assim o estágio se baseou no acompanhamento de todos os trâmites deste projeto desde o final do ano de 2013 até os dias atuais, participando ativamente das reuniões como ouvinte, criando atas de reunião, coordenando o acesso remoto, gestão de mudanças, organização de documentos e acompanhamento *in loco* do equipamento instalado. Atualmente o projeto está em fase de testes.

6.3.5. CONCLUSÃO

Então, foi possível observar a importância dos sistemas de monitoramento online da vibração e de outros parâmetros operacionais, que influenciam diretamente na identificação de possíveis falhas, otimizando o tempo destas identificações garantindo assim uma maior confiabilidade do equipamento.

Sugere-se dar continuidade aos trabalhos e participar ativamente da fase de testes e posterior análise dos dados para comprovar a eficiência do novo sistema de monitoramento.

6.4. TRABALHO DE CONFIABILIDADE UTILIZANDO UM SOFTWARE DA EMPRESA RELIASOFT APLICADO AO SISTEMA DE INJEÇÃO DE ÁGUA DO CANTO DO AMARO.

A necessidade de se obter equipamentos com a máxima disponibilidade e mínima manutenção corretiva aparece no contexto atual na maioria das indústrias. Atrelado a esta visão, os estudos da manutenção centrada na confiabilidade surgem como uma excelente ferramenta para controlar e otimizar estes parâmetros citados que influenciam diretamente na performance dos equipamentos e nas plantas industriais.

Com essa intenção a Petrobras elaborou um estudo de análise RAM onde consistia-se na seleção de 28 equipamentos representativos e pré-selecionados por sua categorização de criticidade



no ativo de produção de Mossoró, especificamente nos sistemas de injeção de água do Canto do Amaro, nos quais foram utilizados para a implementação das ferramentas RAM (*Reability Analisys Mode*), LDA (*Life Diagram Analisys*), RBD (*Reability Blocks Diagram*) e RCM (*Reability Centered Maintenance*). As principais atividades realizadas neste trabalho foi acompanhamento do processo de análise de falha, obtenção de conhecimento nas ferramentas de confiabilidade e auxílio na alimentação da planilha principal da RBD através dos dados simulados pelo *software*.

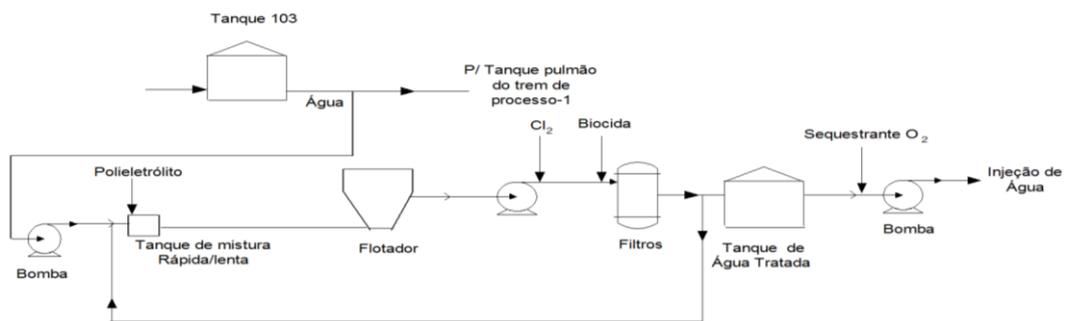


Figura 21 - Croqui do sistema de injeção de água.

A figura 22 mostra um esquema do funcionamento do sistema de injeção de água na Estação de Tratamento de Água.

