

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

MAURICIO LAURINDO

**Avaliação do sistema de circulação e agitação nos tanques de
fluido em uma sonda de perfuração**

NATAL
2016

MAURICIO LAURINDO

**Avaliação do sistema de circulação e agitação nos tanques de fluido em
uma sonda de perfuração**

Monografia apresentada à
Faculdade de Engenharia Química
da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte, para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Química

Orientador: Prof. Dr. Humberto
Neves Maia de Oliveira

Co orientador: Prof. Dr. Marcos
Allysson Felipe Rodrigues

**NATAL
2016**

MAURICIO LAURINDO

**Avaliação do sistema de circulação e agitação nos tanques de fluido em
uma sonda de perfuração**

Monografia apresentada à
Faculdade de Engenharia Química
da Universidade Federal do Rio
Grande do Norte, para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia
Química.

Orientador: Prof. Dr. Humberto
Neves Maia de Oliveira.

Co orientador: Prof. Dr. Marcos
Allysson Felipe Rodrigues.

Aprovado em: _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

_____. Nota: _____.

Prof. Dr. Humberto Neves Maia de Oliveira
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

_____. Nota: _____.

Prof. Dr. Marcos Allysson Felipe Rodrigues
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

_____. Nota: _____.

Prof. Dra. Magna Angélica dos Santos Bezerra Sousa
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, a Deus, por eu ter chegado ao meu objetivo, tanto tempo almejado;

Aos meus familiares, meu Pai e minha Mãe, por terem me educado e me ensinado os princípios básicos de um ser humano consciente e responsável;

À minha esposa, Teodolina, que sempre soube entender as minhas dificuldades e me ajudou em grande parte desta trajetória;

Aos professores da UFRN, que durante todo o curso, me auxiliaram e compreenderam a minha dificuldade de estudar e trabalhar simultaneamente. A lista é extensa, todos são especiais, mas agradeço de coração o Professor Marcos Allysson por ter me ajudado a realizar este trabalho e também ao Professor Humberto e a Professora Magna, sempre muito solícitos, e incluo também o querido Professor Lair que, infelizmente, nos deixou recentemente;

Lembro também de agradecer ao corpo técnico da Petrobrás, meus gerentes e supervisores de trabalho e aos engenheiros de petróleo Henrique Nogueira e Tonny Lísias, que foram muitos atenciosos no momento de auxílio;

Enfim, a todos os colegas estudantes, que convivi durante o período cursado, também aos funcionários da UFRN e aos demais profissionais que atuam no campus.

RESUMO

LAURINDO, Mauricio. Avaliação do sistema de circulação e agitação nos tanques de fluido em uma sonda de perfuração. 2016. 68f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

Em perfuração de poços de petróleo é fundamental trabalhar com equipamentos corretamente dimensionados e seguros, além de contar com profissionais comprometidos e devidamente treinados, afim de se obter sucesso nas variadas operações. O fluido de perfuração é fundamental para se alcançar o objetivo com êxito, uma vez que suas funções básicas são manter o poço pressurizado, resfriar a broca e carrear os cascalhos da formação. Para tanto, se faz necessário o armazenamento e tratamento adequados na superfície, cujos equipamentos devem estar em plenas condições de atender à necessidade. Neste trabalho, o objetivo é avaliar se o sistema de circulação e agitação dos tanques, instalados em uma sonda de perfuração, estão em conformidade com as recomendações operacionais e, diante dos resultados obtidos, sugerir soluções que porventura sejam pertinentes. A metodologia adotada para o sistema de agitação baseia-se na literatura especializada, publicada recentemente pela ASME (Drilling Fluids Processing - Handbook; Elsevier, 2005). Para o sistema de circulação – bombas, tubulações e acessórios – são adotados critérios estudados nas disciplinas Fenômenos de Transporte e Operações Unitárias. Os resultados obtidos são apresentados resumidamente no texto e os cálculos detalhados, apresentados no Anexo. A otimização do sistema é essencial para que o processamento de fluido nos tanques seja eficiente e conserve as propriedades básicas do volume em circulação.

Palavras-chave: Fluido de perfuração. Sistema de circulação e agitação. Tanques de superfície.

ABSTRACT

LAURINDO, Mauricio. **Evaluation of the circulation system and agitation in the fluid tanks in a drilling rig**. 2016. 68f. Completion of Course Work (Undergraduate Degree in Chemical Engineering), Department of Chemical Engineering, Federal University of Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

In oil well drilling is essential trained personnel and properly sized equipment for the development of the activity with safety and quality. The drilling fluid is critical to the successful achievement of the objective, since its basic functions are to maintain the pressurized well, cool the drill bit and clean the well. Storage and treatment in surface tanks should be adequate, so it is important that the equipment is operational to meet the demand. The aim of this study is to evaluate the circulation and agitation system of mud tanks installed in a drilling rig if they're in compliance with the operational conditions and, in view of the results obtained, suggest solutions that may be relevant. The methodology chosen to verify the agitation system is based on the specialized literature recently published by ASME (Drilling Fluids Processing - Handbook; Elsevier, 2005). In order to evaluate the circulation system - pumps, pipelines and accessories - criteria adopted in the disciplines of Transport and Unitary Operations. The results obtained are described briefly in the text, while calculations' development are presented in the annex. The systems optimization is fundamental to the efficiency of the drilling fluid processing to preserve the basic properties of the circulating volume.

Key words: Drilling fluid. System of circulation and agitation. Surface taps.

LISTA DE ABREVIATURAS

bbl	barril
gpm	galões por minuto
lb/gal	libras por galão
NPSH	Net Positive Suction Head
lpm	litros por minuto
rpm	rotação por minuto

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Sonda de Perfuração Terrestre.....	15
Figura 2	Desenho de uma sonda de perfuração.....	16
Figura 3	Bomba alternativa.....	16
Figura 4	Arranjo típico de equipamentos e tanques.....	19
Figura 5	Fluxo radial.....	24
Figura 6	Fluxo axial.....	25
Figura 7	Conjunto motor – gearbox – haste – pás.....	26
Figura 8	Haste oca.....	26
Figura 9	Formação de vórtice.....	29
Figura 10	Impelidor com pás contorcidas – hélice.....	30
Figura 11	Chicanas.....	32
Figura 12	Pistola instalada em um tanque.....	34
Figura 13	Gráfico vazão (gpm) x altura manométrica (ft).....	36
Figura 14	Esquema de Funil misturador.....	37
Figura 15	Tanque de sonda de perfuração.....	41
Figura 16	Agitador.....	41
Figura 17	Pistolas.....	42
Figura 18	Funil de mistura.....	43
Figura 19	Bombas centrífugas.....	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Valores típicos de TOR (s).....	32
Tabela 2	Relação volume deslocado e diâmetro do impelidor	33
Tabela 3	Relação entre diâmetro do impelidor e potência do motor.....	34
Tabela 4	Relação volumetria e profundidade do poço.....	45
Tabela 5	Relação comprimento / largura dos compartimentos.....	45
Tabela 6	Chicanas para Tanque 1 B.....	46
Tabela 7	Configuração atual dos agitadores.....	46
Tabela 8	Nova configuração sugerida.....	47
Tabela 9	Resultados dos cálculos para água e fluido de perfuração.....	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	14
1.2	OBJETIVO GERAL.....	14
1.2.1	OBJETIVO ESPECÍFICO.....	14
2	ASPECTOS TEÓRICOS.....	15
2.1	VISÃO GERAL.....	15
2.2	VISÃO ESPECÍFICA.....	18
2.2.1	DECANTADOR (SAND TRAP).....	19
2.2.2	TANQUE DO DESGASEIFICADOR.....	20
2.2.3	TANQUE INTERMEDIÁRIO.....	20
2.2.4	TANQUE DE SUÇÃO.....	20
2.2.5	TANQUE DE MISTURA.....	21
2.3	SUSPENSÃO, AGITAÇÃO E MISTURA DE FLUIDO DE PERFURAÇÃO.....	22
2.3.1	AGITADORES MECÂNICOS.....	22
2.3.2	IMPELIDORES.....	23
2.3.2.1	IMPELIDORES DE ESCOAMENTO RADIAL.....	24
2.3.2.2	IMPELIDORES DE ESCOAMENTO AXIAL.....	25
2.3.2.3	GEARBOX.....	26
2.3.2.4	HASTE.....	26
3	METODOLOGIA.....	28
3.1	PARÂMETROS DE PROJETO.....	28
3.1.1	RECOMENDAÇÕES.....	28
3.1.1.1	COMPARTIMENTO.....	30
3.1.1.2	DIMENSÃO DE TANQUES E COMPARTIMENTOS.....	30
3.1.1.3	INTERIOR DOS TANQUES.....	31
3.1.1.4	CHICANAS.....	31
3.1.1.5	DIMENSIONAMENTO DOS AGITADORES.....	32
3.1.2	PISTOLAS.....	34

3.1.2.1	PISTOLAS DE ALTA PRESSÃO.....	35
3.1.2.2	PISTOLAS DE BAIXA PRESSÃO.....	35
3.1.2.3	INSTALAÇÃO DAS PISTOLAS.....	36
3.1.2.4	DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE PISTOLAS.....	36
3.1.3	FUNIL MISTURADOR.....	37
3.1.3.1	INSTALAÇÃO E OPERAÇÃO.....	38
3.1.3.2	RECOMENDAÇÕES.....	39
4	INFORMAÇÕES COLETADAS NA SONDA.....	40
4.1	CAPACIDADE DA SONDA E VOLUMETRIA.....	40
4.2	EQUIPAMENTOS DE AGITAÇÃO.....	41
4.3	EQUIPAMENTOS DE MISTURA.....	42
4.4	BOMBAS CENTRÍFUGAS.....	43
4.5	DEMAIS EQUIPAMENTOS UTILIZADOS.....	44
5	APLICAÇÃO DA METOLOGIA.....	45
5.1	VOLUMETRIA MÍNIMA DOS TANQUES.....	45
5.2	NÚMERO DE AGITADORES/COMPARTIMENTOS E CHICANAS.....	45
5.3	DIMENSIONAMENTO DOS DIÂMETROS DOS IMPELIDORES.....	46
5.4	PISTOLAS.....	47
5.5	FUNIL MISTURADOR.....	47
5.6	BOMBAS CENTRÍFUGAS E ESCOAMENTO.....	48
5.7	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	48
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
	REFERÊNCIAS.....	52
	ANEXO.....	53

1 INTRODUÇÃO

A perfuração de poços de petróleo é uma atividade singular, que exige equipamentos adequados, mão de obra devidamente treinada e outros recursos de qualidade, para garantir o sucesso das operações e a segurança em nível máximo, o que demanda investimentos vultosos e manutenção constante.

Para a construção do poço, após definição das coordenadas geográficas obtidas por pesquisas da Geodésia e outros fatores relacionados à Geologia, a sonda de perfuração é instalada no local definido e executa a perfuração do poço, utilizando ferramentas como tubos de aço, de diversos diâmetros e características de construção, como peso, comprimento e forma geométrica, montando assim uma coluna de perfuração, além da broca, equipamento devidamente projetado para perfurar as camadas da formação litológica até chegar à profundidade das zonas produtoras de óleo e/ou gás. Além disso, é essencial a utilização de um sistema de fluido, a ser bombeado constantemente, para que a penetração da coluna de perfuração possa ocorrer de forma segura e eficiente. O bombeamento se dá por bombas alternativas, constituídas por variados componentes tais como pistões e camisas, que são projetados de acordo com a necessidade vazão e pressão de bombeio requeridas, conforme a situação exige.

A sonda de perfuração possui também um sistema de tanques e equipamentos extratores de sólidos para processamento constante do fluido que circula no sistema fechado poço-tanques de superfície. O dimensionamento dos equipamentos de superfície é dado em função da capacidade da profundidade máxima que a sonda pode atingir, ou seja, de acordo com a estrutura do mastro e o peso de coluna de perfuração que pode suportar. Para cada categoria de poços são empregadas sondas limitadas a tal profundidade, principalmente por razões econômicas e também para área de locação disponível. Assim, a volumetria de superfície deve atender ao critério de segurança de poço, cuja recomendação é que possua volume necessário para deslocar 1,5 a volumetria de poço, de acordo com a profundidade perfurada e o diâmetro da broca utilizada.

O fluido de perfuração tem uma participação decisiva neste ramo, contribuindo tanto na “qualidade” do poço perfurado como na segurança durante as operações. Durante a perfuração, o fluido tem como funções básicas garantir a estabilidade das paredes do poço, através da pressão exercida e também do reboco, resfriar a broca e efetuar a retirada dos cascalhos cortados por ela. Além disso, deve fornecer pressão hidrostática e hidrodinâmica suficientes para impedir o influxo indesejável de gases, óleo e água, e no caso de haver este incidente, é fundamental para o controle do kick, a retomada das condições normais e assim evitando o blowout. Em contrapartida, as pressões fornecidas pelo fluido, seja estático ou dinâmico, são limitadas a um range superior, de forma que não ocorra dano à formação e também evitar um fraturamento indesejável. Para tanto, o fluido é projetado para apresentar propriedades físicas e químicas desejáveis, afim de colaborar

positivamente com o êxito da perfuração. É classificado de acordo com a sua constituição, podendo ser tanto de base aquosa como base não aquosa. As propriedades físicas, controladas durante a perfuração, em ambos os sistemas, são o peso (lb/gal.), viscosidade Marsh (s), reologia e tixotropia, filtrado, teor de sólidos e areia. As propriedades químicas monitoradas para o fluido base aquosa são pH, salinidade, teor de cálcio, magnésio, dureza total, concentração de inibidor de hidratação de argilas, e concentração de argila incorporada ao sistema. Para o fluido de base não aquosa, as propriedades químicas monitoradas são concentração de cal hidratada no sistema (lb/bbl.), salinidade, além das propriedades físicas como razão óleo: água (em porcentagem) e estabilidade elétrica.

A fabricação do fluido de perfuração, independente da base aquosa/não aquosa, provém de uma mistura de insumos que fornecem ao fluido todas as propriedades necessárias à sua utilização. Para isto, são utilizados tanques de mistura, dotados de agitadores, linhas de sucção, linha de descarga, funil de mistura, válvulas e bombas centrífugas. Neste sistema, todos os insumos são adicionados e misturados com agitação constante, para contribuir com a solubilidade e homogeneização. Portanto, se faz necessário que os equipamentos empregados estejam devidamente dimensionados para a fabricação do volume de fluido e obter as melhores condições de mistura.

1.1 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho propõe a estudar um sistema de circulação e agitação de fluido de perfuração em uma sonda terrestre, para buscar a otimização dos equipamentos e sanar problemas esporadicamente encontrados durante as operações.

1.2 OBJETIVO GERAL

Examinar o sistema de circulação e agitação de tanques, equipamentos instalados e verificar se a configuração atual está de acordo com as necessidades de operação.

1.2.1 OBJETIVO ESPECÍFICO

Verificar se o dimensionamento dos equipamentos de superfície, relacionados ao tratamento e fabricação de fluidos, instalados em uma sonda de perfuração, está adequado às necessidades observadas sob o ponto de vista de segurança e contingência, e investigar o range que atende, de acordo com as características do sistema.

