



APRESENTAÇÃO DO CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS À SELEÇÃO DE UMA BOMBA PARA O SISTEMA DE LASTRO DE UM NAVIO PORTA- CONTÊINER

Thiago de Souza Preuss

Projeto de Graduação apresentado ao
Curso de Engenharia Mecânica da Escola
Politécnica, Universidade Federal do Rio
de Janeiro, como parte dos requisitos
necessários à obtenção do título de
Engenheiro.

Orientador: Reinaldo de Falco

Rio de Janeiro

Março de 2013



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

Departamento de Engenharia Mecânica

DEM/POLI/UFRJ



**APRESENTAÇÃO DO CÁLCULO DAS CARACTERÍSTICAS NECESSÁRIAS À
SELEÇÃO DE UMA BOMBA PARA O SISTEMA DE LASTRO DE UM NAVIO
PORTA-CONTÊINER**

Thiago de Souza Preuss

PROJETO FINAL SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO MECÂNICO.

Aprovado por:

Prof. Reinaldo De Falco, M.Sc.

Prof. Fernando Augusto de Noronha Castro Pinto, Dr.-Ing

Prof. Flávio de Marco Filho, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2013

Preuss, Thiago de Souza

Apresentação do Cálculo das Características Necessárias à Seleção de uma Bomba para o Sistema de Lastro de um Navio Porta-Contêiner/ Thiago de Souza Preuss. – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2013.

VI, 90 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Reinaldo de Falco

Projeto de Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia Mecânica, 2013.

Referências Bibliográficas: p. 69.

1. Bomba Centrífuga 2. Altura Manométrica 3. Curva Característica do Sistema 4. Sistema de Lastro. I. De Falco, Reinaldo. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ, Curso de Engenharia Mecânica. III. Apresentação do Cálculo das Características Necessárias à Seleção de uma Bomba para o Sistema de Lastro de um Navio Porta-Contêiner.

Agradecimentos

A Deus, por me permitir chegar até aqui.

Aos meus pais, por todo amor e apoio, tanto neste trabalho, como em toda minha vida.

Ao professor Reinaldo de Falco, pela paciência, compreensão e conhecimento na orientação deste trabalho.

Aos professores Fernando Castro Pinto e Flávio de Marco Filho pela participação na banca.

E a todos aqueles que contribuíram para que eu pudesse chegar a este ponto na minha vida.

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica/ UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro Mecânico.

Apresentação do Cálculo das Características Necessárias à Seleção de uma Bomba para o Sistema de Lastro de um Navio Porta-Contêiner

Thiago de Souza Preuss

Março/2013

Orientador: Reinaldo De Falco

Curso: Engenharia Mecânica

Há séculos os navios utilizam o lastro, que é de fundamental importância para manter a sua estabilidade durante as viagens. A utilização do lastro líquido, em substituição ao lastro sólido, como pedras, areia e telhas, trouxe uma grande mudança para a navegação. Com lastro líquido, evitava-se o longo tempo para o carregamento de materiais sólidos e as perigosas instabilidades do navio, resultantes da troca de lastro sólido durante uma viagem.

A partir daí, tornou-se necessário o uso de bombas para que se pudesse fazer o carregamento (lastrar) e o descarregamento (deslastar) da água de lastro do navio. A complexidade do sistema de lastro irá variar com o tipo de navio. Normalmente, os tanques de lastro se situam ao longo de toda sua estrutura, fazendo a tubulação percorrer todo o casco, resultando uma tubulação bem comprida e com ramificações. Para que as operações de lastro e deslastro possam funcionar corretamente, é preciso que o cálculo das características principais da bomba, como vazão e a altura manométrica do sistema, seja adequado. E como esse sistema tem vários reservatórios, esse cálculo pode se tornar um pouco mais complexo. Neste trabalho será visto uma forma de realizar estes cálculos, buscando sempre a situação mais crítica que a bomba irá operar. E a partir das considerações feitas, será estudado o melhor caso para a seleção da bomba.

Palavras-Chave: Bomba, Sistema de Lastro, Vazão, Altura Manométrica do Sistema.

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Engineer.

PRESENTATION OF CALCULATION OF THE REQUIRED CHARACTERISTICS TO
SELECT A PUMP FOR A BALLAST SYSTEM IN A CONTAINER SHIP

Thiago de Souza Preuss

March/2013

Advisor: Reinaldo De Falco

Course: Mechanical Engineering

For centuries ships used ballast, which is fundamental to maintain their stability during travel. The use of liquid ballast, replacing the solid ballast as rocks, sand and tiles, brought a big change to the navigation. With liquid ballast, the long time for loading of solids and dangerous instabilities resulting from the exchange of ship ballast solid during a trip were avoided.

Thereafter, it became necessary to use pumps, in order to load (ballasting) and unload (de-ballasting) the ship with ballast water. The ballast system complexity will vary with the type of ship. Normally, the ballast tanks are situated throughout its structure, resulting in a very long piping and in several ramifications for the ballast system.

For ballast and deballast operations work properly, we need to calculate the main characteristics of the pump flow and head. And as this system has several reservoirs, this calculation can become a little more complex. This work will show a method to perform these calculations, always alert to the most critical situation that the pump will operate. And from the considerations made, will be studied the best situation for the selection of the pump.

Keywords: Pump, Ballast System, Flow, Head.

Índice

1	Introdução.....	1
2	Objetivo e Estrutura do Trabalho	3
3	Conceitos de Mecânica dos Fluidos e Bombas Centrífugas.....	4
3.1	Vazão do Sistema	4
3.2	Capacidade da Bomba	5
3.3	Carga da Bomba e Curva <i>head</i> x vazão	5
3.4	Demais Curvas Características da Bomba	6
3.5	Perda de Carga do Sistema	8
3.5.1	Escoamento de Fluidos, Número de Reynolds e Fator de Atrito	9
3.5.2	Perda de Carga Distribuída.....	12
3.5.2.1	Perda de Carga Distribuída no Escoamento Laminar	12
3.5.2.2	Perda de Carga Distribuída no Escoamento Turbulento	13
3.5.3	Perda de Carga Localizada.....	13
3.6	Altura Manométrica do Sistema.....	15
3.6.1	Teorema de Bernoulli, Altura Manométrica de Sucção e de Descarga.....	17
3.6.2	Fórmula Geral da Altura Manométrica Total.....	19
3.7	Curva Característica do Sistema	20
3.7.1	Obtenção da Curva Característica do Sistema	20
3.8	NPSH Disponível x NPSH Requerido.....	22
4	Principais características do Navio e do Sistema de Lastro	25
4.1	O Navio	25
4.2	O Sistema de Lastro.....	27
4.2.1	Componentes do Sistema de Lastro	28
4.2.2	Diagramas do Sistema de Lastro	31
4.2.3	Tubulação Completa do Sistema de Lastro em 3 Dimensões	34
4.2.4	Operações de Lastro e Deslastro.....	34
5	Bomba de Lastro	40
5.1	Cálculo da Vazão da Bomba	40
5.2	Cálculo da Pressão da Bomba	40
5.2.1	Considerações para o Cálculo	41
5.2.2	Curvas Características do Sistema de Lastro	41
5.2.2.1	Alturas Geométricas (Z_d e Z_s).....	42
5.2.2.2	Perda de Carga do Sistema de Lastro (h_f)	44
5.2.2.3	Construção das Curvas Características.....	53

5.2.3 Associação das Curvas Características dos Sistemas.....	58
5.3 Cálculo do NPSH Disponível.....	63
5.4 Características Necessárias para a Seleção da Bomba.....	65
5.5 Cálculo da Potência do Motor Elétrico.....	66
6. Conclusão.....	68
Referências Bibliográficas.....	69
ANEXO 1 Desenhos Tridimensionais da Tubulação do Sistema de Lastro.....	70
ANEXO 2 Comprimento dos Trechos Retos da Tubulação do Sistema de Lastro.....	82

1 Introdução

Os navios sempre exigiram lastro para operar com sucesso e segurança. Durante séculos, os navios utilizaram lastro sólido, na forma de pedras, areia, telhas, e muitos outros materiais pesados. A partir de 1880, os navios passaram a utilizar cada vez mais a água para o lastro, evitando assim o longo tempo para o carregamento de materiais sólidos e as perigosas instabilidades do navio resultantes da troca de lastro sólido durante uma viagem. Hoje, o lastro dos navios pode ser feito com água doce, salobra ou água salgada, sendo esta última mais comumente usada.

O transporte marítimo é a base da maioria das transações comerciais no mundo. Cerca de 80% do volume do comércio mundial é transportado por navios. Infelizmente, em muitos casos, a metade de uma determinada viagem deve ser feita com lastro para compensar a falta de carga. E isso se mostra na própria palavra. A etimologia da palavra "lastro", que significa "carga inútil" em holandês, reflete o fato dos proprietários de navios se esforçarem ao máximo para evitar o uso de lastro.

A função do lastro é a de proporcionar uma estabilidade mais adequada para os navios no mar, sendo usado para forçá-lo para baixo e reduzir a altura do seu centro de gravidade em relação ao centro de empuxo. Como já foi dito, o lastro é geralmente feito com água do mar, que é bombeada para os tanques conhecidos como tanques de lastro. Dependendo do tipo de embarcação, os tanques podem ser de fundo duplo ou tanques laterais, que serão detalhados ao longo do trabalho. Estes tanques de lastro estão ligados a bombas, que podem bombear água para dentro ou para fora (deslastro). Estes tanques são cheios, a fim de adicionar peso ao navio, uma vez que a carga foi descarregada, e melhorar sua estabilidade. Em algumas condições extremas, a água de lastro pode ser introduzida nos espaços dedicados à carga, a fim de adicionar peso extra durante mau tempo ou para passar sob pontes baixas.



Figura 1 Deslastro do navio pelo Costado.

A água de lastro é utilizada por vários tipos de embarcações e é guardada em uma variedade de tanques ou porões. A complexidade das operações de lastro ou deslastro depende do tamanho, configuração e necessidades do navio e do seu sistema de bombeamento.

A capacidade dos tanques de lastro pode variar de vários metros cúbicos em veleiros e barcos de pesca, a centenas de milhares de metros cúbicos em navios de carga de grande porte. Grandes petroleiros podem transportar mais de 200.000 m³ de lastro.

Devido a fundamental importância do sistema de lastro para o navio, tal é a necessidade de um dimensionamento correto da bomba de lastro. E pela complexidade do sistema, a tarefa se torna ainda mais difícil, se tratando de um sistema com vários reservatórios, sendo necessário assumir algumas considerações para que o cálculo esteja adequado.

2 Objetivo e Estrutura do Trabalho

Este trabalho tem como objetivo apresentar o sistema de lastro de um navio porta-contêiner de grande porte e calcular as características principais de uma bomba para esse sistema. O trabalho foi dividido em 6 capítulos, de modo a abranger todo o conteúdo necessário ao entendimento dos conceitos fundamentais envolvidos, do sistema de lastro e da seleção da bomba. A seguir, será visto em detalhes os assuntos apresentados em cada capítulo, além dos dois iniciais que já foram mencionados.