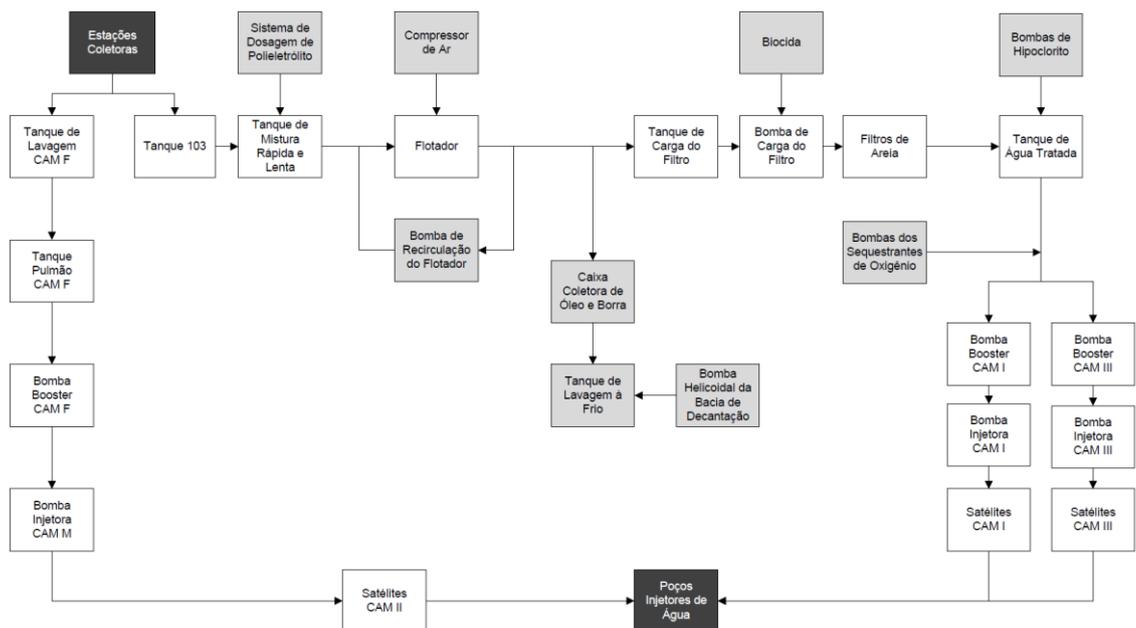


Figura 22 - Diagrama de Blocos de Confiabilidade.



A partir da criação dos blocos criados na figura 23, é possível adicionar tarefas em cada bloco e assim realizar a simulação no *software*. As etapas da realização do trabalho são:

- Treinamento;
- Levantamento de dados;
- Análise sistêmica do SIA;
- Dimensionamento de sobressalente.

Assim, espera-se que com a conclusão deste trabalho, as empresas de petróleo adotem os procedimentos de confiabilidade com ganhos esperados, entre eles otimização de custos e maior disponibilidade dos equipamentos. A atividade do estágio consistiu na alimentação da planilha de LDA, reorganização da estrutura dos dados e planilhas de tarefas programadas, participando ativamente das reuniões e apresentações do presente trabalho na UO-RNCE.

6.4.1. OBJETIVO GERAL

Aprender sobre a aplicação da manutenção centrada na confiabilidade e demais ferramentas como RAM (Reability Analisys Mode), LDA (Life Diagram Analisys), RBD (Reability Blocks Diagram) no sistema de injeção de água no Canto do Amaro.

6.4.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

- Acompanhar o passo a passo na prática do uso do MCC e das ferramentas de confiabilidade aplicados em uma planta de produção de óleo e gás;
- Acompanhamento na implantação da análise RAM do sistema de injeção de água e óleo de uma planta de produção da Petrobras;



- Entendendo quais suas funções e modos de falha para que possa ser construído os diagramas e realizadas as devidas simulações.

6.4.3. MÉTODO

A metodologia utilizada se baseou nos seguintes passos:

- Estudo das referências baseadas na manutenção centrada na confiabilidade e as principais ferramentas que foram RAM (Reability Analisys Mode), LDA (Life Diagram Analisys), RBD (Reability Blocks Diagram).
- Treinamento interno através de um estudo de caso utilizando o software da empresa Reliasoft.
- Alimentação da planilha do LDA.
- Ida ao campo para conhecer o sistema de injeção de água.

6.4.4. DESENVOLVIMENTO

Assim, seguindo a metodologia foram realizados os seguintes passos:

- 1) Estudo das referências baseadas na manutenção centrada na confiabilidade e as principais ferramentas que foram RAM (Reability Analisys Mode), LDA (Life Diagram Analisys), RBD (Reability Blocks Diagram).
- 2) O treinamento interno foi realizado através de um estudo de caso utilizando o software da empresa Reliasoft, no qual baseou-se na seleção de 30 unidades de bombes no Canto do Amaro e o tempo médio entre falhas de cada equipamento junto com o número de intervenções preventivas e número de falhas de cada UB.
Com estes dados foi possível plotar as curvas e obter resultados referentes a disponibilidade e paradas pela manutenção corretiva utilizando a ferramenta



Blocksim da *ReliaSoft*. Foram utilizados os seguintes dados de entrada considerando uma estratégia para um cenário futuro:

	Tarefa 1	Tarefa 2
Tipo de Manutenção	Sob-Condição	Preventiva
Porcentagem de Vida [%]	80	-
Duração da Tarefa [min]	10	1440
Intervalo Fixo da Tarefa [h]	720	7200
Valor de Restauração [%]	95	95
Tempo da Simulação	10 anos	

Tabela 2 – Dados de entrada no *BlockSim*.

A tarefa 1 corresponde a inspeção da condição e a tarefa 2 corresponde a manutenção preventiva na UB. Após a simulação foi obtido os resultados da tabela 3. A distribuição adotada foi a Weibull 2-P.

	Cenário Atual	Cenário Futuro	Ganhos
Disponibilidade	98,9906	98,3393	-0,6513
Manutenção Corretiva	12,287	1,263	11,024

Tabela 3 – Resultados pós-simulação.

Também foi plotado o gráfico da figura 23 que se refere à função densidade de probabilidade em função do tempo em horas.