Equipamentos envolvidos: Agitadores, linhas, válvulas, bombas e volumetria de tanques.

2 ASPECTOS TEÓRICOS

2.1 Visão geral

A profundidade do poço a ser perfurado é definida em função do sistema de sustentação de carga. Este sistema é constituído de mastro ou torre, guincho, subestrutura e fundação. A carga correspondente ao peso da coluna de perfuração suspensa, formada por tubos de perfuração de diversos diâmetros e espessuras (p.ex. DP - Drill Pipe, HWDP – Heavy weight Drill Pipe e DC – Drill Collars), é transmitida para o mastro ou torre, sustentada pelo cabo do guincho, descarregada para a subestrutura e, na sequência, para a fundação [THOMAS, J. E., et al. FUNDAMENTOS DA ENGENHARIA DO PETRÓLEO. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001 – Adaptado pelo autor].

Figura 1 - Sonda de Perfuração Terrestre



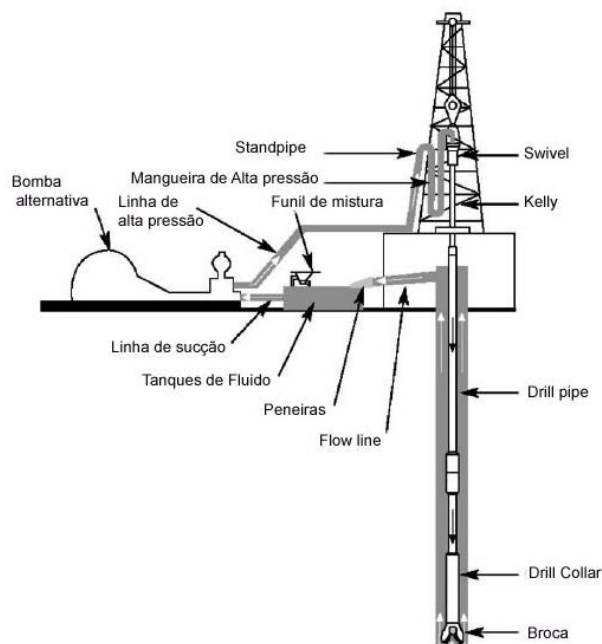
Fonte: O autor.

A Figura 1 mostra uma sonda de perfuração terrestre com o mastro, tubo da coluna de perfuração (Drill pipe) e a subestrutura, sendo que abaixo encontra-se a fundação. O guincho fica instalado na parte anterior ao mastro.

A volumetria mínima de superfície, para o correto dimensionamento dos tanques, é definida em função da profundidade do poço a ser perfurado, baseada na capacidade do sistema de carga da sonda. De acordo com as normas de segurança de poço, em situação de kick (influxo indesejável de fluidos da formação), o volume de fluido mínimo necessário na superfície deve ser, pelo menos, o dobro do volume do poço perfurado ($\text{Volume} = \text{capacidade} \times \text{profundidade}$). Portanto, a profundidade máxima de perfuração que uma sonda é capaz de atingir define o volume mínimo que os tanques devem possuir.

A Figura 2 apresenta, esquematicamente, o sistema de circulação de fluido de perfuração na sonda. A circulação inicia com o bombeio do fluido de perfuração para o poço, através de bombas alternativas, passando por tubulações de alta pressão até chegar no swivel, injetado pelo interior da coluna, passando pela broca e saindo pelo anular, arrastando os cascalhos de perfuração, gerados pelo corte da formação pela boca, vindos do fundo poço.

Figura 2 - Desenho de uma sonda de perfuração



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pg. 23. Adaptado pelo autor.

Na sequência, o fluido e os cascalhos descem pela flow line e chegam nas peneiras, iniciando a separação de sólidos e fluido, e onde começa o conjunto dos equipamentos de superfície. Este sistema inclui extratores de sólidos (peneiras, mud cleaners, centrífugas), tanques, bombas, linhas, válvulas, funil misturador e agitadores, que são instalados com o objetivo de receber o fluido do poço, resfriá-lo, realizar o tratamento adequado para que o mesmo retorne ao poço, nas melhores condições possíveis e exerça suas funções de acordo com as expectativas.

Figura 3 - Bomba alternativa



Fonte: O autor

A bomba alternativa, mostrada na Figura 3, geralmente do tipo Triplex (sistema de bombeamento com três pistões), opera com altas pressões, na

escala de milhares de psi (lb/in²), para vencer todas as perdas de carga e fornecer vazão necessária para realizar a perfuração segura e eficiente do poço.

A configuração das camisas e pistões são responsáveis pelo limite de vazão e pressão a ser fornecido pela bomba alternativa. Esta necessidade provém da geometria do poço, diâmetro da broca e profundidade a ser atingida.

2.2 Visão específica

O fluido de perfuração é uma solução de base aquosa ou não aquosa, que envolve empregar produtos químicos como eletrólitos, adensantes, alcalinizantes, inibidores de hidratação de argilas (em caso de base aquosa) e material polimérico, em determinada quantidade e concentração, até que se obtenha as propriedades adequadas para que o poço seja perfurado de forma rápida, segura e eficiente. O volume tanto pode ser preparado no tanque da sonda como pode ser recebido pronto, da estação de fluidos. O preparo consiste em empregar um tanque de mistura que possui linhas de sucção e descarga, bomba centrífuga e funil de mistura, além de necessitar um sistema de agitação para homogeneizar a solução e manter a suspensão de sólidos, enquanto a reologia adequada não é obtida. Depois de preparado, em batelada, pode ser transferido para o sistema de tanques ativos (que pertencem ao ciclo poço-superfície) ou então ficar agitando como volume reserva.

Outros tanques pertencentes ao sistema ativo também podem ter linhas de sucção e descarga, o que é desejável, quando um tratamento se faz necessário diretamente no volume em circulação. Com exceção do tanque decantador, todos os demais tanques ou compartimentos devem possuir impelidores e pistolas de lama, para promover movimento do fluido, independente da circulação poço-superfície.

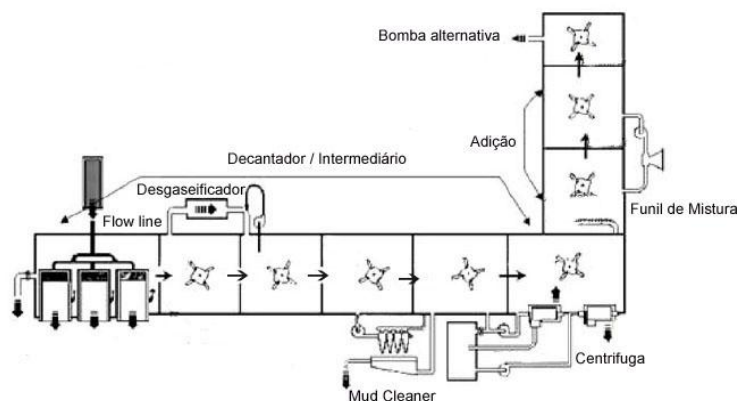
Portanto, esta solução química utilizada na perfuração possui um teor de sólidos considerável, dependendo das características necessárias do projeto. Durante a perfuração, sólidos finos são agregados ao fluido, por afinidade química ou física, aumentando significativamente a porcentagem de sólidos do sistema e, conseqüentemente, alterando algumas propriedades como peso, reologia, tixotropia, além de potencializar um dano a formação, obstruindo a garganta de poros da zona produtora. Assim, é justificado o emprego de extratores de sólidos tais como peneiras, mud cleaner, centrífuga, para retirar o material agregado e manter as propriedades desejadas. Outro equipamento que é fundamental é o desgaseificador, cuja função é, em caso de atravessar uma zona de gás, processar todo o fluido do sistema para que ocorra a separação de qualquer alíquota que fique trapeada, evitando um abaixamento do peso do sistema que pode ocasionar um kick (influxo indesejável de fluido da formação), e em situações extremas, um blowout (influxo não controlado), este podendo causar um trágico acidente.

O peso do fluido varia de acordo com a pressão de poros e estabilidade da rocha atravessada, que é cuidadosamente estudado durante o projeto, para garantir a segurança na perfuração e evitar colapso das paredes do poço. Por isso, os agitadores e bombas de sucção devem ser dimensionadas para trabalhar em um range variado de peso, além, é claro, de que a viscosidade do sistema também varia, nem sempre de forma intencional.

Configuração do sistema utilizado

Em uma sonda de perfuração operando, a configuração dos compartimentos é organizada da seguinte maneira, representado esquematicamente pela Figura 4:

Figura 4 - Arranjo típico de equipamentos e tanques



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005.
Pg. 101. Adaptado pelo autor.

2.2.1 Decantador (Sand Trap): o volume recebido do poço, passando pela flow line, é processado diretamente nas peneiras (ponto de corte é até 74 microns de diâmetro de sólido), cujas telas empregadas tem variados mesh's (80 a 200), de acordo com a broca utilizada e suas características (diâmetro, modelo) e, secundariamente, conforme a vazão da bomba alternativa empregada para circular o volume do sistema tanques e poço. O fluido passa pelas telas da peneira, e os sólidos cujo diâmetro de corte são retidos e descartados do sistema, para uma caixa coletora. Os sólidos mais finos, que passam pelas aberturas das telas, são carregados pelo fluido e são direcionados ao tanque decantador – Sand Trap – que tem um tempo de residência e o deslocamento do fluido para o tanque seguinte é realizado por transbordamento, ou seja, o volume que entra provoca um excesso que passa por gravidade para o tanque seguinte do sistema.

Baseado na teoria consagrada pela indústria do petróleo, esta configuração é para separar os sólidos grosseiros, que por princípio decantariam e seriam retidos no fundo do tanque, passando apenas o volume de fluido, livre dos sólidos decantados. Entretanto, a primeira observação é que este tanque recebe fluido com sólidos mais finos, que não foram descartados através das telas das peneiras, além do fato de que o volume de fluido existente no tanque de decantação, que é o mesmo utilizado no sistema, possui propriedades de densidade, reologia e tixotropia, que ao longo do tempo vai se consolidando e, na prática, torna-se gelificado, impedindo que haja a precipitação dos sólidos.

2.2.2 Tanque do desgaseificador – de acordo com o *Drilling Fluids Processing Handbook* [ASME - *Drilling Fluids Processing Handbook*. Elsevier, 2005. Pg. 102], este tanque é dedicado para receber o fluido do decantador e processa o volume com o equipamento para separar o gás trapeado do fluido de perfuração. Caso não haja decantador, a sucção deve ser instalada no primeiro tanque da sequência. Possui uma linha de sucção para o desgaseificador com bomba centrífuga que succiona o fluido para o extrator de gás, e o descarte é para o tanque seqüencial.

Na prática, nem todas as sondas possuem o desgaseificador instalado, portanto, este tanque é utilizado como intermediário, aumentando o tempo de residência do volume na superfície e, quando é o caso, troca calor com o ambiente e diminui sua temperatura, para retornar ao poço em melhores condições de resfriar o poço.

2.2.3 Tanque intermediário: possui uma linha de sucção, pertencente ao segundo extrator de sólidos – mud cleaner (ponto de corte máximo é em torno de 20 microns) – que opera com hidrociclones para separar outro range de sólidos indesejáveis (areia fina e sólidos finos floculados) agregados ao fluido, que passaram pelas telas das peneiras. O volume deste compartimento é succionado através de bomba centrífuga para ser processamento pelos hidrociclones e os sólidos são novamente peneirados, agora com telas de malha mais fina (mesh 270 a 325), sendo o descarte do fluido, obrigatoriamente, no tanque seguinte. Caso este processador não esteja disponível, o outro equipamento a ser utilizado para extração de sólidos é a centrífuga (ponto de corte é de até 2 microns de diâmetro de sólido), sendo o último da sequência. Além disso, uma quantidade de tanques intermediários seqüenciais servem para melhor homogeneização do volume da superfície e também para resfriamento do volume mais quente recebido nas peneiras, devido à troca de calor com a temperatura de fundo do poço e também devido à troca de calor com a coluna em constante atrito com as paredes do poço, sendo mais pronunciado este fenômeno quando se trata de poços inclinados (direcionais e horizontais).

Outro arranjo desejável, porém, não obrigatório, é que haja sucção e descarga, através da linha que passa pelo funil de mistura, para realizar tratamento químico diretamente no sistema em circulação, além de oferecer mais flexibilidade em relação às transferências de volume de fluido de um tanque a outro e também para transferência de volume diretamente para carretas, largamente utilizadas no transporte de fluidos, em campos terrestres.

2.2.4 Tanque de sucção: é deste compartimento que o fluido parte para a bomba alternativa, bombeando para o dentro do poço. Neste ponto da superfície, todo o fluido que retornou do poço deve estar homogeneizado, devidamente processado pelos extratores de sólidos e suficientemente resfriado, com temperatura mais próxima possível da temperatura de superfície, principalmente quando se trata de poços HT (High Temperature). Deve ter um sistema de sucção e descarga instalado, passando pelo funil

misturador, em caso de necessidade de adensamento rápido, além, é claro, de total agitação para manter o volume homogêneo. Dificilmente possui extrator de sólido, salvo em casos extremos, como poucos compartimentos existentes. Pode receber a descarga da centrífuga extratora, mas é prudente que se garanta o peso adequado do volume existente para evitar desbalanceamento do peso do sistema.

2.2.5 Tanque de mistura: neste tanque prepara-se o volume a ser adicionado no sistema, também pode separar uma parte para tratamento como preparar um tampão (por exemplo, volume de fluido com alta concentração de adensante ou volume de alta reologia) a ser utilizado em determinadas situações da perfuração. Opera em batelada, necessita um sistema bastante eficiente de agitação e normalmente fica isolado do sistema ativo.

2.3 Suspensão, agitação, e mistura de fluido de perfuração [ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005. Cap. 10. Interpretação do autor.]

Princípios básicos de equipamentos de agitação

O dimensionamento e instalação adequados permitem a mistura dos aditivos com velocidade ótima e mínimos problemas. A ideia do sistema de superfície é permitir a manutenção adequada do fluido antes deste ser bombeado para o poço; isto é realizado através da efetiva utilização dos equipamentos de controle de sólidos que removem os sólidos indesejados e recuperá-lo tanto quanto for possível.

Secundariamente para o processo de remoção de sólidos é a adição de produtos químicos e a rápida e perfeita mistura dos materiais de fluido. Esta agitação requer execução efetiva de ambas as tarefas. Majoritariamente, os equipamentos de agitação de fluidos de perfuração devem ser usados para suspender sólidos nos tanques de superfície e manter a homogeneidade do sistema. Duas maneiras de se conseguir isso, e ambos os recursos são largamente utilizados:

- . Agitadores mecânicos;
- . Dispositivo motor (mud guns), ou pistolas.

Conforme citado anteriormente, aditivos de fluido de perfuração tais como bentonita, baritina, LCM, polímeros e cloretos devem ser “molhados” antes de serem “dispersos” completamente no sistema. Uma introdução adequada destes materiais ao sistema é tão importante e podem acrescentar eficiência na perfuração tanto quanto diminuir a quantidade a ser utilizada. Para conseguir a melhor performance, a adição correta na superfície terá melhor efetividade no poço. Diferentes tecnologias são descritas para agitação, adição, hidratação, cisalhamento e mistura de aditivos no fluido de perfuração e atingir maior eficiência.