O capítulo 3 mostra os principais conceitos de mecânica dos fluidos e das bombas centrífugas que serão utilizados nos cálculos de vazão e pressão da bomba. Além disso, mostra as curvas de carga, potência e eficiência da bomba e como obter a curva característica do sistema.

O capítulo 4 descreve o navio e o sistema de lastro, bem como seu funcionamento, suas características, os seus componentes, o diagrama do sistema e, ainda mostra a vista tridimensional da rede.

O capítulo 5 destina-se a parte dos cálculos para obter as características necessárias à seleção da bomba. Os conceitos explicados no capítulo 3 são aplicados através das fórmulas para calcular a vazão, perda de carga e altura manométrica do sistema. Nesse capítulo são mostradas também, as considerações sob as quais os cálculos foram feitos. Além disso, será visto a construção da curva característica para esse sistema.

O capítulo 6 é destinado à conclusão e considerações finais do trabalho.

No final do trabalho, existem 2 anexos. O primeiro mostra a tubulação do sistema de lastro em 3 dimensões. O segundo mostra os comprimentos de trechos retos numerados nas figuras e seus valores correspondentes se encontram em tabelas.

3 Conceitos de Mecânica dos Fluidos e Bombas Centrífugas

Neste capítulo serão abordados os principais conceitos sobre mecânica dos fluidos voltados para bombas centrífugas e sistemas de bombeamento. Esses conceitos são essenciais para compreendermos os parâmetros envolvidos no cálculo da vazão e da pressão que a bomba deverá possuir.

3.1 Vazão do Sistema

A vazão é uma característica que pode ser determinada em função da massa ou do volume de um fluido.

Para o caso de vazão volumétrica, é definida como sendo um volume de fluido que passa por uma secção em um determinado tempo.

$$Q = \frac{dV}{dt} \quad (3.1)$$

Para o caso da vazão mássica, é definida como uma quantidade de massa de fluido que passa por uma secção em certo período de tempo.

$$Q_m = \frac{dm}{dt} \quad (3.2)$$

A vazão volumétrica pode também ser determinada por outra relação, envolvendo a velocidade do fluido e a área da secção da tubulação, conforme mostrado abaixo:

$$Q = v \cdot dA \quad (3.3)$$

Sendo A , a área da secção circular:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.4)$$

Para o caso de sistemas, geralmente a vazão é uma característica do próprio projeto e deve atender a uma determinada demanda. Para o sistema de lastro deste trabalho, a vazão será estabelecida obtendo-se o volume total dos tanques de lastro e dividindo pelo tempo requisitado de projeto que o carregamento/descarregamento deve ser feito.

3.2 Capacidade da Bomba

A capacidade da bomba é o quanto de vazão esta consegue bombear para a tubulação. A capacidade irá variar de acordo com a quantidade do número de rotações e com o tamanho do diâmetro do impelidor. Os fabricantes mostram a faixa de vazão em que a bomba opera através de um gráfico, onde entraremos mais em detalhe no tópico seguinte.

3.3 Carga da Bomba e Curva *head* x vazão

Entende-se como carga da bomba, a energia por unidade de peso que a bomba consegue fornecer ao fluido. A carga, que também é chamada de *head*, é uma medida da altura da coluna de líquido que uma bomba poderia criar a partir da energia cinética transferida ao fluido.

Existem bombas para atender os diversos tipos de aplicações, porém para sabermos qual bomba será adequada para o respectivo serviço, devemos conhecer as características dessa bomba. O gráfico *head* x vazão é fundamental para que possamos ter essas informações. Através da curva do gráfico, podemos saber para cada vazão, qual carga a bomba poderá fornecer. Essa curva é uma das chamadas Curvas Características da bomba. No próximo tópico, veremos os demais tipos de curvas características. O gráfico *head* x vazão é mostrado abaixo:

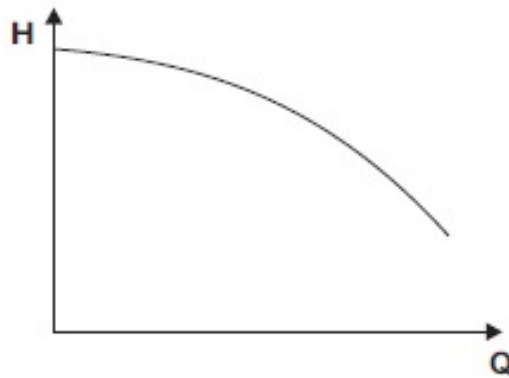


Figura 2 Gráfico Head x Vazão da Bomba

O gráfico utilizado como exemplo, tem a curva chamada de *rising* (inclinada). Nesta a carga aumenta continuamente com a diminuição da vazão. Além dessa, existem outros tipos de curva head x vazão. São as curvas ascendente/descendente (drooping), altamente descendentes (steep) e planas (flat). (DE MATTOS, DE FALCO, 1998)

O fabricante também pode fornecer várias curvas no mesmo gráfico, referentes ao tamanho do diâmetro de cada rotor, para um mesmo equipamento.

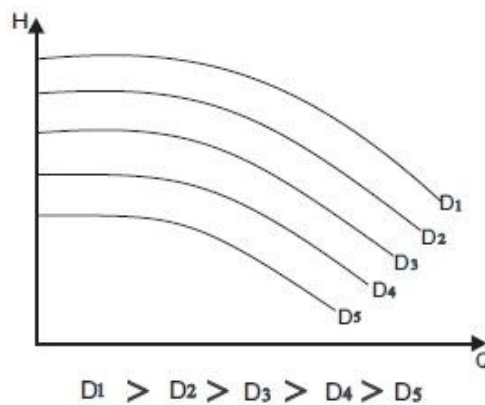


Figura 3 Curva da bomba para impelidores de diâmetros diferentes

3.4 Demais Curvas Características da Bomba

Além da curva *head* x vazão, as bombas tem outras duas principais curvas que a caracterizam. São as curvas de potência consumida x vazão e rendimento total (η) x vazão.

A curva de potência consumida x vazão, mostra a potência utilizada pelo acionador para movimentar a bomba em cada vazão. Para esse tipo de curva, o motor deve ser dimensionado de modo que sua potência cubra todos os pontos de operação.

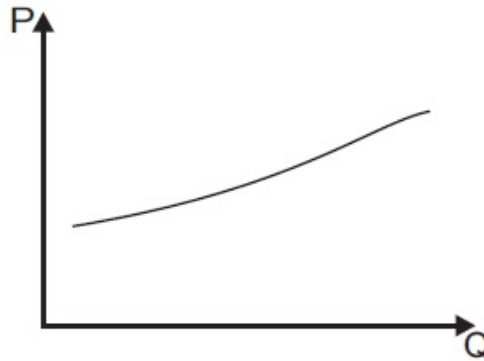


Figura 4 Curva Potência x Vazão

A potência consumida pode ser calculada pela fórmula expressa abaixo:

$$Pot_{Cons} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta} \quad (3.5)$$

Sendo,

Pot_{Cons}: Potência consumida [CV];

γ : peso específico do fluido [kgf/m³];

Q: vazão [m³/s];

H: carga [m];

η : rendimento da bomba.

Além da potência consumida pela bomba, também temos a potência hidráulica, que é a potência cedida ao fluido. Esta pode ser calculada pela seguinte fórmula:

$$Pot_{HIDR} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75} \quad (3.6)$$

Sendo,

Pot_{HIDR}: Potência hidráulica [CV]

γ : peso específico do fluido [kgf/m³];

Q: vazão [m³/s];

H: carga [m];

Outra curva importante é a curva rendimento (η) x vazão. O rendimento é a relação entre a potência hidráulica e a potência consumida pela bomba.

$$\eta = \frac{\text{Potência hidráulica}}{\text{Potência consumida}} \quad (3.7)$$

E a curva é representada da seguinte forma:

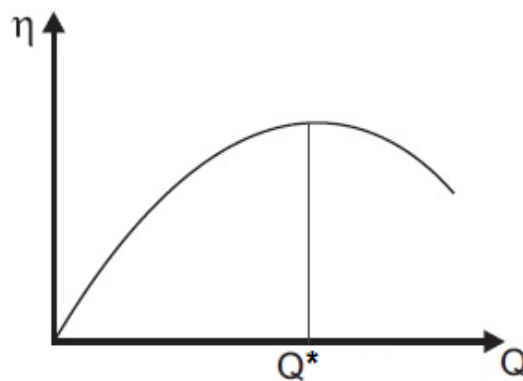


Figura 5 Curva Rendimento x Vazão

Sendo Q^* , o ponto onde a melhor eficiência é obtida.

3.5 Perda de Carga do Sistema

O termo perda de carga (h_f), numa tubulação, se refere à energia por unidade de peso perdida pelo fluido devido ao atrito com a parede do tubo e aos acessórios utilizados (curvas, válvulas, reduções etc). É dessa forma que a perda de carga é dividida: perda de carga distribuída (h_{fr}), que é a perda nos trechos retos; e perda de carga localizada (h_{fl}), que é a perda ocorrida nos acessórios. Assim:

$$h_f = h_{fr} + h_{fl} \quad (3.8)$$

Como a perda de carga distribuída irá depender do tipo de escoamento (laminar ou turbulento), é preciso entender a definição deles e como se determina o tipo de escoamento em que o fluido se encontra. (DE MATTOS, DE FALCO, 1998)

3.5.1 Escoamento de Fluidos, Número de Reynolds e Fator de Atrito

a) Escoamento Laminar

O escoamento laminar ocorre quando as partículas de um fluido movem-se ao longo de trajetórias bem definidas, apresentando lâminas ou camadas e tendo cada uma delas a sua característica preservada no meio. No escoamento laminar a viscosidade age no fluido no sentido de amortecer a tendência de surgimento da turbulência. Este escoamento ocorre geralmente a baixas velocidades e em fluidos que apresentem grande viscosidade.

b) Escoamento Turbulento

O 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, com movimento aleatório, produzindo uma transferência de quantidade de movimento entre regiões de massa líquida. Este escoamento é comum na água, cuja viscosidade é relativamente baixa.

Neste tipo de escoamento as partículas se misturam de forma não linear, isto é, de forma caótica com turbulência e redemoinhos, em oposição ao fluxo laminar. As distribuições de pressão, densidade e velocidade apresentam uma componente aleatória de grande variabilidade no espaço e/ou no tempo. (RODRIGUES, LUIZ)

c) Número de Reynolds

O número de Reynolds é um número adimensional, usado em mecânica dos fluidos, que caracteriza o comportamento global de um fluido. A partir dele, podemos determinar a natureza do escoamento (laminar ou turbulento) dentro de um tubo ou sobre uma superfície. (FOX, MCDONALD, PRITCHARD, 2006)

O seu nome vem de Osborne Reynolds, um físico e engenheiro irlandês, que demonstrou experimentalmente os dois tipos distintos de escoamento. O seu significado físico é um quociente entre as forças de inércia e as forças de viscosidade.

Analisando essa relação, podemos deduzir que se o número de Reynolds for alto, os efeitos viscosos são desprezíveis; e se for baixo, os efeitos viscosos são dominantes.

