



APRESENTAÇÃO DO PROJETO HIDRÁULICO E DOS CÁLCULOS PARA
SELEÇÃO DE BOMBA PARA O SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO
FUTURO GALPÃO DAS ENGENHARIAS DA UFRJ – CAMPUS MACAÉ ATRAVÉS
DE POÇO SEMI ARTESIANO PROPOSTO

Amanda Fontes da Silva

Projeto Final de Graduação apresentado
ao curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Federal do Rio de Janeiro -
Campus Macaé, como parte dos
requisitos necessários à obtenção do
título de engenheiro.

Orientador: Prof. Marcelo Silva

Co-Orientador: Prof. Rafael Malheiro

Macaé

Outubro de 2016

3586a Silva, Amanda Fontes
Apresentação do Projeto Hidráulico e dos Cálculos
para Seleção de Bomba para o Sistema de
Abastecimento de Água do Futuro Galpão das
Engenharias da UFRJ - Campus Macaé Através de Poço
Semi Artesiano Proposto / Amanda Fontes Silva. --
Rio de Janeiro, 2016.
65 f.

Orientador: Marcelo Silva.

Coorientador: Rafael Malheiro.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Colegiado
de Ensino de Graduação - Macaé, Bacharel em
Engenharia Mecânica, 2016.

1. Seleção de uma bomba. 2. poço semi artesiano.
I. Silva, Marcelo, orient. II. Malheiro, Rafael,
coorient. III. Título.

APRESENTAÇÃO DO PROJETO HIDRÁULICO E DOS CÁLCULOS PARA SELEÇÃO DE BOMBA PARA O SISTEMA DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA DO FUTURO GALPÃO DAS ENGENHARIAS DA UFRJ – CAMPUS MACAÉ ATRAVÉS DE POÇO SEMI ARTESIANO PROPOSTO

Amanda Fontes da Silva

PROJETO FINAL DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO DO CAMPUS MACAÉ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Examinado por:

Prof.º Marcelo da Silva

Prof.º Rafael Malheiro da Silva do Amaral Ferreira

Prof.ª Raquel Jahara Lobosco

Macaé, RJ - Brasil

Outubro de 2016

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida e pela oportunidade de chegar até aqui.

Agradeço aos meus pais pelo incentivo, carinho e compreensão. Sem eles não seria possível a realização deste trabalho, nem o alcance da tão sonhada formação. Não há palavras para agradecer todo sacrifício que fizeram e fazem por mim e minha irmã.

Agradeço ao meu noivo, Pablo Dias, pela paciência e companheirismo. Obrigada por ter sido meu ombro amigo nos momentos mais difíceis longe de casa e me ajudar de todas as formas possíveis a chegar até aqui. Com certeza, o caminho seria muito mais difícil sem você ao meu lado.

Agradeço à minha irmã, pelo incentivo e apoio em todos os momentos. Nossa amizade é um dos meus maiores tesouros.

Agradeço a todos os professores que passaram pela minha vida. Todos foram imprescindíveis na minha formação. Vocês têm o dom de transformar uma vida inteira de quem ensinam. Vocês inspiram quando se dedicam a esta nobre gentileza, transmitir conhecimento.

Resumo do Projeto Final de Graduação apresentado ao curso de Engenharia Mecânica da UFRJ – Campus Macaé como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de engenheiro mecânico.

Apresentação do Projeto Hidráulico e dos Cálculos para Seleção de Bomba para o Sistema de Abastecimento de Água do Futuro Galpão das Engenharias da UFRJ – Campus Macaé Através de Poço Semi Artesiano Proposto

Amanda Fontes da Silva

Outubro/2016

Orientador: Prof. Marcelo Silva

Co-Orientador: Prof. Rafael Malheiro

Curso: Engenharia Mecânica

Com a crescente busca por alternativas economicamente viáveis e sustentáveis para as necessidades humanas e pela escassez de água, seja devido às secas enfrentadas por algumas regiões do país ou por concessionárias não suprirem a demanda, foi proposto a criação de um poço semi artesiano no campus Macaé da Universidade Federal do Rio de Janeiro como forma de incentivo para este tipo de abastecimento de água para uso geral, como em banheiros e jardins. Foram definidas algumas características do poço proposto, assim como a instalação hidráulica para abastecimento do futuro galpão das engenharias no campus e apresentados os cálculos para seleção da bomba necessária para o sistema de recalque.

Palavras-chave: poço semi artesiano, bomba, sistema hidráulico, abastecimento

Abstract of the graduation final project presented to the Mechanical Engineering course as partial fulfillment of the requirements for the degree of mechanical engineer.

Presentation of hydraulic design and the calculation for pump selection for water supply of the future engineering wearhouse through proposed semi artesian well

Amanda Fontes da Silva

October/2016

Advisor: Marcelo Silva

Advisor: Rafael Malheiro

Course: Mechanical Engineering

With the growing search for economically viable and sustainable alternatives for human needs and the shortage of water, due to droughts faced by some regions of the country or providers not meeting the demand, it was proposed the creation of a semi artesian well in the Macaé campus of University of Rio de Janeiro as an incentive for this general use water supply, such as bathrooms and gardens. Some characteristics of the proposed well were defined, such as the hydraulic system to supply the future engineering wearhouse and calculations were presented for the pump selection required for the discharge system.

Keywords: semi artesian well, pump, hydraulic system, supply

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|--------------------------------------|
| Figura 1. Distribuição dos Pontos de Captação..... | 5 |
| Figura 2. Tipos de Pontos de Captação de Água Subterrânea..... | 6 |
| Figura 3. Principais tipos de bombas | 7 |
| Figura 4. Bomba centrífuga..... | 8 |
| Figura 5. Diagrama de Moody - Rouse | 19 |
| Figura 6. Coeficiente de Atrito para Escoamento Completamente Turbulento | 20 |
| Figura 7. Curva do sistema..... | 27 |
| Figura 8. Ponto de trabalho | 27 |
| Figura 9. Curva Head x Vazão | 28 |
| Figura 10. Curva Potência Absorvida x Vazão | 29 |
| Figura 11. Curva Rendimento x Vazão | 30 |
| Figura 12. Curva NPSH Requerido x Vazão..... | 31 |
| Figura 13. Aquífero Fissural | 37 |
| Figura 14. Aquífero Intersticial ou Poroso..... | 38 |
| Figura 15. Poço Utilizando Bomba Submersa | 39 |
| Figura 16. Poço Utilizando Bomba Injetora..... | Erro! Indicador não definido. |
| Figura 17. Poço Utilizando Bomba Centrífuga | 39 |
| Figura 18. Poço Utilizando Bomba Manual | 40 |
| Figura 19. Poço Utilizando Catavento | 40 |
| Figura 20. Poço Utilizando Compressor | 40 |
| Figura 21. Vista lateral poço bomba galpão..... | 42 |
| Figura 22. Vista superior poço bomba galpão..... | 42 |
| Figura 23. Esquema bóia elétrica de nível e bomba ligada | 46 |
| Figura 24. Esquema bóia elétrica de nível e bomba desligada..... | 46 |
| Figura 25. Esquema bóia elétrica de nível e bomba desligada..... | 47 |
| Figura 26. Altura geométrica de descarga..... | 48 |
| Figura 27. Altura geométrica de sucção..... | 49 |
| Figura 28. Comprimento real da tubulação | 51 |
| Figura 29. Comprimento real da tubulação | 51 |
| Figura 30. Comprimento real da tubulação | 52 |
| Figura 31. Comprimento real da tubulação | 52 |
| Figura 32. Curva característica..... | 56 |
| Figura 33. Catálogo bombas centrífugas KSB | 59 |
| Figura 34. Dados de Operação e Tabela de Rendimentos HYDROBLOC CN | 60 |
| Figura 35. Curvas Características HIDROBLOC CN..... | 60 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1. Região Metropolitana do Rio de Janeiro | 2 |
| Tabela 2. Região Noroeste do Rio de Janeiro | 3 |
| Tabela 3. Região Norte do Rio de Janeiro | 3 |
| Tabela 4. Região Serrana Fluminense..... | 3 |
| Tabela 5. Região Baixadas Litorâneas do Rio de Janeiro | 4 |
| Tabela 6. Região Médio Paraíba do Sul..... | 4 |
| Tabela 7. Região Centro-Sul Fluminense..... | 4 |
| Tabela 8. Região Baía da Ilha Grande..... | 4 |
| Tabela 9. Coeficientes de Flamant | 14 |
| Tabela 10. Coeficientes de Hazen-Willians | 16 |
| Tabela 11. Coeficientes de Hazen-Willians (material e tempo de uso) | 17 |
| Tabela 12. Rugosidades da parede do tubo | 19 |
| Tabela 13. Perdas de cargas localizadas em conexões..... | 22 |
| Tabela 14. Valores de K..... | 23 |
| Tabela 15. Valores de Pressão de Vapor e peso específico da água em função da temperatura. | 35 |
| Tabela 16. Pressão Atmosférica | 35 |
| Tabela 17. Acessórios na sucção..... | 43 |
| Tabela 18. Acessórios no recalque..... | 43 |
| Tabela 19. Comprimento real e equivalente na sucção | 53 |
| Tabela 20. Comprimento real e equivalente no recalque | 53 |
| Tabela 21. Dados do Ponto 1 | 55 |
| Tabela 22. Dados do Ponto 2 | 55 |
| Tabela 23. Dados do Ponto 3 | 55 |
| Tabela 24. Dados do Ponto 4 | 55 |
| Tabela 25. Dados do Ponto 5 | 55 |
| Tabela 26. Custo do projeto | 62 |

SUMÁRIO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | Introdução | 1 |
| 2 | Objetivo..... | 6 |
| 3 | Fundamentos Teóricos | 7 |
| 3.1 | Classificação das bombas..... | 7 |
| 3.1.1 | Bombas centrífugas..... | 8 |
| 3.1.2 | Bombas de fluxo axial..... | 8 |
| 3.1.3 | Bombas de fluxo misto..... | 9 |
| 3.1.4 | Bombas periféricas ou regenerativas..... | 9 |
| 3.1.5 | Bombas alternativas | 9 |
| 3.1.6 | Bombas rotativas | 9 |
| 3.2 | Conceitos de Mecânica dos Fluidos | 9 |
| 3.2.1 | Classificação dos escoamentos..... | 10 |
| 3.2.2 | Número de Reynolds..... | 10 |
| 3.2.3 | Teorema de Bernoulli..... | 11 |
| 3.3 | Características de um sistema hidráulico | 12 |
| 3.3.1 | Vazão do sistema e velocidade de escoamento | 12 |
| 3.3.2 | Perdas de carga do sistema..... | 12 |
| 3.3.3 | Cálculo das perdas de carga distribuídas e localizadas | 13 |
| 3.3.3.1 | Fórmulas de perda de carga distribuída..... | 13 |
| 3.3.3.2 | Métodos de cálculo para perda de carga localizada | 21 |
| 3.3.4 | Altura manométrica do sistema..... | 24 |
| 3.3.5 | Cálculo da altura manométrica de sucção (<i>H_s</i>)..... | 25 |
| 3.3.6 | Cálculo da altura manométrica de descarga (<i>H_d</i>) | 25 |
| 3.3.7 | Determinação da curva do sistema..... | 26 |
| 3.3.8 | Determinação do ponto de trabalho..... | 27 |
| 3.4 | Curvas Características | 28 |
| 3.4.1 | Curva head X vazão | 28 |
| 3.4.2 | Curva potência absorvida x vazão..... | 29 |
| 3.4.3 | Curva rendimento total x vazão..... | 30 |
| 3.4.4 | Curva NPSH req x vazão | 30 |
| 3.5 | Fatores que alteram as curvas características | 31 |

| | | |
|-------|--|----|
| 3.5.1 | Variação do diâmetro do rotor..... | 31 |
| 3.5.2 | Variação da rotação do rotor | 32 |
| 3.5.3 | Variação nas propriedades dos fluidos..... | 32 |
| 3.6 | Ponto de melhor eficiência (BEP – Best Efficiency Point)..... | 32 |
| 3.7 | Seleção de bombas | 33 |
| 3.8 | Operação de bombas | 33 |
| 3.9 | Cavitação e NPSH (Net Positive Suction Head)..... | 34 |
| 4 | Poço Tubular Profundo | 36 |
| 4.1 | Características gerais..... | 36 |
| 4.2 | Tipos de poços e aquíferos | 36 |
| 4.3 | Unidade de bombeamento..... | 39 |
| 5 | Características do Poço Semi Artesiano Proposto e Instalações Hidráulicas..... | 41 |
| 5.1 | Poço semi artesiano..... | 41 |
| 5.2 | Instalações hidráulicas..... | 41 |
| 5.3 | Diâmetros de recalque e de sucção..... | 44 |
| 5.4 | Controle de acionamento da bomba | 45 |
| 6 | Cálculos para Seleção da Bomba | 47 |
| 6.1 | Cálculo da vazão da bomba..... | 47 |
| 6.2 | Altura geométrica..... | 48 |
| 6.3 | Perda de carga do sistema | 50 |
| 6.3.1 | Perda de carga distribuída | 50 |
| 6.3.2 | Comprimentos reais e equivalentes..... | 50 |
| 6.3.3 | Perda de carga total | 54 |
| 6.4 | Altura manométrica do sistema..... | 54 |
| 6.5 | Curva característica do sistema | 54 |
| 6.6 | Cálculo do NPSH disponível..... | 56 |
| 6.7 | Potência do motor | 57 |
| 7 | Seleção da Bomba | 58 |
| 8 | Estimativa de Custo..... | 61 |
| 9 | Conclusão..... | 63 |
| | Referências Bibliográficas | 64 |

1 Introdução

A importância da água subterrânea pode ser medida por suas reservas em comparação às das águas superficiais. De acordo com o manual de construção de poços tubulares profundos da FUNASA, estima-se que de toda água existente no mundo aproximadamente 2,78% é água doce, da qual 0,01% são águas superficiais, 0,05% estão na umidade do solo, 0,62% representa as águas subterrâneas e 2,15% as geleiras. Ou seja, a água subterrânea representa 98% de toda água doce disponível na Terra.

A utilização de água subterrânea remonta a mais de 4000 anos A.C. Nesta época, os antigos chineses já perfuravam poços com centenas de metros de profundidade e há 2100 anos A.C., os egípcios já utilizavam poços para abastecimento público, (FUNASA, 2014).

No século XII, na cidade de Artois na França, foi perfurado o primeiro poço artesiano (poço tubular profundo perfurado para exploração de água subterrânea), (FUNASA, 2014).

A partir dos anos 1950, a água subterrânea passou a ser utilizada extensivamente devido aos estudos de geologia e hidrogeologia, e também, a evolução tecnológica das técnicas de perfuração de poços a partir daquelas desenvolvidas para a exploração do petróleo e pelo desenvolvimento de bombas.

Atualmente na Europa, o sistema de abastecimento de água, depende em 75% da água subterrânea e em países como Dinamarca, Suécia, Bélgica e Alemanha, chega a 90%. Os núcleos urbanos da Argélia são abastecidos 100% com águas subterrâneas, (FUNASA, 2014).

No Brasil, estima-se que 50% das cidades são abastecidas por água subterrânea, sendo, o estado de São Paulo o maior usuário nacional, com 70% das cidades e 90% das indústrias, (FUNASA, 2014).

A água subterrânea vem assumindo uma importância cada vez mais relevante como fonte de abastecimento. Devido a uma série de fatores que restringem a utilização das águas superficiais, como o problema das secas na região nordeste e recentemente na região sudeste, o crescente aumento dos custos de sua captação, adução e tratamento assim como sua contaminação, fazem com que a água subterrânea seja reconhecida com uma alternativa viável.

Algumas vantagens de sua utilização são que os investimentos de captação da água subterrânea são mais baixos se comparados aos das águas superficiais, tem um menor prazo de execução das obras, um menor custo de manutenção e um menor impacto ambiental para pequenas vazões. As desvantagens de sua utilização são a falta de controle governamental, a falta de estudos hidrogeológicos e a estrutura geológica e natureza das camadas.

De acordo com a Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (SEMADS), no estado do Rio de Janeiro cerca de 80% do seu território é formado por rochas metamórficas e magmáticas, isto implica que o principal sistema aquífero do estado é do tipo fissural, a água circula, armazena-se em fissuras e falhas nas rochas. No restante do estado, cerca de 20%, é formado por rochas sedimentares e sedimentos variados relacionados à porção continental da bacia sedimentar de Campos e bacias sedimentares menores como as de Resende e de Volta Redonda. Os sedimentos aluvionares de grandes rios, como Guandú, Guapiaçu, Macaé, Iguaçu e Macacu são importantes por sua extensão e espessura. Neste tipo de sedimento os aquíferos são do tipo poroso, com diferentes potencialidades e em condições favoráveis tendem a ser mais produtivos que os fissurais.

A potencialidade hidrogeológica do estado do Rio de Janeiro é melhor visualizada pelas informações dos quase 1700 poços tubulares organizados nas tabelas abaixo por regiões do estado:

Tabela 1. Região Metropolitana do Rio de Janeiro

| | Nº Poços | Aquífero Captado | Profundidade Média dos Poços (m) | Vazão Média dos Poços (m ³ /h) | Capacidade Específica Média (m ³ /h/m) |
|-----------------------------|----------|------------------|----------------------------------|---|---|
| Região Metropolitana | 11 | Poroso | 53.52 | 3.91 | 0.17 |
| | 151 | Misto | 69.47 | 5.21 | 1.52 |
| | 540 | Faturado | 76.68 | 4.03 | 0.25 |

FONTE: Adaptado de SEMADS, 2001.