A idéia dos equipamentos agitadores é a suspensão de sólidos, mistura perfeita dos materiais de fluido e manter a homogeneidade do sistema nos tanques de superfície.

2.3.1 Agitadores mecânicos

São utilizados extensivamente nos tanques de fluidos da superfície. Indiferentemente do fabricante, estes equipamentos têm componentes similares, a serem descritos abaixo:

- . Drive motor - bomba centrífuga;
- . Geared reducer (gearbox) – redutores;
- . Gearbox output shaft – caixa de engrenagem de transmissão de saída;
- . Impelidor.

Os objetivos de um projeto adequado de sistema de agitação mecânica é a suspensão uniforme dos sólidos, aplicação adequada de cisalhamento, homogeneidade do sistema de fluido na superfície e otimização econômica do uso da potência.

2.3.2 Impelidores

Também chamados de turbinas, convertem energia mecânica em movimento de fluido, bem como o impelidor de uma bomba centrífuga. Consideráveis estudos têm sido dedicados para adequar os projetos de impelidores e também sua instalação. Todos impelidores transmitem potência para o fluido de duas formas:

- . Capacidade de bombeamento;
- . Capacidade de cisalhamento.

O desenho do impelidor promove uma destas formas sacrificando efetivamente a outra. A quantidade de fluido que é “movido” por um impelidor é a capacidade de bombeamento, ou capacidade de deslocamento, e muitos fabricantes tem submetido a exaustivos testes para determinar as características de escoamento e capacidade para cada tipo e tamanho de impelidor. Menos previsível é a taxa de cisalhamento. Isto deveria ser visto da forma de um gradiente de velocidade do fluido pela distância. Esta taxa pode ser medida para um ponto de alguma distância do impelidor tipo placa, e máximo e valores médios calculados. Limite do cisalhamento – Shear stress – é o produto da taxa de cisalhamento multiplicado pela propriedade viscosa do fluido. Com fluido Newtoniano em regime laminar, limite de cisalhamento e taxa de cisalhamento são sinônimos; de qualquer maneira, contudo, ainda que, a maioria dos fluidos de perfuração são não-newtonianos e, conseqüentemente, as previsões obtidas em bancada são menos expressivas para a aplicação do mundo real.

Quando se discute agitação necessária, a taxa de cisalhamento depende de uma série de parâmetros, tais como:

- . Tipo de impelidor;
- . Velocidade de giro;
- . Distância das paredes do compartimento;
- . Utilização ou não de chicanas;
- . Concentração;
- . Distribuição do tamanho de partículas;
- . Densidade do fluido;
- . Viscosidade plástica;
- . Força gel;

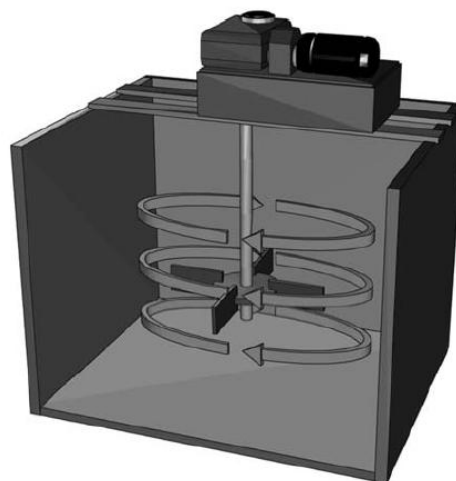
. Outros.

A modelagem de laboratório sugere que adequada agitação de componentes do fluido de perfuração é executada através de correntes turbulentas presente em áreas de turbulência criadas pelo escoamento do fluido e associadas à fronteira do fluido dentro do compartimento.

A configuração do impelidor vai depender do tipo e da geometria do tanque. O escoamento resultante do impelidor projetado pode ser classificado predominantemente como AXIAL ou RADIAL. Isto descreve o tipo de escoamento produzido dentro do compartimento. Impelidores podem ser construídos a partir de duas pás, porém no ramo de fluido de perfuração e sua aplicação são usualmente utilizadas 4 ou mais pás.

2.3.2.1 Impelidores de escoamento RADIAL

Figura 5 - Fluxo radial



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook.
Elsevier, 2005; Pg. 220.

Ocorre quando as placas dos impelidores estão montados verticalmente ou perpendicular ao plano do disco. Nesta configuração, o fluido é movimentado no sentido horizontal, padrão circular dentro do compartimento. Teoricamente, o sentido de escoamento será de baixo para cima, quando a porção de líquido tocar a parede do tanque e assim mantém a suspensão uniforme no tanque. Quando utilizado sozinho, o impelidor do tipo radial deve ser alocado perto do fundo do tanque, tipicamente entre 12 inches (30 cm). Para uma agitação uniforme, tanto para a camada superior e também a inferior, a profundidade do tanque deve estar limitada em, aproximadamente, 6 feet (1,8 m).

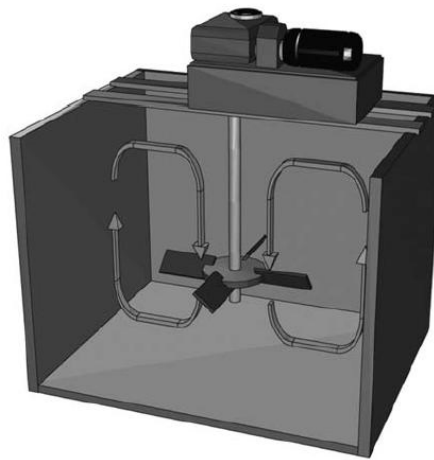
Em ocasião que seja instalado superdimensionado no tanque, este tipo de impelidor pode gerar duas zonas de fluido em movimento: uma acima e outra abaixo do impelidor. As zonas superior e inferior compartilham um limite e

podem interferir no escoamento entre ambos, diminuindo a transmissão ótima de potência, variando o grau de efetividade.

2.3.2.2 Impelidores de escoamento AXIAL

As placas do impelidor estão dispostas em ângulo entre 45 a 60° - em relação à vertical, induzindo um movimento de fluido na direção AXIAL (Figura 6) - direção do eixo - no sentido de cima para baixo, ou vice-versa, dependendo da configuração das pás e do sentido da rotação do eixo.

Figura 6 - Fluxo axial



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook.
Elsevier, 2005; Pg 221.

Quando utilizado sozinho, a recomendação é que o impelidor seja posicionado entre $2/3$ a $3/4$ do seu diâmetro, referente à distância entre o disco e o fundo do tanque. A direção de escoamento do fluido também tem uma parcela de escoamento radial dentro do compartimento.

A combinação de ambos (radial e axial) os escoamentos ocasionam maior poder de mistura, na maioria das vezes. Tanques com profundidade maior que 6 ft (1,8 m) necessitam de algum tipo de impelidor de escoamento axial, além de requerer mais de um impelidor por eixo.

A maioria dos impelidores axiais tem um ângulo constante das placas produzem maior escoamento neste tipo de placa e menor em direção ao eixo; perde a força de bombeamento, em contrapartida, induz maior força cisalhante.

Importante destacar que alguns impelidores variam a geometria e inclinação das pás, promovendo maior ou menor grau o escoamento em ambas as direções, sendo RADIAL e AXIAL. Este tipo de impelidor, geralmente, fornecem menos força cisalhante para o fluido do que tradicionalmente ocorre com as pás de plano simples - regulares - entretanto, o compartimento deve ser muito bem conhecido, para avaliar o correto grau de cisalhamento.

2.3.2.3 Gearbox: há muitos tipos de redutores apropriados para ser utilizado em agitadores mecânicos. Os principais a serem considerados: parafuso / tambor (ângulo reto) e helicoidal (ângulo reto ou paralelo). Não há evidência de uma ou outra ser melhor ou superior, no entanto especialistas afirmam que o tipo helicoidal exige menor potência, portanto são utilizadas com mais frequência em relação ao parafuso / tambor, que oferece uma simples redução de velocidade. A vantagem do helicoidal é que pode ser montado em ângulo reto ou paralelo ao eixo do impelidor, além de possuir redução simples, dupla ou tripla da velocidade. Ambos têm boa eficiência e tem vantagens em relação à manutenção - economia de operação, visando prolongamento de vida útil do equipamento. A manutenção recomendada neste equipamento, na parte superior, para evitar o desgaste prematuro dos selos e também verificar o barulho excessivo, além da elevada temperatura.

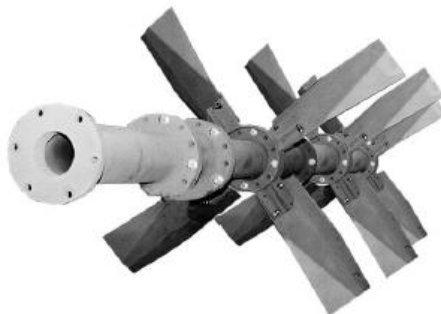
Figura 7 - Conjunto motor - gearbox - haste - pás



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook.
Elsevier, 2005; Pág. 216.

2.3.2.4 Haste: pode ser oca ou maciça, é construída por diversos materiais, sendo o mais utilizado aço-carbono. São conectadas a uma união rígida com o eixo de saída do redutor. Hastes ocas (Figura 9) são adaptadas para tanques profundos; podem ser adaptados a um flange e parafusados juntos, útil quando a altura superior é limitada.

Figura 8 - Haste oca



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook.
Elsevier, 2005; Pg. 216.

A vantagem da haste oca é menor inclinação, comparando com as hastes maciças, em mesmo corte transversal; portanto, para a mesma massa de material, hastes ocas resistem a inclinação imposta de ponta a ponta do seu diâmetro. Portanto, são duras e firmes como as hastes sólidas de igual ou menor massa.

Quando comprimentos de hastes são iguais, a redução de massa reduz o esforço da união do redutor. Velocidade crítica - vibração causada pela flexão da haste no início do movimento (inércia) - é também menor quando se trata de haste oca.

3 METODOLOGIA

Para determinar o tamanho e posicionamento dos agitadores, potência de motores, diâmetro das pistolas e o diâmetro da restrição sob o funil de mistura, e também avaliar a necessidade de uso das chicanas, foi utilizado o método apresentado no livro “Drilling Fluids Processing” [ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Cap 10], com dados de gráficos e tabelas, além das recomendações fornecidas na mesma seção.

Em relação aos cálculos de bombas e escoamento, foram aplicados os conhecimentos adquiridos em Fenômenos de Transporte, com utilização de tabelas e equações fornecidas pelo manual de engenharia química [PERRY & CHILTON, Manual de engenharia química. Ed. Guanabara Dois, 1980] e outras referências de livros texto.

3.1 Parâmetros de projeto

3.1.1 Recomendações

Informações a serem conhecidas para correto dimensionamento do sistema de agitação:

- . Dimensão dos tanques e compartimentos;
- . Simetria dos compartimentos para instalação;
- . Finalidade dos tanques (mistura, sucção, remoção de sólidos);
- . Considerar a máxima densidade de fluido a ser utilizado;

Os parâmetros citados servem para que o projeto defina o tipo de impelidor e a quantidade de energia requerida; como mencionado anteriormente, são dois os tipos de escoamento provocados pelos agitadores mecânicos: AXIAL e RADIAL.

Para a escolha correta do equipamento, considera-se que os impelidores de fluxo radial, utilizadas na indústria de perfuração, são tipicamente fabricados com aço carbono e com placas retangulares, normalmente entre 3 a 4 placas por impelidor, soldadas em ângulo reto, referente ao disco e paralelas em relação ao eixo.

Para tanques quadrados e/ou retangulares, propriamente dimensionados para fluxo radial, irão produzir algum fluxo axial quando o volume de fluido deslocado se chocar com as paredes do tanque. Assim como todo tanque de geometria não circular, ocorrerão “zonas mortas”, as quais não são eliminadas facilmente; portanto, quando perfeitamente dimensionados, elas são desprezíveis. O impelidor deve ser instalado de forma que fique em uma distância de 3 a 6 in (7.5 a 15 cm) do fundo do tanque (PARA IMPELIDOR DE FLUXO RADIAL). Caso esta recomendação não seja observada, o volume de fluido não irá atingir o nível abaixo do impelidor, formando uma espécie de “volume morto”, o qual não só reduz o volume útil do tanque como também “incrementa” o custo de material químico a ser utilizado. Além disso, os sólidos precipitados por falta de agitação, terão que ser removidos do tanque durante a

limpeza e desmobilização dos equipamentos. Entretanto, não se pode enfatizar o suficiente que a boa agitação resulte do dimensionamento adequado e da colocação correta do impulsor.

Em tanques profundos, nos quais são utilizados dois ou mais impelidores em um só eixo, este deve ser “estabilizado” no fundo do tanque, para evitar “ a vibração ou balanço excessivo” do eixo, além de prolongar a vida útil da união eixo-gearbox. Ao utilizar impelidores de fluxo axial, há maior flexibilidade na escolha do comprimento do eixo, comparando com o caso do fluxo radial. Um bom planejamento de instalação será, usualmente, com impelidor de fluxo axial montado entre $2/3$ e $3/4$ do diâmetro, distante do fundo do tanque.

Um posicionamento adequado do agitador fará melhor uso da geometria do tanque para desviar o fluxo do fluido do impelidor, em direção ao fundo e se chocando contra a parede do compartimento. Recomenda-se que o eixo do agitador seja estabilizado no fundo do tanque.

No caso de agitadores que causam fluxo axial, sugere-se que mantenha o nível de fluido no limite máximo superior, para evitar formação de vórtice (Figura 10) e “trapeamento” de ar no fluido - transferência de massa ar e líquido; se este equipamento for montado em nível muito baixo, deve ocorrer o desgaste prematuro do fundo do tanque, o qual levaria a uma excessiva carga erosiva. Outra consequência de uma montagem inadequada é a ineficiência de agitação do fluido na superfície, levando a uma pobre homogeneização do sistema.

Figura 9 - Formação de vórtice



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pág. 225

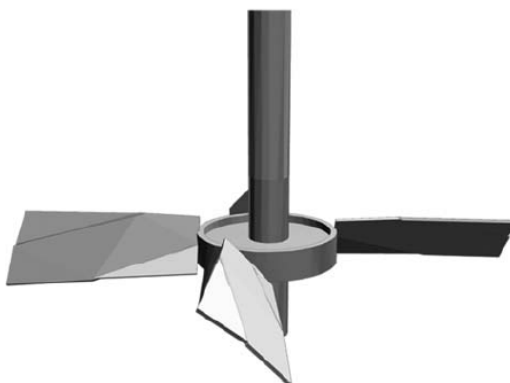
Anteparos de formas variáveis partem do ângulo de contato na face do impelidor. Requerem menor potência para movimentar a mesma quantidade de fluido, comparando com os de fluxo puramente axial ou radial; por isso, surgem as combinações entre redutores / motores, ou redutores de alta capacidade de torque em conjunto com pequenos motores, tanto para agitador axial quanto radial. Geralmente, este tipo é utilizado em compartimentos de grandes capacidades.