Para o escoamento em tubos, o número de Reynolds é calculado da seguinte forma:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (3.9)$$

Sendo,

ρ : Massa específica do fluido

V : Velocidade de escoamento do fluido

D : Diâmetro interno do tubo

μ : Viscosidade absoluta

E para determinarmos o tipo de escoamento, os seguintes critérios são seguidos:

$Re < 2000$ – Escoamento Laminar

$2000 < Re < 4000$ - Escoamento Transitório

$Re > 4000$ – Escoamento Turbulento

d) Fator de Atrito

O fator de atrito f é função do número de Reynolds e da rugosidade relativa e/D da tubulação, onde e é a rugosidade e D é o diâmetro do tubo. Isso é válido exceto em dois casos: no escoamento laminar, onde f depende apenas de Re ; e no escoamento completamente turbulento, para o qual os valores de Reynolds são bastante altos e f passa a depender somente da rugosidade relativa.

O valor da rugosidade do tubo pode ser obtido em tabelas que o informam de acordo com o material utilizado. A tabela do Manual de Treinamento da KSB, mostrada abaixo, fornece os seguintes valores:

Tabela 1 Rugosidade dos Materiais

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	0,00013	-----
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

Para o caso do escoamento turbulento, o fator de atrito é obtido utilizando-se o ábaco de Moody, mostrado abaixo.

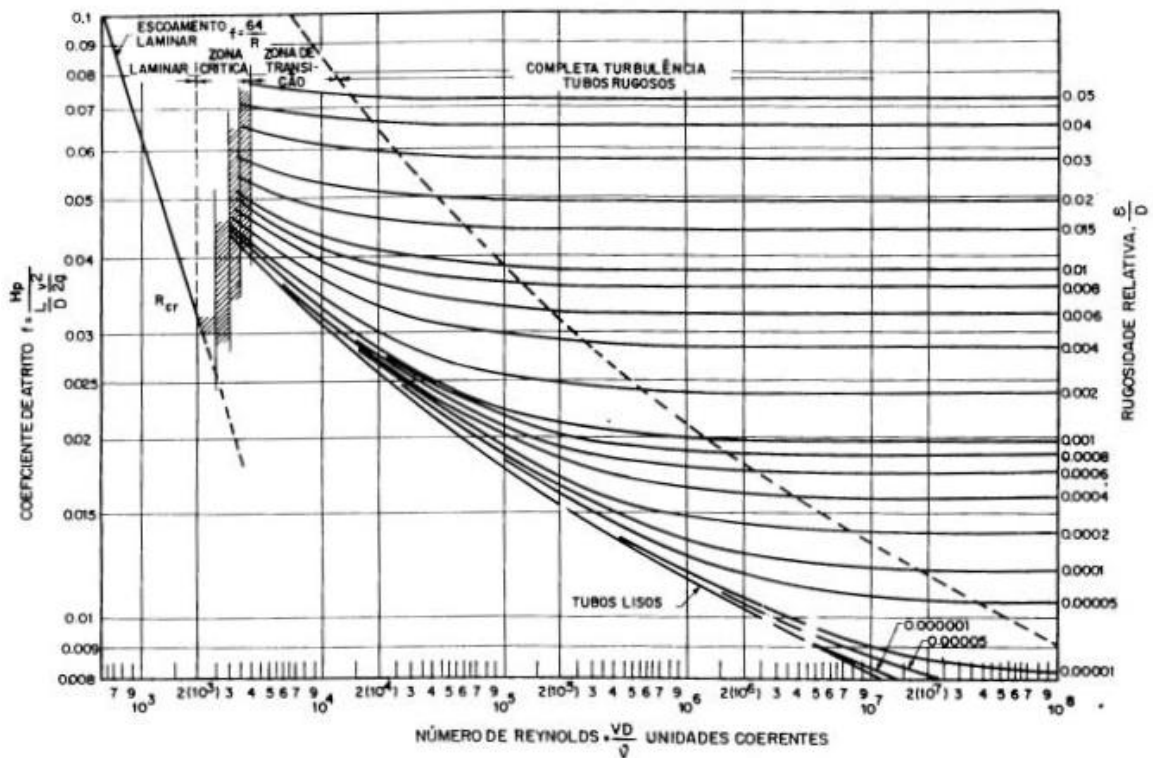


Figura 6 Ábaco de Moody

Entra-se com o valor de Reynolds no eixo da abscissa e com o valor da rugosidade relativa no eixo da ordenada à direita do gráfico. Dessa forma, o valor do fator de atrito pode ser encontrado no eixo da ordenada à esquerda do gráfico.

3.5.2 Perda de Carga Distribuída

A perda de carga distribuída pode ser expressa como a perda de pressão devido ao atrito do fluido com as paredes do tubo. Geralmente é a maior parcela da perda de energia pelo fluido numa tubulação. Como já dito anteriormente, vai variar de acordo com o tipo de escoamento; laminar ou turbulento.

3.5.2.1 Perda de Carga Distribuída no Escoamento Laminar

A perda de carga no escoamento laminar pode ser calculada pela equação de Hagen-Poiseuille:

$$h_{fr} = 32 \cdot \nu \cdot \frac{L}{g \cdot D^2} \cdot V \quad (3.10)$$

Sendo,

ν : Viscosidade cinemática do fluido

L: Comprimento do tubo

g: Aceleração da gravidade

D: Diâmetro interno do tubo

V: Velocidade média do escoamento

De outra forma, podemos calcular a perda de carga distribuída no escoamento laminar utilizando a equação de Darcy-Weisbach:

$$h_{fr} = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.11)$$

Sendo, f , o fator de atrito. Para o caso do escoamento laminar, o fator de atrito assume

a forma, $f = \frac{64}{Re}$.

3.5.2.2 Perda de Carga Distribuída no Escoamento Turbulento

Da mesma forma que no escoamento laminar, podemos utilizar a equação de Darcy-Weisbach para calcular a perda de carga distribuída no escoamento turbulento. No entanto, o fator de atrito utilizado não será o mesmo. Este poderá ser obtido através de fórmulas teórico-experimentais ou por gráficos. Será abordado neste trabalho apenas o segundo método.

3.5.3 Perda de Carga Localizada

A perda de carga localizada é definida como a perda de energia por unidade de peso que ocorre nos acessórios, tais como válvulas, curvas, retenções, filtros etc. Para sistemas pequenos com muitos acessórios, a perda localizada pode até exceder a perda distribuída.

O cálculo da perda de carga localizada pode ser feito de duas maneiras. Uma é pelo método direto e a outra pelo método do comprimento equivalente.

a) Método Direto

Para o método direto a seguinte fórmula é utilizada:

$$h_{fl} = K \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (3.12)$$

Onde K expressa a influência do atrito, do diâmetro e do comprimento referente ao acessório utilizado. Os valores de K são tabelados e fornecidos pelos fabricantes.

A fórmula acima deve ser utilizada para cada acessório separadamente e então, depois, deve ser somada cada parcela da perda para que se possa obter a perda de carga localizada total.

b) Método do Comprimento Equivalente

Nesse método, como o próprio nome diz, é feita a equivalência da perda de carga do acessório com a de um trecho reto de tubulação. Para esse caso, calculamos a perda de carga total da seguinte forma:

$$h_{fl} = f \cdot \frac{L_{tot}}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.13)$$

Onde L_{total} é a soma dos comprimentos de trecho reto mais a soma dos comprimentos equivalentes de cada acessório da tubulação. Os valores dos comprimentos equivalentes referentes a cada acessório podem ser encontrados nas tabelas abaixo do Manual de Treinamento da KSB.

Tabela 2 Comprimentos Equivalentes de Acessórios e Acidentes

Comprimentos equivalentes a perdas localizadas. (Expressos em metros de canalização retilínea)*























DIÂMETRO D		COTOVELO 90° RAIO LONGO	COTOVELO 90° RAIO MÉDIO	COTOVELO 90° RAIO CURTO	COTOVELO 45°	CURVA 90° R/D - 1 1/2	CURVA 90° R/D - 1	CURVA 45°	ENTRADA NORMAL	ENTRADA DE BORDA	REGISTRO DE GAVETA ABERTO	REGISTRO DE GLOBO ABERTO	REGISTRO DE ÂNGULO ABERTO	TÊ PASSAGEM DIRETA	TÊ SAÍDA DE LADO	TÊ SAÍDA BILATERAL	VÁLVULA DE PE E CRIVO	SAÍDA DA CANALIZAÇÃO	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO LEVE	VÁLVULA DE RETENÇÃO TIPO PESADO
mm	pol.																			
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1 ¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1 ½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2 ½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	6,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

Tabela 3 Comprimentos Equivalentes de Válvulas Diversas (DE MATTOS, DE FALCO,1998)

Diâmetro Nominal (Polegada)	Válvulas gaveta (abertura total)	Válvulas globo (2) (abertura total)			Válvula de retenção		Válvulas de esfera ou macho (abertura total)	Válvula de três vias (Área de abertura 80% da área tubo)		Válvula borboleta (abertura total)	Diâmetro Nominal (Polegada)
					Portinhola	Levantamento		Fluxo direto	Fluxo pelo ramal		
		90°	60°	45°							
1 1/2"	1.75 (0,53)	46 (14,02)	23 (7,01)	18 (5,49)	17 (5,18)	20 (6,10)	2.5 (0,76)	6 (1,83)	20 (6,10)	6 (1,83)	1 1/2"
2"	2.25 (0,69)	60 (18,29)	30 (9,15)	24 (6,52)	22 (6,71)	25 (7,62)	3.5 (1,07)	7.5 (2,29)	24 (7,32)	8 (2,36)	2"
2 1/2"	2.75 (0,84)	70 (21,34)	38 (11,59)	30 (9,15)	27 (8,23)	30 (9,15)	4 (1,22)	9 (2,74)	30 (9,15)	10 (3,05)	2 1/2"
3"	3.5 (1,07)	90 (27,44)	45 (13,72)	38 (11,59)	35 (10,67)	38 (11,59)	5 (1,52)	12 (3,66)	36 (10,98)	12 (3,66)	3"
4"	4.5 (1,37)	120 (36,59)	60 (18,29)	48 (14,63)	45 (13,72)	50 (15,24)	6.5 (1,98)	15 (4,57)	48 (14,63)	15 (4,57)	4"
6"	6.5 (1,98)	175 (53,35)	88 (26,83)	72 (21,95)	65 (19,82)	75 (22,87)	10 (3,05)	22 (6,71)	70 (21,34)	23 (7,01)	6"
8"	9 (2,74)	230 (70,12)	120 (36,59)	95 (28,96)	90 (27,44)	100 (30,49)	13 (3,96)	30 (9,15)	95 (28,96)	27 (8,23)	8"
10"	12 (3,66)	280 (85,37)	150 (45,73)	130 (39,63)	120 (36,59)	130 (39,63)	16 (4,88)	38 (11,59)	120 (36,59)	35 (10,67)	10"
12"	14 (4,27)	320 (97,56)	170 (51,83)	145 (44,21)	140 (42,68)	150 (45,73)	19 (5,79)			40 (12,20)	12"
14"	15 (4,57)	380 (115,85)	190 (57,93)	160 (48,78)	150 (45,73)	170 (51,83)	20 (6,10)			45 (13,72)	14"
16"	17 (5,18)	420 (128,05)	220 (67,07)	180 (54,88)	170 (51,83)	190 (57,93)	22 (6,71)			50 (15,24)	16"
18"	18 (5,49)	480 (146,34)	250 (76,22)	205 (62,50)	180 (54,88)	210 (64,02)	24 (7,32)			58 (17,68)	18"
20"	20 (6,10)	530 (161,59)	290 (88,41)	240 (73,17)	200 (60,98)	240 (73,17)	27 (8,23)			64 (19,51)	20"
22"	25 (7,62)	580 (176,83)	300 (91,46)	255 (77,74)	240 (73,17)	260 (79,27)	30 (9,15)			70 (21,34)	22"
24"	32 (9,76)	630 (192,07)	330 (100,61)	270 (82,32)	250 (76,22)	290 (88,41)	33 (10,06)			78 (23,78)	24"
										100 (30,49)	30"
										125 (38,11)	36"
										145 (44,21)	42"
										165 (50,30)	48"
										175 (53,35)	52"

3.6 Altura Manométrica do Sistema

A altura manométrica do sistema (H) é definida como a energia que o sistema vai solicitar da bomba para que esta consiga transferir um fluido de um reservatório a outro a uma determinada vazão. Essa energia irá variar levando-se em conta as resistências que este sistema fornece ao fluido. Tais resistências são: a altura geométrica (h), a diferença de pressão entre os reservatórios de descarga (Pd) e sucção (Ps) e as perdas de carga da rede (hf).