Tabela 2. Região Noroeste do Rio de Janeiro

| | Nº Poços | Aqüífero Captado | Profundidade Média dos Poços (m) | Vazão Média dos Poços (m ³ /h) | Capacidade Específica Média (m ³ /h/m) |
|------------------------|----------|------------------|----------------------------------|---|---|
| Região Noroeste | 213 | Faturado | 66.90 | 8.38 | 0.97 |

FONTE: Adaptado de SEMADS, 2001.

Tabela 3. Região Norte do Rio de Janeiro

| Municípios | Nº Poços | Aqüífero Captado | Profundidade Média dos Poços (m) | Vazão Média dos Poços (m ³ /h) | Capacidade Específica Média (m ³ /h/m) |
|---------------------|----------|------------------|----------------------------------|---|---|
| Campos | 4 | Faturado | 115.50 | 3.73 | 0.18 |
| | 44 | Poroso | 92.75 | 34.18 | 14.43 |
| S. F. Itabapoana | 1 | Misto | 81.50 | | |
| | 15 | Poroso | 113.96 | 25.11 | 1.70 |
| S. J. Barra | 17 | Poroso | 178.46 | 47.10 | 6.54 |
| S. Fidélis | 5 | | 66.00 | 9.74 | 0.45 |
| C. Moreira | 2 | | 55.00 | 4.78 | 0.16 |
| Carapebus | 3 | | 109.33 | 10.67 | 0.64 |
| Macaé | 1 | Poroso | 50.00 | 4.00 | 0.20 |
| Quissamã | 1 | | 60 | 2.5 | |
| Região Norte | 15 | Faturado | 81.17 | 6.28 | 0.36 |
| | 1 | Misto | 81.50 | | |
| | 77 | Poroso | 108.79 | 27.60 | 5.72 |

FONTE: SEMADS, 2001.

Tabela 4. Região Serrana Fluminense

| | Nº Poços | Aqüífero Captado | Profundidade Média dos Poços (m) | Vazão Média dos Poços (m ³ /h) | Capacidade Específica Média (m ³ /h/m) |
|----------------------------------|----------|------------------|----------------------------------|---|---|
| Região Serrana Fluminense | 314 | Faturado | 88.79 | 12.96 | 0.92 |
| | 19 | Misto | 78.11 | 5.24 | 0.57 |

FONTE: Adaptado de SEMADS, 2001.

Tabela 5. Região Baixadas Litorâneas do Rio de Janeiro

| | Nº Poços | Aqüífero Captado | Profundidade Média dos Poços (m) | Vazão Média dos Poços (m ³ /h) | Capacidade Específica Média (m ³ /h/m) |
|----------------------------|----------|------------------|----------------------------------|---|---|
| Região Baixadas Litorâneas | 29 | Fraturado | 80.64 | 2.84 | 0.29 |
| | 3 | Misto | 35.25 | 2.88 | 0.30 |
| | 10 | Poroso | 35.39 | 3.43 | 0.55 |

FONTE: Adaptado de SEMADS, 2001.

Tabela 6. Região Médio Paraíba do Sul

| | Nº Poços | Aqüífero Captado | Profundidade Média dos Poços (m) | Vazão Média dos Poços (m ³ /h) | Capacidade Específica Média (m ³ /h/m) |
|-----------------------------|----------|------------------|----------------------------------|---|---|
| Região Médio Paraíba do Sul | 84 | Fraturado | 87,23 | 6,14 | 0,38 |
| | 3 | Misto | 107,46 | 5,84 | 0,29 |
| | 49 | Poroso | 129,36 | 14,48 | 0,32 |

FONTE: Adaptado de SEMADS, 2001.

Tabela 7. Região Centro-Sul Fluminense

| | Nº Poços | Aqüífero Captado | Profundidade Média dos Poços (m) | Vazão Média dos Poços (m ³ /h) | Capacidade Específica Média (m ³ /h/m) |
|------------------------------|----------|------------------|----------------------------------|---|---|
| Região Centro-Sul Fluminense | 139 | Fraturado | 88,16 | 9,90 | 0,77 |
| | 1 | Misto | 64,00 | 9,00 | 0,60 |

FONTE: Adaptado de SEMADS, 2001.

Tabela 8. Região Baía da Ilha Grande

| Municípios | Nº Poços | Aqüífero Captado | Profundidade Média dos Poços (m) | Vazão Média dos Poços (m ³ /h) | Capacidade Específica Média (m ³ /h/m) |
|----------------|----------|------------------|----------------------------------|---|---|
| Angra dos Reis | 8 | Misto | 51,65 | 2,78 | 0,11 |
| | 24 | Fraturado | 85,63 | 4,75 | 0,27 |

FONTE: SEMADS, 2001.

Estima-se que existam atualmente em operação no estado do Rio de Janeiro mais de quatro mil poços tubulares profundos. Todavia, o cadastramento desenvolvido pelo Projeto Rio de Janeiro (CPRM, 2000), contabilizou a existência de quase 1700 poços e o cadastro do Instituto Estadual do Ambiente (INEA), havia identificado até junho de

2012, 634 poços profundos. Assim, em ambos foram contabilizados quase 2334 poços, ou seja, um número bem inferior ao estimado, (Fundação COPPETEC, 2014).

Diante da estimativa apresentada é notável a dificuldade de se estabelecer de forma segura o número de poços no estado.

Na região Norte Fluminense, o aquífero da bacia sedimentar de Campos é de grande importância. O alto potencial, associado a uma qualidade muito boa da água, fazem desta região uma das mais importantes do Brasil em termos de água subterrânea, (INEA, 2012).

Na região de Macaé e Rio das Ostras observa-se a distribuição dos pontos de captação no mapa abaixo:

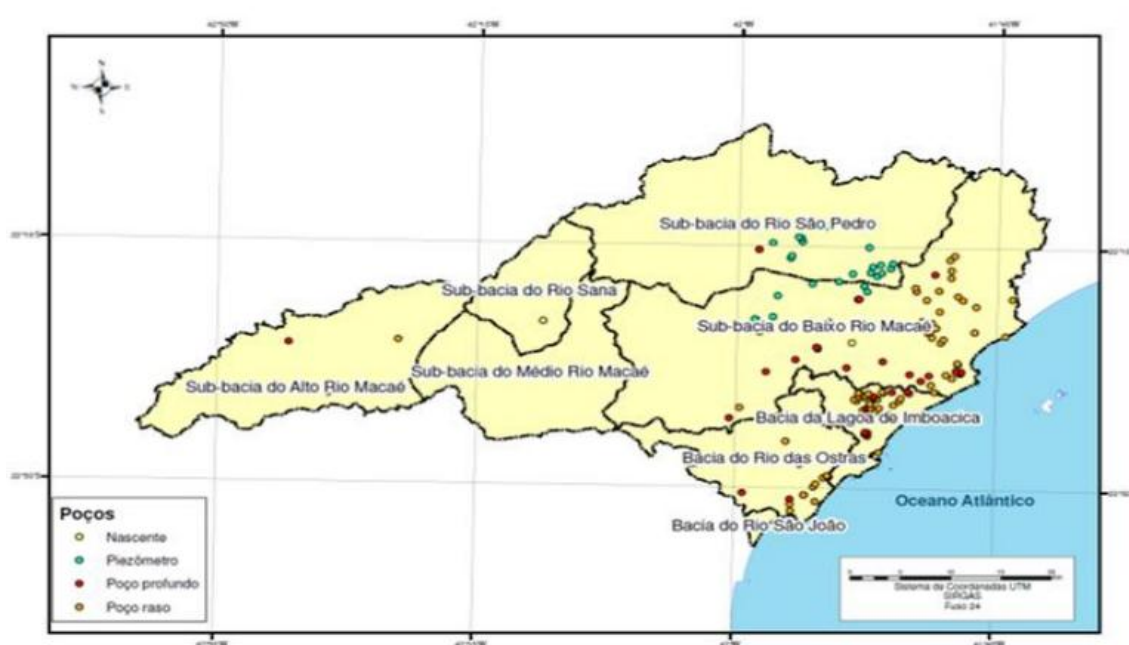


Figura 1. Distribuição dos Pontos de Captação.

FONTE: INEA, 2012.

E na Figura 2 são observados os tipos de pontos de captação de água subterrânea:

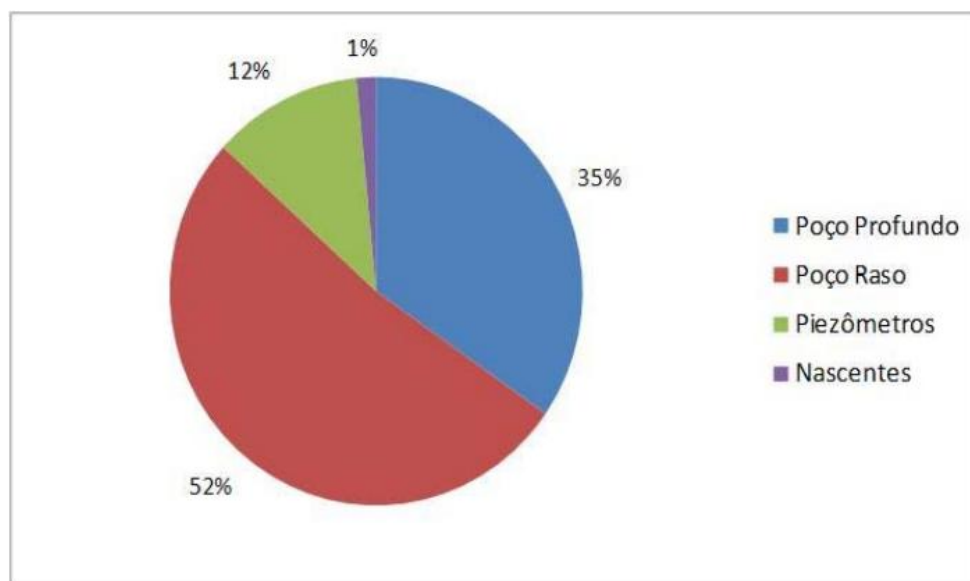


Figura 2. Tipos de Pontos de Captação de Água Subterrânea.

FONTE: INEA, 2012.

No estado do Rio de Janeiro ainda não foram registradas restrições ao uso dos aquíferos, quer pela quantidade ou qualidade e os casos de contaminações naturais ou antrópicas identificadas são pontuais e estatisticamente não causam impedimento ao uso das águas subterrâneas, (Fundação COPPETEC, 2014).

2 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo propor a construção de um poço semi artesiano para abastecer o galpão das engenharias que será construído na cidade universitária em Macaé como forma de economia de água, assim como selecionar a bomba necessária para funcionamento do poço.

3 Fundamentos Teóricos

Este capítulo tratará da teoria utilizada para a seleção da bomba e apresentará as equações para o cálculo do projeto.

3.1 Classificação das bombas

Bombas são máquinas operatrizes hidráulicas que cedem parte da energia de uma fonte motora a um fluido para transportá-lo de um ponto a outro obedecendo às condições do processo. Elas são classificadas pela sua aplicação ou pela forma como cedem energia ao fluido, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998). Para esta última classificação a Figura 3 ilustra um esquema com os principais tipos.

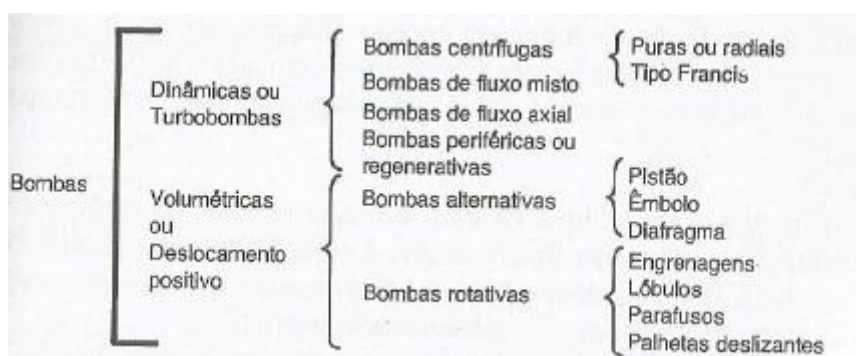


Figura 3. Principais tipos de bombas.

FONTE: De Mattos, 1998.

Estas máquinas são divididas em dois grandes grupos: bombas dinâmicas e bombas volumétricas. Nas bombas dinâmicas a movimentação do fluido é dada por forças desenvolvidas em sua própria massa, enquanto que nas bombas volumétricas ou de deslocamento positivo a movimentação é dada por um componente mecânico da bomba que obriga o fluido a exercer o mesmo movimento, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

A principal diferença entre estes dois grupos de bombas é o tipo de energia transmitida ao fluido. Nas bombas dinâmicas a energia transferida é a energia cinética que posteriormente é convertida em energia de pressão, enquanto que nas bombas volumétricas a energia fornecida já está na forma de pressão, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

3.1.1 Bombas centrífugas

As bombas centrífugas fornecem primordialmente energia cinética ao líquido, sendo a mesma, posteriormente, convertida em energia de pressão. Esta energia cinética pode ter origem puramente centrífuga ou de arrasto, ou uma combinação das duas, dependendo da forma do impelidor, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998). A Figura 4 ilustra uma bomba centrífuga com seus principais componentes.

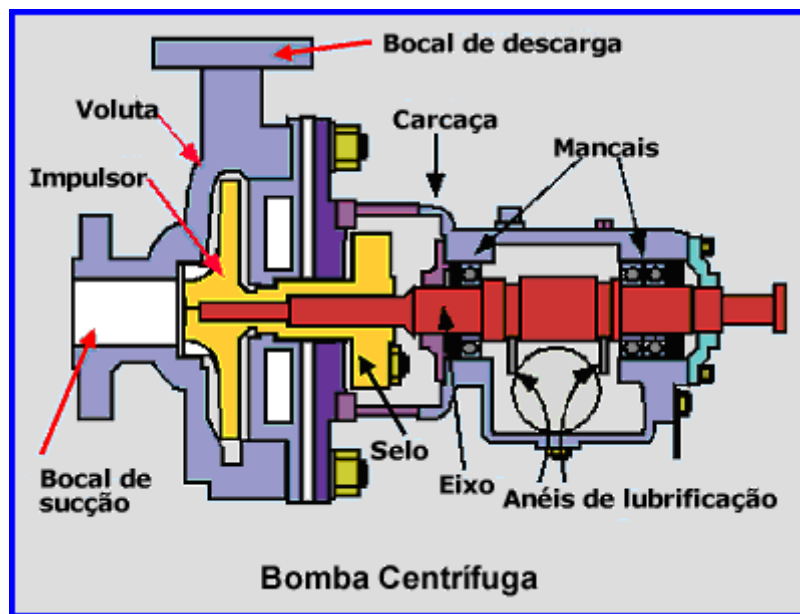


Figura 4. Bomba centrífuga.

FONTE: <<http://mecanicosedemanutencaoc1.comunidades.net/bombas-centrifugas-apostilas>>. Acesso em: 16 agosto 2016.

3.1.2 Bombas de fluxo axial

As bombas de fluxo axial transmitem toda a energia cinética ao líquido por forças puramente de arrasto. Elas são empregadas quando se deseja vazão elevada e carga fornecida ao fluido pequena, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

3.1.3 Bombas de fluxo misto

As bombas de fluxo misto fornecem ao fluido energia de forma intermediária, isto é, parte da energia é fornecida devido à força centrífuga e parte devido à força de arrasto, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

3.1.4 Bombas periféricas ou regenerativas

As bombas periféricas ou regenerativas arrastam o fluido através de um impelidor com palhetas na sua periferia, de forma que a energia cinética inicial é convertida em energia de pressão pela redução de velocidade na carcaça, (DE MATTOS, DE FALCO 1998).

3.1.5 Bombas alternativas

As bombas alternativas são utilizadas para serviços onde se requer cargas elevadas e vazões baixas. Tendo como órgão que produz o movimento do fluido um pistão ou um êmbolo ou um diafragma, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

3.1.6 Bombas rotativas

As bombas rotativas levam este nome por serem comandadas pelo movimento de rotação. Podem operar com vazões mais elevadas e apresentam como equipamento rotativo: engrenagens, lóbulos, parafusos ou palhetas deslizantes, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

3.2 Conceitos de Mecânica dos Fluidos

Fluido é uma substância que se deforma continuamente, ao ser submetido a uma força tangencial constante qualquer, (BRUNETTI, 2008).

Os fluidos são classificados em newtonianos e não newtonianos. Os fluidos newtonianos seguem os princípios da Tensão de Cisalhamento:

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (3.1)$$

O coeficiente de proporcionalidade μ é chamado de viscosidade dinâmica. Ela é uma propriedade dos fluidos que permite equilibrar, dinamicamente, forças externas quando os fluidos estão em movimento. Para fluidos newtonianos a viscosidade é determinada pelo estado da substância de temperatura e pressão, (BRUNETTI, 2008).

3.2.1 Classificação dos escoamentos

O escoamento de fluidos viscosos pode ser classificado como:

- 1) Escoamento Laminar: ocorre quando as partículas de um fluido movem-se ao longo de trajetórias bem definidas, tendendo a percorrer trajetórias paralelas, apresentando lâminas ou camadas e tendo cada uma delas a sua característica preservada no meio, (LIVI, 2013).
- 2) Escoamento Turbulento: ocorre quando as partículas de um fluido não se movem ao longo de trajetórias bem definidas, ou seja, as partículas descrevem trajetórias irregulares, formando minúsculos redemoinhos, (LIVI, 2013).

3.2.2 Número de Reynolds

O número de Reynolds é um número adimensional, usado em mecânica dos fluidos para caracterizar o comportamento global de um fluido. A partir dele, determina-se a natureza do escoamento dentro de um tubo ou sobre uma superfície, (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2006).