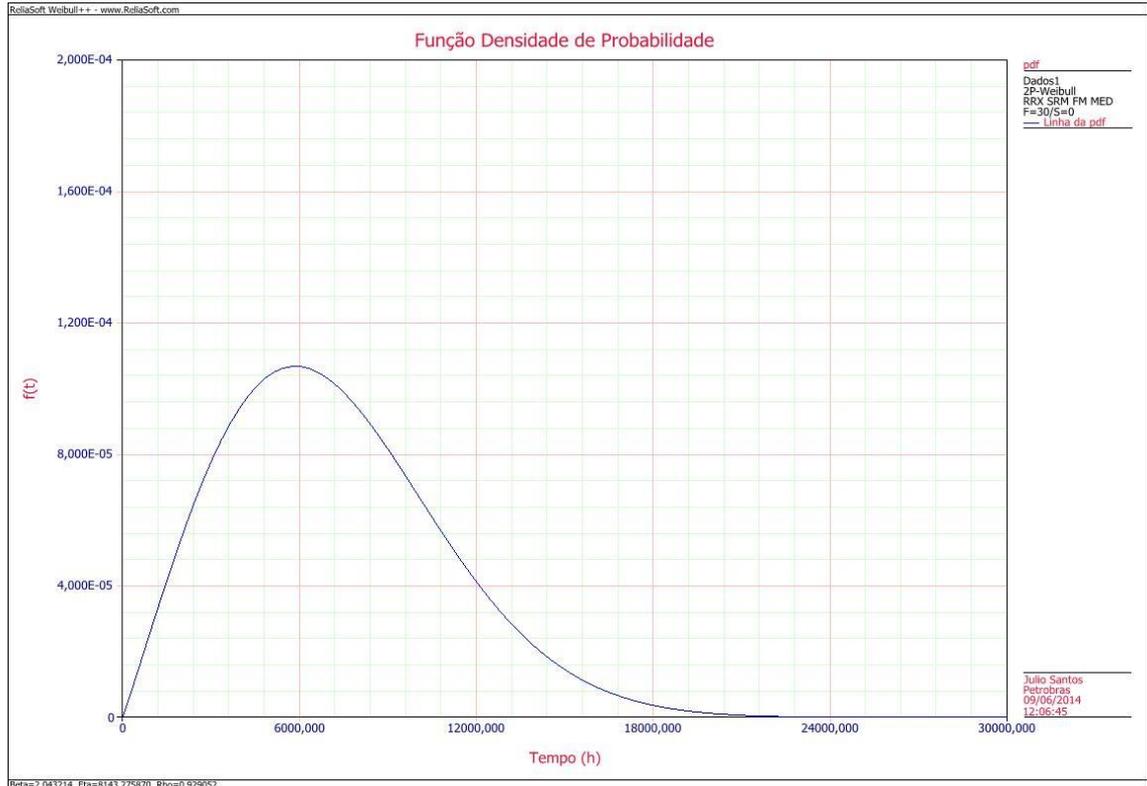


Figura 23 - Gráfico da Função densidade pelo tempo.

Assim é possível observar um ganho de 11,04 em relação a manutenção corretiva, ou seja, uma redução de 90,1% em relação ao cenário atual. Também se obteve uma pequena redução da disponibilidade, apresentando-se como um fator positivo.

- 3) Foi realizada a alimentação da planilha de LDA (anexo 1), através do auxílio do engenheiro de campo que informou os tempos de manutenção corretiva planejada e periodicidade das tarefas.

Com estes dados foi possível alimentar os blocos de tarefas através do BlockSim e realizar as simulações para obter os dados de saída que foram a quantidade de manutenção corretiva e a porcentagem de disponibilidade.



Relatório de Estágio – Oto Lima de Albuquerque Neto

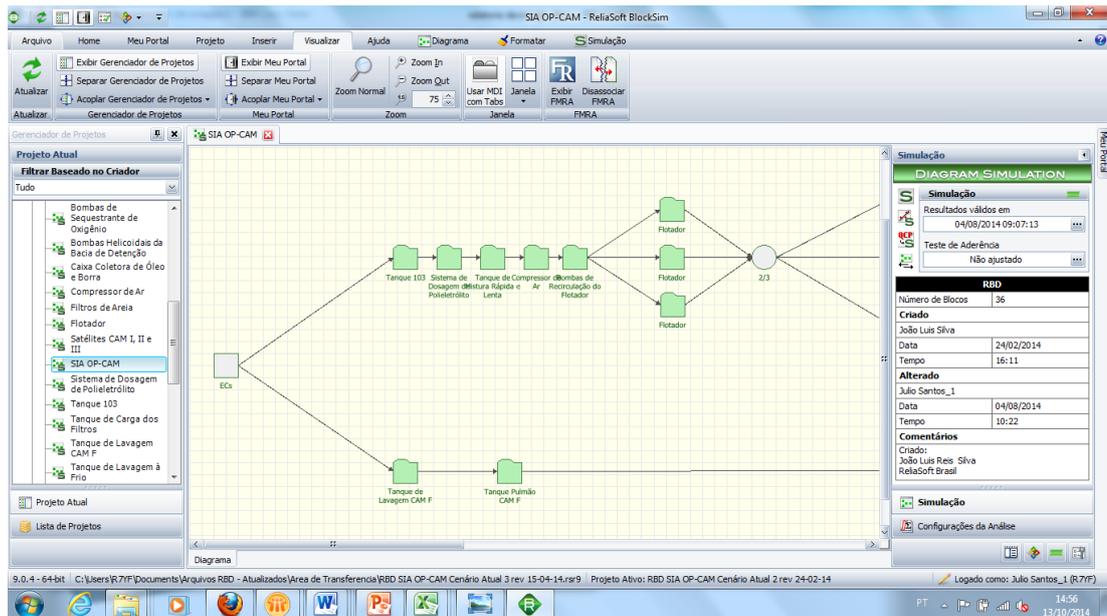


Figura 24 - Tela do Programa BlockSim apresentando parte do Sistema de Injeção de Água do Canto do Amaro.