A altura geométrica (h) é a diferença entre os níveis dos reservatórios de descarga (Zd) e de sucção (Zs), que podem ser vistos na figura 7. Essas medidas são feitas a partir da superfície do fluido, no reservatório em que se encontram, até a linha de centro do rotor da bomba. Para obtermos a perda de carga total da rede devemos somar as perdas de carga da sucção (hfs) e descarga (hfd).

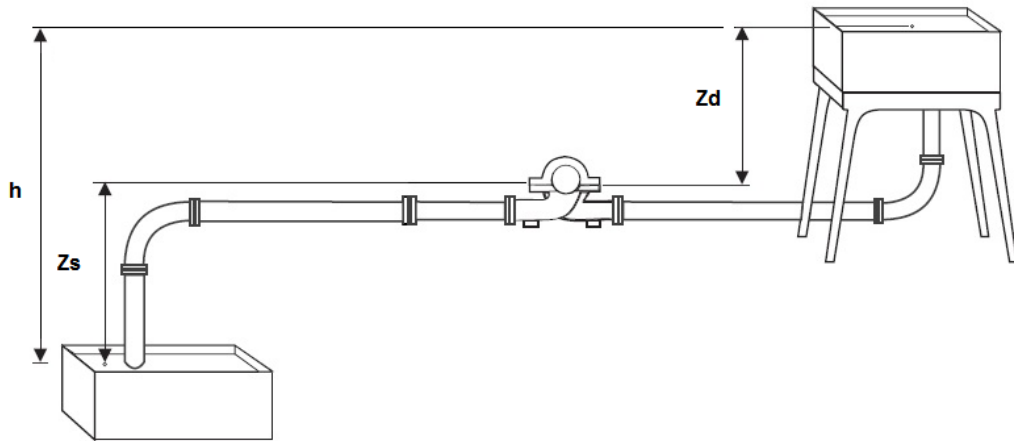


Figura 7 Alturas Geométricas dos Reservatórios

O cálculo da altura manométrica total é feito considerando-se o quanto de energia já existe na linha de sucção (h_s) e o quanto de energia se deve ter na linha de recalque (h_d). A bomba deverá fornecer a quantidade de energia requisitada na linha de recalque menos a quantidade de energia que existe na linha de sucção. Para essas quantidades de energia damos os nomes de altura manométrica de sucção e altura manométrica de descarga, respectivamente. Portanto, a altura manométrica total será dada pela diferença $h_d - h_s$. (DE MATTOS, DE FALCO, 1998)

$$H = h_d - h_s \quad (3.14)$$

Existem duas formas para calcularmos a altura manométrica de sucção e de descarga. Uma forma é pela aplicação do Teorema de Bernoulli. Esse procedimento será descrito no tópico seguinte.

Outro procedimento utilizado é através da medição na própria instalação. Obviamente, a instalação nesse caso já deve estar operando. Neste trabalho será abordado apenas o primeiro método.

3.6.1 Teorema de Bernoulli, Altura Manométrica de Sucção e de Descarga

a) Teorema de Bernoulli

O teorema de Bernoulli representa um caso particular do princípio da conservação de energia, expressando que num fluido ideal, a energia se conserva ao longo de seu percurso. A energia total de um fluido pode se apresentar das seguintes formas: energia de pressão, que é a energia do fluido devido à pressão que possui; energia cinética, que é a energia devido à velocidade do fluido e a energia potencial gravitacional, que é a energia devido à altura que se encontra o fluido.

A energia de pressão por unidade de peso em um determinado ponto do fluido é definida como:

$$E_P = \frac{P}{\gamma} \quad (3.15)$$

Sendo p , a pressão atuante num ponto do fluido e γ , o peso específico do fluido.

A energia cinética por unidade de peso é definida como:

$$E_C = \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (3.16)$$

Sendo V , a velocidade do fluido e g , a aceleração da gravidade.

A energia potencial gravitacional por unidade de peso em um ponto do fluido é definida como a cota (Z) deste ponto em relação a um determinado plano de referência.

Considerando-se um escoamento permanente e um fluido ideal, a energia total em qualquer ponto do fluido é constante e é dada pela soma das energias de pressão, cinética e potencial gravitacional. Lembrando que não há qualquer recebimento ou fornecimento de energia e nem troca de calor. E expressão fica:

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{V^2}{2g} + Z = cte \quad (3.17)$$

Assim, para o caso de dois pontos distintos do fluido, temos a seguinte relação:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (3.18)$$

Na condição de fluidos reais, o Teorema de Bernoulli ganha um termo a mais, que contabiliza a energia por unidade de peso perdida pelo líquido (hf) ao longo do percurso devido ao atrito, ficando da seguinte forma:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + hf \quad (3.19)$$

b) Altura Manométrica de Sucção

A altura manométrica de sucção (h_s) é definida como a quantidade de energia por unidade de peso existente na linha de sucção. Para calcularmos, devemos aplicar o Teorema de Bernoulli, mostrado acima, entre um ponto na superfície do fluido no reservatório de sucção e o flange da bomba. O termo que contabiliza a velocidade no reservatório de sucção pode ser desprezado. Desta forma, obtemos a expressão:

$$h_s = Z_s + \frac{P_s}{\gamma} - h_{fs} \quad (3.20)$$

É importante notar que o valor de Z_s pode ser positivo ou negativo, dependendo da instalação que compõe o sistema. Analisando a expressão, podemos ver de forma clara que quanto maior a altura do reservatório de sucção ou a pressão existente nele, maior será a quantidade de energia na linha de sucção. E como queremos saber a quantidade de energia “líquida”, devemos descontar a quantidade de energia perdida pelo fluido no percurso.

c) Altura Manométrica de Descarga

A altura manométrica de descarga é definida como a quantidade de energia por unidade de peso que se quer obter no ponto final da linha de descarga. Assim, aplicamos o Teorema de Bernoulli da mesma forma que foi feita para a sucção. Nesse caso, aplicamos entre o flange da bomba e a superfície do fluido do reservatório de descarga. Obtemos, então, a seguinte expressão:

$$hd = Zd + \frac{Pd}{\gamma} + hfd \quad (3.21)$$

Da mesma forma que no cálculo da altura manométrica de sucção, Zd pode assumir valores tanto positivos quanto negativos, dependendo apenas da instalação.

Essa expressão demonstra a quantidade de energia necessária para que o fluido consiga chegar ao ponto requisitado atendendo as condições do processo. Quanto maior a altura geométrica, a pressão do reservatório e a perda de carga, maior será a quantidade de energia requerida. (DE MATTOS, DE FALCO, 1998)

3.6.2 Fórmula Geral da Altura Manométrica Total

Depois de todos os conceitos serem definidos, podemos agora demonstrar a fórmula geral para a altura manométrica total. Sabendo que, $H = hd - hs$, temos então:

$$H = \left(Zd + \frac{Pd}{\gamma} + hfd \right) - \left(Zs + \frac{Ps}{\gamma} - hfs \right) \quad (3.22)$$

Organizando a expressão, fica:

$$H = Zd - Zs + \frac{Pd - Ps}{\gamma} + (hfd + hfs) \quad (3.23)$$

Sendo,

Zd : Altura geométrica de descarga

Zs : Altura geométrica de sucção

Pd : Pressão no reservatório de descarga

P_s : Pressão no reservatório de sucção

h_{fd} : Perda de carga na linha de descarga

h_{fs} : Perda de carga na linha de sucção

γ : Peso específico do fluido

3.7 Curva Característica do Sistema

A curva característica do sistema mostra os dois parâmetros mais importantes para o dimensionamento da bomba para um sistema: a altura manométrica total (H) e a vazão (Q). Através da curva podemos saber a altura manométrica total para cada vazão correspondente, dentro de uma determinada faixa de operação. (LENGSFELD *et al.*, 1991, DA SILVA, 2003)

3.7.1 Obtenção da Curva Característica do Sistema

A curva característica do sistema é determinada a partir da fórmula geral da altura manométrica total para determinados pontos de vazão. Analisando a fórmula, vemos que o único termo que varia com a vazão é o termo da perda de carga (h_f). Desse modo, a curva pode ser separada em parte estática, que são os parâmetros que independem da vazão e parte dinâmica, que são os parâmetros que variam com a vazão, como mostra o gráfico abaixo.

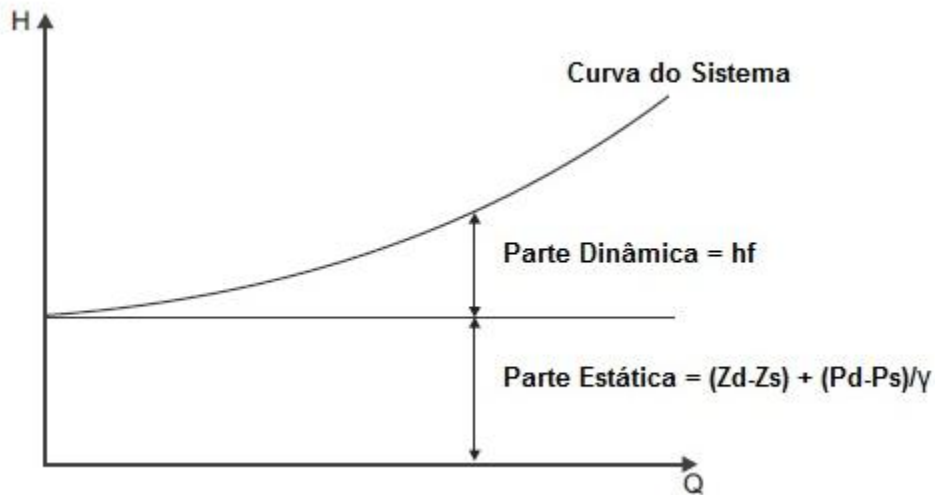


Figura 8 Curva Característica do Sistema - Parte Dinâmica e Parte Estática

Para a condição onde $Q=0$, damos o nome de "shut off" da bomba. Desse valor de carga em diante, o que faz alterar o desenho da curva é a perda de carga, exclusivamente.