O significado físico do número de Reynolds é o quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade, portanto para números de Reynolds alto, os efeitos viscosos são desprezíveis e se for baixo, os efeitos viscosos são dominantes, (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2006).

Para escoamento em tubos, o número de Reynolds é dado por:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (3.2)$$

Em que:

ρ : massa específica do fluido

v : velocidade de escoamento do fluido

D : diâmetro interno do tubo

μ : viscosidade absoluta

Através do número de Reynolds é possível determinar o tipo de escoamento para tubulações:

$Re < 2000$ – escoamento laminar

$2000 < Re < 4000$ – escoamento transitório

$Re > 4000$ – escoamento turbulento

3.2.3 Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli expressa a conservação da energia mecânica ao longo de um linha de corrente em um escoamento com as seguintes restrições: escoamento permanente, incompressível, com propriedades constantes nas seções transversais e sem realização de trabalho de eixo, (LIVI, 2013).

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + h_p \quad (3.3)$$

Z - energia potencial por unidade de peso do fluido

$\frac{P}{\gamma}$ - energia de pressão por unidade de peso do fluido

$\frac{v^2}{2g}$ - energia cinética por unidade de peso do fluido

h_p – perda de carga por unidade de peso do fluido ao se deslocar do ponto 1 ao ponto 2

3.3 Características de um sistema hidráulico

Nesta seção serão apresentadas as fórmulas para o cálculo da perda de carga assim como as variáveis que caracterizam um sistema hidráulico e sua curva.

3.3.1 Vazão do sistema e velocidade de escoamento

Vazão é a relação entre o volume do fluido que atravessa uma determinada seção de um conduto e o tempo gasto para tal:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.4)$$

A vazão também pode ser determinada pela razão entre a massa do fluido e o tempo, denominando-se vazão mássica:

$$Q_m = \frac{m}{t} \quad (3.5)$$

A velocidade de escoamento é dada pela razão entre a vazão do fluido escoado e a área de seção por onde escoar:

$$v = \frac{Q}{A} \quad (3.6)$$

3.3.2 Perdas de carga do sistema

Denomina-se perda de carga de um sistema, a energia perdida por unidade de peso do fluido, devido ao atrito causado pela resistência da parede interna do tubo pela passagem do fluido pela mesma, (LIVI, 2013). As perdas de carga são classificadas em:

- 1) Distribuída (h_{pd}): causadas pelo movimento ao longo da tubulação, sendo uniforme em qualquer trecho de mesmo diâmetro, independente da posição da mesma, (LIVI, 2013).

- 2) Localizadas (h_{pl}): causadas pelo movimento da água nas paredes internas e emendas das conexões e acessórios da instalação, não são uniformes, (LIVI, 2013).

A perda de carga total (h_p) é dada pela soma entre a perda de carga distribuída e a perda de carga localizada:

$$h_p = h_{pd} + h_{pl} \quad (3.7)$$

3.3.3 Cálculo das perdas de carga distribuídas e localizadas

As perdas de carga distribuídas assim como as perdas de carga localizadas podem ser determinadas através de medidas de pressão, porém o mais usual é calculá-las através de fórmulas experimentais ou empíricas, conhecendo-se as dimensões da tubulação, características do líquido, conexões, etc.

Fórmulas de perda de carga distribuída

A seguir são citadas as principais fórmulas utilizadas para o cálculo da perda de carga distribuída.

a) Fórmula de Flamant

A fórmula de Flamant é utilizada para tubos de paredes lisas, com limite de emprego de 10 mm até 1000 mm de diâmetro para escoamento com água, (Manual de Treinamento KSB, 2003).

$$h_{pd} = \frac{H_{pd}}{L} = \frac{4b^4}{D} \sqrt{\frac{v^7}{D}} \quad (3.8)$$

h_{pd} – perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/m]

H_{pd} – perda de carga distribuída [m]

L - comprimento do trecho reto do tubo [m]

D – diâmetro interno da tubulação [m]

v - velocidade média do escoamento [m/s]

b - coeficiente de Flamant [adimensional]

Tabela 9. Coeficientes de Flamant.

| MATERIAL | b |
|----------------------|----------|
| Ferro fundido ou aço | 0,00023 |
| Concreto | 0,000185 |
| Chumbo | 0,000140 |
| Plástico (PVC) | 0,000135 |

FONTE: Manual de Treinamento KSB, 2003.

b) Fórmula de Fair – Whipple – Hsiao

As fórmulas de Fair – Whipple – Hsiao são usadas para tubos de pequenos diâmetros, até 100 mm, conduzindo água, (Manual de Treinamento KSB, 2003).

Para tubo de aço galvanizado

$$h_{pd} = \frac{H_{pd}}{L} = 0,002021 \times \frac{Q^{1,88}}{D^{4,88}} \quad (3.9)$$

h_{pd} - perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/m]

H_{pd} - perda de carga distribuída [m]

L - comprimento do trecho reto do tubo [m]

Q – vazão [m³/s]

D - diâmetro interno do tubo [m]

Para tubo de cobre ou latão

$$h_{pd} = \frac{H_{pd}}{L} = 0,0086 \times \frac{Q^{1,75}}{D^{4,75}} \quad (3.10)$$

h_{pd} - perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/m]

H_{pd} - perda de carga distribuída [m]

L - comprimento do trecho reto do tubo [m]

Q - vazão [m³/s]

D - diâmetro interno do tubo [m]

c) Fórmula de Hazen-Willians

A fórmula de Hazen – Willians é muito utilizada no meio industrial, sendo válida para diâmetros acima de 50 mm e escoamento com água, tubos lisos e Reynolds igual a 10^5 , (Manual de Treinamento KSB, 2003).

$$h_{pd} = \frac{H_{pd}}{L} = 10,643 \cdot Q^{1,85} \cdot C^{-1,85} \cdot D^{-4,87} \quad (3.11)$$

h_{pd} - perda de carga distribuída em relação ao comprimento do tubo [m/m]

H_{pd} - perda de carga distribuída [m]

L - comprimento do trecho reto do tubo [m]

Q - vazão [m³/s]

D - diâmetro interno do tubo [m]

C - coeficiente de Hazen – Willians [adimensional]

Tabela 10. Coeficientes de Hazen-Willians.

| MATERIAL | C |
|---|-----|
| Aço corrugado (chapa ondulada) | 060 |
| Aço com juntas "Look-Bar" novas | 130 |
| Aço galvanizado novo e em uso | 125 |
| Aço rebitado novo | 110 |
| Aço rebitado em uso | 085 |
| Aço soldado novo | 120 |
| Aço soldado em uso | 090 |
| Aço soldado com revestimento esp. novo e em uso | 130 |
| Chumbo | 130 |
| Cimento amianto | 140 |
| Cobre | 130 |
| Concreto bem acabado | 130 |
| Concreto acabamento comum | 120 |
| Ferro fundido novo | 130 |
| Ferro fundido em uso | 090 |
| Ferro fundido revestido de cimento | 130 |
| Grés cerâmico vidrado (Manilha) | 110 |
| Latão | 130 |
| Madeira em aduelas | 120 |
| Tijolos condutos bem executados | 100 |
| Vidro | 140 |
| Plástico | 140 |

FONTE: Manual de Treinamento KSB, 2003.

Tabela 11. Coeficientes de Hazen-Willians (material e tempo de uso).

| TIPO DE TUBO | IDADE/ANOS | DIÂMETRO (mm) | C |
|---|---------------|--------------------------------|----------------|
| FERRO FUNDIDO PICHADO | NOVO | Até - 100 | 118 |
| | | 100 - 200 | 120 |
| | | 200 - 400 | 125 |
| | | 400 - 600 | 130 |
| | 10 ANOS | Até - 100 | 107 |
| | | 100 - 200 | 110 |
| | | 200 - 400 | 113 |
| | | 400 - 600 | 115 |
| | 20 ANOS | Até - 100 | 89 |
| | | 100 - 200 | 93 |
| | | 200 - 400 | 95 |
| | | 400 - 600 | 100 |
| | 30 ANOS | Até - 100 | 65 |
| | | 100 - 200 | 75 |
| | | 200 - 400 | 80 |
| | | 400 - 600 | 85 |
| FERRO FUNDIDO CIMENTO AMIANTO | NOVO OU USADO | Até - 100 | 120 |
| | | 100 - 200 | 130 |
| | | 200 - 400 | 135 |
| | | 400 - 600 | 140 |
| AÇO REVESTIDO INTERNAMENTE | NOVO OU USADO | 500 - 1000 | 135 |
| | | > 1000 | 140 |
| PVC | NOVO OU USADO | Até 50 | 125 |
| | | 50 - 100 | 135 |
| | | 100 - 300 | 140 |
| TUBO DE CONCRETO ARM. PROTENDIDO CENTRIFUG. | NOVO OU USADO | Até 600 | = fe. f. cime. |
| | | > 600 | = aço revest. |
| AÇO S/ REVESTIMENTO SOLDADO | NOVO | = Ferro fundido novo pichado | |
| | USADO | Ferro fundido usado pichado | |
| AÇO S/ REVESTIMENTO REBITADO | NOVO | = Ferro fundido com 10 anos | |
| | USADO | no mín. = Ferro f. com 20 anos | |

FONTE: Manual de Treinamento KSB, 2003.

d) Fórmula de Darcy – Weisbach

A fórmula de Darcy – Weisbach é utilizada para diâmetros acima de 50 mm e é válida para fluidos incompressíveis, (Manual de Treinamento KSB, 2003).

$$H_{pd} = f \frac{L}{D} \times \frac{v^2}{2g} \quad (3.12)$$

H_{pd} – perda de carga distribuída [m]

L - comprimento do trecho reto do tubo [m]

D – diâmetro interno da tubulação [m]

v - velocidade média do escoamento [m/s]

f - coeficiente de atrito [adimensional]

g - aceleração da gravidade [m/s²]

O coeficiente de atrito (f) é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa (K/D). Alguns valores de K são mostrados na Tabela 12. Em regime laminar é determinado pela relação:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (3.13)$$

Em regime turbulento pode ser determinado pelo diagrama de Moody – Rouse, indicado na Figura 5.

Tabela 12. Rugosidades da parede do tubo.

| MATERIAL | k (m) - TUBOS NOVOS | k (m) - TUBOS VELHOS |
|----------------------|---------------------|----------------------|
| Aço galvanizado | 0,00015 - 0,00020 | 0,0046 |
| Aço rebitado | 0,0010 - 0,0030 | 0,0060 |
| Aço revestido | 0,0004 | 0,0005 - 0,0012 |
| Aço soldado | 0,00004 - 0,00006 | 0,0024 |
| Chumbo | lisos | lisos |
| Cimento amianto | 0,000013 | ----- |
| Cobre ou latão | lisos | lisos |
| Concreto bem acabado | 0,0003 - 0,0010 | ----- |
| Concreto ordinário | 0,0010 - 0,0020 | ----- |
| Ferro forjado | 0,00004 - 0,00006 | 0,0024 |
| Ferro fundido | 0,00025 - 0,00050 | 0,0030 - 0,0050 |
| Madeira com aduelas | 0,0002 - 0,0010 | ----- |
| Manilhas cerâmicas | 0,0006 | 0,0030 |
| Vidro | lisos | lisos |
| Plástico | lisos | lisos |

FONTE: Manual de Treinamento KSB, 2003.

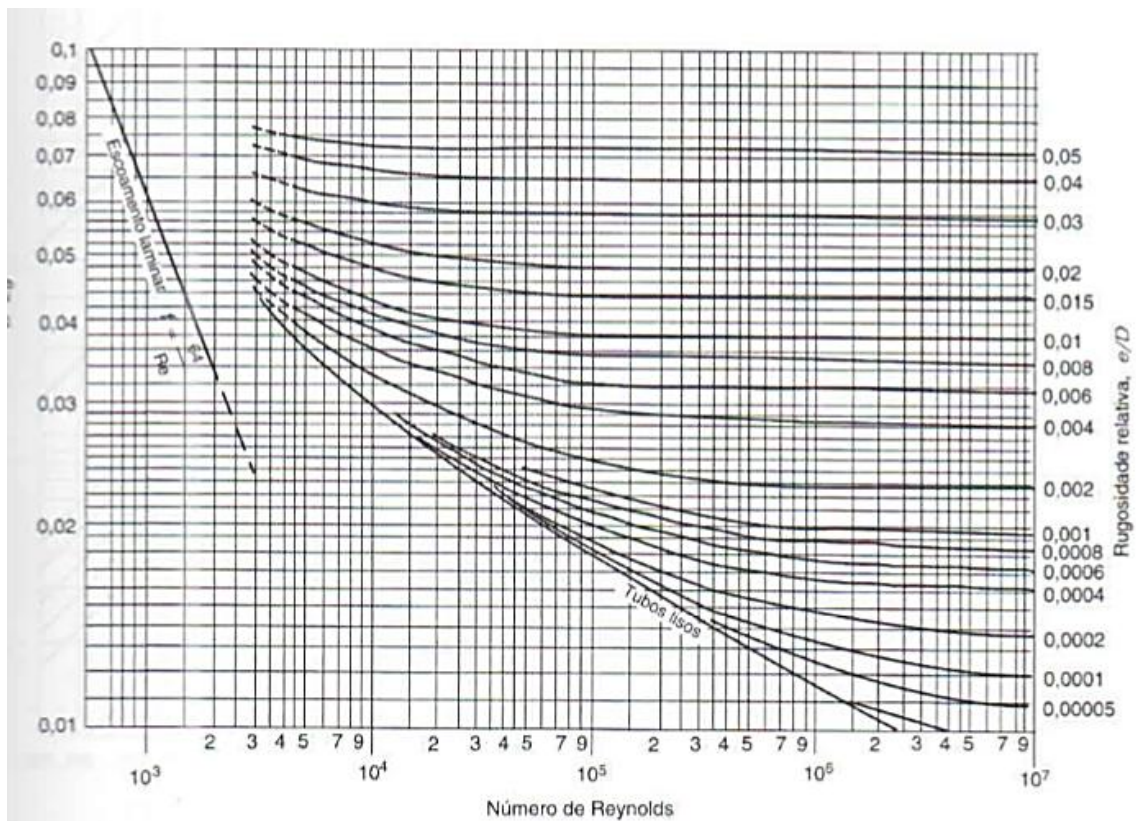


Figura 5. Diagrama de Moody – Rouse.

FONTE: Livi, 2013.

Para escoamentos completamente turbulentos, o coeficiente f torna-se independente do número de Reynolds, e o gráfico ilustrado na Figura 6 é utilizado para determinar o seu valor:

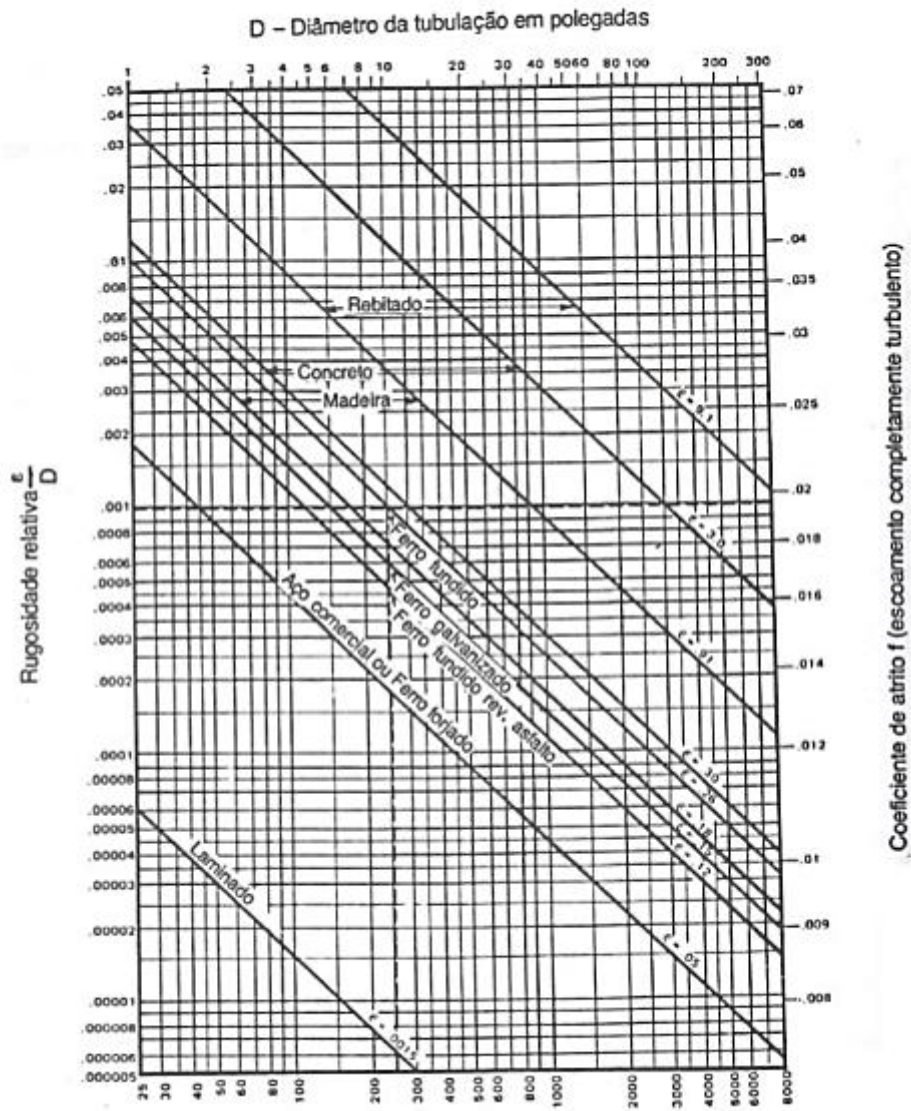


Figura 6. Coeficiente de Atrito para Escoamento Completamente Turbulento.