- 4) Foi criado um passo a passo ensinando o procedimento para alimentar o blocksim a partir dos dados da planilha de LDA.

Passo a Passo para a Alimentação de Dados de Políticas de Manutenção no RBD e Simulação do Cenário Futuro

Considerações iniciais:

- Sistema: Bomba Booster CAM III;
- Equipamentos do Sistema: Filtro, Motor Elétrico, Acoplamento e Motor Elétrico;
- Equipamento utilizado para a simulação e realização do presente passo a passo: Motor Elétrico.

Passo 1 – Identificação das Tarefas

Através da planilha “Relatório RCM” deve ser localizado os modos de falhas que se relacionem com o equipamento selecionado. Neste exemplo, deve ser localizado os modos de falhas para o Motor Elétrico (Última coluna).

Figura 1 – Planilha do Relatório RCM.

Pela planilha da figura 1, a coluna “Nº Tabela LDA” identifica o número da tarefa, assim para o presente exemplo, foram localizados para o motor elétrico as tarefas 11, 22 e 24.

Figura 25 – Parte do passo a passo criado para orientar o usuário para simular as tarefas.



O passo a passo tem a função de orientar o usuário a partir da planilha do relatório com as informações de tarefas preventivas e sob-condição, alimentar os dados de entrada do BlockSim e posterior simulação do sistema.

- 5) A visita técnica no Canto do Amaro no Sistema de Injeção de Água foi realizada com o principal objetivo de conhecer os equipamentos selecionados para o projeto e entender os seus funcionamentos.

6.4.5. CONCLUSÃO

Diante do exposto, observou-se como o estudo da confiabilidade é uma ferramenta poderosa para ampliar o desenvolvimento das indústrias que buscam uma maior disponibilidade dos equipamentos. Os resultados do presente trabalho foram satisfatórios apresentando uma disponibilidade geral de 85% em relação ao sistema de injeção de água para uma simulação de 10 anos, comprovando assim sua eficiência.

6.5. PARADA PROGRAMADA DA ESTAÇÃO COMPRESSORA E COLETORA DE UPANEMA.

Nas décadas passadas, a indústria utilizava uma metodologia de manutenção arcaica, ou seja, só era realizado a manutenção de equipamentos após a ocorrência da avaria. Este tipo de manutenção é conhecido como corretiva, que provoca elevados custos para a empresa devido a paradas inesperadas, interrupção da produção, entre outros.

Após a modernização da manutenção, surgiu a preventiva que aplica a manutenção corretiva programada, ou seja, através de intervalos pré-determinados, ocorrem as intervenções nos equipamentos, evitando assim paradas inesperadas.

6.5.1. OBJETIVO GERAL



Acompanhar a parada programada na estação coletora e compressora de Upanema.

6.5.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Acompanhar os serviços realizados na parada programada de Upanema assim como compreender a importância do projeto.

6.5.3. METODOLOGIA

Ida a estação compressora e coletora de Upanema e acompanhar *in loco* os serviços realizados. Como citado, através do MS Project, foi possível criar o projeto de parada programada e posterior divisão correta dos serviços para as equipes de mecânica, elétrica, instrumentação e caldeiraria.

6.5.4. DESENVOLVIMENTO

Seguindo a metodologia, foi acompanhada parada programada na Estação Coletora e Compressora de Upanema, tendo em vista a intenção de se evitar a manutenção corretiva não planejada. Foram acompanhadas as substituições e reparos de componentes. Dentre elas, as principais foram:

- Instalação de válvulas de alívio;
- Substituição de dutos;
- Inspeção da condição de vasos de pressão.



Figura 26 - Estação Coletora e Compressora de Upanema.

Na figura 26, observa-se um guindaste realizando uma manobra, ou seja, o deslocamento de um duto. A atividade do estágio foi acompanhar a maioria dos serviços realizados pelas equipes de mecânica, elétrica, instrumentação e caldeiraria *in loco*, além de entender a importância da parada programada.

6.5.5. CONCLUSÃO

Através da parada programada de Upanema, foi possível observar a importância de se realizar projetos de intervenção em plantas para evitar falhas e paradas indesejadas. Através desta prática, com auxílio de software, a empresa alcançará bons níveis de redução de custo e disponibilidade dos equipamentos em conjunto com a produção.