Assim, para traçarmos a curva do sistema, separamos mais quatro pontos além do ponto $Q=0$, sendo um deles o ponto de trabalho da bomba. Então, somamos em cada ponto a parte estática mais a parte dinâmica.

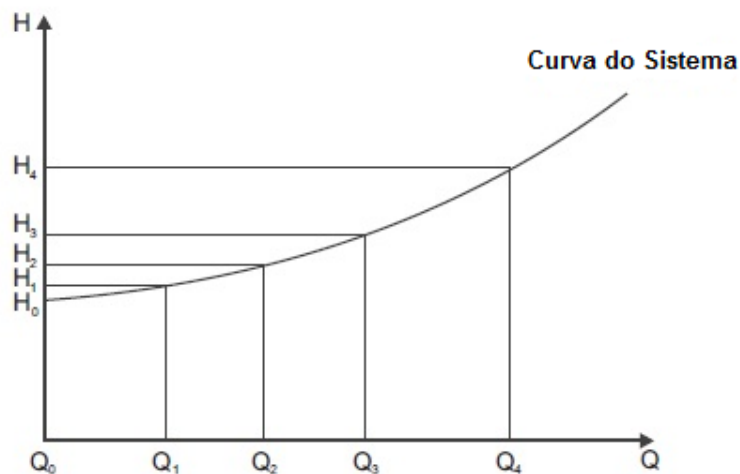


Figura 9 Construção da Curva Característica do Sistema

3.8 NPSH Disponível x NPSH Requerido

A sigla NPSH, que do inglês é Net Positive Suction Head, significa, numa tradução aproximada, carga positiva líquida de sucção. Este termo é relativo ao sistema e à bomba.

Quando é relativo ao sistema, é chamado de NPSH disponível, e pode ser entendido como a pressão existente no flange de sucção da bomba que empurra o fluido para as palhetas do impelidor, acima da pressão de vapor do próprio líquido. O NPSH disponível pode ser calculado pela expressão abaixo:

$$NPSH_{DISP} = h_{atm} + Z_s - h_{vp} - h_{fs} \quad (3.24)$$

Sendo,

h_{atm} = pressão atmosférica em metros de coluna de água;

Z_s = altura geométrica de sucção;

h_{vp} = pressão de vapor em metros de coluna de água;

h_{fs} = perda de carga na tubulação de sucção.

Nas tabelas abaixo, podemos ver os valores da pressão atmosférica para determinadas altitudes e da pressão de vapor de água para determinadas temperaturas.

Tabela 4 Pressão Atmosférica em metros de coluna d'água para algumas altitudes

DADOS DE PRESSÃO ATMOSFÉRICA PARA DETERMINADAS ALTITUDES LOCAIS										
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

Tabela 5 Pressão de Vapor d'água para algumas temperaturas

PRESSÃO DE VAPOR DA ÁGUA PARA DETERMINADAS TEMPERATURAS										
Temperatura da água (°C)	0	4	10	20	30	40	50	60	80	100
Pressão de Vapor da água (mca)	0,062	0,083	0,125	0,239	0,433	0,753	1,258	2,31	4,831	10,33

Quando o termo é relativo à bomba, é chamado de NPSH requerido. É definido como a pressão no flange de sucção da bomba que esta requer para funcionar adequadamente. O NPSH requerido depende somente da bomba e suas características construtivas e do líquido bombeado. É função da velocidade, logo aumenta com a vazão. Normalmente, é fornecida uma curva $NPSH_{REQ} \times Vazão (Q)$ pelo fabricante, como mostrado abaixo:

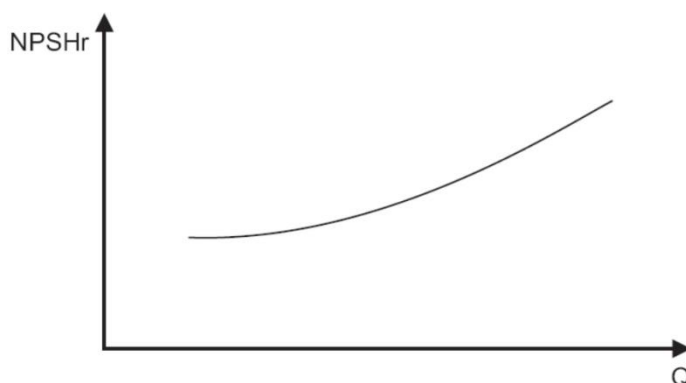


Figura 10 Curva do NPSH requerido x Vazão

O NPSH serve como parâmetro para evitar a ocorrência do fenômeno chamado cavitação, que causa muitos danos à bomba. Para que isso não aconteça, o NPSH

disponível deve ser maior que o requerido. Assim, é garantido que a pressão de sucção seja maior que a pressão de vapor do fluido. Na prática, é usada ainda uma margem de 0,6 m, sendo expressa pela relação:

$$NPSH_{DISP} \geq NPSH_{REQ} + 0,6 m \quad (3.25)$$

4 Principais características do Navio e do Sistema de Lastro

Nesse capítulo serão apresentadas as principais características do navio e do sistema de lastro para o qual estamos querendo selecionar a bomba.

4.1 O Navio

O navio estudado em questão se trata de um porta contêiner de grande porte (figura 11), com comprimento total de aproximadamente 220 metros. Suas principais dimensões são boca (largura) com cerca de 29 metros, pontal (altura medida do ponto mais inferior do navio até o convés principal) com cerca de 16 metros e calado (altura medida do ponto mais inferior do navio até a linha d'água) de 11,60 metros.

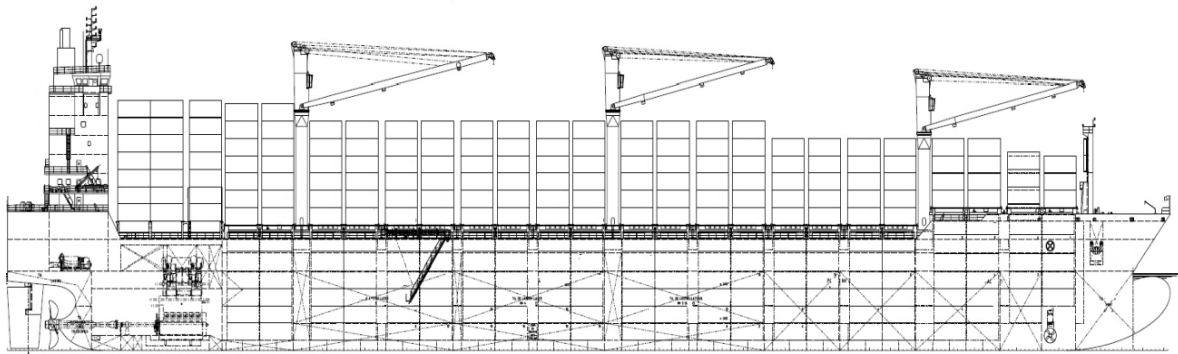


Figura 11 Arranjo Geral do Navio

A praça de máquinas, que se situa à ré do navio, comporta diversos equipamentos do navio, sendo alguns destes o motor principal, os motores geradores de energia, trocadores de calor, bombas etc. As bombas do sistema de lastro do navio estão situadas, especificamente, no que é chamado de estrado principal, uma região localizada ao fundo do navio, que pode ser visto na figura 12. Dessa forma, as bombas ficam mais próximas das caixas de mar, que são as estruturas que permitem a ligação da água do mar para o interior do navio.

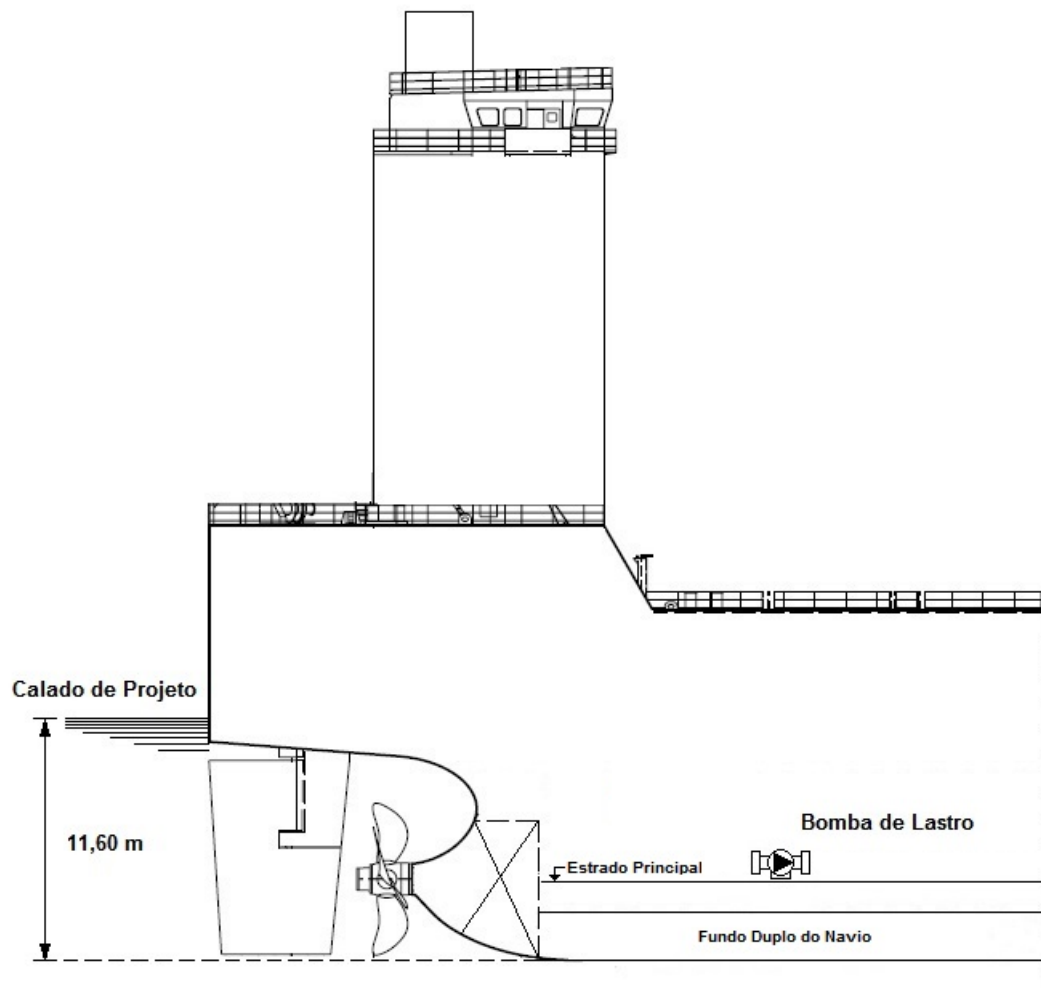


Figura 12 Localização da Bomba na Praça de Máquinas

As caixas de mar, geralmente existem nos dois bordos do navio e possuem alturas diferentes, sendo denominadas caixas de mar alta e baixa. Elas são interligadas por meio de uma tubulação de diâmetro grande chamada de *crossover* ou *sea bay*. Desse tubo saem as tubulações ramificadas para os sistemas que operam com água salgada, sendo um deles o sistema de lastro. As figuras 13 e 14 mostram os detalhes das caixas de mar e a tubulação que segue para atender os sistemas com água salgada.