FONTE: Mattos, 1998.

















Métodos de cálculo para perda de carga localizada

a) Método do comprimento equivalente

O método do comprimento equivalente consiste em adicionar à extensão da tubulação comprimentos tais que correspondam à mesma perda de carga que causariam os acessórios existentes na canalização. Assim, o comprimento total passa a ser a soma do comprimento da tubulação em trecho retilíneo mais o comprimento equivalente de cada acessório.

O comprimento equivalente de cada tipo de acessório pode ser determinado experimentalmente, mas também, existem tabelas onde são fornecidos os comprimentos equivalentes dos principais acessórios de sistema de tubulações como a Tabela 13 apresentada a seguir.

Tabela 13. Perdas de cargas localizadas em conexões.

| CONEXÃO | | Diâmetro nominal X Equivalência em metros de canalização | | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--|--|------|------|--------|--------|------|--------|------|------|------|
| | | MATERIAL | 3/4" | 1" | 1 1/4" | 1 1/2" | 2" | 2 1/2" | 3" | 4" | 5" |
| Curva 90° |  | PVC | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 1,9 |
| | | Metal | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 | 1,0 | 1,3 | 1,6 | 2,1 |
| Curva 45° |  | PVC | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 1,0 | 1,1 |
| | | Metal | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,7 | 0,9 |
| Joelho 90° |  | PVC | 1,2 | 1,5 | 2,0 | 3,2 | 3,4 | 3,7 | 3,9 | 4,3 | 4,9 |
| | | Metal | 0,7 | 0,8 | 1,1 | 1,3 | 1,7 | 2,0 | 2,5 | 3,4 | 4,2 |
| Joelho 45° |  | PVC | 0,5 | 0,7 | 1,0 | 1,3 | 1,5 | 1,7 | 1,8 | 1,9 | 2,5 |
| | | Metal | 0,3 | 0,4 | 0,5 | 0,6 | 0,8 | 0,9 | 1,2 | 1,5 | 1,9 |
| Tê de passagem direta |  | PVC | 0,8 | 0,9 | 1,5 | 2,2 | 2,3 | 2,4 | 2,5 | 2,6 | 3,3 |
| | | Metal | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,1 | 1,3 | 1,6 | 2,1 | 2,7 |
| Tê de saída lateral |  | PVC | 2,4 | 3,1 | 4,6 | 7,3 | 7,6 | 7,8 | 8,0 | 8,3 | 10,0 |
| | | Metal | 1,4 | 1,7 | 2,3 | 2,8 | 3,5 | 4,3 | 5,2 | 6,7 | 8,4 |
| Tê de saída bilateral |  | PVC | 2,4 | 3,1 | 4,6 | 7,3 | 7,6 | 7,8 | 8,0 | 8,3 | 10,0 |
| | | Metal | 1,4 | 1,7 | 2,3 | 2,8 | 3,5 | 4,3 | 5,2 | 6,7 | 8,4 |
| União |  | PVC | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,1 | 0,15 | 0,2 | 0,25 |
| | | Metal | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,01 | 0,02 | 0,03 |
| Saída de canalização |  | PVC | 0,9 | 1,3 | 1,4 | 3,2 | 3,3 | 3,5 | 3,7 | 3,9 | 4,9 |
| | | Metal | 0,5 | 0,7 | 0,9 | 1,0 | 1,5 | 1,9 | 2,2 | 3,2 | 4,0 |
| Luva de redução (*) |  | PVC | 0,3 | 0,2 | 0,15 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,85 | 0,95 | 1,2 |
| | | Aço | 0,29 | 0,16 | 0,12 | 0,38 | 0,64 | 0,71 | 0,78 | 0,9 | 1,07 |
| Registro de gaveta ou esfera aberto |  | PVC | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,7 | 0,8 | 0,9 | 0,9 | 1,0 | 1,1 |
| | | Metal | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,5 | 0,7 | 0,9 |
| Registro de globo aberto |  | Metal | 6,7 | 8,2 | 11,3 | 13,4 | 17,4 | 21,0 | 26,0 | 34,0 | 43,0 |
| Registro de ângulo aberto |  | Metal | 3,6 | 4,6 | 5,6 | 6,7 | 8,5 | 10,0 | 13,0 | 17,0 | 21,0 |
| Válvula de pé com crivo |  | PVC | 9,5 | 13,3 | 15,3 | 18,3 | 23,7 | 25,0 | 26,8 | 28,8 | 37,4 |
| | | Metal | 5,6 | 7,3 | 10,0 | 11,6 | 14,0 | 17,0 | 22,0 | 23,0 | 30,0 |
| Válvula de Retenção | Horizontal  | Metal | 1,6 | 2,1 | 2,7 | 3,2 | 4,2 | 5,2 | 6,3 | 6,4 | 10,4 |
| | Vertical  | Metal | 2,4 | 3,2 | 4,0 | 4,8 | 6,4 | 8,1 | 9,7 | 12,9 | 16,1 |

FONTE: Manual Schneider, 2006.

Método direto

Conforme (Manual de Treinamento KSB, 2003), todas as perdas de carga podem ser expressas de acordo com a Equação 3.14:

$$H_{pl} = K \frac{v^2}{2g} \quad (3.14)$$

H_{pl} - perda de carga localizada [m]

K - coeficiente obtido experimentalmente

v - velocidade média do líquido na entrada da singularidade [m/s]

g - aceleração da gravidade [m/s²]

Tabela 14. Valores de K.

| PEÇAS QUE OCASIONAM A PERDA | K |
|-------------------------------|------|
| Ampliação gradual | 0,30 |
| Bocais | 2,75 |
| Comporta aberta | 2,50 |
| Controlador de vazão | 2,50 |
| Cotovelo de 90° | 0,90 |
| Cotovelo de 45° | 0,75 |
| Crivo | 0,40 |
| Curva de 90° | 0,40 |
| Curva de 45° | 0,20 |
| Curva de 22,5° | 0,10 |
| Entrada normal em canalização | 0,50 |
| Entrada de borda | 1,00 |
| Pequena derivação | 0,03 |
| Junção | 0,40 |
| Medidor Venturi | 2,50 |
| Redução gradual | 0,15 |
| Registro de ângulo aberto | 5,00 |
| Registro de gaveta aberto | 0,20 |
| Registro de globo aberto | 10,0 |
| Tê, passagem direta | 0,60 |
| Tê, passagem de lado | 1,30 |
| Tê, saída de lado | 1,30 |
| Tê, saída bilateral | 1,80 |
| Válvula de pé | 1,75 |
| Válvula de retenção | 2,50 |
| Velocidade | 1,00 |

FONTE: Manual de Treinamento KSB, 2003.

O método direto para determinação da perda de carga localizada não é o mais utilizado, pois para cada acessório da tubulação deve-se efetuar o cálculo da perda correspondente (Manual de Treinamento KSB, 2003).

3.3.4 Altura manométrica do sistema

A altura manométrica de um sistema representa a energia por unidade de peso que o sistema solicita da bomba, para uma determinada vazão, para transferir um fluido de um ponto a outro. Ela é composta pela altura estática mais a altura dinâmica, (Manual de Treinamento KSB, 2003).

A altura estática é composta pela altura geométrica e pela carga de pressão. A altura geométrica (Z) é a diferença de cota entre o nível de sucção e o nível de descarga do líquido, (Manual de Treinamento KSB, 2003).

$$Z = Z_d - Z_s \quad (3.15)$$

A carga de pressão é a diferença de pressão existente entre o reservatório de descarga e o reservatório de sucção em sistemas fechados. Em sistemas abertos, esta parcela é considerada nula, (Manual de Treinamento KSB, 2003).

$$P = \frac{P_d - P_s}{\gamma} \quad (3.16)$$

A altura dinâmica é a soma da perda de carga total e a carga de velocidade. A perda de carga total (h_p) é a soma de todas as perdas de carga que ocorrem no sistema, tanto na parte da sucção quanto na parte do recalque. Já a carga de velocidade é a diferença entre a carga de velocidade do fluido no reservatório de sucção e no reservatório de descarga. Na prática esta parcela pode ser desprezada, (Manual de Treinamento KSB, 2003).

Logo a altura manométrica do sistema é dada pela equação 3.17 ou 3.18.

$$H_{man} = Z + \frac{P_d - P_s}{\gamma} + h_p + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} \quad (3.17)$$

ou

$$H_{man} = H_d - H_s \quad (3.18)$$

H_d - altura manométrica de descarga (quantidade de energia por unidade de peso que deve existir no flange de descarga para que o fluido alcance o reservatório de descarga nas condições exigidas de vazão e pressão)

H_s - altura manométrica de sucção (quantidade de energia por unidade de peso já existente no flange de sucção para uma determinada vazão)

Para sistemas abertos:

$$H_{man} = Z + h_p + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} \quad (3.19)$$

3.3.5 Cálculo da altura manométrica de sucção (H_s)

A altura manométrica de sucção representa a energia manométrica por unidade de peso existente no flange de sucção, sendo possível duas alternativas para seu cálculo.

A primeira alternativa consiste em aplicar o teorema de Bernoulli entre um ponto tomado na superfície livre do reservatório de sucção e o flange de sucção da bomba. A segunda consiste em medir localmente a quantidade de energia por unidade de peso existente no flange de sucção, (Manual de Treinamento KSB, 2003).

Utilizando o teorema de Bernoulli, tem-se para a altura manométrica de sucção:

$$H_s = Z_s + \frac{P_s}{\gamma} - h_{ps} + \frac{v_s^2}{2g} \quad (3.20)$$

3.3.6 Cálculo da altura manométrica de descarga (H_d)

A altura manométrica de descarga representa a energia manométrica por unidade de peso que deve existir no flange de descarga para que o fluido atinja o ponto final de descarga atendendo as condições do processo. Análogo a altura manométrica de sucção, há duas alternativas para cálculo, (Manual de Treinamento KSB, 2003). Aplicando o teorema de Bernoulli, tem-se para a altura manométrica de descarga:

$$H_d = Z_d + \frac{P_d}{\gamma} + h_{pd} + \frac{v_d^2}{2g} \quad (3.21)$$

Assim, a altura manométrica total ou altura manométrica do sistema é escrita como:

$$H = (Z_d - Z_s) + \left(\frac{P_d - P_s}{\gamma} \right) + (h_{ps} + h_{pd}) + \frac{v_d^2 - v_s^2}{2g} \quad (3.22)$$

3.3.7 Determinação da curva do sistema

Denomina-se curva do sistema uma curva que mostra a variação da altura manométrica total com a vazão ou a variação da energia por unidade de peso que o sistema solicita em função da vazão. Esta curva é de grande importância, sobretudo em sistemas que incluem associações de bombas, sistemas com variações de níveis nos reservatórios e sistemas com vazões variáveis, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

O procedimento para obtenção da curva consiste em fixar arbitrariamente valores de vazão, em torno de seis, estando entre estes a vazão zero e a vazão de projeto. As quatro vazões restantes devem ser fixadas de maneira que duas sejam de valor inferior à vazão pretendida para operação e as outras duas sejam de valor superior, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998). Utilizando a fórmula para a altura manométrica total serão obtidos os valores de H para cada vazão, então, de posse dos pares de valores (Q,H) é possível construir uma curva como a da Figura 7.

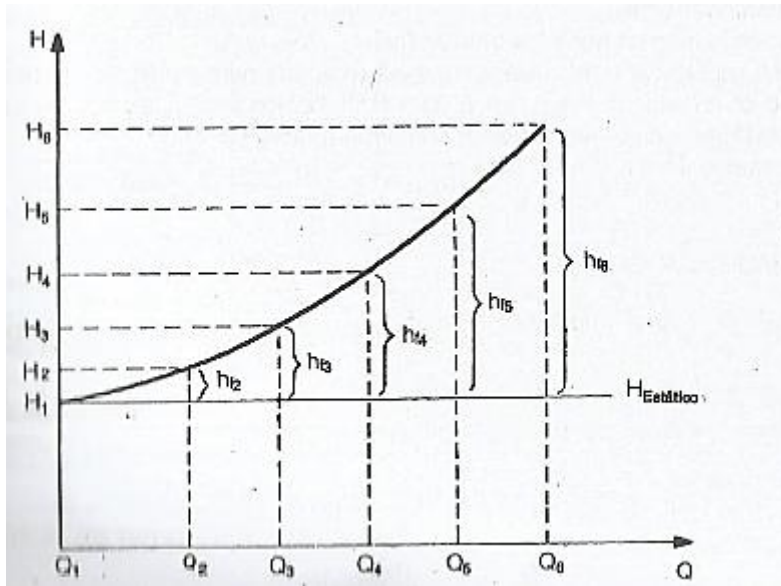


Figura 7. Curva do sistema.

FONTE: Mattos, 1998.

3.3.8 Determinação do ponto de trabalho

Determina-se o ponto normal de trabalho pela interseção da curva Q x H da bomba com a curva do sistema como mostra a Figura 8.

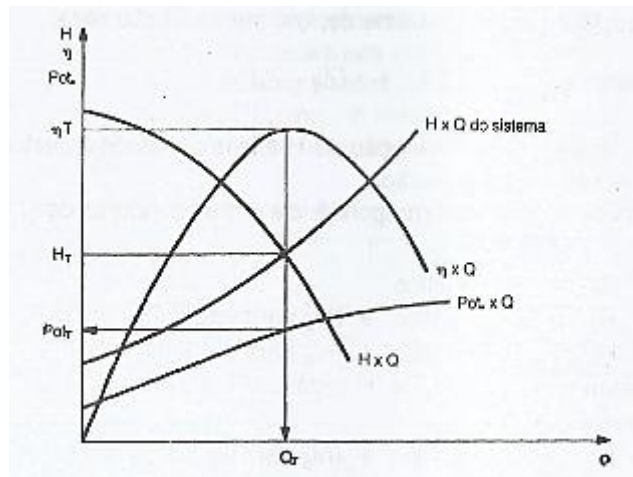


Figura 8. Ponto de trabalho.

FONTE: Mattos, 1998.

3.4 Curvas Características

Para cada bomba existe uma curva característica ou curva de performance fornecida pelo fabricante da bomba. Estas curvas são obtidas considerando o bombeio de água para um estágio, devendo sofrer correções quando aplicadas a fluidos com outros valores de viscosidade. A principal informação que pode ser obtida a partir destas curvas é o ponto de operação do sistema: vazão, potência e eficiência de uma bomba em operação, (FERREIRA, RODRIGUES, 2003).

As curvas característica são a curva de eficiência, potência e head, traçadas sob o eixo que representa a vazão.

3.4.1 Curva head X vazão

Head é a energia por unidade massa que a bomba tem condições de fornecer ao fluido para uma determinada vazão, (DE MATTOS, DE FALCO 1998).

Na teoria, a carga fornecida ao líquido varia de maneira linear com a vazão, fornecendo assim a curva teórica de uma bomba. Porém existem diversas perdas de energia hidráulica no processo devido ao comportamento do líquido em relação ao rotor e carcaça não ser ideal, existem perdas por atrito interno, choques e turbulência. Assim, na prática, a carga fornecida ao líquido varia de maneira não linear com a vazão, fornecendo a curva real de uma bomba (FERREIRA, RODRIGUES, 2003), conforme a Figura 9:

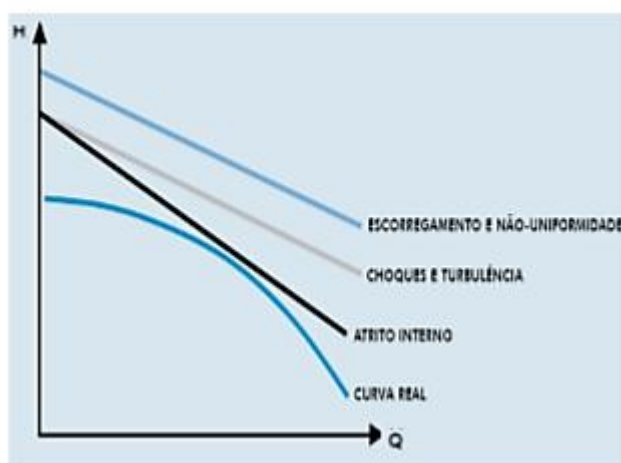


Figura 9. Curva Head x Vazão.

FONTE: Ferreira, 2003.

3.4.2 Curva potência absorvida x vazão

A curva de potência fornecida pelo fabricante é a potência absorvida pela bomba (DE MATTOS, DE FALCO, 1998), é expressa por:

$$Pot_{abs} = \frac{\rho QH}{\eta} \quad (3.23)$$

Em que:

ρ : massa específica do fluido

Q: vazão

H: head

η : eficiência

A eficiência é representada como uma razão entre a potência hidráulica da bomba e potência absorvida:

A curva de potência absorvida é gerada a partir de testes de bancadas pelo fabricante da bomba conforme a Figura 10.

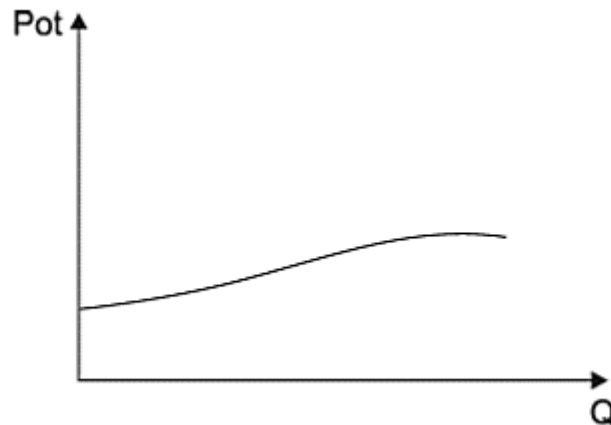


Figura 10. Curva Potência Absorvida x Vazão.