6.6. PARTICIPAÇÃO NAS AÇÕES DO COMITÊ TÉCNICO DE MANUTENÇÃO PREDITIVA



Muitas indústrias buscam padronizar sua estrutura organizacional em vários setores de maneira que existe a necessidade de interação e comprometimento entre ambas. Seguindo este contexto, foi criado o CTMP, Comitê Técnico de Manutenção Preditiva, que é composto por engenheiros e técnicos especialistas, conforme o tema, lotados prioritariamente nas gerências que compõem a UO-RNCE, podendo ter a participação também de outras gerências envolvidas. Este comitê deve ser coordenado por profissionais da ENGP/EMI. no qual possui as seguintes atribuições:

- Promover a integração entre as equipes de manutenção preditiva e os órgãos de apoio através de reuniões, encontros técnicos, etc.;
- Identificar oportunidades de melhorias na atividade buscando aperfeiçoamento das técnicas utilizadas;
- Identificar e promover cursos de capacitação para as equipes;
- Criar e/ou revisar os padrões relacionados á atividade.

Fonte: Sistema de Padronização Interna da Petrobras.

6.6.1. OBJETIVO GERAL

Auxiliar e acompanhar as reuniões e ações do Comitê Técnico de Manutenção Preditiva da UO-RNCE.

6.6.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Participar das reuniões como ouvinte;
- Auxilio na elaboração das atas;
- Execução das ações baseadas nas atas.



6.6.3. MÉTODO

A metodologia baseia-se da seguinte maneira:

- Organização da estrutura das pastas que compõe as ações do CTMP facilitando a busca dos dados.
- Participação em reuniões para a organização das ações e apresentações nas reuniões formais e extraordinários do CTMP.
- Execução das ações passadas para o estagiário de acordo com o responsável por cada ação nas atas de reuniões.
- Auxílio na elaboração da primeira apresentação na reunião feita em Julho/2014.

6.6.4. DESENVOLVIMENTO

Na primeira reunião feita em julho, foram criadas ações para direcionar o desenvolvimento da manutenção preditiva na UO-RNCE. Diante do exposto, foram passadas algumas ações que fizeram parte do presente plano de estágio. Entre elas:

- Elaboração da apresentação para a empresa contratada de Análise de Óleo para fins de discussões internas;
- Consolidação dos indicadores de manutenção de maneira padronizada para todos os ativos de produção da UO-RNCE;
- Estudo sobre a análise de graxa lubrificante;
- Analisar e Padronizar os fluxogramas da manutenção preditiva nos ativos de produção;



- Levantamento da situação atual de cada ativo em relação ao quantitativo de pessoas que trabalham diretamente ou indiretamente com a manutenção preditiva e o quantitativo de equipamentos.
- Criação de Padrão para auditoria de campo;
- Cálculo do prejuízo financeiro devido à degradação de óleo em decorrência do mau condicionamento dos tambores e afins;
- Projeto de implantação da Metodologia A3.

As tarefas acima foram concluídas com exceção das duas últimas devido a não priorização da mesma. A tarefa sobre a criação do padrão de auditoria no campo foi feita, faltando apenas uma revisão final.

6.6.5. CONCLUSÃO

Após realização das tarefas e ações passadas após reunião do CTMP, foi possível observar a importância de se existir um Comitê Técnico de Manutenção Preditiva nas indústrias de um modo geral, devido este facilitar as organização e padronização das ações contribuindo para a melhoria da empresa além de redução de custos por manutenção.

Sugere-se focar as tarefas que apresentem maior prioridade. A penúltima tarefa pode ser realizada através do apoio dos professores do departamento de Engenharia Mecânica da UFRN.

6.7. ANÁLISE DE ÓLEO LUBRIFICANTE

A análise de óleo lubrificante é uma das técnicas de manutenção preditiva utilizadas pela Petrobras com o intuito de determinar o melhor tempo para parada dos equipamentos para manutenção sem prejuízo da produção, falhas indesejadas, ou com o mínimo de paradas dentro da vida útil do equipamento. Com isso se ganha em redução de custo com manutenção preventiva e reduz a probabilidade de paradas por eventos decorrentes de falhas do equipamento. Este processo encontra-se parcialmente implantado nos ativos da UO-RNCE.



6.7.1. OBJETIVO GERAL

Aprender como funciona na prática todo o procedimento desde da coleta até a avaliação dos laudos fornecidos pela empresa responsável pelas análises de óleo, ajudando a Engenharia de Manutenção e Inspeção na interpretação dos laudos e indicando possíveis melhorias de: logística, interpretação, avaliação de locais de coleta e armazenamento.

6.7.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Conhecer os procedimentos sobre coleta no campo, análise de laudos e normas utilizadas pela Petrobras, associar a literatura sobre o assunto e contribuir identificando pontos a serem melhorados.

6.7.3. MÉTODO

A metodologia adotada foi à análise qualitativa dos procedimentos e a análise quantitativa através dos resultados. Sendo essa última prejudicada pela falta de prioridade. Sendo assim seguimos a sequência sugerida pelo supervisor do estágio:

- Leitura e interpretação de padrões Petrobras e normas de outras empresas;
- Acompanhar as coletas no campo;
- Treinamento nas técnicas de análise no campo utilizando a maleta da Kittiwake;
- Estudo sobre histórico de análise de laudos com resultados críticos e análises estatísticas.