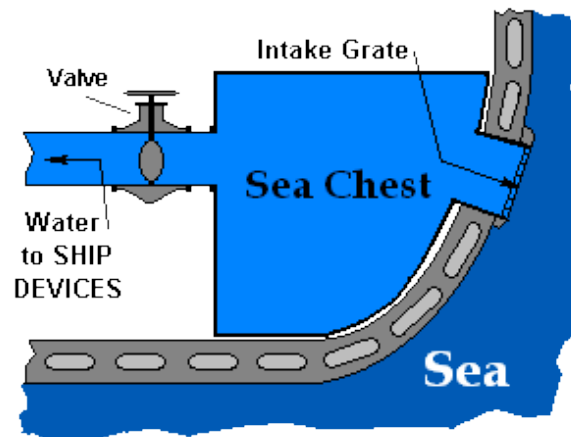


Figura 13 Detalhe da Caixa de mar do Navio

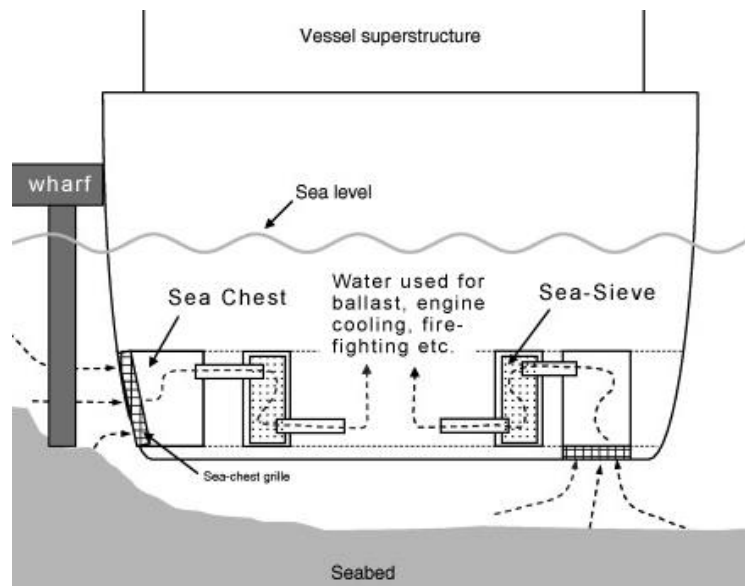


Figura 14 Caixas de Mar e Rede para os Sistemas do Navio

4.2 O Sistema de Lastro

O sistema de lastro do navio é composto basicamente por tanques, bombas e válvulas e a sua função é a de estabilizar o movimento longitudinal do navio, também conhecido como *trim*; o movimento rotacional ou de banda, conhecido como *heel* ou *list*; e alterar a altura que o navio fica submerso, o que é chamado de calado. Para o movimento rotacional, existe um sistema específico responsável pelo controle desse

movimento. É o chamado sistema *anti-heeling* ou sistema de compensação de banda, que não será detalhado neste trabalho.

A tubulação do sistema de lastro se encontra em duas partes do navio. Um trecho se situa na praça de máquinas e outro trecho na região do fundo duplo, fora da praça de máquinas, percorrendo praticamente todo o navio. O fundo duplo do navio é um tipo de construção do casco em que são colocadas duas camadas no fundo do navio. Uma camada externa, formando o casco normal do navio e outra mais interna, atuando como um segundo casco e formando uma barreira para a água no caso do casco externo ser danificado. No espaço entre essas duas camadas, se encontram a maioria dos tanques de lastro do navio. Além desses tanques do fundo duplo, existem também os tanques de lastro laterais, que se iniciam logo acima dos tanques do fundo duplo e se estendem até quase o convés principal, como mostra a figura abaixo.

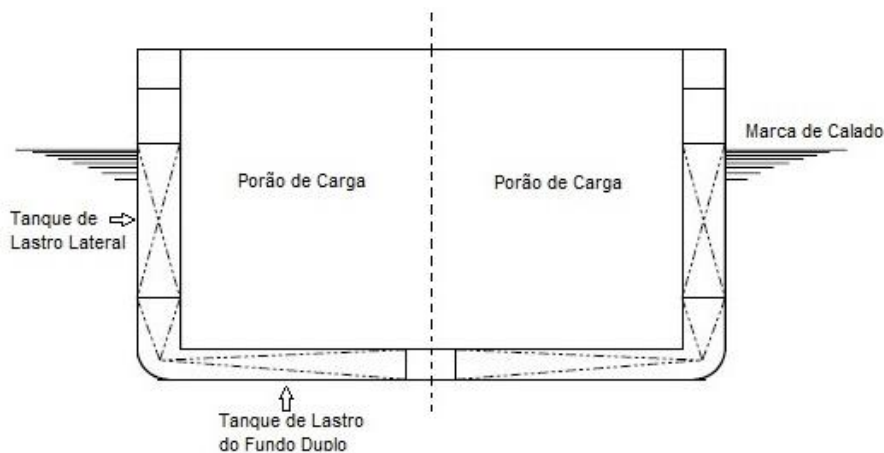


Figura 15 Desenho da Seção do Navio mostrando os Tanques de Lastro

4.2.1 Componentes do Sistema de Lastro

Os principais componentes do sistema de lastro são as bombas, as válvulas, os tanques e as redes de tubulação, como já foi dito anteriormente. Estes componentes possuem as seguintes características:

a) Bombas Centrífugas

O sistema possui 2 bombas centrífugas (figura 16) responsáveis pelas operações de lastro e deslastro. Na operação para lastrar o navio é utilizada uma bomba apenas, ficando a outra de *stand-by* em caso de falhas. Na operação de deslastro é utilizada uma bomba para deslastar cada bordo do navio.



Figura 16 Bombas Centrífugas In-Line para o Sistema de Lastro

b) Tanques de Lastro

São 23 tanques de lastro, sendo 1 de colisão de vante, 6 tanques laterais e 16 tanques do fundo duplo. Será mostrado mais a frente o diagrama do sistema (figura 19), onde a posição dos tanques poderá ser vista mais claramente.

O volume total dos tanques de lastro para esse navio é de aproximadamente 11.762 m³. Os tanques estão todos à pressão atmosférica. A tabela abaixo fornece aproximadamente o volume de cada tanque.

Tabela 6 Volumes dos Tanques de Lastro

Tanque	Vol. do Tanque (m ³)	Quant.	Vol. Parcial (m ³)
Tanque de Colisão de Vante	557,8	1	557,8
Fundo Duplo N° 1A (BB/BE)	255,5	2	511,1
Fundo Duplo N° 1B (BB/BE)	557,8	2	1115,6
Fundo Duplo N° 2A(BB/BE)	533,6	2	1067,3
Fundo Duplo N° 2B(BB/BE)	566,6	2	1133,3
Fundo Duplo N° 3 (BB/BE)	708,6	2	1417,2
Fundo Duplo N° 4 (BB/BE)	710,4	2	1420,9
Fundo Duplo N° 5 (BB/BE)	668,3	2	1336,6
Fundo Duplo N° 6 (BB/BE)	107,0	2	214,0
Lateral N° 3 (BB/BE)	490,7	2	981,5
Lateral N° 4 (BB/BE)	478,2	2	956,4
Lateral N° 5 (BB/BE)	525,1	2	1050,3
Volume Total (m³)			11762,4

c) Válvulas borboletas

São as válvulas borboletas pneumáticas (figura 17) que operam o sistema, onde são utilizadas para permitir o controle dos tanques que serão lastrados e/ou das manobras que serão feitas. Esse controle é feito remotamente por um operador no centro de controle da praça de máquinas.



Figura 17 Válvula Borboleta Pneumaticamente Operada

d) Redes do Sistema de Lastro:

As redes do sistema de lastro são com tubulação de aço, rugosidade (e) de 0,00015 m e diâmetro nominal (D) de 300 mm.

4.2.2 Diagramas do Sistema de Lastro

Os diagramas do sistema de lastro nos informam, de forma esquemática, como as redes do sistema estão interligadas, desde a entrada da água salgada pelas caixas de mar, passando pelas bombas e indo até aos seus respectivos tanques de destino. Abaixo, podemos ver os diagramas das redes do sistema de lastro do navio. Um, mostra as redes pertencentes à praça de máquinas, incluindo as bombas; e o outro, mostra as redes fora da praça de máquinas que percorrem todo o navio e se dividem para cada um dos tanques.