FONTE: De Mattos, 1998.

3.4.3 Curva rendimento total x vazão

Representa o rendimento total da bomba em função da vazão. Na prática é calculada pela relação entre a hidráulica da bomba e a potência absorvida, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

$$\eta = \frac{Pot_{hid}}{Pot_{abs}} \quad (3.24)$$

A Figura 11, representa uma curva de rendimento total em função da vazão.

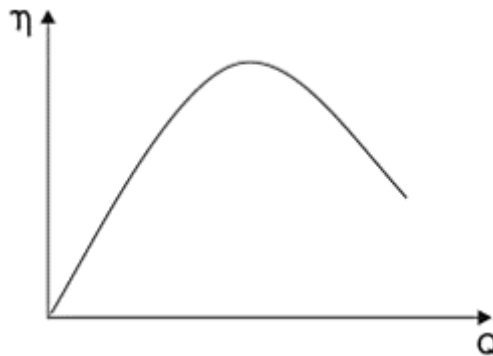


Figura 11. Curva Rendimento x Vazão.

FONTE: De Mattos, 1998.

3.4.4 Curva NPSH req x vazão

O NPSH requerido, em inglês (Net Positive Suction Head – NPSH), é definido como a pressão no flange de sucção da bomba que esta requer para que funcione de maneira adequada. A partir de testes de bancada realizados pelo fabricante da bomba é possível determinar a curva NPSH req x vazão (DE MATTOS, DE FALCO, 1998), como mostra a Figura 12.

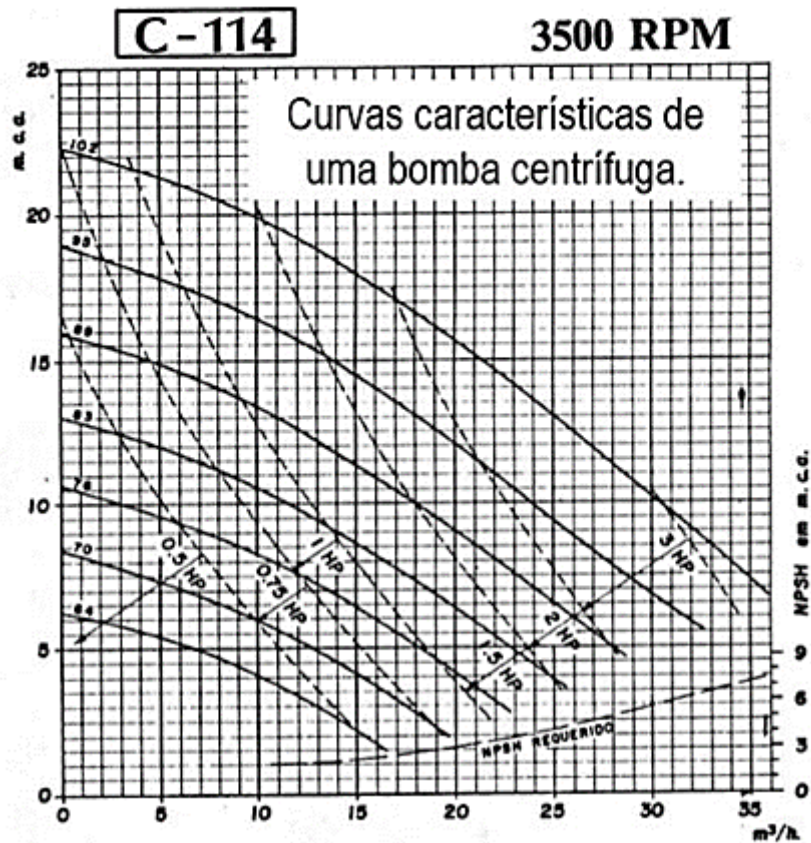


Figura 12. Curva NPSH Requerido x Vazão.

FONTE: Santos, 2007.

3.5 Fatores que alteram as curvas características

3.5.1 Variação do diâmetro do rotor

Refere-se à troca do rotor ou usinagem do diâmetro externo do rotor a fim de reduzi-lo. Essas variações são calculadas através das equações 3.25 ou 3.26. O motivo da variação do diâmetro do rotor é a adequação da curva característica de um determinado modelo de bomba ao ponto de trabalho, pois para cada modelo de bomba existe uma série de rotores com diâmetros variados, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{D_2}{D_1} \quad (3.25)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{D_2}{D_1}\right)^2 \quad (3.26)$$

3.5.2 Variação da rotação do rotor

Com a alteração da rotação do rotor se alteram as curvas de head x vazão a fim de adequar a capacidade da bomba à necessidade do sistema de bombeamento. Essa variação pode ser utilizada para controlar o desempenho da bomba e pode ser calculada pelas relações das equações 3.27, 3.28 e 3.29, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad (3.27)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2 \quad (3.28)$$

$$\sqrt{\frac{Pot_2}{Pot_1}} = \sqrt[3]{\frac{N_2}{N_1}} \quad (3.29)$$

3.5.3 Variação nas propriedades dos fluidos

A variação da massa específica não altera a energia cedida pela bomba ao fluido, porém a potência absorvida pela bomba é diretamente proporcional a ela como mostra a Equação 3.30, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

$$Pot = \rho \cdot Q \cdot H \quad (3.30)$$

3.6 Ponto de melhor eficiência (BEP – Best Efficiency Point)

O ponto na curva head x vazão no qual a bomba converte a energia de entrada em energia hidráulica de saída de forma mais eficiente é conhecido como BEP. A maioria das bombas centrífugas de simples estágio tem o melhor ponto de eficiência localizada em torno de 70% a 85% da vazão máxima. Para vazões abaixo ou acima do

BEP, as forças hidráulicas ao redor do rotor estão menos balanceadas, resultando em menor eficiência, altos níveis de deflexão do eixo e conseqüentemente maior vibração, (HENN, 2012).

3.7 Seleção de bombas

De acordo com DE MATTOS e DE FALCO (1998), primeiramente definem-se as condições operacionais necessárias para um sistema de bombeamento, como:

- vazão;
- pressão de sucção;
- pressão de descarga;
- altura manométrica total;
- fluido bombeado;
- temperatura, etc.

Após a definição das condições operacionais, é gerada a curva do sistema, levando em consideração a altura manométrica total estática e adicionando a altura manométrica dinâmica de acordo com o acréscimo da vazão, essa está relacionada com a perda de carga.

A partir das primeiras informações, seleciona-se o modelo da bomba em uma carta de seleção de bombas. Após definir o modelo, define-se o diâmetro do rotor, o NPSH requerido e a potência para a bomba operar no sistema definido.

3.8 Operação de bombas

Um sistema de bombeamento pode operar com uma única bomba, quando esta atende a altura manométrica de recalque e vazão desejada. Em outros casos, quando as características operacionais do sistema não podem ser atendidas por apenas uma bomba, torna-se necessário a utilização de duas ou mais bombas simultaneamente, sendo possível encontrá-las na configuração em série ou em paralelo, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

3.9 Cavitação e NPSH (Net Positive Suction Head)

Se a pressão absoluta em qualquer ponto de um sistema de bombeamento atingir valor igual ou inferior à pressão de vapor do líquido, na temperatura de bombeamento, parte desse líquido se vaporizará. Se as bolhas formadas continuem em trânsito com o líquido bombeado e atingirem alguma região onde a pressão absoluta for novamente superior à pressão de vapor do líquido na temperatura de bombeamento, haverá o colapso das bolhas com retorno à fase líquida. Entretanto, como o volume específico do líquido é inferior ao volume específico do vapor, o colapso das bolhas implicará a existência de um vazio, proporcionando o aparecimento de onda de choque. Este fenômeno é conhecido com cavitação, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

Os principais inconvenientes da cavitação são barulho, vibração, alteração das curvas características e danificação do material.

A fim de caracterizar as condições para que ocorra boa aspiração, foi introduzida a noção de NPSH nas instalações de bombeamento. Esta grandeza representa a disponibilidade de energia com que o líquido penetra na região de sucção da bomba. O termo em inglês Net Positive Suction Head significa altura positiva líquida de sucção e é identificado como NPSH requerido e NPSH disponível, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

O NPSH disponível é uma característica da instalação em que a bomba opera, e da pressão disponível do líquido no lado de sucção da bomba, sendo calculado pela equação 3.31, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

$$NPSH_{DISP} = h_{atm} \pm Z_s - h_v - h_{ps} \quad (3.31)$$

h_{atm} – pressão atmosférica em metros de coluna de água

Z_s - altura geométrica de sucção

h_v – pressão de vapor em metros de coluna de água

h_{ps} - perda de carga na tubulação de sucção

O valor da pressão de vapor de água e da pressão atmosférica são tabelados, como mostram as Tabelas 15 e 16.

Tabela 15. Valores de Pressão de Vapor e peso específico da água em função da temperatura.

| t(°C) | ρ_s (kgf/m ³) | p_s (kPa) | γ (kgf/m ³) | t(°C) | ρ_s (kgf/m ³) | p_s (kPa) | γ (kgf/m ³) |
|-------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|-------|--------------------------------|-------------|--------------------------------|
| 15 | 174 | 1,707 | 999 | 65 | 2547 | 24,986 | 981 |
| 20 | 238 | 2,335 | 998 | 70 | 3175 | 31,147 | 978 |
| 25 | 322 | 3,159 | 997 | 75 | 3929 | 38,543 | 975 |
| 30 | 429 | 4,208 | 996 | 80 | 4828 | 47,363 | 972 |
| 35 | 572 | 5,611 | 994 | 85 | 5894 | 57,820 | 969 |
| 40 | 750 | 7,358 | 992 | 90 | 7149 | 70,132 | 965 |
| 45 | 974 | 9,555 | 990 | 95 | 8620 | 84,562 | 962 |
| 50 | 1255 | 12,312 | 988 | 100 | 10333 | 101,367 | 958 |
| 55 | 1602 | 15,716 | 986 | 105 | 12320 | 120,859 | 955 |
| 60 | 2028 | 19,895 | 983 | 110 | 14609 | 143,314 | 951 |

FONTE: Henn, 2012.

Tabela 16. Pressão Atmosférica.

| Altitude em Relação ao Mar (metros) | 0 | 150 | 300 | 450 | 600 | 750 | 1.000 | 1.250 | 1.500 | 2.000 |
|-------------------------------------|-------|-------|------|------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| Pressão Atmosférica (mca) | 10,33 | 10,16 | 9,98 | 9,79 | 9,58 | 9,35 | 9,12 | 8,83 | 8,64 | 8,08 |

FONTE: Manual Schneider.

Quando o NPSH é relativo à bomba, é chamado NPSH requerido e é definido como a pressão no flange de sucção da bomba que esta requer para que funcione de maneira adequada. O seu valor é obtido pela curva NPSH requerido x vazão fornecida pelo fabricante, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

O NPSH requerido é utilizado como parâmetro para evitar a ocorrência do fenômeno da cavitação. Para isso, o NPSH disponível deve ser maior que o NPSH requerido, garantindo que a pressão de sucção seja maior que a pressão de vapor do fluido. Na prática, além disso, é usada também uma margem de segurança de geralmente 0,6 m, (DE MATTOS, DE FALCO, 1998).

$$NPSH_{DISP} \geq NPSH_{REQ} + 0,6 \quad (3.32)$$

4 Poço Tubular Profundo

Nesta seção serão apresentadas a definição de um poço semi artesiano e sua classificação de acordo com a geologia do terreno e os tipos de bombeamento utilizados para o funcionamento do poço.

4.1 Características gerais

Poço tubular profundo, também conhecido como poço artesiano ou semi artesiano (dependendo da pressão), é uma obra de engenharia projetada e construída para a exploração de água subterrânea, aberto por máquinas perfuratrizes, de diâmetro raramente superior a 60 cm, vertical, de profundidades variáveis, podendo atingir até 2600 m, de grande rendimento para a produção de água, sendo totalmente ou parcialmente revestidos, dependendo das condições da geologia local, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998).

A construção de um poço tubular, em geral, pode ser desdobrada nas seguintes etapas (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998):

- a) Perfuração;
- b) Aplicação do revestimento;
- c) Encascalhamento;
- d) Desenvolvimento;
- e) Cimentação;
- f) Teste de produção.

Se corretamente locado, projetado, fiscalizado e executado, o poço propiciará um rendimento e uma vida útil bem maior.

A principal diferença entre um poço artesiano e um poço semi artesiano está na pressão do poço, o primeiro não necessita de bombeamento, enquanto o segundo faz necessário a sua utilização, pois não possui pressão suficiente para que a água jorre.

4.2 Tipos de poços e aquíferos

Poços em rochas cristalinas – aquíferos fissurados

Aquíferos fissurais são aqueles nos quais a água está presente nas fraturas e fendas das rochas cristalinas. Os poços neste tipo de aquífero apresentam como principais características, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998):

- Profundidades máximas em torno de 80 metros; mais freqüente 60 metros;
- Diâmetro mais freqüente de 4 a 6 polegadas;
- Perfuração à percussão e ar comprimido;
- Dispensam revestimentos, filtros e pré-filtros;
- Geralmente tem baixas vazões, média de 2 a 5 m³/h.

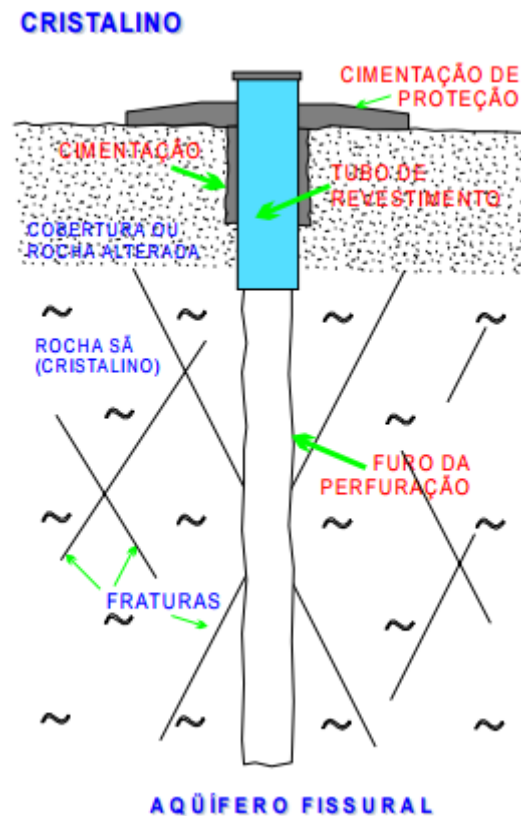


Figura 13. Aquífero Fissural.

FONTE: CPRM, 1998.

Poços em rocha sedimentar – aquífero poroso

Aquíferos porosos são aqueles em que a água está armazenada e flui nos espaços entre os grãos em sedimentos e rochas sedimentares de estrutura granular. Os poços

neste tipo de aquífero apresentam como principais características, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998):

- Profundidades as mais variadas, podendo atingir mais de 1000 metros;
- Diâmetro variável de 4 a 22 polegadas;
- Perfuração à percussão e ar comprimido;
- Exigem revestimentos, filtros e pré-filtros;
- Custos elevados de material de completação;
- Pequenas a grandes vazões, até 1000 m³/h.

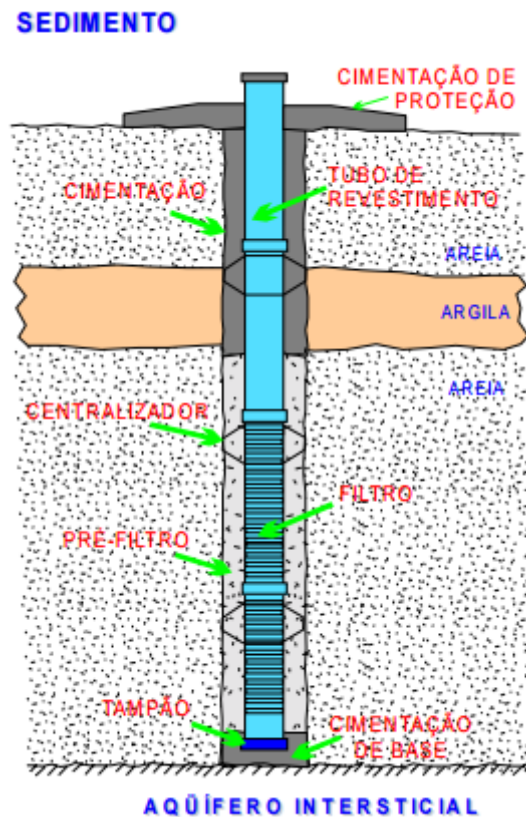


Figura 14. Aquífero Intersticial ou Poroso.

FONTE: CPRM, 1998.

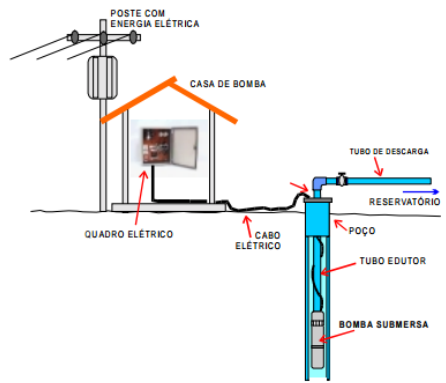
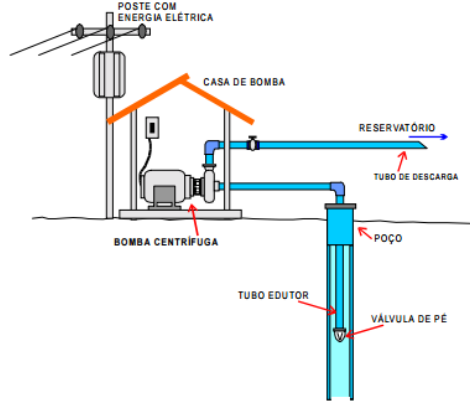
Poços mistos – aquífero fissurado e poroso

Aquíferos fissurado e poroso são aqueles onde a parte superior perfurada apresenta rochas sedimentares e na parte inferior apresenta rochas cristalinas. Por causa dessa característica da geologia, o poço é construído, como um poço em sedimento com a colocação de revestimentos e filtros no domínio das rochas permeáveis e porosas e

sem revestimento na parte inferior, domínio das rochas cristalinas onde o aquífero é fissural, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998).