A força cisalhante é desejável em alguns compartimentos de fluido do sistema, mas não são necessários em todos eles. Quando se trata de

“resfriamento” ou em tanque de mistura, o cisalhamento auxilia na rapidez do processo de mistura e homogeneização. Para tanques de armazenamento, não haverá necessidade de muita força cisalhante.

O impelidor do tipo hélice (contorcido), mostrado na Figura 7, tem uma vantagem adicional de necessidade de menor potência por unidade de fluido deslocado, assim são utilizados preferencialmente para este fim. O acoplamento e dimensionamento dos impelidores, seja radial, axial, ou contorcido, são extremamente importantes.

Figura 10 - Impelidor com pás contorcidas - hélice



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pág. 219.

Se todas as fases do projeto e instalação forem corretas e os agitadores forem inadequadamente instalados, o resultado alcançado pode não ser o previsto pelo projeto, comprometendo a eficiência.

3.1.1.1 Compartimento

Agitadores trabalham melhor se forem instalados em compartimentos arredondados ou quadrados. Os arredondados são ideais por várias razões, inclusive por não possuírem zonas mortas nos quais os sólidos podem se acumular. A limpeza destes são mais facilmente executadas, em comparação aos tanques de geometria quadrada ou retangular. A forma simétrica favorece a mistura, além de ocupar menor espaço efetivo; necessitam de chicanas para evitar formação de vórtice e promovem melhor suspensão, além de otimizar o custo de fabricação.

3.1.1.2 Dimensão de tanques e compartimentos

O dimensionamento adequado do agitador é baseado no limite superior da quantidade de fluido a ser misturado. Portanto, o conhecimento das dimensões do tanque é essencial. Na maioria dos casos, todos os compartimentos, exceto o decantador (sand trap), necessitam de agitadores. Alguns sistemas podem converter o decantador (sand trap) para um tanque ativo. Neste caso, a instalação do agitador é necessária. Isso pode ser problemático, considerando que muitos sistemas possuem peneiras montadas

acima deles, o que implica em pouco ou nenhum espaço para que sejam fixados. Caso seja imprescindível um sistema de agitação, sem que haja espaço para instalação dos equipamentos, uma alternativa é utilizar pistolas (mud guns) que irão proporcionar o movimento de mistura no compartimento.

3.1.1.3 Interior dos tanques

Uma importante consideração ao construir os tanques de fluido é o arranjo interno de tubos. Se forem posicionados de forma errada, a agitação ótima pode ser comprometida, impossibilitando atingir o objetivo proposto. Importante atentar para que, tanto tubos ou outro suporte estrutural, não interfiram/obstruam o fluxo da porção de fluido agitada, podendo gerar zona morta e, conseqüentemente, deposição de sólidos.

3.1.1.4 Chicanas

Em tanques de forma arredondadas ou cilíndricas, as chicanas são essenciais, pois convertem o movimento giratório para um regime de fluxo que ajuda a suspender os sólidos e manter a homogeneidade. Também evitam a formação de vórtice; em ambos os casos, as chicanas promovem uma aplicação eficiente da potência.

Figura 11 - Chicanas



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pág. 228.

A largura da chicana deve estar entre $1/10$ a $1/12$ do diâmetro do tanque e deve ser posicionada a 90° , ao redor do tanque. Geralmente tem maior efeito quando localizadas a uma curta distância da parede do vaso. Um intervalo entre $1/60$ a $1/72$ do diâmetro do vaso é recomendada entre a chicana e a parede do vaso, no caso de geometria cilíndrica.

Em tanques cuja geometria é retangular/quadrada, o efeito dos “cantos” induz o mesmo resultado das chicanas para o tanque circular. No entanto, a relação desproporcional entre comprimento e largura, especificamente para tanques retangulares, pode gerar as zonas mortas nas quais a energia de agitação não surte o efeito desejado. Estrategicamente, chicanas fixadas em um ponto médio do comprimento poderá neutralizar este efeito negativo.

Quando a razão entre comprimento e largura exceder (1,5:1), mais de um agitador é recomendado.

Alguns fabricantes sugerem que chicanas sejam instaladas ao redor de cada impelidor para otimizar a agitação e prevenir o vórtice. Uma típica placa (anteparo), com espessura de $\frac{1}{2}$ a $\frac{3}{4}$ " por 12" de largura e extensão (30 x 30 x 1,25) cm, chegando aproximadamente a 6" (15 cm) acima da placa do agitador (fluxo radial). Quatro delas são instaladas ao redor cada agitador com 90° de espaçamento, alinhados entre o centro do eixo do impelidor e os quatro cantos do tanque; para um tanque retangular no qual tenha dois ou mais agitadores, o tanque é dividido, imaginariamente, em compartimentos quadrados e a chicana fica direcionada para cada um dos cantos.

3.1.1.5 Dimensionamento dos agitadores

A escolha de cada agitador / impelidor a ser utilizado, bem como seu adequado dimensionamento, e também de seus componentes, é essencial para se obter a melhor performance do sistema. Cada compartimento considerado e sua respectiva dimensão determinada, o diâmetro do impelidor e a correspondente potência deve ser calculada.

A razão R entre o volume máximo de fluido no compartimento (V_{tanque} , gal.) pelo volume deslocado de fluido (D , gpm), em função da velocidade angular do eixo (rpm) e do diâmetro do impelidor utilizado (in, mm). Sendo R convertido em segundos ($R \times 60$), se obtém a Turnover rate (TOR), (Eq. (1)), na qual varia para cada objetivo do compartimento, conforme mostrado na Tabela 1.

$$\text{TOR} = (V_{\text{tanque}} / D) \times 60 \text{ (s)} \quad (\text{Eq. 1})$$

Tabela 1 - Valores típicos de TOR (s)

Tipo de Impelidor	Intermediário	Adição	Sucção	Reserva	Mistura
Inclinado/Placa	50-75	50-75	65-85	50-80	40-65

Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005. Pág. 229. Adaptado pelo autor.

Desta maneira, fica estabelecido o range do valor ótimo de TOR (s) para cada compartimento, de acordo com a sua função no sistema de tanques de superfície, a serem adotados como referência. Este tempo, em segundos, é o intervalo necessário para que o volume de fluido tenha o ciclo completo dentro do compartimento considerado.

Um detalhe importante é que sejam adotados critérios para evitar os valores extremos das faixas recomendadas. no limite inferior, a chance de formação de vórtice e possível "entrada de ar no sistema" é bem considerável. Para valores próximos ao limite superior, a suspensão adequada de sólidos pode ser comprometida - poderão começar a sedimentar.

A Tabela 2 relaciona diversos diâmetros de impelidores, considerando os três tipos de pás (plano, inclinado e hélice), em vazões com as unidades em galões (gpm) e litros (lpm), em uma frequência de 60 Hz. Assim, um agitador

com diâmetro e tipo de placa específicos, apresenta uma determinada vazão ou deslocamento de volume (D).

Daí, sabendo a capacidade do compartimento (gal ou L), aplica-se a Eq. (1), obtém-se o valor de TOR, e compara-se com o valor recomendado para cada tipo de compartimento.

Tabela 2 – Relação volume deslocado (D) e diâmetro do impelidor (60 Hz)

Diâmetro		Placa		Inclinado		Hélice	
in	m m	gpm	lpm	gpm	lpm	gpm	lpm
20	508	1051	3978	909	3441	N/A	N/A
24	610	1941	7347	1645	6226	N/A	N/A
28	711	2839	10746	2468	9341	5861	22185
32	813	4635	17543	3764	14247	N/A	N/A
34	864	N/A	N/A	N/A	N/A	8790	33270
36	914	6273	23743	5402	20447	9180	34746
38	965	7342	27789	6343	24008	10604	40136
40	1016	8411	31836	7284	27570	N/A	N/A
42	1067	N/A	N/A	N/A	N/A	13940	52762
44	1118	11300	42771	9928	37577	N/A	N/A
45	1143	N/A	N/A	N/A	N/A	16812	63633
48	1219	14401	54508	12512	47358	20020	75776
52	1321	18630	70515	16100	60939	24852	94063
54	1372	N/A	N/A	N/A	N/A	27602	104475
56	1422	NA	NA	NA	NA	30353	114887
60	1524	NA	NA	NA	NA	36567	138404
64	1626	NA	NA	NA	NA	43533	164771

Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pág. 229.

No caso de ter a capacidade máxima do compartimento (V_{Tanque}), a função que o mesmo terá no sistema – mistura, sucção, intermediário – e considerando a faixa de TOR definida na Tabela 1, pode-se determinar o diâmetro do impelidor a ser utilizado, também através da Eq. (1).

Para o caso do modelo hélice, valores devem ser significativamente mais rápidos - números pequenos - para alcançar os mesmos resultados, mas por causa do projeto do impelidor, entrada de ar no sistema é pouco provável. Nos compartimentos simétricos, o fluido tem uma proximidade de igual distância de deslocamento do centro do eixo do impelidor ou do impelidor tipo placa antes do contato com a parede do compartimento. Os agitadores devem estar localizados na posição mais central possível do tanque.

A melhor performance do equipamento ocorre quando se trata de compartimento circular ou na forma quadrada; Tanques retangulares devem ser convertidos, sempre que possível, mesmo somente para efeitos de cálculos, o mais próximo da situação de geometria quadrada.

Importante recomendação é que a altura máxima real de fluidos no tanque não ultrapasse 1 ft (3/10 m) abaixo da altura nominal; isto serve para como fator de segurança ou capacidade de emergência, nível de instalação ou balanço devido às plataformas flutuantes. Observação importante: Tanque com profundidade maior que 6 ft (1,8 m) o modelo plano não deve ser utilizado; portanto, são escolhidos os modelos inclinados.

Se o peso máximo do fluido a ser utilizado na operação não é conhecido, é prudente que seja considerado como base de cálculo o peso de 20 (lb/gal). Este parâmetro será suficiente para ser considerado como fator de segurança, sendo possível utilizar o sistema sem a preocupação de

sobrecarregar o motor. Porém, raramente irá se operar com peso de fluido acima de 12 (lb/gal). Isto vai depender, estritamente, da profundidade e da pressão de poros do reservatório.

A definição da potência do motor, para girar o eixo do impelidor, em função do diâmetro do agitador e peso máximo de fluido (lb/gal) a ser utilizado na perfuração. Normalmente, dimensiona-se baseado no maior valor possível, A tabela 3 apresenta a relação entre os parâmetros citados:

Tabela 3 - Relação entre diâmetro do impelidor e potência do motor

Potência		Diâmetro do Impelidor							
		20 lb/gal		16 lb/gal		12 lb/gal		8.3 lb/gal	
hp	KW	in	cm	in	cm	in	cm	in	cm
1.0	0.7	22	56	24	61	26	66	29	74
2.0	1.5	26	66	28	71	30	76	32	81
3.0	2.2	29	74	31	77	33	83	34	86
5.0	3.7	32	81	34	86	36	91	38	97
7.5	5.6	35	89	37	94	39	100	42	107
10.0	7.5	37	94	40	102	43	109	46	117
15.0	11.2	42	107	45	114	49	123	51	130
20.0	14.9	46	117	50	126				
25.0	18.6	49	124						
30.0	2.4								

Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pág. 229. Adaptado pelo autor.

Portanto, conhecendo o diâmetro do impelidor e peso máximo de fluido a ser utilizado, obtém-se a potência do motor. O redutor deverá reduzir a velocidade angular do motor (rpm) para a faixa de velocidade angular recomendada do eixo (50 a 90 rpm).

3.1.2 Pistolas

Tanto as pistolas de alta pressão como de baixa pressão são utilizadas para movimentar o fluido dos tanques através de jatos. Pressão e escoamento são ocasionadas por bombas centrífugas, ou até mesmo, com menor frequência, por bombas alternativas.

Figura 12 - Pistola instalada em um tanque



Fonte: O autor.

Considerando duas possibilidades de origem e destino de bombeio:

- a. partindo do tanque de mistura;
- b. partindo de um tanque com fluido já processado pelos extratores de sólidos;

Quando se bombeia continuamente o fluido com alto teor de sólidos, os quais ainda não foram processados pelos extratores, há possibilidade de que os sólidos - principalmente areia - pode-se resultar em abrasão, tanto na parte interna da bomba centrífuga como nos jatos das pistolas. Os fabricantes já fornecem material plástico com alta resistência à abrasão para aumentar a vida útil e reduzir a frequência de manutenção. Caso estas peças não sejam substituídas quando necessário, a eficiência da agitação diminui consideravelmente.

Outro argumento que reforça a evitar o bombeamento de fluido com alto teor de sólidos é que podem-se degradar as partículas, fazendo com que passem pelo ponto de corte dos extratores, transformando-se em sólidos finos e aumentando a necessidade de diluição do sistema, além de reduzir a eficiência de processamento dos extratores.

O bombeamento de fluido já processado pelos extratores, portanto com uma carga menor de sólidos, é desejável por duas razões: primeiro, porque previne que a circulação continua de fluido seja isenta de sólidos de perfuração, e também porque mantém a eficiência das pistolas e diminui a incidência de abrasivos no interior da bomba centrífuga e também dos jatos, conseqüentemente aumentando a vida útil dos equipamentos. Segundo, porque o fluido mais "limpo" fica localizado no tanque a ser misturado. Especialmente efetivo quando a concentração de sólidos é alta ou flutuantes (p.ex. quando se perfura com alta taxa de penetração e/ou cascalhos retornam à superfície).

3.1.2.1 Pistolas de alta pressão

Valores típicos de 3000 a 6000 psi, necessitando de tubos reforçados. A faixa de diâmetros dos jatos varia entre $\frac{1}{4}$ " a $\frac{3}{4}$ ".

Sistema de alta pressão e baixo volume.

3.1.2.2 Pistolas de baixa pressão

Jatos variam entre $\frac{1}{2}$ " a 1"; Head de operação efetiva da bomba na faixa de 75 ft; tubos normalmente utilizados SCH 40. Devido a alta taxa de escoamento, são utilizados diâmetros maiores de tubos, para evitar excesso de perda por fricção. Agitação efetiva ocorre do maior volume de fluido entrando no tanque através do jato. O cisalhamento do fluido é aplicado pela velocidade do fluido saindo do jato. Este sistema é chamado de alto volume e baixa pressão.

Com qualquer tipo de sistema, é economicamente e funcionalmente desejável manter as linhas de alimentação do bico de jato tão curtas e retas quanto possível; com um sistema de baixa pressão, isso não é somente desejável, mas é crítico para uma operação eficiente [ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005

3.1.2.3 Instalação das pistolas

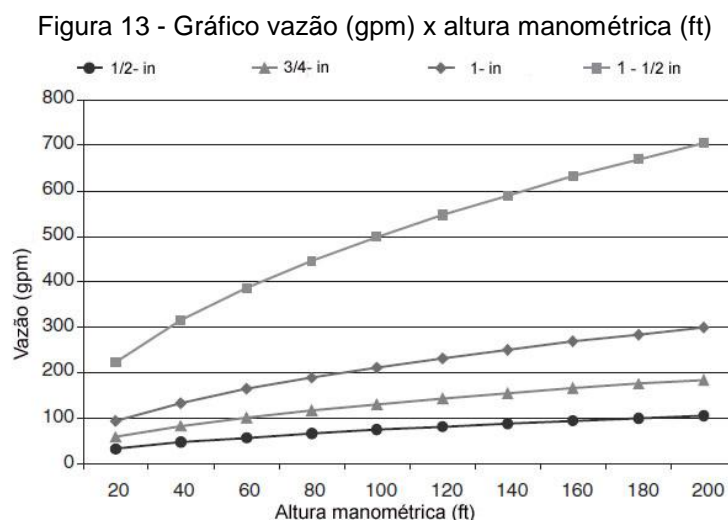
Normalmente instaladas em uma distância de 6 inches do fundo do tanque e, geralmente, com objetivo de direcionar o jato para movimentar as zonas mortas, ocasionadas em ângulos retos dos tanques que possuem sistema de agitação mecânica inadequada, ou então serem causadas por tubos e outras obstruções mecânicas.