a) Redes de Lastro na Praça de Máquinas

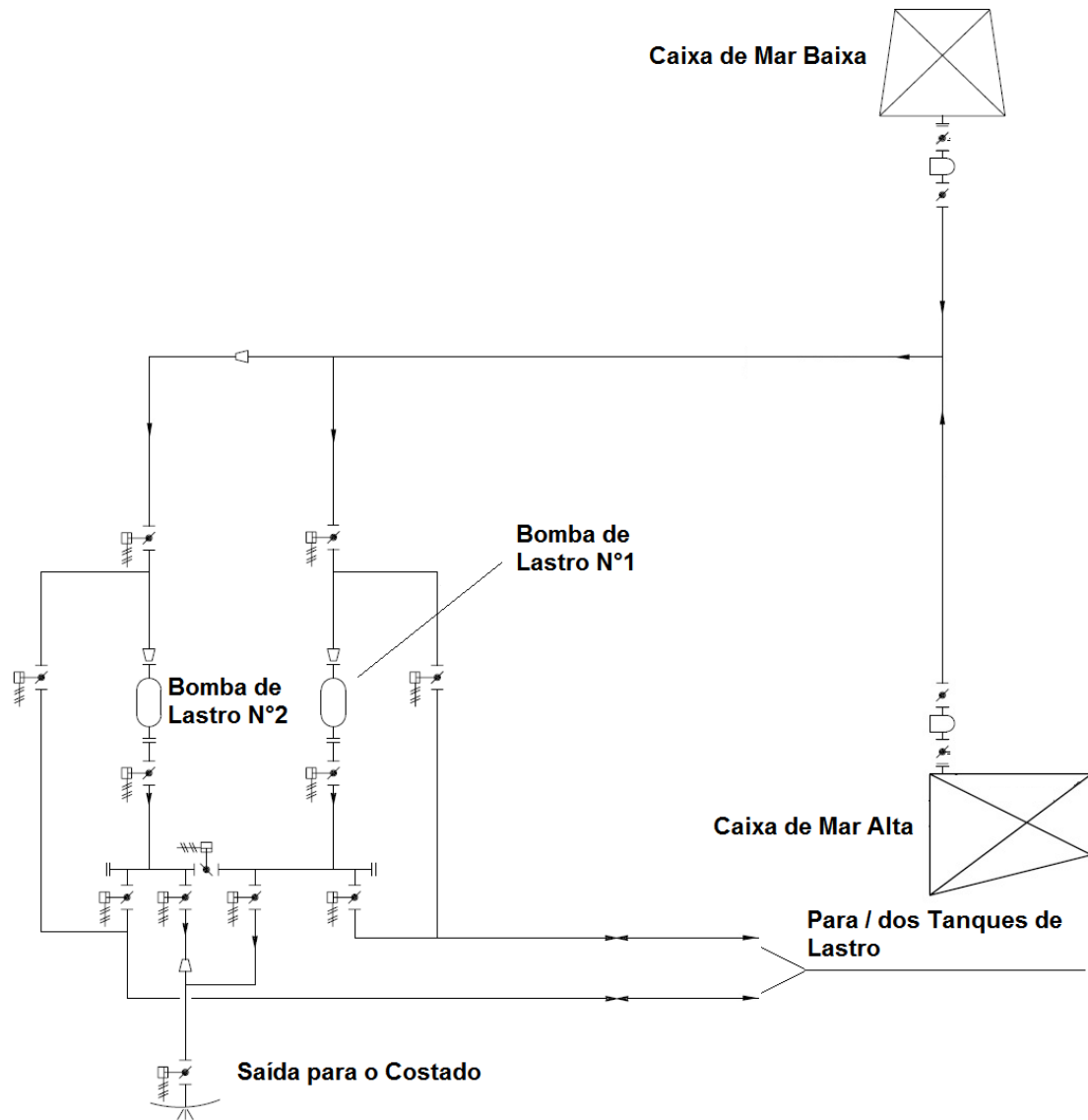


Figura 18 Diagrama do Sistema de Lastro na Praça de Máquinas

b) Redes de Lastro Fora da Praça de Máquinas

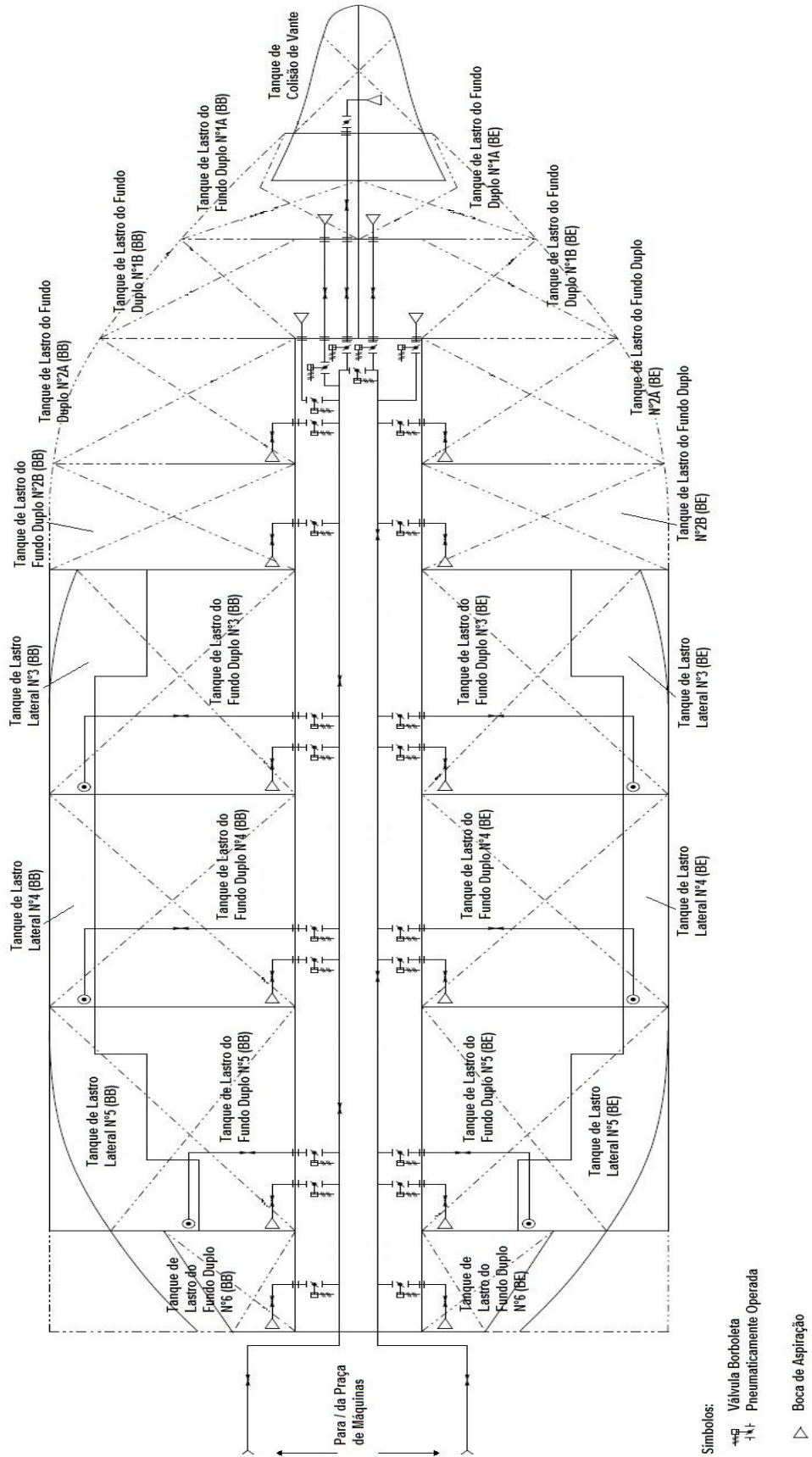


Figura 19 Diagrama do Sistema de Lastro Fora da Praça de Máquinas

4.2.3 Tubulação Completa do Sistema de Lastro em 3 Dimensões

Para facilitar a visualização da tubulação do sistema e seus componentes, foi feita a modelagem em 3 dimensões do sistema de lastro no Software Solid Works 2011. Por motivos de espaço, as imagens foram colocadas no Anexo 1.

4.2.4 Operações de Lastro e Deslastro

As operações de lastro e deslastro consistem em colocar e retirar a água salgada dos tanques de lastro, respectivamente. No entanto, essas operações funcionam de maneiras diferentes para o navio estudado. Enquanto que para lastrarmos o navio é utilizada apenas uma bomba (e a outra fica como reserva), no caso do deslastro são utilizadas as duas, de modo que cada bomba deslastre um bordo do navio. As operações em si são iguais na região fora da praça de máquinas, exceto pelo sentido do fluido. Na região da praça de máquinas é que são feitas manobras diferentes e que serão mostradas mais adiante.

Na figura abaixo, é mostrado um esquema de como o navio utiliza o sistema de lastro e as respectivas operações de acordo com o transporte de carga.

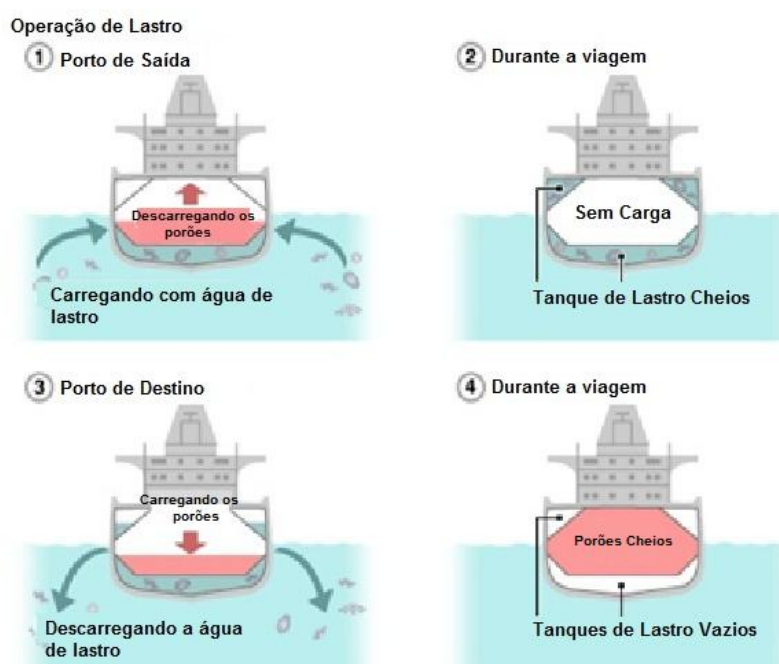


Figura 20 Operações de Lastro e Deslastro nos Portos

No porto de partida, o navio está descarregando a sua carga, enquanto o sistema de lastro está enchendo os tanques de lastro, para que durante a viagem ao porto de destino, ele consiga manter o seu equilíbrio. Chegando ao porto de destino o processo inverso é iniciado, e enquanto o navio é carregado, a água dos tanques de lastro é jogada para fora do navio.

a) Operação de Lastro

A operação de lastro é feita através das caixas de mar. Devido ao fato do nível do mar estar acima dos tanques, não haveria a necessidade do uso da bomba, sendo a água escoada para o interior dos tanques apenas pela força da gravidade. Apesar disso, o nível da água aumentando dentro dos tanques, somado ao aumento da perda de carga devido ao longo comprimento da tubulação, faz com que o tempo se torne muito grande para esta operação. Assim, se faz necessário o uso da bomba para que este processo seja acelerado. Para essa operação apenas uma bomba é necessária, como pode ser visto nas figuras abaixo.