6.7.4. DESENVOLVIMENTO

6.7.4.1. TREINAMENTO COM A MALETA

Seguindo o exposto acima, com a finalidade de se obter resultados com menores intervalos de tempo possíveis e confiabilidade dos mesmos, foi realizado um treinamento no laboratório da preditiva no Canto do Amaro utilizando duas maletas que realizam análise de óleo lubrificante *in loco*. A maleta da figura 27 realiza os seguintes ensaios:

- Teor de Água;
- Teor de Acidez;
- Teor de Basicidade;
- Viscosidade não quantitativa.



Figura 27 - Foto da maleta da Kittiwake que faz análise de óleo lubrificante.

Na figura 28, é possível observar o uso da maleta na presença de parte da equipe de manutenção do Canto do Amaro.



Figura 28 – Treinamento no laboratório da preditiva no Canto do Amaro.

A maleta da figura 29 realiza ensaio de contagem de partículas.



Figura 29 - Maleta para contagem de partículas.

Após o treinamento foi possível observar a eficiência da mesma em relação à rapidez quanto ao fornecimento de dados. Foram realizados testes com óleo lubrificante novo e usado para se obter valores diferenciados e assim compará-los para posterior análise.

6.7.4.1.1. CONCLUSÃO



Observou-se que após o treinamento no laboratório da preditiva e acompanhamento da coleta de óleo lubrificante em equipamentos dinâmicos, a análise de óleo lubrificante apresenta-se como ferramenta fundamental para manter a saúde ativa dos equipamentos da UO-RNCE devido a possibilidade de se obter um histórico das tendências dos principais parâmetros do óleo lubrificante. Verificou-se também a eficiência da maleta após comparar valores do teor de água, teor de acidez e contagem de partículas para um óleo “novo” e um óleo “velho”, demonstrando assim uma relativa diferença para ambos os ensaios.

Sugere-se um treinamento mais aprofundado com a maleta através de instalações offshore, pois devido à dificuldade de transporte e logística para fornecimento de amostras em equipamentos *offshore*, o uso da maleta surge como ótima opção para resultados rápidos e precisos.

6.7.4.2. PLANILHAS DE DADOS REFERENTES À ANÁLISE DE ÓLEO

Cada equipamento da UO-RNCE possui alguns pontos de coleta de óleo lubrificante, e cada ponto de coleta possui um banco de dados registrados em uma planilha com todos os resultados da análise de óleo realizada por um laboratório contratado. No presente estágio foi realizada a atualização de 74 planilhas em um total de 567 laudos planilhados, contribuindo assim para a execução dos diagnósticos das manutenções preditivas.