É comum que tenham capacidade de efetividade em um diâmetro de 5 a 9 feet, dependendo do peso do fluido, viscosidade e velocidade de saída dos jatos. O tamanho dos jatos e a pressão de alimentação determina quando de volume de fluido irá escoar através do jato e qual a velocidade praticada.

Maiores volumes de fluido (baixa pressão) irão produzir maior circulação, enquanto maior velocidade (alta pressão) haverá maior cisalhamento. O teorema de Bernoulli descreve a relação entre pressão e velocidade - balanço de energia - alta pressão do fluido na saída do jato é convertida a alta velocidade.

3.1.2.4 Dimensionamento do sistema de pistolas

Partindo do fato que a maioria dos sistemas são instalados para se obter pistolas de (baixa pressão - grandes volumes), é imprescindível uma escolha adequada de outros equipamentos, tais como bombas centrífugas e tubulações. A Figura 13 relaciona a taxa de escoamento com diversos diâmetros de jatos (ideais), em função da pressão de alimentação. Se redutores são utilizados, menor será a capacidade; para tubos mais longos, maior número de acessórios; menor o diâmetro do tubo, maior o total de pressão de alimentação necessária.



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pág. 236. Adaptado pelo autor.

Os itens a serem considerados:

- . Quantidade e tamanho de jatos;

- . Definição de curvas, conexões, válvulas e redutores;
- . Comprimento e diâmetro de tubos utilizados.

A bomba deve ser o último a ser determinado, após a escolha dos outros componentes do sistema, para não ocorrer o sobrecarga do motor ou o efeito ao contrário.

Regras usuais:

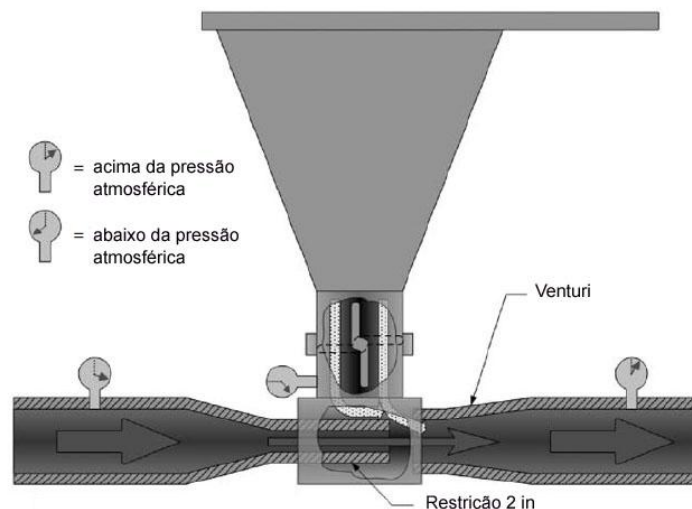
- . Velocidade de fluido deve ser mantida entre 5 a 10 ft/s (para evitar erosão no tubo);
- . Acessórios e conexões devem ser minimizadas;
- . Tubos devem ser os mais curtos possíveis.

Importante considerar que a vazão de fluido aumentada devido à utilização das pistolas, em tanques que têm linha de sucção para os extratores de sólidos, podem comprometer a eficiência dos equipamentos, afinal poderão ter um volume maior que sua capacidade de processamento. Por exemplo: mud cleaner - vazão de processamento / volume do tanque (vazão do sistema mais vazão da pistola).

3.1.3 Funil misturador

Assim como as pistolas de alta pressão, este equipamento também necessita de tubos e conexões que suportem a alta pressão da bomba. Ao passar por uma restrição abaixo do funil, a pressão é convertida em alta velocidade, causando um vácuo e auxiliando tanto a sucção do material alimentado como exerce o cisalhamento necessário para que ocorra a melhor dispersão entre os aditivos e o fluido. A Figura 14, mostra, esquematicamente, um funil misturador:

Figura 14 – Esquema de Funil misturador



Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005.
Pág. 244. Adaptado pelo autor.

Analisando os valores de pressão em 3 pontos indicados (A, B, C), no ponto A, a pressão de alimentação é alta, enquanto a velocidade deve ser baixa; assumindo que o sistema está nivelado - não há diferença de altura - a pressão não tem perda em relação à cota. Quando o fluido passa pela restrição, teoricamente, a pressão no ponto C deveria ser igual à pressão verificada no ponto A. No entanto, ocorre uma perda por fricção, diminuindo, o valor lido anteriormente. A presença do tubo Venturi, com sua geometria característica, suaviza a diferença de diâmetro e minimiza o efeito de turbulência gerado quando o escoamento é expandido no maior diâmetro do tubo.

A velocidade na restrição atinge, normalmente, o valor de 10 ft/s, enquanto ocorre a redução de 6" para 2".

A maioria dos funis usam o tubo Venturi por duas razões:

- a. aumentam a ação cisalhante no fluido;
- b. auxiliam na retomada de parte da pressão após a passagem pela restrição, além de diminuir os efeitos da turbulência durante o aumento do diâmetro;

O tubo Venturi reduz o tempo para se obter a viscosidade quando se utiliza um aditivo para este objetivo, por exemplo, bentonita.

3.1.3.1 Instalação e operação

Para cada funil, devem ser cuidadosamente selecionados os demais equipamentos, tais como bombas, motor, linha de alimentação e descarte para que se atinja a melhor performance em relação à vazão e a pressão recomendada.

Importante que sejam consideradas todas as perdas por fricção, seja em linha ou conexões, para que chegue a pressão correta no funil. O próximo passo é selecionar a bomba e o rotor que proporcionará a vazão requerida.

Também é importante determinar a potência do motor, neste caso tomando como referência o maior peso de fluido a ser trabalhado. Quando não há um valor definido, adota-se, como referência, o peso de 20.0 lb/gal. Linhas de alimentação e descarte devem ser mais curtas quanto possível, para evitar as perdas de carga no escoamento.

A pressão de retorno na descarga é crucial para eficiência operacional. Ao utilizar jato de 2 in (5 cm) com comprimento de 3 1/8 in (7 cm), forma-se um vácuo significativo ao operar com 70 a 75 ft de head, até alcançar 50% de pressão de entrada. Evidentemente, a queda da pressão de descarga deverá ser menor que 50% da pressão de entrada, e o sistema deverá estar dimensionado adequadamente. O sistema de pressão de retorno também tem um efeito na taxa para cada material que pode ser adicionado ao sistema. Uma pequena mudança na pressão de descarga causa uma significativa mudança na taxa de adição.

Quando a lacuna está entre 1 in e 3 1/8 in (2,5 e 7 cm), para este caso exemplificado, há uma pequena diferença na taxa de adição de barita. Quando

o comprimento foi maior que o 3 1/8 in, a taxa de adição de baritina reduz significativamente.

3.1.3.2 Recomendações

- . Vazão de operação - dimensionar a capacidade conforme a necessidade - um número adequado é de 600 a 800 gpm;
- . Linhas de alimentação e descarga - mais curtas e linha reta possíveis; dimensionar a bomba e motor baseado no sistema de pressão (head 75 ft) e vazão suficiente;
- . Diminuir a perda por fricção utilizando tubulações novas ou limpas; efetuar a limpeza adequada para evitar entupimentos e restrições na passagem do fluido;
- . Mesa de apoio para material de fluido - dimensão de (1 x 1) m;
- . Programar regulares manutenção e inspeção para o funil.

4 Informações coletadas na sonda

São apresentadas dimensões e equipamentos disponíveis para a operação.

4.1 Capacidade da sonda e volumetria

A sonda adotada como referência tem capacidade de perfuração de poço com até 1100 m de profundidade. Tendo esta referência, a volumetria recomendada dos tanques é que tenha capacidade de armazenamento para até 1,5 vezes o volume teórico do poço, na profundidade máxima.

A volumetria total útil dos tanques tem capacidade para armazenar 420 bbl:

- . Volume Decantador: 55 bbl;
- . Volume Tanque 1 A: 45 bbl;
- . Volume Tanque 1 B: 100 bbl;
- . Volume Tanque Sucção (2 A): 155 bbl;
- . Volume Tanque Mistura (2 B): 65 bbl.

A sonda possui dois tanques (1 e 2), divididos em compartimentos (A, B e Decantador), dispostos em “L”, com dimensões de comprimento, largura e profundidade iguais:

- . Comprimento total: 9,65 m;
- . Largura: 2,20 m;
- . Profundidade: 1,70 m;

Possui comunicação por gravidade entre os dois tanques com tubo de 10 in, comprimento de 1,50 metros; A comunicação entre os tubos de 6 in se dá na parte superior, por um tubo flexível, de mesmo diâmetro;

A comunicação entre os compartimentos internos se dá por tubos e válvulas borboleta com diâmetro de 10 in.

Possui linhas de sucção somente no interior do tanque 2:

Linha de sucção para bomba de lama (alternativa) e bomba centrífuga:

- . Diâmetro interno: 8 in; Comprimento: 9,97 m;
- . As linhas de recalque estendem-se pelos dois tanques:
 - Diâmetro interno: 4 in; Comprimento: 29,57 m;
 - Diâmetro interno: 6 in; Comprimento: 39,85 m;

Figura 15 - Tanque de sonda de perfuração



Fonte: O autor.

. São utilizadas válvulas borboletas (Bv) para manobra de fluxo, com diâmetro igual ao tubo em que estão instaladas;

Bv (8 in): 4 unidades;

Bv (6 in): 15 unidades;

Bv (4 in): 2 unidades.

4.2 Equipamentos de agitação

Os tanques 1 A e 1 B possuem um agitador instalado em cada um, do mesmo modelo (Figura 16):

Figura 16 - Agitador



Fonte: O autor.

- . Haste oca, comprimento de 1,60 m, fixados na base do tanque, com 4 pás inclinadas e contorcidas, dois impelidores, separados por 0,5 m de distância;
 - . Diâmetro dos impelidores é de 0,7 m;
 - . Motor elétrico de 10 c.v. (1750 rpm), redutor helicoidal, com rotação de eixo em 90 rpm;
- O tanque sucção (2 A) possui dois agitadores instalados, nas mesmas características citadas anteriormente;
- O tanque de mistura (2 B) não possui agitador instalado;

Figura 17 - Pistolas



Fonte: O autor.

Em relação às pistolas (mud gun) (Figura 17), que auxiliam a circulação do volume interno e promovem agitação, principalmente nas zonas mortas (cantos do tanque), todos os tanques, com exceção do tanque decantador, possuem linhas de descarga e cone de restrição:

- . Diâmetro das linhas de descarga: 6 in e 4 in;
- . Redução de diâmetro na descarga: 1 in;
- . Número de pistolas: 6 pistolas (6 in para 1 in) e 8 pistolas (4 in para 1 in);

O funil misturador possui uma redução / expansão (Venturi) de 6 in (152 mm) para 2 in (51 mm), comprimento de 70 mm, em seguida expansão de 2 in para 6 in.

4.3 Equipamento de mistura

Sobre o tanque de mistura (2 B) está instalado o funil de mistura (Figura 18), formato cônico, abaixo do qual passa uma linha de descarga, direcionada apenas para os compartimentos do tanque 2.

Ao passar por baixo do funil, há uma redução abrupta de diâmetro, passando de 6 in para 2 in, cujo comprimento se estende por 7 cm, e depois disso retorna ao diâmetro anterior. Também possui uma válvula borboleta, para fechar a

abertura na qual o material químico é aplicado para se misturar instantaneamente com a porção de fluido.

Figura 18 - Funil de mistura



Fonte: O autor.

4.4 Bombas centrífugas

Em um skid instalado junto ao tanque 2, estão dispostas 3 bombas centrífugas (Figura 19), em paralelo, com manifold apropriado para operá-las de forma separada. As características das bombas são:

- . Potência nominal: 40 c.v.;
- . Rotação: 1750 rpm;
- . Eficiência considerada: 50 %

Figura 19 - Bombas centrífugas



Fonte: O autor.

Observação: não foi possível obter algumas informações importantes, como o diâmetro do rotor e a carta da bomba utilizada, para buscar os valores de NPSH e altura manométrica.

4.5 demais equipamentos utilizados

. Válvulas borboleta: ao todo, estão instaladas 4 válvulas de 10 in, 8 válvulas de 6 in e 5 válvulas de 8 in, distribuídas nas linhas, comunicação interna entre compartimentos e manifold;

. Linhas de sucção e descarga:

.. Comprimento total da linha de 8 in é de 9,00 m;

.. Comprimento total da linha de 6 in é de 67,62 m;

5 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Todos os cálculos desenvolvidos estão detalhados no Anexo.

5.1 Volumetria mínima dos tanques

A partir da capacidade máxima de perfuração da sonda, e tendo a capacidade de poço (bbl/m) em função do diâmetro da broca utilizada, calculou-se o volume teórico do poço, em seguida aplicou-se o fator de segurança ($\times 1,5$) e obteve-se a volumetria mínima necessária para os tanques:

Tabela 4 - Relação volumetria e profundidade do poço

Profundidade máxima (m)	1100
Capacidade do poço 8 ¾ (in)	0,244
Volume teórico (bbl)	268,4
Volumetria de segurança (bbl)	402,6
Volumetria dos tanques (bbl)	420,0

Fonte: O autor.

A volumetria total dos tanques da sonda, fornecida na seção 4.1, revelou um acréscimo de 17,4 bbl a mais que o mínimo necessário.

5.2 Número de agitadores / compartimento e chicanas

Para verificar a quantidade necessária de agitadores por compartimento cuja geometria possui 4 ângulos de 90°, seguindo a recomendação teórica na seção 3.1.1.4 (Chicanas), caso a razão de comprimento e largura for maior que (1,5:1,0), mais de um agitador é recomendado.

Tabela 5 - Relação comprimento / largura dos compartimentos

Tanque	Comprimento (m)	Largura (m)	Relação (C / L)	Agitador / tanque
1 A	2,00	2,20	0,91	1
1 B	4,70	2,20	2,14	2
2 A	6,68	2,20	3,00	2
2 B	2,97	2,20	1,35	1

Fonte: O autor.

Também na seção 3.1.1.4 (Chicanas), recomenda-se a instalação de chicanas em tanques retangulares, cuja relação comprimento e largura são desproporcionais, gerando zonas mortas, onde a energia de agitação não surte o efeito desejado.