4.3 Unidade de bombeamento

A unidade de bombeamento refere-se ao tipo de equipamento utilizado para o bombeamento da água do poço. No caso de poços tubulares, podem ser: bomba submersa, bomba injetora, bomba manual, bomba centrífuga, compressor e catavento. Cada uma com uma finalidade, mas todas possuem uma tubulação edutora, geralmente de duas polegadas, que conduzirá a água ao sistema de armazenamento ou de irrigação, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998).

| | |
|--|---|
| <p>Bomba submersa</p> <p>É utilizada para bombeamentos com vazões de médio a grande porte (mais de 3000 L/h), com profundidades variadas. Sua instalação é feita dentro do poço mediante tubo edutor que liga a bomba ao reservatório, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998).</p> |  <p>Figura 15. Poço Utilizando Bomba Submersa. FONTE: CPRM, 1998.</p> |
| <p>Bomba centrífuga</p> <p>É utilizada para bombeamentos com vazões de pequeno porte (menos de 3600 L/h), com baixas profundidades. Sua instalação é feita fora do poço mediante tubo edutor, que sai do poço diretamente para a bomba, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998).</p> |  <p>Figura 16. Poço Utilizando Bomba Centrífuga. FONTE: CPRM, 1998.</p> |

Bomba manual

É utilizada para bombeamentos manuais, com baixíssimas vazões (menos de 500 L/h), com baixas profundidades. Sua instalação é feita diretamente acoplada à boca do poço com um sistema de sucção dentro do poço, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998).

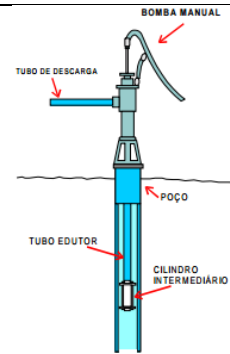


Figura 17. Poço Utilizando Bomba Manual.
FONTE: CPRM, 1998.

Catavento

Através da energia eólica, um pistão no interior do poço eleva a água pelo tubo edutor, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998).

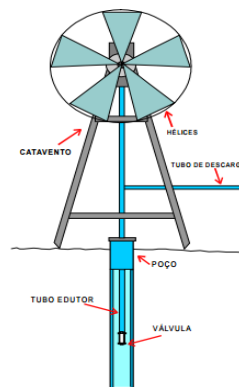


Figura 18. Poço Utilizando Catavento.
FONTE: CPRM, 1998.

Compressor

Ar comprimido é injetado no interior do tubo fazendo com que a água suba à superfície pelo tubo edutor, (COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, 1998).

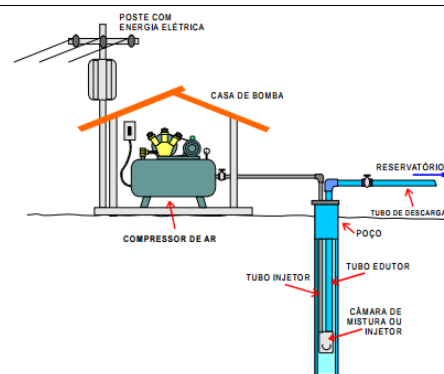


Figura 19. Poço Utilizando Compressor.
FONTE: CPRM, 1998.

5 Características do Poço Semi Artesiano Proposto e Instalações Hidráulicas

5.1 Poço semi artesiano

Através de sondagens a trado realizadas no campus universitário de Macaé foi verificado que na área do estacionamento o lençol freático encontra-se aproximadamente a 2 m. Também de acordo com as sondagens, verifica-se que o solo é argiloso com baixa permeabilidade até 8 ou 9 metros. Sendo assim, é muito provável que antes de se chegar à rocha sã, abaixo de 15 metros, deve haver uma camada de areia ou rocha decomposta com um bom índice de permeabilidade, sendo possível a construção do poço semi artesiano.

Para ser viável, o poço deverá ter uma profundidade mínima em torno de 9 m, início da camada de areia ou rocha decomposta.

5.2 Instalações hidráulicas

Como o poço ainda é uma proposta, será necessário estimar sua provável localização, assim como as instalações hidráulicas e suas características para o abastecimento do galpão. Nas Figuras 21 e 22 tem-se uma ideia de como serão as instalações.

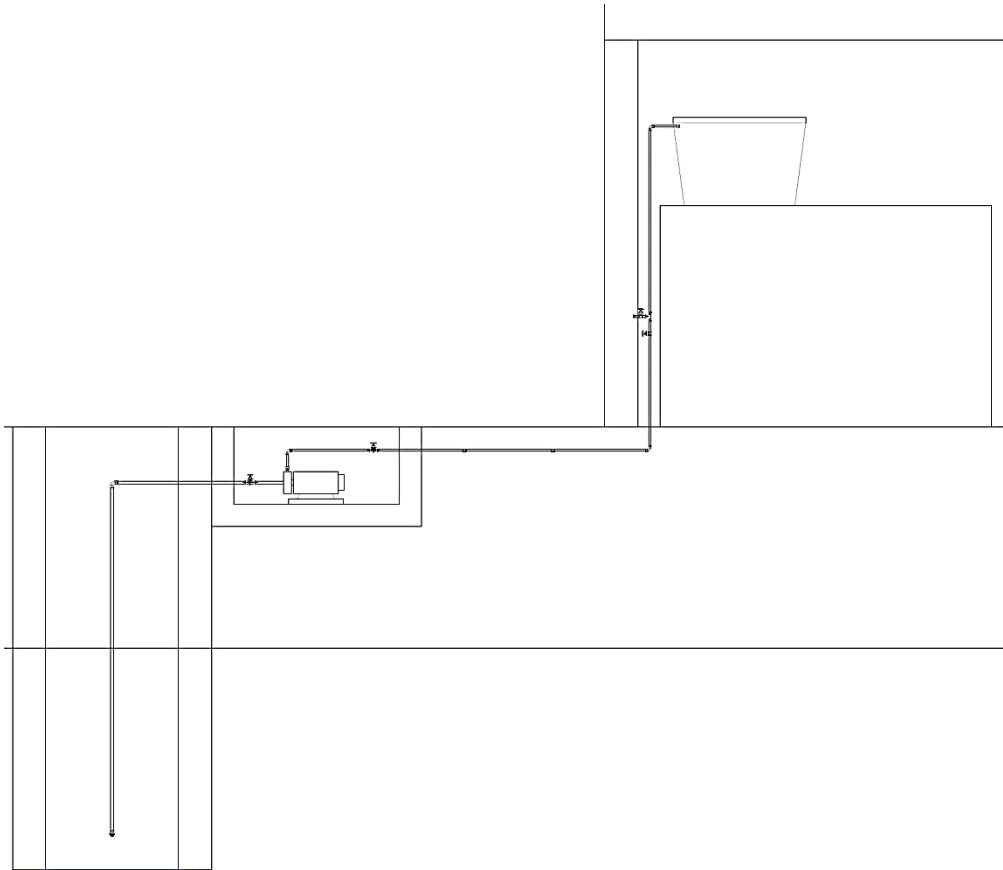


Figura 20. Vista lateral poço bomba galpão.

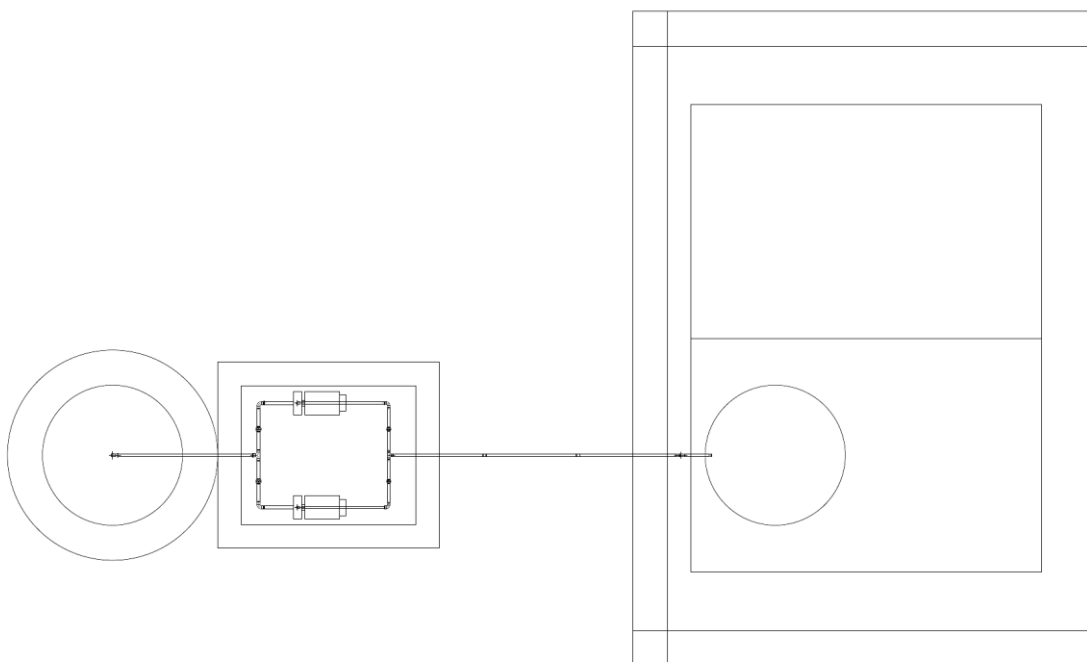


Figura 21. Vista superior poço bomba galpão.

O poço do tipo semi artesiano terá aproximadamente 9 metros de profundidade e um diâmetro constante e se encontrará a aproximadamente 35 metros do galpão para não contaminação.

O galpão será utilizado por professores e alunos do campus tendo como consumo diário de água estimado 4200 litros.

O reservatório superior será instalado acima dos banheiros a uma altura de 3 metros e terá como volume o consumo de 2 dias.

O sistema possuirá duas bombas centrífugas, sendo uma em operação e a outra em stand-by em caso de falhas. Elas serão instaladas a 1 metro abaixo do terreno.

Tanto a tubulação de sucção como a de recalque e seus acessórios serão de PVC. As conexões a serem utilizadas estão listadas nas Tabelas 17 e 18.

Tabela 17. Acessórios na sucção.

| Sucção |
|---------------------------|
| 1 válvula de pé com crivo |
| 2 curvas 90° |
| 1 T de saída lateral |
| 1 registro de gaveta |

Tabela 18. Acessórios no recalque.

| Recalque |
|------------------------|
| 1 válvula de retenção |
| 4 curvas 90° |
| 1 T de saída lateral |
| 1 T de passagem direta |
| 2 luvas |
| 2 registros de gaveta |
| 1 saída de canalização |

5.3 Diâmetros de recalque e de sucção

Através do projeto inicial do galpão tem-se que o consumo diário de água estimado é de 4200 litros. Para cálculo, utiliza-se o dobro do valor do consumo diário, ou seja, o equivalente ao consumo de dois dias, 8400 litros.

O dimensionamento do diâmetro de recalque baseia-se na fórmula de Forchheimer:

$$D = 1,3\sqrt{Q}^4 \sqrt{\frac{h}{24}} \quad (5.1)$$

Em que:

Q – vazão [m^3/s]

h - horas de funcionamento da bomba

Pelas normas NB-92/80, NBR – 5626, a capacidade horária mínima de bomba é de 15% do consumo diário. Para praticidade, pode-se tomar 20%, o que obriga a bomba a funcionar durante 5 horas para recalcar o consumo diário. A vazão é obtida pela Equação (3.4).

$$Q = \frac{8400}{5} = 1680 \frac{L}{h} = 4,67 \cdot 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Pela Equação (5.1)

$$D_r = 0,019 \text{ m}$$

Como este valor não coincide com o valor de um diâmetro comercial, o diâmetro de recalque deve ser o diâmetro comercial inferior ou superior ao calculado. Portanto:

$$D_r = 20 \text{ mm}$$

Para comprovação, deve-se realizar o cálculo da velocidade econômica, devendo a mesma estar entre 0,5 a 4 metros por segundo.

$$V = \frac{4Q}{\pi D_r^2} \quad (5.2)$$

$$V = 1,65 \text{ m/s}$$

Logo o diâmetro de recalque para a vazão estimada é de 19 milímetros e o diâmetro de sucção é o diâmetro comercial imediatamente superior ao diâmetro de recalque, 25 milímetros.

$$D_s = 25 \text{ mm}$$

Realizando o cálculo da velocidade econômica para o diâmetro de sucção, encontra-se:

$$V = 0,95 \text{ m/s}$$

5.4 Controle de acionamento da bomba

O acionamento da bomba será realizado por bóias elétricas de nível instaladas no reservatório superior e no poço. No reservatório superior, a bóia fará o controle de nível de água, acionando a bomba quando o nível do reservatório atingir 20% do volume total. No poço, a bóia fará a proteção da bomba, não permitindo o seu acionamento quando o poço estiver no nível mínimo de sucção, que será definido após a seleção da bomba. As Figuras 23, 24 e 25 ilustram o funcionamento das bóias.

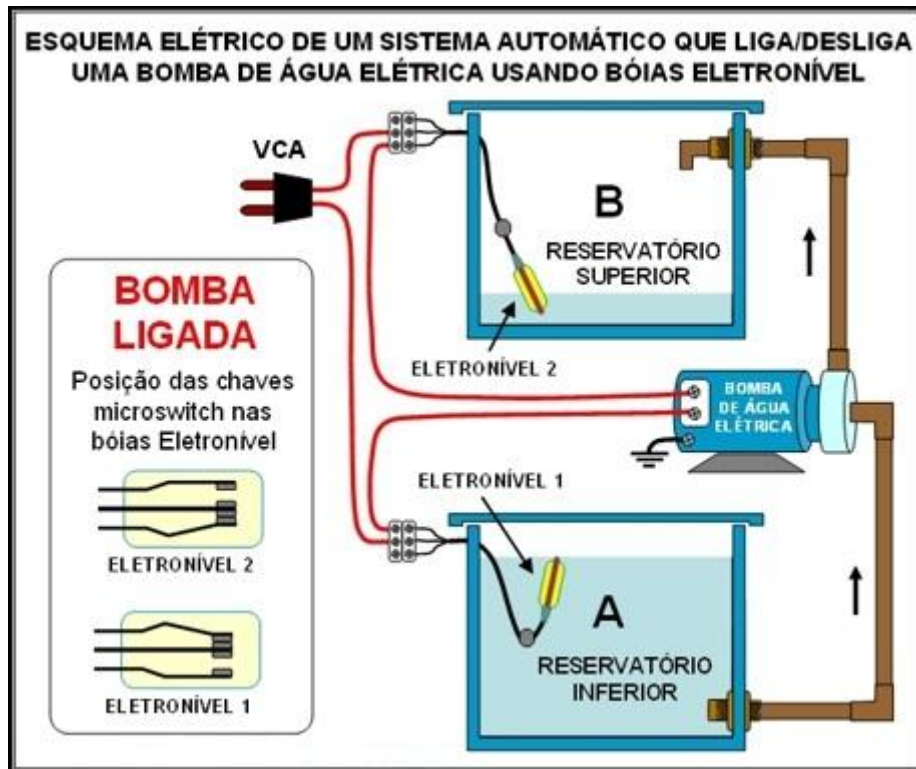


Figura 22. Esquema bóia elétrica de nível e bomba ligada.

FONTE: <<http://www.sempresustentavel.com.br/hidrica/bombasdeagua/dicas/boia-eletronivel.htm>>.

Acesso em: 29 agosto 2016.

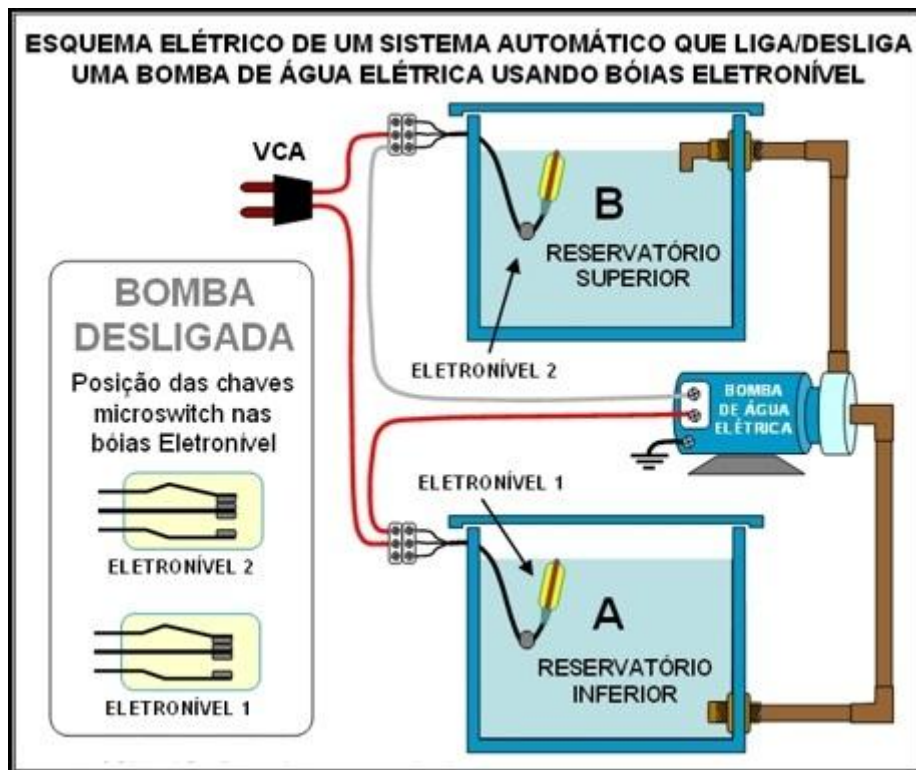


Figura 23. Esquema bóia elétrica de nível e bomba desligada.