Relatório de Estágio – Oto Lima de Albuquerque Neto

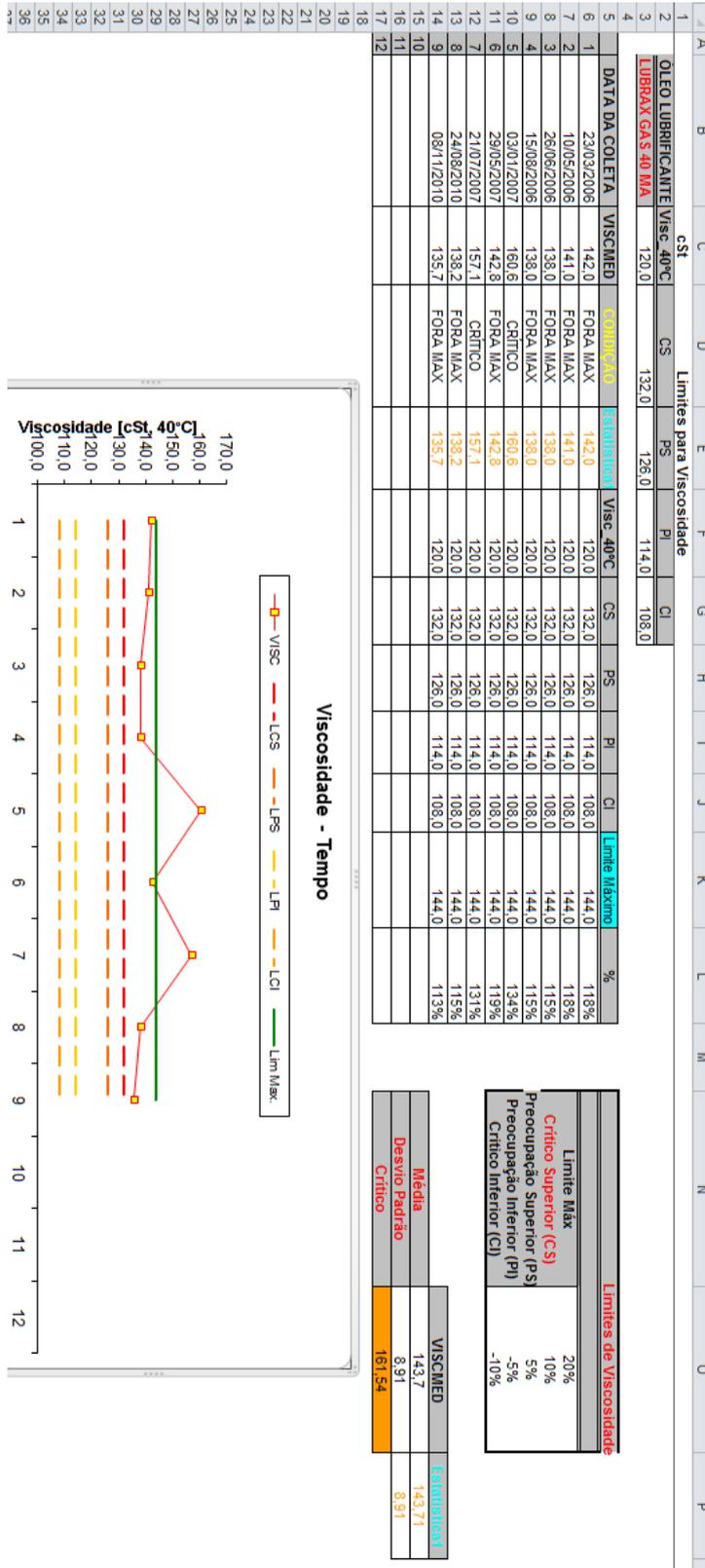


Figura 30 - Exemplo de uma planilha de dados da preditiva de um motor a gás.



Na figura 30, é exemplificada uma parte da planilha de acompanhamento de dados dos resultados das análises de óleo. Observa-se a geração do gráfico da viscosidade e a tendência de alteração do comportamento da viscosidade do óleo lubrificante.

6.7.4.2.1. CONCLUSÃO

Assim, foi possível verificar a utilidade de um banco de dados sobre cada equipamento que consta que os dados dos principais parâmetros de monitoramento da análise de óleo. Estas planilhas indicam os gráficos de tendência e assim influencia diretamente na tomada de decisão para intervir nos equipamentos que apresentam tendências de falhas.

6.7.4.3. VISITA NOS CAMPOS DO CANTO DO AMARO E ALTO DO RODRIGUES PARA VERIFICAÇÃO DA CONDIÇÃO DE ARMAZENAMENTO E MANUSEIO DOS TAMBORES DE ÓLEO LUBRIFICANTE.

De acordo com a equipe local, foi informado que o manuseio dos tambores desde o caminhão até o armazém é feito através de uma empilhadeira. Dois pares de tambores são colocados em um palete e amarrados com uma fita de lacre (figura 31). Assim a empilhadeira transporta cada palete até o devido local de armazenamento.



Figura 31 - Tambores novos presos por uma fita de lacre e sobre um palete.



Figura 32 - Tambores novos presos por uma fita de lacre e sobre um palete.

De acordo com as referências, o manuseio dos tambores é feito de forma satisfatória, contribuindo para um melhor desempenho do óleo lubrificante. A posição da maioria dos tambores presentes no armazém pode ser observada na figura 33.



Figura 33 - Posição de alguns tambores do armazém do CAM.

Pela figura 33, observa-se que alguns tambores estão posicionados corretamente de acordo com a fundamentação teórica. Durante a inspeção, verificou-se que um dos tambores estava aberto e apresentando contaminação por partículas macroscópicas em sua superfície.



Figura 34 - Tambor aberto no armazém.

Na situação da figura 34, o óleo lubrificante poderá estar contaminado com partículas sólidas como areia, poeira e a água devido à chuva. Esta contaminação prejudica o rendimento do óleo lubrificante, tornando a lubrificação dos equipamentos deficiente.

6.7.4.3.1. CONCLUSÕES

Diante do exposto, foi possível observar a importância de um bom armazenamento do óleo lubrificante, devido a possibilidade de degradação do óleo lubrificante durante o armazenamento, contribuindo assim para uma lubrificação deficiente nos equipamentos e ampliando a possibilidade de falha precoce dos mesmos.

6.7.4.4. COLETA E TROCA DO ÓLEO LUBRIFICANTE DO REDUTOR EM UMA DAS UNIDADES DE BOMBEIO DO CANTO DO AMARO.

Foi acompanhado o procedimento de coleta e substituição de óleo lubrificante nos redutores de unidades de bombeio no Canto do Amaro. Inicialmente os operários adquirem uma



ordem de serviço e a autorização para que a UB seja desligada. O painel elétrico (figura 36) é aberto e assim o sistema de fornecimento de eletricidade é interrompido.



Figura 35 - Unidade de bombeio localizada no Canto do Amaro.



Figura 36 - Painel de controle de fornecimento de corrente elétrica.



O operador retira os parafusos da tampa superior do redutor e assim se inicia a coleta do óleo utilizando o conjunto bomba de vácuo, mangueira e frasco vazio (figura 37).



Figura 37 - Coleta com bomba de vácuo.



Figura 38 - Foto dos operadores realizando a coleta.

Após a coleta, é inserido uma mangueira dentro do reservatório de óleo do redutor e assim se inicia o bombeio com o intuito de retirar o óleo velho. Este óleo velho é bombeado para dentro de um reservatório próprio para descarte de lubrificantes usados, ver figura 38.



Figura 39 - Reservatório para óleo lubrificante que será descartado.

Após a retirada do óleo velho, é derramado um óleo de menor viscosidade que tem o objetivo de limpar e retirar resíduos que ainda estejam presentes no reservatório.