Para o conjunto de tanques considerado neste trabalho, são dois os tanques retangulares (1 B e 2 A), mas no tanque de sucção 2 A, dois agitadores são utilizados, portanto fazendo uma divisão imaginária do tanque ao meio, considerando em cada área um agitador, não se faz necessário o uso de chicanas, pois em tanques de geometria quadrada, o efeito dos cantos é similar ao efeito das chicanas (citado na seção 3.1.1.4). Mas para o tanque 1 B,

onde se utiliza apenas um agitador, e a relação entre comprimento e largura é desproporcional (2,14 - Tabela 9), recomenda-se a instalação das chicanas.

Tabela 6 - Chicanas para Tanque 1 B

Tanque	Nº de anteparos	Espessura (cm)	Largura (cm)	Altura (cm)
1 B	4,00	1,25	30,50	50,00

Fonte: O autor.

Observação: Instalação ao redor do agitador com 90° de espaçamento, alinhados entre o centro do eixo do impelidor e os quatro cantos do tanque.

5.3 Dimensionamento dos diâmetros de impelidores

Seguindo o método apresentado na seção 3.1.1.5 (Dimensionamento dos agitadores), foram utilizadas as Tabelas (1, 2 e 3) e a Eq. (1). Inicialmente, analisada a configuração dos equipamentos instalados (volume dos compartimentos, tipo e diâmetro dos impelidores, motor elétrico). Depois, calculados os valores de TOR para cada compartimento, comparados com a faixa de valores descritos na Tabela 1, conforme a função no sistema. Então, para cada um, buscou-se uma mínima otimização, dentro dos critérios propostos na metodologia adotada.

Um resumo conclusivo referente aos cálculos do dimensionamento dos agitadores é mostrado na Tabela 8.1. Os valores mostrados apontam que os agitadores instalados apresentam deficiência em relação ao TOR (s), segundo o critério adotado.

Tabela 7 – Configuração atual dos agitadores

Tanque	1 A	1 B	2 A	2 B
Função no sistema	Intermediário	Intermediário	Sucção*	Mistura
Volume (gal)	1.890	4.200	6.510	2.730
Diâmetro Impelidor (mm)	700	700	700	-
Tipo Impelidor	Hélice	Hélice	Hélice	-
Potência Motor (cv)	10	10	10	-
TOR (s)	19,35	43,00	33,30	57,70
Faixa TOR (s) / função	50 - 75	50 - 75	65 – 85	40 - 65

Fonte: o autor.

* Possui dois agitadores - (Volume / 2). Nota do autor.

Por isso, foram sugeridos, com modelos de placas e diâmetros diferentes, conforme a necessidade de cada compartimento e sua função no sistema. A idéia foi encontrar a melhor configuração para que o valor de TOR (s) ficasse mais centralizado no range proposto pela Tabela 1.

Assim, para o tanque 1 A, sugeriu-se a diminuição do diâmetro do impelidor de 700 mm para 610 mm; para o tanque 1 B, aumento do diâmetro do impelidor de 700 mm para 813 mm. Em todos eles, com exceção do tanque de mistura, sugeriu-se utilizar impelidores do tipo inclinado, porém sem precisar a troca do conjunto motor – redutor.

Para o tanque de mistura, que não utiliza o sistema de agitação, sugeriu-se a instalação de um agitador com 711 mm de diâmetro, tipo placa plana, com potência de motor de 3 cv, no mínimo.

Tabela 8 – Nova configuração sugerida

Tanque	1 A	1 B	2 A	2 B
Função no sistema	Intermediário	Intermediário	Sucção*	Mistura
Volume (gal)	1.890	4.200	6.510	2.730
Novo Diâmetro (mm)	610	813	-	711
Novo Impelidor	Inclinado	Inclinado	Inclinado	plano
Novo Motor (cv)	-	-	-	10
Novo TOR (s)	68,94	66,95	79,13	57,70
Faixa TOR (s) / função	50 - 75	50 - 75	65 – 85	40 - 65

Fonte: o autor.

* Possui dois agitadores - (Volume / 2). Nota do autor.

Verificou-se que, com a nova configuração sugerida, os respectivos valores de TOR (s), para cada tanque, ficou mais centralizado no range proposto pela Tabela 1.

Nota: conforme citação na seção 2.3.2.2 (impelidores de escoamento axial), os tanques com profundidade maior que 6 ft (1,8 m) necessitam de mais que um impelidor por eixo. No caso deste conjunto de tanques estudado, a profundidade é de 1,7 m, portanto, apenas um impelidor por eixo é o suficiente.

5.4 Pistolas

Conforme descrito na seção 3.1.2.2 (pistolas de baixa pressão), a literatura consultada recomenda que a saída dos jatos das pistolas fique em uma altura de 6 in (15,24 cm) acima do fundo do tanque. O jato deve ter diâmetro na faixa de 1/2 in a 1 in (1,27 a 2,54 cm), além de que a bomba tenha capacidade de 75 ft de head (altura manométrica).

Verificando o sistema dos tanques em estudo, as condições de instalação na sonda estão alinhadas com as recomendações. Os jatos das pistolas estão dentro da faixa (1 in - 2,54 cm), porém a distância entre os jatos e o fundo do tanque está atendida está abaixo do limite (10 cm). Somente o cálculo da altura manométrica não foi possível realizar, porque não foi disponibilizada o catálogo da bomba utilizada e também não foi possível descobrir o diâmetro do rotor.

5.5 Funil Misturador

Realizado o estudo das condições de instalação e operação do tanque misturador, foi observado que o jato está de acordo com a teoria, e a velocidade calculada para o jato (Seção 3.1.3), está acima do previsto, que seria em torno de 10 ft/s (a velocidade calculada foi de 9,12 m/s). Portanto, este equipamento está operando a contento.

5.6 Bombas centrífugas e escoamento

Para verificar o dimensionamento da bomba, foram realizados os cálculos de perda de carga, em função das propriedades dos fluidos considerados, e adotado o método do comprimento equivalente, para quantificar a perda de carga em “acidentes” na tubulação, como curvas, restrições e válvulas, todos eles descritos detalhadamente no ANEXO. Um resumo dos resultados estão representados na Tabela 7:

Tabela 9 - Resultados dos cálculos para água e fluido de perfuração

Fluido	Água	Fluido Perfuração	Fluido Perfuração (Sucção 1A e 1B)
ρ (Kg/m ³)	997	2.398	2.398
Q (m ³ /s)	$1,85 \times 10^{-2}$	$1,85 \times 10^{-2}$	$1,85 \times 10^{-2}$
P _{vap} (KPa)	$3,167 \times 10^3$	$3,20 \times 10^3$	$3,20 \times 10^3$
L _{sucção} (m)	12,36	5,840	5,750
L _{recalque} (m)	43,78	25,19	25,19
L _{projeto} (m)	31,42	19,35	19,44
W _{cons} (cv)	15,24	22,58	22,68
NPSH (m)	22,26	9,96	9,87

Fonte: O autor.

Inicialmente, a água foi considerada como fluido padrão, para chegar ao valor da potência da bomba e NPSH disponível do sistema. O desenvolvimento dos cálculos se estendeu para as condições de fluido com peso de 20 lb/gal (2.398 kg/m³) e com viscosidade em 30 cP. Para finalizar, foi calculado também para a situação de expandir a linha de sucção para os tanques 1 A e 1 B.

Portanto, considerando os resultados da Tabela 7, a bomba utilizada na sonda (40 c.v.) tem capacidade de operar com fluido 20,00 ppg (2.398 kg /m³), e como não há sucção nos compartimentos do tanque 1, a sugestão é estender a linha de 8” (14,97 m, com uma curva de 90°) sem causar prejuízo no sistema de circulação. O NPSH disponível pelo sistema deve ser, pelo menos, 15% maior que o NPSH requerido pela bomba, afim de evitar a cavitação, para densidade e viscosidade do fluido definidas em condições extremas.

5.7 Discussão dos resultados

Ao acompanhar as operações e observar as limitações, ficou mais fácil de identificar “pontos fracos” do sistema de circulação de superfície, e comprovar através da metodologia aplicada.

Em relação aos tanques, é imprescindível a extensão da linha de sucção para o tanque 1, pois são dois compartimentos que possuem apenas linhas de descarga, através do recurso das pistolas. Na rotina de sonda, frequentemente é necessária a transferência de um volume de fluido, partindo de um tanque intermediário para o tanque de mistura. Além disso, dependendo da situação da perfuração, é comum utilizar o recurso de calhas, isolando o tanque decantador e o tanque 1 A e até mesmo os tanques 1 A e 1 B. Mesmo que não

seja a prática correta, algumas vezes é interessante circular o poço com apenas o tanque de sucção, assim, o volume dos tanques intermediários pode ser transferido rapidamente para o tanque 2 A, principalmente quando se trata de operação de cimentação e também quando há perda parcial de circulação. Como a sonda não possui mud cleaner, somente os extratores de sólidos peneira e centrífuga são acionados. Obrigatoriamente, todo o volume do poço passa pela peneira; utilizando o recurso das calhas, ocorre um by-pass (desvio) dos tanques intermediários e circula-se apenas pelo tanque de sucção. Uma proposta seria dividir este tanque em dois compartimentos, pois sua volumetria é muito grande e, como será comentado mais adiante, geralmente ocorrem problemas como agitação insuficiente, principalmente em situação de fluido com alta viscosidade, e também por ter um comprimento muito grande, ao final do poço, quando todo o fluido do sistema é recuperado para uma carreta, observa-se um volume morto exagerado, chegando a ficar com 20% da capacidade sem poder succionar, enquanto o limite mínimo aceitável de sucção é de 10% da capacidade do tanque. Além disso, o volume dos tanques intermediários escoam apenas por comunicação entre os compartimentos, dificultando ainda mais a recuperação do volume total. A hipótese de se estender a linha de 8 in para o tanque 1 é viável, desde que o NPSH disponível pelo sistema seja maior que, pelo menos, 15% do NPSH requerido pela bomba.

Sobre os agitadores, foram identificados detalhes que são relevantes, no que tange à performance dos mesmos. Primeiramente, o tanque de mistura (2 B) não possui o equipamento instalado, sendo agitado basicamente por pistolas. Como é um tanque de adição de materiais químicos, obrigatoriamente deve conter um agitador mecânico, para manter os sólidos suspensos e uma homogeneização completa do volume fabricado.

Em relação ao tanque sucção (2 A), tendo dois agitadores bem distribuídos no espaço do compartimento, teoricamente não se faz qualquer objeção em relação à instalação encontrada, porém, na prática, observa-se que nos cantos do tanque, quando perto da sua capacidade (155 bbl.), o movimento do fluido não é vigoroso. No entanto, não foram encontrados sólidos sedimentados, ao esvaziá-lo para limpeza.

O tanque 1 e seus dois compartimentos merecem atenção e sugere-se a instalação de chicanas ao redor do agitador, pois a teoria cita que, quando a razão do comprimento pela largura exceder (1,5:1), é prudente que se utilize este recurso, pois a probabilidade de ocorrerem zonas mortas e agitação deficiente, além de formar vórtice, é significativa. Mais ainda, sugere-se a troca do agitador atuais (hélice) por agitador de placas, mudando o regime de fluxo axial para radial.

O tanque 1 A, mesmo com sua volumetria reduzida, e tendo quatro jatos de pistolas e um agitador acima do recomendado, a razão do TOR calculado indica que a agitação não é satisfatória. Recomendou-se, então, diminuir o diâmetro do agitador e também mudar o regime axial (hélice) para o regime radial (placas).

Finalmente, observou-se que a profundidade dos tanques é de 1,70 m, e a literatura recomenda a utilização de dois impelidores por eixo somente quando a profundidade fica acima de 1,80 m. Nenhum prejuízo foi comprovado ao utilizar esta configuração, mas deve-se ressaltar que é desnecessário, conforme recomenda a teoria. A potência dos motores (10 cv) estão acima do necessário calculado.

Comentando rapidamente sobre as pistolas e funil misturador, verificou-se que o dimensionamento e as instalações destes equipamentos estão dentro da expectativa. No entanto, é prudente atentar ao fato que a altura manométrica de operação de ambos deve ficar próximo de 75 ft (22,86 m). O dimensionamento é, geralmente, baseado nas propriedades da água, mas como em perfuração de poços o peso do fluido é variado, conforme a necessidade, incluindo também a viscosidade, este parâmetro poderá ficar comprometido, caso a bomba não tenha potência suficiente para superar esta variação. Obviamente, o fluxo de fluido é garantido, mas em se tratando de funil e pistolas, que dependem de pressão suficiente para operar, pode ocorrer deficiência e os equipamentos não apresentarem a performance requerida.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo realizado baseou-se em dados coletados em campo, nas atividades diárias de perfuração. Mesmo com recomendações e evidências de cálculos, as adequações físicas nem sempre são viáveis, ora pela dificuldade de se realizar o serviço, por questões econômicas e burocráticas, ora pela sonda operar continuamente, cuja rotina é bastante dinâmica, principalmente quando está em desenvolvimento de projeto de campo, com vários poços a serem concluídos em período reduzido.

Valeu a oportunidade de verificar quais são os parâmetros que realmente influem no bom funcionamento dos equipamentos, muitas vezes o senso comum leva a conclusões precipitadas e errôneas. Os resultados mostraram-se coerentes com a realidade, e confirmou algumas deficiências que são identificadas durante as operações, agora comprovadas com a metodologia aplicada.

REFERÊNCIAS

ASME Shale Shaker Committee. **Drilling Fluids Processing Handbook**. Oxford: Elsevier Inc., 2005.

BENNET, Carroll O., MYERS, J.E. - **Fenômenos de transporte de quantidade de movimento, calor e massa**. Tradução e revisão de Eduardo Walter Leser (et al). São Paulo: McGraw Hill do Brasil, 1978.

CREMASCO, Marco A. **Operações Unitárias em sistemas particulados e fluidodinâmicos**. São Paulo: Blucher, 2012.

PERRY, Robert H. & CHILTON, Cecil H. **Manual de Engenharia Química**. Traduzido por Horácio Macedo (et al). 5ª Edição. Rio de Janeiro, Ed. Guanabara Dois S.A., 1980.

THOMAS, J. E., et al. **Fundamentos da Engenharia do Petróleo**. Rio de Janeiro: Ed. Interciência, 2001.

ANEXO

A CÁLCULOS REALIZADOS

A1 Cálculo da volumetria de poço

$$V_{\text{poço}} (\text{bbl}) = \text{Capacidade (bbl/m)} \times \text{profundidade (m)}$$

$V_{\text{poço}}$ = volume do poço

$$\text{Capacidade (bbl/m)} = 0,0003187 \times (\text{Diâmetro da broca})^2$$

Como o diâmetro da broca é 8,75 in, a equação resulta em:

$$\text{Capacidade (bbl/m)} = 0,0003187 \times (8,75)^2 = 0,244$$

Assim, o volume teórico do poço, para profundidade de 1.100 m é:

$$V_{\text{poço}} (\text{bbl}) = 2,44 (\text{bbl/m}) \times 1.100 (\text{m}) = 268,4$$

E o volume teórico de segurança ($1,5 \times V_{\text{poço}}$):

$$\text{Volume de segurança (bbl)} = 268,4 \times 1,5 = 402,6$$

A2 Cálculo dos agitadores

a. Tanque 2 B (mistura)

Volume útil do tanque: 65 bbl. - 2.730 gal.