FONTE:<<http://www.sempresustentavel.com.br/hidrica/bombasdeagua/dicas/boia-eletronivel.htm>>.

Acesso em: 29 agosto 2016.

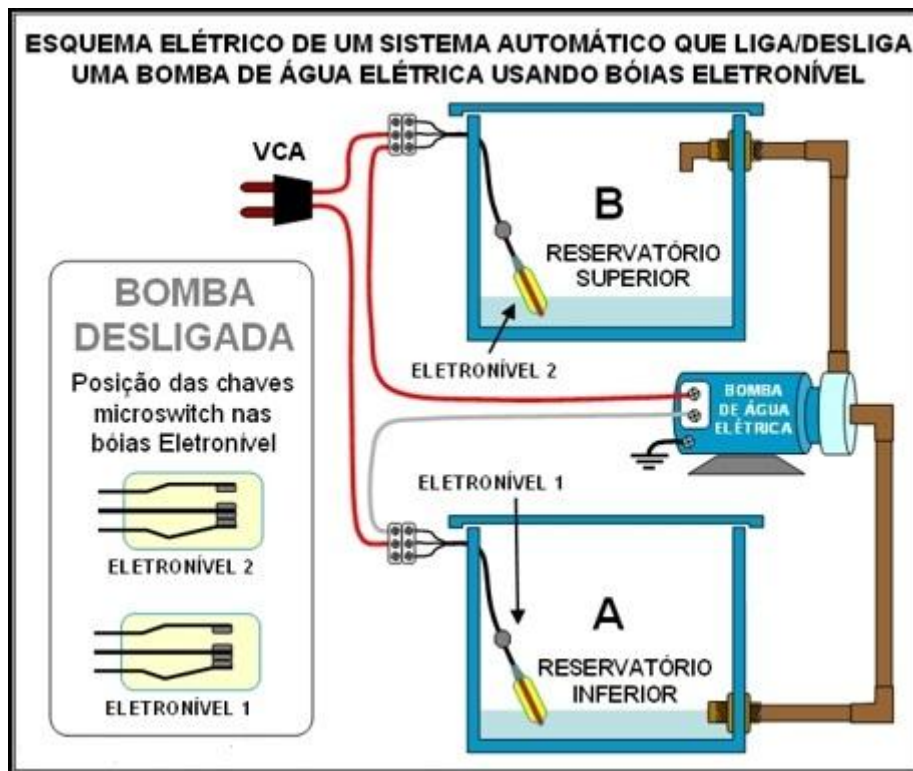


Figura 24. Esquema bóia elétrica de nível e bomba desligada

FONTE: <<http://www.sempresustentavel.com.br/hidrica/bombasdeagua/dicas/boia-eletronivel.htm>>.

Acesso em: 29 agosto 2016.

6 Cálculos para Seleção da Bomba

Para a seleção da bomba são necessários os cálculos da vazão e head, além de verificar o NPSH da mesma para evitar a cavitação.

6.1 Cálculo da vazão da bomba

O cálculo da vazão da bomba foi realizado na Seção 5.3 para determinar os diâmetros da tubulação, para tal foi utilizado o consumo estimado para o galpão referente a dois dias e o tempo recomendado de funcionamento diário da bomba.

$$Q = 1680 \text{ L/h}$$

6.2 Altura geométrica

A altura geométrica do sistema é obtida pela Equação 3.15 para os valores da altura geométrica de descarga e da altura geométrica de sucção indicados nas Figuras 26 e 27.

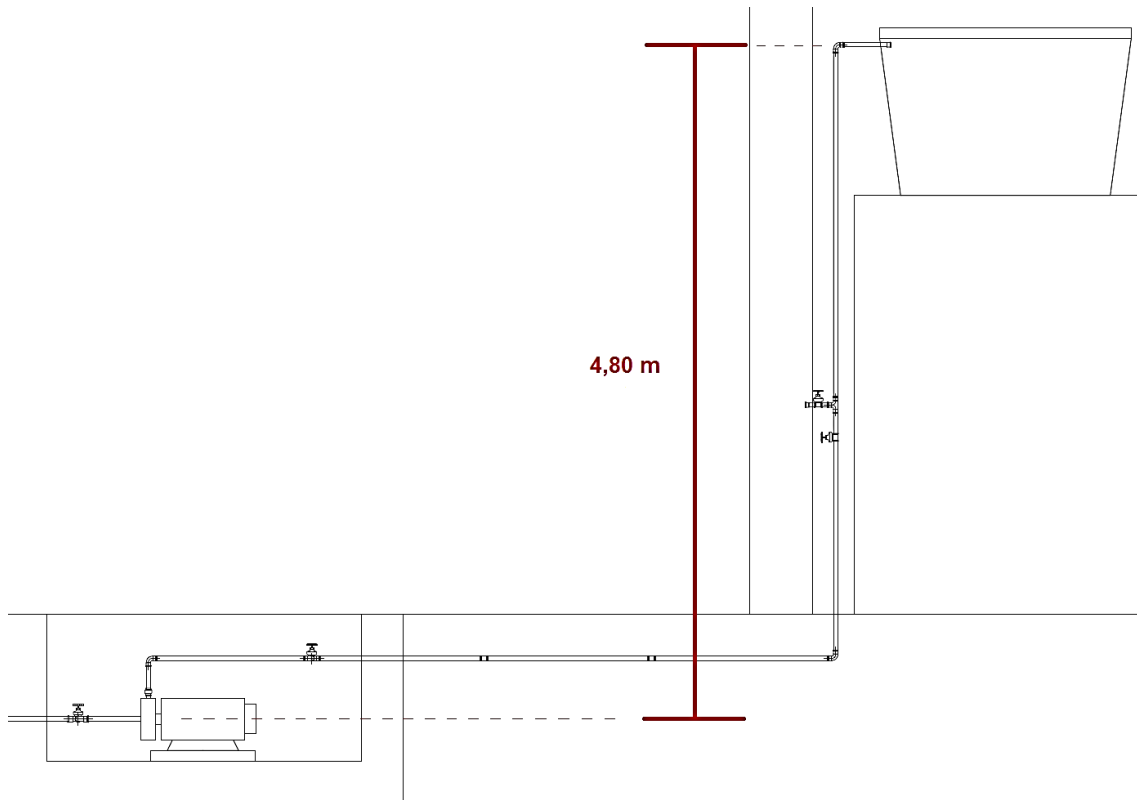


Figura 25. Altura geométrica de descarga.

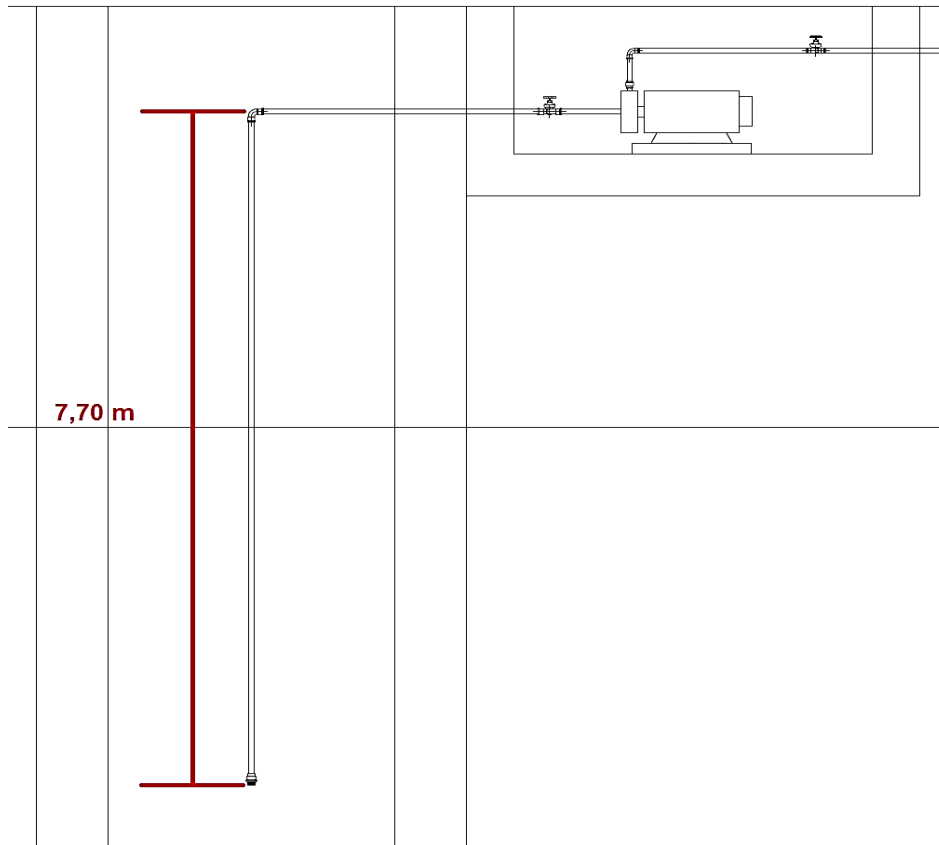


Figura 26. Altura geométrica de sucção.

A altura geométrica de descarga é a diferença de altura entre o reservatório superior e o eixo da bomba e a altura geométrica de sucção é a diferença de altura entre o eixo da bomba e o nível dinâmico do poço, que para o sistema proposto foi considerado o ponto de captação.

$$Z_d = 4,80 \text{ m}$$

$$Z_s = - 7,70 \text{ m}$$

$$Z = 4,80 + 7,70 = 12,5 \text{ m}$$

6.3 Perda de carga do sistema

6.3.1 Perda de carga distribuída

A perda de carga do sistema será calculada pela fórmula de Hazen – Willians, para aplicá-la deve-se determinar o coeficiente de Hazen – Willians obtido pela Tabela 11, tendo como PVC o material da tubulação, C corresponde a 125.

Da Equação 3.11, para a vazão de 1,68 m³/h e o diâmetro de sucção de 25 mm, a perda de carga distribuída na sucção é de 0,0614 m/m.

$$h_{pd} = 10,643 \cdot \left(\frac{1,68}{3600}\right)^{1,85} \cdot (125)^{-1,85} \cdot \left(\frac{25}{1000}\right)^{-4,87} = 0,0614 \text{ m/m}$$

Da mesma maneira para o diâmetro de recalque de 20 mm, a perda de carga distribuída no recalque é de 0,1819 m/m.

$$h_{pd} = 10,643 \cdot \left(\frac{1,68}{3600}\right)^{1,85} \cdot (125)^{-1,85} \cdot \left(\frac{20}{1000}\right)^{-4,87} = 0,1819 \text{ m/m}$$

6.3.2 Comprimentos reais e equivalentes

Os comprimentos reais ou trechos retos da tubulação estão identificados nas Figuras 28, 29, 30 e 31.

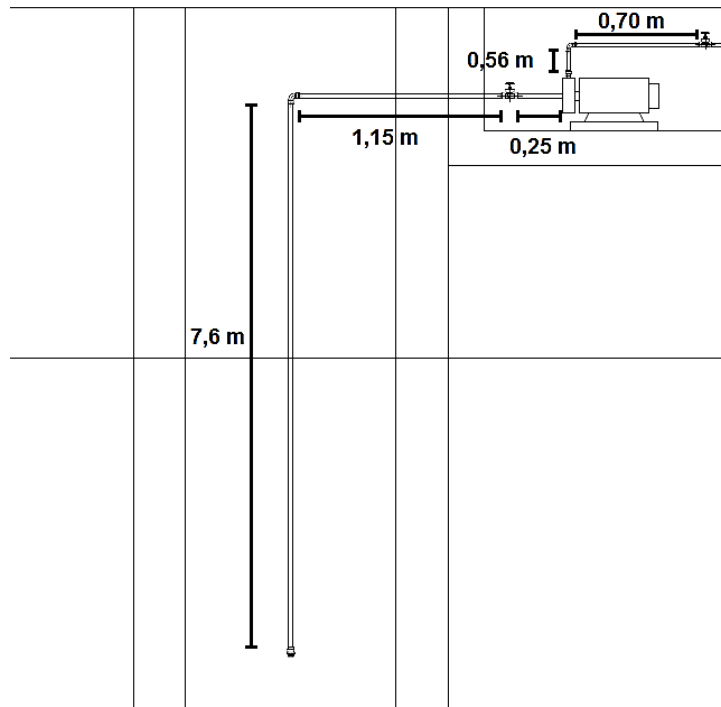


Figura 27. Comprimento real da tubulação.

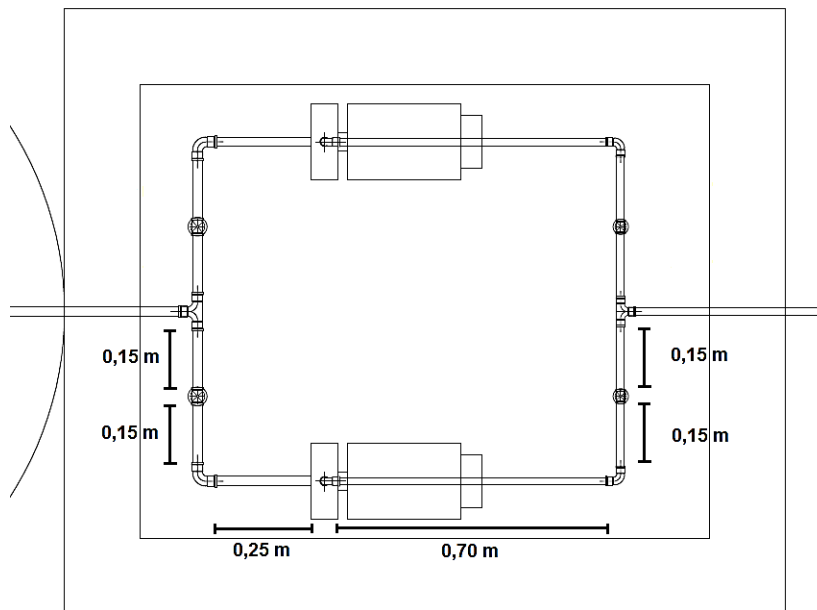


Figura 28. Comprimento real da tubulação.

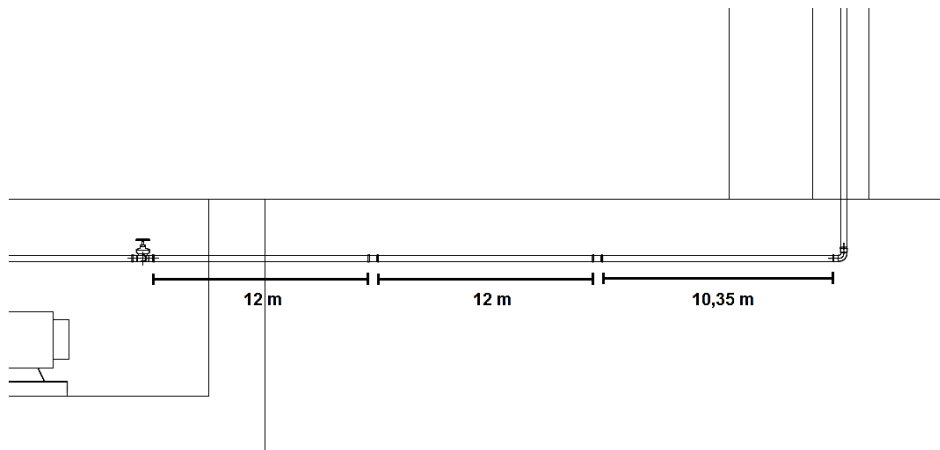


Figura 29. Comprimento real da tubulação.

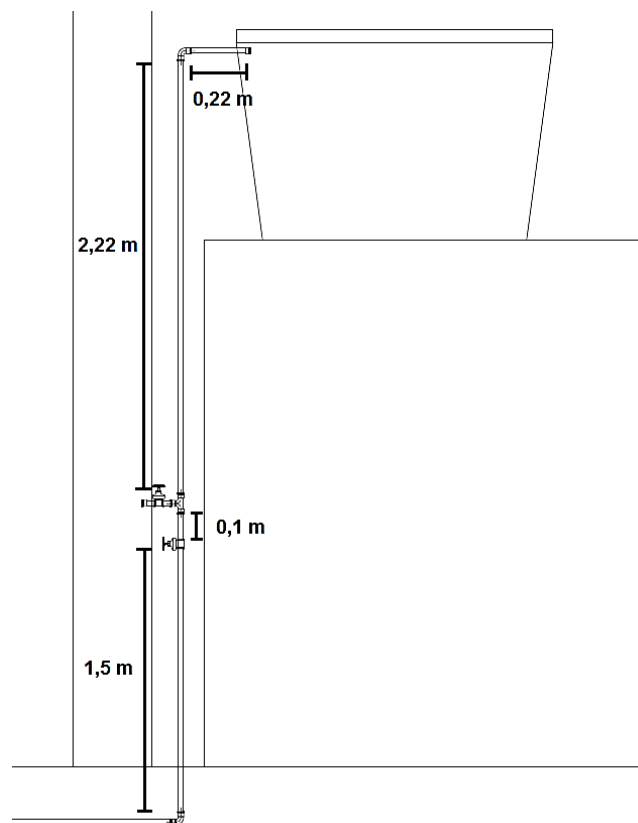


Figura 30. Comprimento real da tubulação.