Posteriormente, se inicia o bombeio do óleo novo que está no tambor para o reservatório do redutor da UB. Após o bombeio a tampa do redutor é parafusada novamente e a UB é ligada finalizando assim o procedimento de troca de óleo lubrificante.

Pela figura 40, o óleo da esquerda, ou seja, o mais escuro é o óleo velho e o frasco da direita é o óleo novo. Verifica-se visualmente uma grande diferença entre os dois óleos. A cor escura provavelmente deve ser predominante devido à presença de óxidos, impurezas, partículas ferrosas, entre outros.



Figura 40 - Frascos com os óleos coletados.



6.7.4.4.1. CONCLUSÃO

Através do acompanhamento da substituição e coleta do óleo lubrificante nos redutores de algumas unidades de bombeio do Canto do Amaro, foi possível compreender todo este procedimento além de aprimorar ainda mais a experiência com óleo lubrificante e seu manuseio.



7. CONCLUSÃO

A realização do estágio foi de grande valia para ampliação e aprendizado prático dos conhecimentos adquiridos em sala de aula, na universidade. Dentro deste período, foi possível conhecer algumas das máquinas e/ou instrumentos de grande porte utilizados na empresa para continuidade da sua produção e correlacionar o desgaste observado em alguns de seus componentes com os dados de análise de óleo lubrificante manipulados na gerência/sede da empresa através de planilha Excel®.

Pôde se conhecer melhor sobre a utilização da ferramenta de manutenção preditiva quanto à análise de óleo lubrificante, análise de vibração, ensaios destrutivos e não destrutivos e suas importâncias na compreensão das condições de funcionamento, desgaste e vida útil de uma máquina, e como os resultados dos exames das amostras de óleo lubrificante e a conservação do histórico destas informações podem ser úteis para avaliá-la.

Foi possível compreender sobre os estudos de confiabilidade, onde pôde-se concluir o quanto um equipamento deve ser confiável tendo os parâmetros de disponibilidade e manutenibilidade sempre com ótimos índices influenciando diretamente na operação e redução de custos para a indústria.

Além do conhecimento técnico corroborado com a prática da análise destes dados e a visitas a campo, a participação nas atividades do estágio, juntamente com os técnicos e engenheiros da empresa em um ambiente de trabalho, permitiu compreender um pouco mais sobre a importância do trabalho realizado por eles através do setor de Engenharia de Manutenção e Inspeção da UO-RNCE, Petrobras, concluindo, assim, que o desenvolvimento de um bom trabalho em grupo com união e organização pode gerar ótimos resultados.



8. REFERÊNCIAS

ARATO JUNIOR, Adyles. **Manutenção Preditiva Usando Análise de Vibrações**. Barueri: Editora Manole Ltda, 2004. 190 p.

BLOOM, Neil B. **Reliability Centered Maintenance: Implementation made simple**. New York: Kenneth McCombs, 2006. 291 p.

CARRETEIRO, R.P.; BELMIRO, P.N.A. **Lubrificantes e Lubrificação Industrial**, 2006, cap. 45.

CURSO de Desgaste e Tribologia. Apostila elaborada pela TESTMAT. Disponível em: <<http://pt.slideshare.net/freddypoetscher/apostila-desgaste-tribologia-cursos-servicos-testmat>>. Acesso em: 30 set. 2014.

GET – Grupo de Estudos de Tribologia e Integridade Estrutural, **Projeto Lubrificantes de Alto Desempenho**, Relatório 1/4 entregue a Petrobras em 27 de Novembro de 2007.

HUTCHINGS, I.M., **Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials**. Cambridge: British Library Cataloguing in Publication Data, 1992a. 273p.

LAFRAIA, João Ricardo Barusso. **Manual de Confiabilidade, Manutenibilidade e Disponibilidade**. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda., 2001. 375 p.

LEIGNER, L.O., **The Practical Handbook of Machinery Lubrication**. 3th edition, 253p.

OREDA. **Offshore Reliability Data**. SINTEF, 2009.

PALLEROSI, Prof. Dr. Carlos Amadeu. **Confiabilidade, A Quarta Dimensão da Qualidade: Conceitos Básicos e Métodos de Cálculo**. São Paulo: Reliasoft Brasil, 2006. 10 v.

Site Interno Petrobras. Disponível em: <<http://portalpetrobras.petrobras.com.br/PetrobrasPortal/appmanager/portalp/desktop>>. Acesso em: 30 set. 2014.

Site Oficial da Petrobras. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/>>. Acesso em: 30 set. 2014.

STACHOWIAK, G.W.; BATCHELOR, A.W., **Engineering Tribology**, 1996.

SANTOS, Júlio César dos. **Análise de Confiabilidade de uma Bomba Centrífuga: Aplicação na Injeção de Água para Recuperação de Petróleo**. Natal: UFRN, 2011. 146 p.



Relatório de Estágio – Oto Lima de Albuquerque Neto



SILVA, Napoleão Fernandes da. **Bombas Alternativas Industriais: Teoria e Prática.** Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2007. 211 p.

SUPREME LUBRIFICANTES. **Análise de Óleo Lubrificante.** São Paulo: Artigo Técnico, 2010. 11 p.