De acordo com o método citado na seção 5.1.2, calcula-se inicialmente o tamanho dos impelidores. Para isso, consulta-se a Tabela 2:

Tabela 2 – Relação volume deslocado (D) e diâmetro do impelidor (60 Hz)

Diâmetro		Placa		Inclinado		Hélice	
in	m m	gpm	lpm	gpm	lpm	gpm	lpm
20	508	1051	3978	909	3441	N/A	N/A
24	610	1941	7347	1645	6226	N/A	N/A
28	711	2839	10746	2468	9341	5861	22185
32	813	4635	17543	3764	14247	N/A	N/A
34	864	N/A	N/A	N/A	N/A	8790	33270
36	914	6273	23743	5402	20447	9180	34746
38	965	7342	27789	6343	24008	10604	40136
40	1016	8411	31836	7284	27570	N/A	N/A
42	1067	N/A	N/A	N/A	N/A	13940	52762
44	1118	11300	42771	9928	37577	N/A	N/A
45	1143	N/A	N/A	N/A	N/A	16812	63633
48	1219	14401	54508	12512	47358	20020	75776
52	1321	18630	70515	16100	60939	24852	94063
54	1372	N/A	N/A	N/A	N/A	27602	104475
56	1422	NA	NA	NA	NA	30353	114887
60	1524	NA	NA	NA	NA	36567	138404
64	1626	NA	NA	NA	NA	43533	164771

Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pág. 229.

Para o volume de 2730 galões, o diâmetro do impelidor pode ser considerado como 711 mm, tipo placa plana. A partir daí, calcula-se o TOR (Turnover rate), sendo:

$$\text{TOR} = (V_{\text{tanque}} / D) \times 60 \quad (\text{Eq. 1})$$

$$\text{TOR} = \frac{2.730 \times 60}{2.839} = 57,70 \text{ s}$$

TOR = Turnover rate (s)

V_{tanque} = Volume útil do tanque (gal)

D = deslocamento total de fluido (gal /s)

Assim, o valor obtido é o tempo necessário para o agitador deslocar todo o volume do fluido. A partir daí a Tabela 1 fornece os valores típicos para cada tanque, conforme sua função no sistema:

Tabela 1 - Valores típicos de TOR (s)

Tipo de Impelidor	Intermediário	Adição	Sucção	Reserva	Mistura
Inclinado/Placa	50–75	50–75	65–85	50–80	40–65

Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005. Pág. 229. Adaptado pelo autor.

O tanque de mistura (Pill) necessita de um TOR na faixa entre 40 a 65 s, portanto, o diâmetro escolhido atende perfeitamente a necessidade.

Finalmente, a Tabela 3 define a potência do motor a ser empregado para movimentar o agitador.

Tabela 3 - Relação entre diâmetro do impelidor e potência do motor

Potência		Diâmetro do Impelidor							
		20 lb/gal		16 lb/gal		12 lb/gal		8.3 lb/gal	
hp	KW	in	cm	in	cm	in	cm	in	cm
1.0	0.7	22	56	24	61	26	66	29	74
2.0	1.5	26	66	28	71	30	76	32	81
3.0	2.2	29	74	31	77	33	83	34	86
5.0	3.7	32	81	34	86	36	91	38	97
7.5	5.6	35	89	37	94	39	100	42	107
10.0	7.5	37	94	40	102	43	109	46	117
15.0	11.2	42	107	45	114	49	123	51	130
20.0	14.9	46	117	50	126				
25.0	18.6	49	124						
30.0	2.4								

Fonte: ASME - Drilling Fluids Processing Handbook. Elsevier, 2005; Pág. 229. Adaptado pelo autor.

A tabela baseia-se também no peso máximo do fluido a ser agitado. Desta maneira, para um peso de 20 ppg (lb / gal.), para um impelidor com diâmetro de 711 mm, tipo placa, é necessário um motor de 3 hp.

Da mesma forma, os valores para os demais tanques são calculados:

b. Tanque 2 A (sucção)

Volume útil - 155 bbl. (6.510 gal.)

Da Tabela 2, o range do valor recomendado do TOR para operar com agitador é de 65 a 85 s; o diâmetro do impelidor instalado na sonda já está definido (70 mm), a Tabela 2. fornece o valor de 5.861 (gal/s) para um impelidor do tipo contorcido (hélice), com movimento axial. Como este compartimento possui dois agitadores, o volume total considerado é dividido por dois. Assim, o TOR (s) fica sendo:

$$\text{TOR} = \frac{(6.510/2) \times 60}{5.861} = 33,32 \text{ s}$$

Para inserir o TOR dentro da faixa para tanque de sucção, buscou-se um agitador mais apropriado para este caso. Na Tabela 2, foi sugerido utilizar um outro tipo de impelidor, com o mesmo diâmetro:

$$\text{TOR} = \frac{(6.510/2) \times 60}{2.468} = 79,13 \text{ s}$$

Então, conforme a Tabela 1, o novo TOR calculado fica dentro do range recomendado. A potência requerida para este impelidor, considerando peso do fluido com 20 ppg, de acordo com a Tabela 3, também indica a potência de 3 cv, e a potência do motor instalado é de 10 cv. Portanto, pode-se utilizar o mesmo motor.

c. Tanque 1 B (intermediário)

Volume útil - 100 bbl (4.200 gal)

Da Tabela 1 - range do valor recomendado do TOR 50 a 75 s;
O diâmetro do impelidor instalado na sonda é 70 mm;
Da tabela 2 - D = 5.861 (gal/s) - impelidor do tipo contorcido (hélice), movimento axial. O TOR (s) calculado:

$$\text{TOR} = \frac{4.200 \times 60}{5.861} = 43,00 \text{ s}$$

Como o TOR está fora da faixa recomendada, o diâmetro do impelidor é insuficiente para agitar o fluido. Um novo valor do diâmetro de impelidor é proposto, por exemplo com 813 mm, do tipo inclinado. Da Tabela 2, o valor de D é 3.764. Calculando o TOR:

$$\text{TOR} = \frac{4.200 \times 60}{3.764} = 66,95 \text{ s}$$

Portanto, dentro da faixa recomendada. A potência do motor para agitar fluido com 20 ppg, obtido na Tabela 3, indica 5 hp. O motor instalado (10 cv) atende um novo agitador, agora com diâmetro maior.

d. Tanque 1 A - (intermediário)

Volume útil - 45 bbl. (1.890 gal.)

Da Tabela 1 - range do valor recomendado do TOR 50 a 75 s;
O diâmetro do impelidor instalado na sonda é 70 mm;
Da tabela 2. - D = 5.861 (gal./s) - impelidor do tipo contorcido (hélice), movimento axial. O TOR (s) calculado:

$$\text{TOR} = \frac{1.890 \times 60}{5.861} = 19,35 \text{ s}$$

Também aqui o valor de TOR está fora da faixa recomendada, o diâmetro do impelidor é insuficiente para agitar o fluido. Um novo valor do diâmetro de impelidor é proposto, e também um novo modelo, agora considerando um

impelidor com diâmetro de 610 mm, do tipo inclinado. Da Tabela 2, o valor de D é 1.645. Calculando o TOR:

$$\text{TOR} = \frac{1.890 \times 60}{1.645} = 68,94 \text{ s}$$

Portanto, dentro da faixa recomendada. A potência do motor para agitar fluido com 20 ppg, obtido na Tabela 3, indica 2 hp. O motor instalado (10 cv) atende um novo agitador, agora com diâmetro maior.

A 3 Cálculos de escoamento

Fluido: água

Temperatura: 25 °C

Densidade: 997 kg/m³

Viscosidade: 1 cP;

Pressão de vapor (T: 25°C): 3,167 kPa

Vazão considerada da bomba centrífuga, medida no campo: 7 bbl / min, equivalente a $1,85 \times 10^{-2}$ m³/s;

Calculando a velocidade média, considerando diâmetro interno de 6 in:

$$v = \frac{4 \times Q}{\pi \times ID^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

v = velocidade média (m/s)

Q = vazão volumétrica (m³/s)

ID = diâmetro interno (m)

$\pi = 3,1416$ (constante adimensional)

$$v = \frac{4 \times Q}{\pi \times ID^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,1524)^2} = 1,01 \text{ m/s}$$

Calculando o número de Reynolds, através da equação abaixo:

$$Re = \frac{\rho v ID}{\mu} \quad (3)$$

ρ = densidade (kg / m³)

ID = diâmetro interno (m)

v = velocidade média (m/s)

μ = viscosidade (kg / m. s)

$$Re = \frac{(997) \times (1,01) \times (0,1524)}{0,001} = 1,54 \times 10^5$$

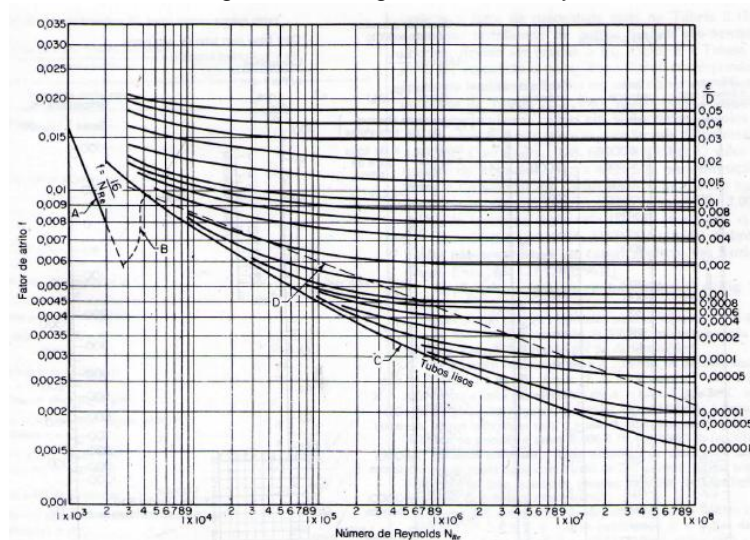
Consultando o manual de engenharia química [PERRY & CHILTON, Manual de engenharia química. Ed. Guanabara Dois, 1980, tabela 5-7, pg. 5-20], foi considerado o valor da rugosidade de tubos de aço comercial sendo $\epsilon = 0,0018$ in ($4,57 \times 10^{-5}$ m). Da relação ϵ / D , se obtém o valor para encontrar o fator de atrito de fanning (f):

$$\text{Relação } (\epsilon / ID) = \frac{4,6 \times 10^{-5}}{0,1524} = 3,02 \times 10^{-4} \quad (4)$$

ε = rugosidade superficial (m);
ID = diâmetro interno (m);

Através do diagrama de Moody [PERRY & CHILTON, Manual de engenharia química. Ed. Guanabara Dois, 1980, Fig. 5-26, pg. 5-21], se obtém o valor de atrito de Fanning, em função de (ε / ID) e número de Reynolds:

Figura 20 - Diagrama de Moody



Fonte: PERRY & CHILTON, Manual de engenharia química. Ed. Guanabara Dois, 1980

O fator de atrito de Fanning (f): $6,50 \times 10^{-3}$ (adimensional)

5.1.2. Perda de carga

Foi utilizado método do comprimento equivalente [CREMASCO, M.A. Operações unitárias em sistemas particulados e dinâmicos. Blucher, 2012. Pág. 45-46]:

$$L_c = L_{w_{\text{reto}}} + \sum L_{w_{\text{eq}}} \quad (5)$$

L_c = comprimento característico (m)

$L_{w_{\text{reto}}}$ = comprimento da tubulação sem acidentes (m)

$L_{w_{\text{eq}}}$ = comprimento de tubo equivalente (m)

Assim, com os dados obtidos na sonda, têm-se:

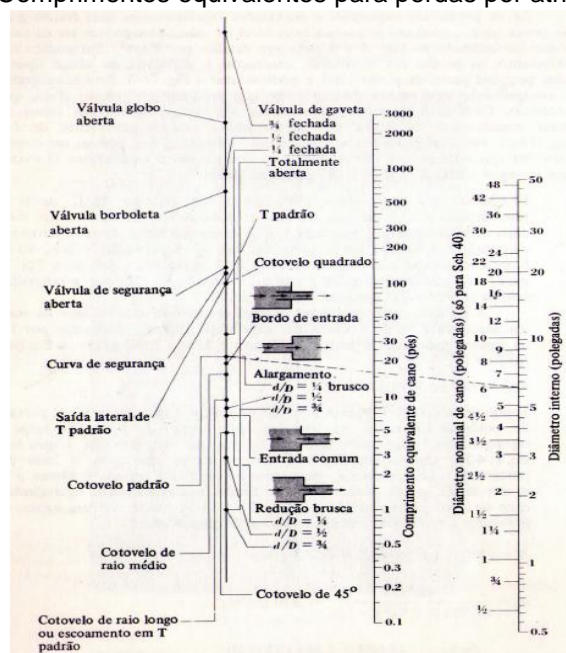
$L_{w_{\text{reto}}}$ (ID 8 in) = 9,97 m

$L_{w_{\text{reto}}}$ (ID 4 in) = 29,57 m

$L_{w_{\text{reto}}}$ (ID 6 in) = 39,87 m

5.1.2.1 Perda de carga localizada

Figura 21 - Comprimentos equivalentes para perdas por atrito (Crane Co)



Fonte: Bennet, C.O, Myers, J.E. - Fenômenos de transporte de quantidade de movimento, calor e massa. Trad. e rev. Leser, E. W. et al. McGraw Hill do Brasil, 1978. pg 200.