Pelas Tabelas 17 e 18 foram indicados os acessórios e a quantidade utilizada e pela Tabela 13 obtêm-se os valores dos comprimentos equivalentes de cada acessório.

As Tabelas 19 e 20 resumem os comprimentos reais e equivalentes da tubulação de sucção e recalque.

Tabela 19. Comprimento real e equivalente na sucção.

| Sucção | | | |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|--|
| Diâmetro | | $D_s = 25 \text{ mm}$ | |
| Comprimento real da tubulação | | $L_R = 9,30 \text{ m}$ | |
| Acessórios | Quantidade | Comprimento Equivalente | Comprimento Equivalente Total [m] |
| Válvula de pé com crivo | 1 | 7,30 | 7,30 |
| Curva 90° | 2 | 0,50 | 1 |
| T de saída lateral | 1 | 1,70 | 1,70 |
| Registro de gaveta | 1 | 0,20 | 0,20 |
| | | Total | 10,20 |

Tabela 20. Comprimento real e equivalente no recalque.

| Recalque | | | |
|-------------------------------|-------------------|--------------------------------|--|
| Diâmetro | | $D_r = 20 \text{ mm}$ | |
| Comprimento real da tubulação | | $L_R = 40 \text{ m}$ | |
| Acessórios | Quantidade | Comprimento Equivalente | Comprimento Equivalente Total [m] |
| Válvula de retenção | 1 | 1,60 | 1,60 |
| Curva 90° | 4 | 0,40 | 1,60 |
| T de saída lateral | 1 | 1,40 | 1,40 |
| T de saída direta | 1 | 0,40 | 0,40 |
| Luva | 2 | 0,29 | 0,58 |
| Registro de gaveta | 2 | 0,10 | 0,20 |
| Saída de canalização | 1 | 0,50 | 0,50 |
| | | Total | 6,28 |

Logo, o comprimento total da tubulação de sucção é 19,50 m e o comprimento total da tubulação de recalque é 46,28 m.

$$L_T = L_R + L_{Eq}$$

$$L_{Ts} = 9,30 + 10,20 = 19,50 \text{ m}$$

$$L_{Tr} = 40 + 6,28 = 46,28 \text{ m}$$

6.3.3 Perda de carga total

Pela Equação 3.11 obtém-se o valor da perda de carga total na sucção e no recalque sabendo o valor da perda de carga distribuída e o comprimento total da tubulação.

$$h_{pd} = \frac{H_{pd}}{L}$$

$$H_{pd} = h_{pd} \cdot L$$

$$H_{pds} = 0,0614 \times 19,50 = 1,2 \text{ m}$$

$$H_{pdr} = 0,1819 \times 46,28 = 8,42 \text{ m}$$

$$H_p = H_{pds} + H_{pdr} = 9,62 \text{ m}$$

6.4 Altura manométrica do sistema

Pela Equação 3.19 determina-se a altura manométrica do sistema sabendo a perda de carga total e altura geométrica do sistema.

$$H_{man} = Z + H_p = 12,5 + 9,62 = 22,12 \text{ m}$$

6.5 Curva característica do sistema

Para construir a curva característica do sistema é necessário determinar as alturas manométricas do sistema para diferentes pontos de vazão. Para mais três pontos de vazão escolhidos, calculou-se a perda de carga total e a altura manométrica correspondente. As Tabelas 21, 22, 23, 24 e 25 indicam os pontos da curva.

Tabela 21. Dados do Ponto 1.

| Ponto 1 | |
|-----------------------|------|
| Q (m ³ /h) | 0 |
| H _p (m) | 0 |
| H _{man} (m) | 12,5 |

Tabela 22. Dados do Ponto 2.

| Ponto 2 | |
|-----------------------|-------|
| Q (m ³ /h) | 0,56 |
| H _p (m) | 1,26 |
| H _{man} (m) | 13,76 |

Tabela 23. Dados do Ponto 3.

| Ponto 3 | |
|-----------------------|------|
| Q (m ³ /h) | 1,25 |
| H _p (m) | 5,56 |
| H _{man} (m) | 18,1 |

Tabela 24. Dados do Ponto 4.

| Ponto 4 | |
|-----------------------|-------|
| Q (m ³ /h) | 1,68 |
| H _p (m) | 9,62 |
| H _{man} (m) | 22,12 |

Tabela 25. Dados do Ponto 5.

| Ponto 5 | |
|-----------------------|-------|
| Q (m ³ /h) | 2,40 |
| H _p (m) | 18,58 |
| H _{man} (m) | 31,1 |

Os pontos indicados dão origem à curva característica indicada na Figura 32. Ela relaciona a altura manométrica do sistema com diferentes vazões.

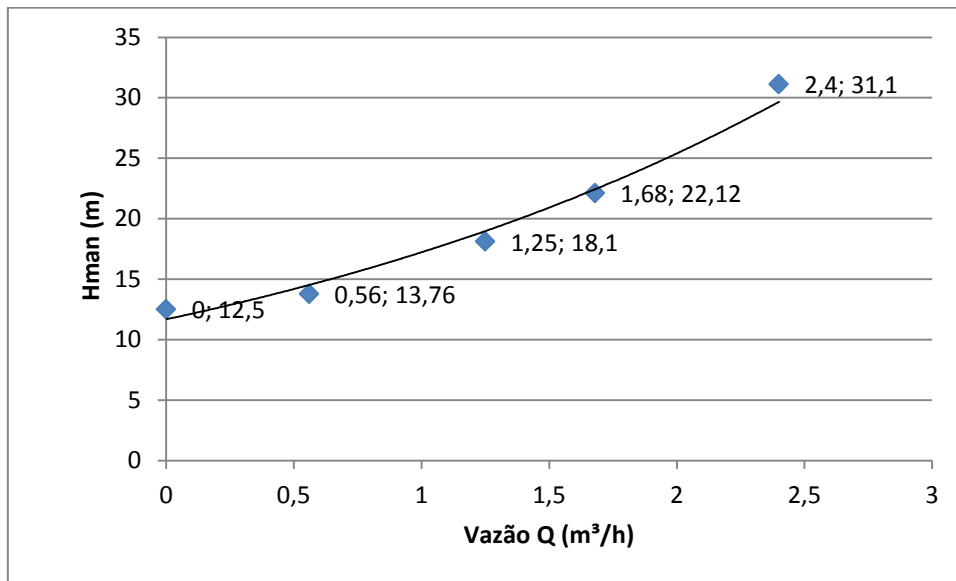


Figura 31. Curva característica.

O ponto utilizado para a seleção da bomba é o ponto de operação da mesma, cuja vazão corresponde a 1,68 m³/h e a altura manométrica a 22,12 m.

6.6 Cálculo do NPSH disponível

O NPSH disponível é obtido pela Equação 3.31 sabendo os valores da altura geométrica e a perda de carga na sucção, já calculadas, além dos valores da pressão atmosférica e da pressão de vapor.

Pelas Tabelas 15 e 16 obtêm-se os valores da pressão de vapor e da pressão atmosférica. Considerando a temperatura da água bombeada 25 °C, a pressão de vapor correspondente é 322 Kgf/m² ou dividindo-se o valor pelo peso específico da água (997 Kgf/m³) 0,323 m. A altitude local para o campus pode ser considerada zero, já que a cidade Macaé encontra-se no nível do mar, para este valor a pressão atmosférica corresponde a 10,33 m.

$$NPSH_{DISP} = h_{atm} \pm Z_s - h_v - h_{ps}$$

$$h_{atm} = 10,33 \text{ m}$$

$$Z_s = -7,7 \text{ m}$$

$$h_v = 0,323 \text{ m}$$

$$h_{ps} = 1,2 \text{ m}$$

$$NPSH_{DISP} = 10,33 - 7,7 - 0,323 - 1,2 = 1,107 \text{ m}$$

Considerando o fator de segurança da Equação 3.32.

$$NPSH_{DISP} \geq NPSH_{REQ} + 0,6$$

$$NPSH_{REQ} \leq 0,5 \text{ m}$$

6.7 Potência do motor

Pela Equação 3.23 é possível estimar a potência do motor elétrico da bomba. Utilizando um rendimento de 75%:

$$Pot_{abs} = \frac{\rho Q H}{\eta}$$

Ou

$$Pot_{abs} = \frac{\gamma Q H}{75\eta}$$

$$\gamma = 997 \text{ Kgf/m}^3$$

$$Q = 4,67 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H = 22,12 \text{ m}$$

$$\eta = 75\%$$

$$Pot_{abs} = 0,2 CV$$

O motor que aciona a bomba deve trabalhar com uma folga ou margem de segurança, evitando que o mesmo venha, por uma razão qualquer, operar com sobrecarga. Assim, recomenda-se que a potência necessária ao funcionamento da bomba seja acrescida de uma folga conforme a recomendação a seguir para motores elétricos: até 0,2 cv (50%), de 0,2 cv a 0,5 cv (30%), de 0,5 cv a 10 cv (20%), de 10 cv a 20 cv (15%) e acima de 20 cv (10%).

Considerando uma folga de 50% para o motor elétrico, a potência passará a ser de 0,30 cv.

7 Seleção da Bomba

Após determinar as condições operacionais como: vazão de operação, altura manométrica total, fluido bombeado, temperatura de bombeamento e curva do sistema, seleciona-se o tipo de bomba.

Analisando a Seção 4.3 referente aos tipos de bombeamento em poço tubular verifica-se que a bomba centrífuga é a mais adequada para pequenas vazões e baixa profundidade, sendo a escolhida para o sistema em estudo.

Após a definição do tipo de bomba, deve-se escolher o modelo adequado do fabricante para o sistema. Pelo catálogo de bombas centrífugas da KSB (Figura 33) é possível selecionar o modelo da mesma.



Figura 32. Catálogo bombas centrífugas KSB.

FONTE: <http://www.vanguardacomercial.com.br/download/catalogo_bombas_ksb.pdf>. Acesso em: 10 outubro 2016.

O tipo de bomba mais adequado para o sistema é o HYDROBLOC CN. De posse dos valores calculados e da tabela de escolha (Figura 34) ou curvas características (Figura 35) fornecidas pelo fabricante, escolhe-se o modelo da bomba.

Para a vazão de 1,68 m³/h e altura manométrica de 22,12 m o modelo escolhido é o C 750 N, cuja potência do motor é de 0,75 cv.

Considerações

Selecionada a bomba, definiu-se o nível mínimo de sucção no poço. Para os dados de operação informados pelo fabricante (Figura 34), a altura máxima de sucção permitida para o modelo da bomba selecionada é de 7 m. Como a altura manométrica de sucção é de 8,9 m, o nível mínimo de sucção é de 1,9 m da captação de água, ou seja, quando o nível de água atingir essa altura, a bóia de nível não permitirá o acionamento da bomba.

A bomba selecionada para o sistema proposto é do tipo monobloco (acoplada ao motor) de baixa potência, não sendo necessário definir uma potência para um motor, nem o diâmetro do rotor, pois são fornecidos pelo fabricante um único valor para o modelo escolhido. Para bombas de maior potência, utilizadas para vazões maiores, faz-se necessário determinar tanto a potência como o diâmetro do rotor, obtidos pelas curvas características, mencionadas na Seção 3.4, fornecidas pelo fabricante.

Por primeira escolha pôde-se observar o que foi apresentado na teoria, em que a maioria das bombas centrífugas de simples estágio tem o melhor ponto de eficiência localizada em torno de 70% a 85% da vazão máxima. Para vazões muito abaixo ou acima deste ponto resulta uma menor eficiência, não sendo vantajosa sua utilização.

8 Estimativa de Custo

O custo do projeto foi feito com base no TCPO (Tabelas de Composição de Preços para Orçamento). Na Tabela 26 está indicado o custo de cada serviço, incluindo materiais e mão de obra, além da aquisição da bomba.

Tabela 26. Custo do projeto.

| | QUANTIDADE | PREÇO UNITÁRIO | PREÇO TOTAL |
|--|------------|----------------|---------------------|
| POÇO | 1 | R\$ 2.504,36 | R\$ 2.504,36 |
| ABRIGO DE BOMBA | 1 | R\$ 1.612,65 | R\$ 1.612,65 |
| INSTALAÇÃO HIDRÁULICA | 1 | R\$ 1.883,54 | R\$ 1.883,54 |
| INSTALAÇÃO DOS CONJUNTOS MOTOR-BOMBA - ATÉ 1HP | 2 | R\$ 241,41 | R\$ 482,82 |
| AQUISIÇÃO DOS CONJUNTOS MOTOR-BOMBA | 2 | R\$ 800,00 | R\$ 1.600,00 |
| CUSTO TOTAL DOS SERVIÇOS | | | R\$ 8.083,38 |

9 Conclusão

A utilização de poços artesianos é uma alternativa para o abastecimento de água que vêm crescendo devido a grande demanda que por muitas vezes não é suprida pelas concessionárias, ou pela escassez do recurso em regiões do país em épocas de seca. Esta forma de abastecimento deve ser incentivada principalmente para uso geral que demanda uma maior quantidade de água e em que o desperdício se faz frequente.

O abastecimento de água através do poço semi artesiano é economicamente viável e quando comparado aos gastos com o abastecimento por concessionária é, a longo prazo, mais vantajoso. Porém, para a profundidade estabelecida no projeto, a utilização da água fica restrita a banheiros, jardins e limpeza, não tendo potabilidade adequada para consumo, para este fim, faz-se necessário um tratamento adequado da água ou uma profundidade maior para o poço, cerca de 100 m, além da análise da qualidade da água e acompanhamento por profissionais especializados na área.

O sistema de abastecimento proposto para o galpão assim como a seleção da bomba estão limitados para os valores de operação apresentados no projeto. Se houvesse a necessidade de ampliar o sistema, de maneira a abastecer outras salas ou prédios do campus, dependendo da nova vazão, seria necessário redimensionar todo o sistema, inclusive selecionar uma nova bomba.

A seleção de uma bomba para um sistema de recalque pode ser bem mais complexa do que para o sistema proposto. A bomba selecionada, assim como a maioria encontrada no mercado são específicas para uma determinada condição de trabalho, assim sendo, fora desta condição seu rendimento poderá ficar bem abaixo do esperado, não compensando a sua utilização. Portanto, não basta ter em mãos um mosaico, tabelas ou curvas de seleção de bombas, todos os parâmetros listados para a seleção da mesma devem ser levados em consideração para definir a opção mais viável, caso contrário todo sistema deverá ser redimensionado.

Além disso, durante a seleção, dependendo do sistema como um todo, faz-se necessário analisar as possibilidades de alteração do ponto de trabalho da bomba, objetivando propiciar flexibilidade ao sistema, principalmente em aplicações industriais em que seja necessário atender uma nova necessidade operacional.

Referências Bibliográficas

- Água Subterrâneas na RH-VIII Bacias Hidrográficas dos Rios Macaé, das Ostras e Lagoa de Imboassica*. INEA, 2012. Disponível em: <http://www.planomacaeostras.com/pdf/aguas_subterraneas_versao_ago2012.pdf>. Acesso em: 14 julho 2016.
- BRUNETTI, F. *Mecânica dos Fluidos*. 2ª edição. São Paulo. Pearson Prentice Hall, 2008.
- CAPUCCI, E. *et al. Poços Tubulares e Outras Captações de Águas Subterrâneas*. Rio de Janeiro. SEMADS, 2001.
- CREDER, H. *Instalações Hidráulicas e Sanitárias*. 6ª edição. Rio de Janeiro. LTC, 2012.
- DA SILVA, M. A. *Manual de Treinamento KSB – Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas*. 5ª edição. 2003.
- DE MATTOS, E.E., DE FALCO, R. *Bombas Industriais*. 2ª edição. Rio de Janeiro. Interciência, 1998.
- FERREIRA FILHO, J., RODRIGUES R. C. *Monitoramento e Controle de Processos*. Rio de Janeiro. Petrobras, 2003.
- FILHO, W. D. C. *et al. Noções Básicas Sobre Poços Tubulares*. CPRM, 1998.
- FOX, R. W. MCDONALD, A. T., PRITCHARD, P. J., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*. 6ª edição. LTC, 2006.
- FUNASA. *Manual de Projeto e Construção de Poços Tubulares Profundos*. 2014.
- FUNDAÇÃO COPPETEC. *Elaboração do Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro. INEA, 2014.
- HENN, E. A. L. *Máquinas de Fluido*. Santa Maria. UFSM, 2012.
- JUSTINO, D. *Dimensionamento do Sistema de Recalque para abastecimento de água da comunidade de Macundú, distrito de São João Marcos, município de Rio Claro, Rio de Janeiro*. Centro Universitário de Volta Redonda. Cadernos UNIFOA, 18º edição. Volta Redonda, 2012.
- Manual de curvas características. KSB, 2005. Disponível em: <http://www.ufrj.br/institutos/it/deng/daniel/Downloads/Material/Graduacao/IT%20503/MC_A2740_42_44_4P_E_S_5%5B1%5D.pdf>. Acesso em: 1 out. 2016.
- LIVI, C. P. *Fundamentos de Fenômenos de Transporte*. 2ª edição. Rio de Janeiro. LTC, 2013.

SOUZA, P. H. A. I. *Apresentação dos Cálculos para Seleção de Bomba para Sistema de Reaproveitamento de Água de Poços Artesianos*. 2014. 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

TCPO. *Tabelas de Composições de Preços para Orçamentos*. 13ª edição. São Paulo. Pini, 2008.