Utilizadas as equações para redução e expansão, respectivamente, com referência no manual de engenharia química [PERRY & CHILTON, Manual de engenharia química. Ed. Guanabara Dois, 1980. Eq. 5-91 e 5.92 (Borda-Carnot), pg. 5-31]:

Equação de contração súbita, regime turbilhonar

$$C = \frac{k_c \times v_e^2}{2 \times g} \quad (6)$$

C = perda de carga por contração súbita (m);

K_c = coeficiente de perda por contração (adimensional);

v_e^2 = velocidade média no tubo mais estreito (m/s)

g = constante gravitacional (9,8 m/s²)

o coeficiente k_c é apresentado na tabela abaixo:

Tabela 9 - Coeficiente de perda sob redução repentina regime turbilhonar

A_2/A_1	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
K_c	0,5	0,45	0,36	0,21	0,07	0

Fonte: PERRY & CHILTON, Manual de engenharia química. Ed. Guanabara Dois, 1980. Tab. 5-18, pg. 5-31

Equação de expansão (Borda-Carnot)

$$E = \frac{v_1^2 \times (1 - A_1 / A_2)^2}{2 \times g} \quad (7)$$

E = perda de carga por alargamento (m);

v_1^2 = velocidade no duto menor (m/s);

A_1 = área do duto menor (m²)

A_2 = área do duto maior (m²)

Assim, calculados todos os valores necessários, têm-se:

Velocidade nos dutos em estudo:

$$v_e (1 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times ID^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,0254)^2} = 36,00 \text{ m/s}$$

$$v_e (2 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times ID^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,0508)^2} = 9,12 \text{ m/s}$$

$$v_e (4 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times ID^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,1016)^2} = 2,28 \text{ m/s}$$

$$v_e (6 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times ID^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,1524)^2} = 1,01 \text{ m/s}$$

$$v_e (8 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times ID^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,2032)^2} = 0,57 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds para as diferentes velocidades:

$$Re (1 \text{ in}) = \frac{(997) \times (36,00) \times (0,0254)}{0,001} = 9,14 \times 10^5$$

$$Re (2 \text{ in}) = \frac{(997) \times (9,12) \times (0,0508)}{0,001} = 5,27 \times 10^5$$

$$Re (4 \text{ in}) = \frac{(997) \times (2,28) \times (0,1016)}{0,001} = 2,31 \times 10^5$$

$$Re(6 \text{ in}) = \frac{(997) \times (1,01) \times (0,1524)}{0,001} = 1,54 \times 10^5$$

$$Re (8 \text{ in}) = \frac{(997) \times (0,57) \times (0,2032)}{0,001} = 1,16 \times 10^5$$

Fator de atrito de Fanning para velocidade de diâmetro de 1 in:

$$\text{Relação } (\varepsilon / ID) (1 \text{ in}) = \frac{4,6 \times 10^{-5}}{0,0254} = 1,81 \times 10^{-3}$$

$$\text{Fator de atrito } (f) (1 \text{ in}) = 0,006$$

Como o fator de atrito para a maior restrição se aproximou do valor calculado preliminarmente, considerou-se o primeiro valor, para todas as velocidades.

Razão de área na expansão - para consultar valor de K_c na Tabela 5:

$$A_2 / A_1 = ID_2^2 / ID_1^2 \quad (8)$$

Razão de área de 6 in para 2 in = 0,11 - K_c (Tabela 5) = 0,5

Razão de área de 6 in para 1 in = 0,03 - K_c (Tabela 5) = 0,5

Razão de área de 4 in para 1 in = 0,25 - K_c (Tabela 5) = 0,5

Calculando C para redução de 6 in para 2 in

$$C = \frac{0,5 \times (9,12)^2}{2 \times 9,81} = 2,11 \text{ m}$$

Calculando C para redução de 6 in para 1 in

$$C = \frac{0,5 \times (36,00)^2}{2 \times 9,81} = 33,03 \text{ m}$$

Calculando C para redução de 4 in para 1 in

$$C = \frac{0,5 \times (36,00)^2}{2 \times 9,81} = 33,03 \text{ m}$$

Calculando a expansão de 1 in para 6 in

$$E = \frac{(36,00)^2 \times (1 - 0,028)^2}{2 \times 9,81} = 62,41 \text{ m}$$

O comprimento equivalente de perda de carga total no sistema é o somatório

$$L_c = L_{w \text{ reto}} + \sum L_{w \text{ eq}} \quad (5)$$

L sucção (8 in) = 9,97 + 124,40 = 134,37 m

L recalque (6 in) = 39,87 + 768,58 = 808,45m

L recalque (4 in) = 29,57 + 324,94 = 354,51 m

Utilizando a equação de Darcy-Weisbach [CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e dinâmicos. Blucher, 2012. Pág. 46], calculou-se a perda por atrito (h_L):

$$h_L = \frac{2 \times f \times v^2 \times L_c}{g \times ID} \quad (9)$$

Tabela 10 - Valores das perdas de cargas localizadas

Acidentes	Quantidade	Perda de carga equivalente (m)
Válvula borboleta (8 in)	4	31,10
Válvula borboleta (6 in)	15	24,37
Válvula borboleta (4 in)	2	15,85
Curva 90° (6 in)	18	2,60
Curva 90° (4 in)	17	1,60
União (6 in)	4	0,05
Redução (6 in - 1 in)	6	33,03
Redução (6 in - 2 in)	1	2,11
Redução (4 in - 1 in)	8	33,03
Expansão (2 in - 6 in)	1	62,41
Conexão em T (6 in)	9	10,37
Conexão em T (4 in)	6	0,30

Fonte: O autor

h_L = perda por atrito dinâmico (m)

f = fator de atrito de Fanning (adimensional)

v = velocidade média (m/s)

L = comprimento (m)

g = constante gravitacional (m/s²)

ID = Diâmetro do tubo (m)

Desta maneira, obteve-se:

a. para tubos de 8 in (0,20 m)

$$h_L (\text{ID} = 8 \text{ in}) = \frac{2,00 \times (6,50 \times 10^{-3}) \times (0,57)^2 \times (134,37)}{(9,81) \times (0,20)} = 0,29 \text{ m}$$

b. para tubos de 6 in (0,15 m)

$$h_L (\text{ID} = 6 \text{ in}) = \frac{2,00 \times (6,50 \times 10^{-3}) \times (1,01)^2 \times (808,45)}{(9,81) \times (0,15)} = 7,29 \text{ m}$$

c. para tubos de 4 in (0,10 m)

$$h_L (\text{ID} = 4 \text{ in}) = \frac{2,00 \times (6,50 \times 10^{-3}) \times (2,28)^2 \times (354,51)}{(9,81) \times (0,10)} = 24,42 \text{ m}$$

Altura de projeto - da fórmula na literatura [CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e dinâmicos. Blucher, 2012. Pág. 61]:

$$H = H_D - H_s \quad (10)$$

$$H_D = \frac{P_D}{\rho g} + z_D + h_{LD} \quad (11)$$

$$H_S = \frac{P_S}{\rho g} + z_S - h_{LS} \quad (12)$$

H = altura de projeto (m)

H_D = altura na descarga (recalque) (m)

H_S = altura na sucção (m)

P_D = Pressão na descarga (recalque) (kPa)

P_S = Pressão na sucção (kPa)

z_D = cota na descarga (recalque) (m)

z_S = cota na sucção (m)

Considerando que na descarga das pistolas e na sucção o tanque tenha uma altura de 1,70 de fluido:

$$\text{Pressão hidrostática (kPa)} = P_{\text{atm}} + \rho g h_{\text{tanque}} \quad (13)$$

Aplicando os valores nas 3 equações acima, obtêm-se:

$$H_D = 12,07 + 0 + (7,29 + 24,42) = 43,78 \text{ m}$$

$$H_S = 12,07 + 0 - 0,29 = 11,78 \text{ m}$$

$$H = 43,78 - 11,78 = 32,00 \text{ m}$$

Para determinar a potência da bomba (eficiência $(\eta) = 0,5$), utilizou-se a equação da potência útil [CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e dinâmicos. Blucher, 2012. pg 46]

$$W_{\text{util}} = \rho g Q H \quad (14)$$

$$W_{\text{util}} = 997 \times 9,81 \times 1,85 \times 10^{-2} \times 32,00$$

$$W_{\text{util}} = 5.790 \text{ W}$$

$$W_{\text{consl}} = \frac{W_{\text{util}}}{\eta} = \frac{5.790}{0,5} = 11.580 \text{ Watt}$$

$$\text{Convertendo para c.v.: } W_{\text{cons}} = \frac{11.580 \text{ (W)}}{746 \text{ W / 1 cv}} = 15,52 \text{ cv}$$

O NPSH da bomba:

Da equação obtida na literatura [CREMASCO, M.A. Operações Unitárias em sistemas particulados e dinâmicos. Blucher, 2012. Pág. 65]

$$\text{NPSH} = H_s + \frac{(P_{\text{atm}} - P_{\text{vap}})}{\rho g} \quad (15)$$

NPSH = Net Positive Suction Head (altura de sucção disponível) (m)

H_s = perda de carga na linha da sucção (m)

P_{atm} = Pressão atmosférica (1×10^5 Pa)

P_{vap} = Pressão de vapor do líquido em função da temperatura (Pa)

Calculando pela fórmula e utilizando os dados fornecidos e calculados:

$$\text{NPSH} = 11,78 + \frac{(1 \times 10^5 - 3,167 \times 10^3)}{(997) \times (9,81)} = 21,68 \text{ m}$$

Agora, refazendo os cálculos para fluido de perfuração

Fluido: Perfuração (base aquosa)

Temperatura: 25 °C

Densidade: 2.398 kg/m³

Viscosidade: 30 cP;

Pressão de vapor (T: 25°C): 3,10 kPa

Vazão considerada da bomba centrífuga, medida no campo: 7 bbl. / min, equivalente a $1,85 \times 10^{-2}$ m³/s;

$$v_e (1 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times \text{ID}^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,0254)^2} = 36,00 \text{ m/s}$$

$$v_e (2 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times \text{ID}^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,0508)^2} = 9,12 \text{ m/s}$$

$$v_e (4 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times \text{ID}^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,1016)^2} = 2,28 \text{ m/s}$$

$$v_e (6 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times \text{ID}^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,1524)^2} = 1,01 \text{ m/s}$$

$$v_e (8 \text{ in}) = \frac{4 \times Q}{\pi \times \text{ID}^2} = \frac{4 \times 1,85 \times 10^{-2}}{3,1416 \times (0,2032)^2} = 0,57 \text{ m/s}$$

Número de Reynolds para as diferentes velocidades:

$$\text{Re (1 in)} = \frac{(2.398) \times (36,00) \times (0,0254)}{0,030} = 7,36 \times 10^4$$

$$\text{Re (2 in)} = \frac{(2.398) \times (9,12) \times (0,0508)}{0,030} = 3,70 \times 10^4$$

$$\text{Re (4 in)} = \frac{(2.398) \times (2,28) \times (0,1016)}{0,030} = 1,84 \times 10^4$$

$$\text{Re(6 in)} = \frac{(2.398) \times (1,01) \times (0,1524)}{0,030} = 1,23 \times 10^4$$

$$\text{Re (8 in)} = \frac{(2.398) \times (0,57) \times (0,2032)}{0,030} = 9,26 \times 10^3$$

Fator de atrito de Fanning em função do N_{re} :

$$\text{Relação } (\varepsilon / \text{ID}) \text{ (1 in)} = \frac{4,6 \times 10^{-5}}{0,0254} = 1,81 \times 10^{-3}$$

$$\text{Fator de atrito (f) (1 in)} = 0,059$$

$$\text{Relação } (\varepsilon / \text{ID}) \text{ (2 in)} = \frac{4,6 \times 10^{-5}}{0,0508} = 9,10 \times 10^{-4}$$

$$\text{Fator de atrito (f) (2 in)} = 0,0040$$

$$\text{Relação } (\varepsilon / \text{ID}) \text{ (4 in)} = \frac{4,6 \times 10^{-5}}{0,1016} = 4,53 \times 10^{-4}$$

$$\text{Fator de atrito (f) (4 in)} = 0,0046$$

$$\text{Relação } (\varepsilon / \text{ID}) \text{ (6 in)} = \frac{4,6 \times 10^{-5}}{0,1524} = 3,02 \times 10^{-4}$$

$$\text{Fator de atrito (f) (6 in)} = 0,0037$$

$$\text{Relação } (\varepsilon / \text{ID}) \text{ (8 in)} = \frac{4,6 \times 10^{-5}}{0,2032} = 2,26 \times 10^{-4}$$

$$\text{Fator de atrito (f) (8 in)} = 0,0037$$

Considerando os valores de perda de carga localizada constantes, uma vez que não dependem do peso e viscosidade, foi necessário recalculá-la a perda por atrito dinâmico, para os novos valores de fator de atrito:

a. para tubos de 8 in (0,20 m)

$$h_L \text{ (ID = 8 in)} = \frac{2,00 \times (0,0037) \times (0,57)^2 \times (134,37)}{(9,81) \times (0,20)} = 0,17 \text{ m}$$

b. para tubos de 6 in (0,15 m)

$$h_L (\text{ID} = 6 \text{ in}) = \frac{2,00 \times (0,0037) \times (1,01)^2 \times (808,45)}{(9,81) \times (0,15)} = 4,15 \text{ m}$$

c. para tubos de 4 in (0,10 m)

$$h_L (\text{ID} = 4 \text{ in}) = \frac{2,00 \times (0,0040) \times (2,28)^2 \times (354,51)}{(9,81) \times (0,10)} = 15,03 \text{ m}$$

Calculando a altura de projeto (H)

$$H_D = 6,01 + 0 + (4,15 + 15,03) = 25,19 \text{ m}$$

$$H_S = 6,01 + 0 - 0,17 = 5,84 \text{ m}$$

$$H = 25,19 - 5,84 = 19,35 \text{ m}$$

Calculando a potência da bomba

$$W_{\text{util}} = 2.398 \times 9,81 \times 1,85 \times 10^{-2} \times 19,35$$

$$W_{\text{util}} = 8.421 \text{ W}$$

$$W_{\text{const}} = \frac{W_{\text{util}}}{\eta} = \frac{8.421}{0,5} = 16.842 \text{ Watt}$$

Convertendo para c.v.: $W_{\text{cons}} = \frac{16.842 \text{ (W)}}{746 \text{ W / 1 c.v.}} = 22,58 \text{ cv}$

Calculando o NPSH:

$$\text{NPSH} = 5,84 + \frac{(1 \times 10^5 - 3,10 \times 10^3)}{(2.398) \times (9,81)} = 9,96 \text{ m}$$

Como o tanque 1 (A e B) não têm sucção, fazendo o cálculo para estender a linha de sucção 8 in (0,20 m) para os compartimentos do tanque 1, com fluido de perfuração para 2.398 kg/m³ e viscosidade em 30 cP:

- necessário mais 10 metros de linha de 8 in;
- também mais 3 curvas de 90° e duas válvulas borboleta (8 in).

Assim, os cálculos para perda de carga na sucção:

$$L_{w \text{ reto}} (\text{ID} 8 \text{ in}) = 9,97 + 5 = 14,97 \text{ m}$$

$$h_L (\text{ID} = 8 \text{ in}) = \frac{2,00 \times (0,0037) \times (0,57)^2 \times (134,37)}{(9,81) \times (0,20)} = 0,17 \text{ m}$$

Válvula borboleta (8 in)	6	31,10
Curva 90° (8 in)	3	3,5

$$L \text{ sucção (8 in)} = 14,97 + 197,10 = 212,07 \text{ m}$$

$$L \text{ recalque (6 in)} = 39,87 + 768,58 = 808,45 \text{ m}$$

$$L \text{ recalque (4 in)} = 29,57 + 324,94 = 354,51 \text{ m}$$

$$h_L \text{ (ID = 8 in)} = \frac{2,00 \times (0,0037) \times (0,57)^2 \times (212,07)}{(9,81) \times (0,20)} = 0,26 \text{ m}$$

$$H_D = 6,01 + 0 + (4,15 + 15,03) = 25,19 \text{ m}$$

$$H_S = 6,01 + 0 - 0,26 = 5,75 \text{ m}$$

$$H = 25,19 - 5,75 = 19,44 \text{ m}$$

$$W_{\text{cons}} = \frac{2.398 \times 9,81 \times 1,85 \times 10^{-2} \times 19,44}{0,5 \times 746} = 22,68$$

$$\text{NPSH} = 5,75 + \frac{(1 \times 10^5 - 3,10 \times 10^3)}{(2.398) \times (9,81)} = 9,87 \text{ m}$$