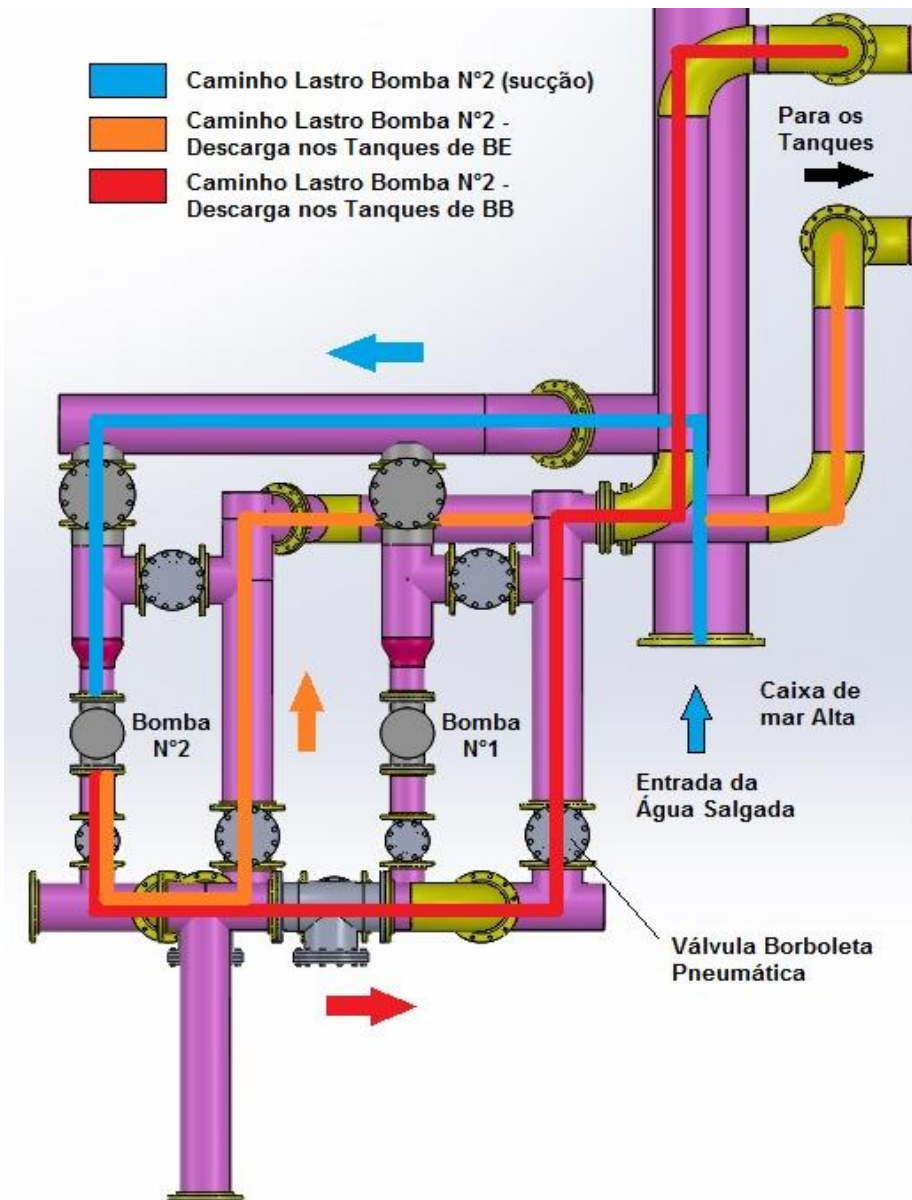


Figura 21 Operação de Lastro na Praça de Máquinas - Vista Superior

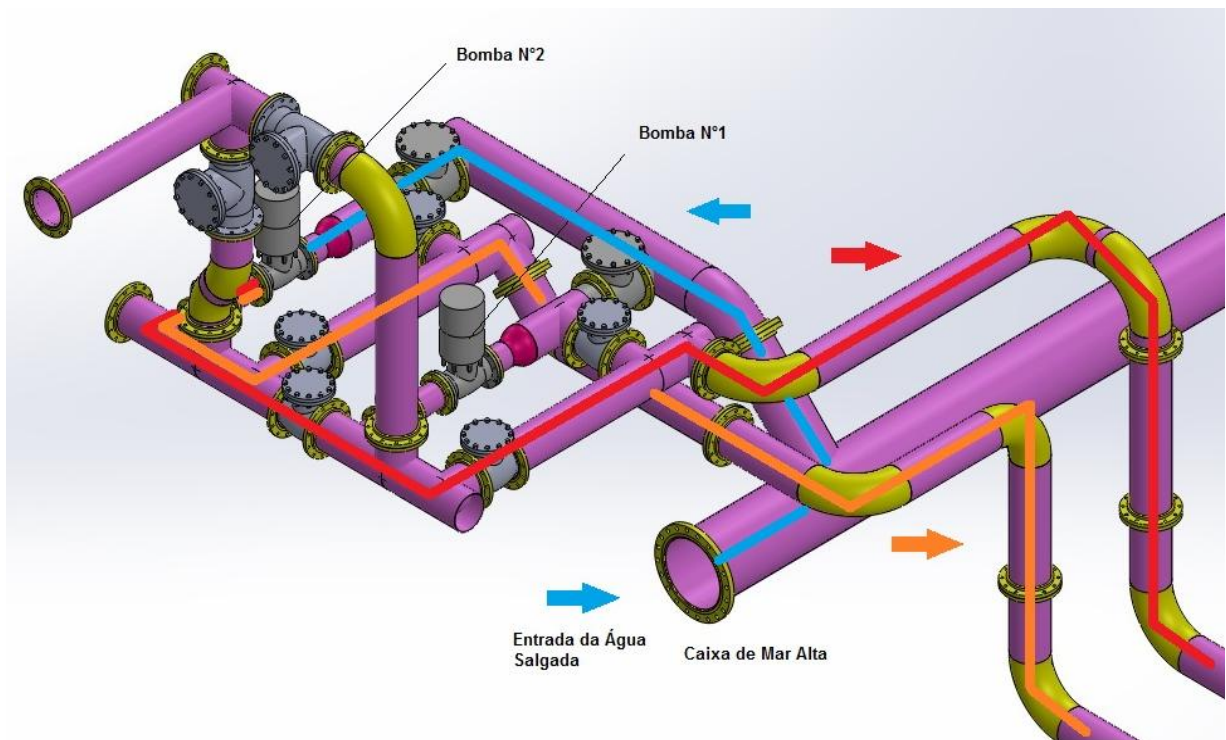


Figura 22 Operação de Lastro na Praça de Máquinas - Vista Isométrica

b) Operação de Deslastro

A operação de deslastro é, de certa maneira, o processo inverso da operação de lastro. Exceto pelo fato de que na operação de deslastro a água salgada não sairá pela caixa de mar, mas sim, por uma tubulação que leva ao costado do navio. E, além disso, como foi falado anteriormente, são utilizadas as duas bombas para esse procedimento. Cada bomba fica responsável pelo deslastreamento de um bordo. Através das figuras a seguir, é explicado de forma clara como esse procedimento ocorre na região da praça de máquinas.

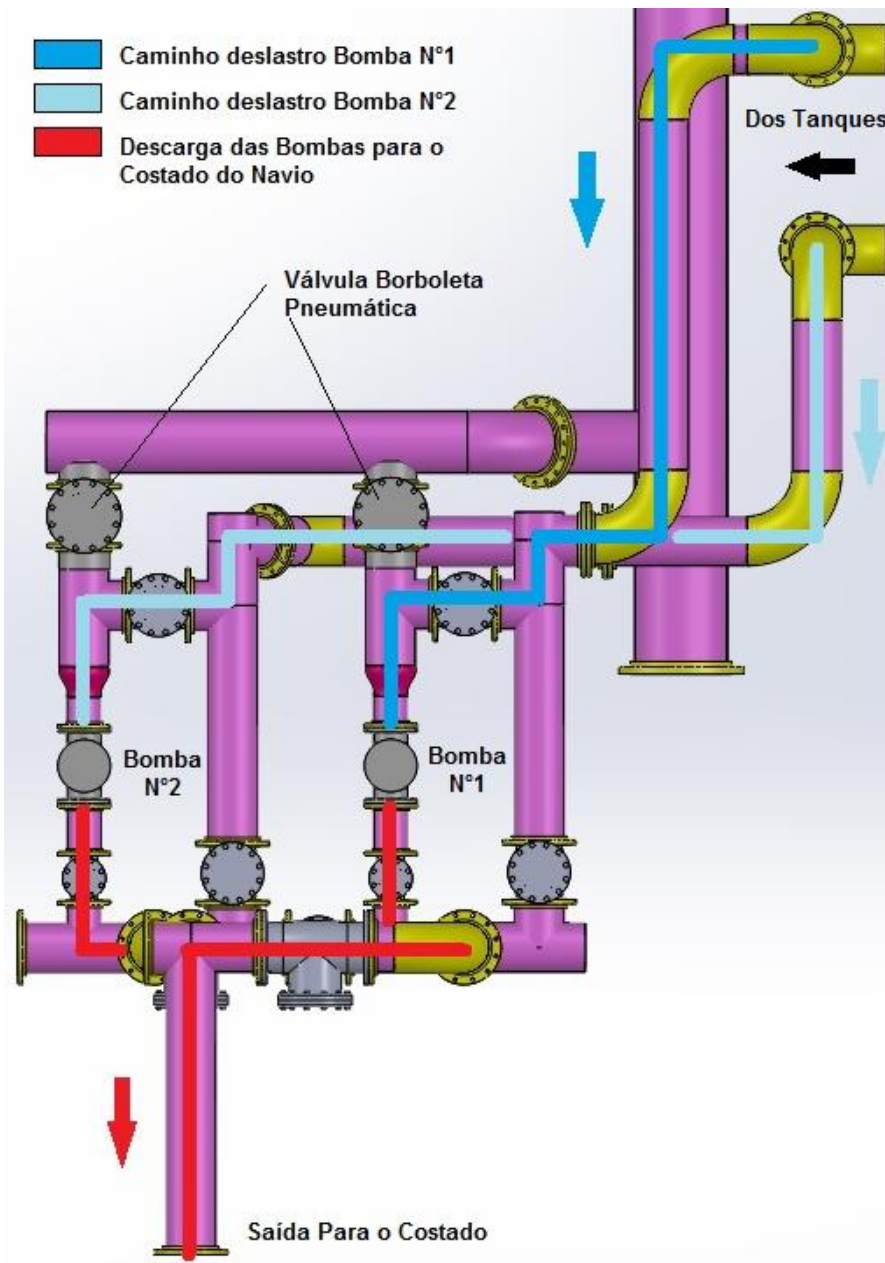


Figura 23 Operação de Deslastro na Praça de Máquinas - Vista Superior

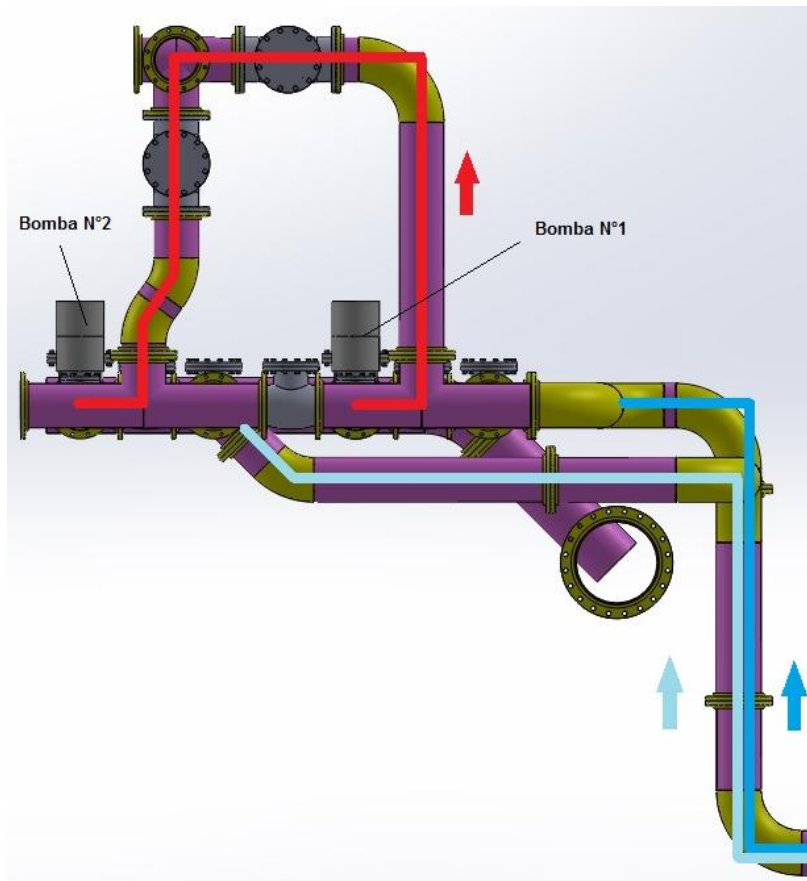


Figura 24 Operação de Deslasto na Praça de Máquinas - Vista Lateral

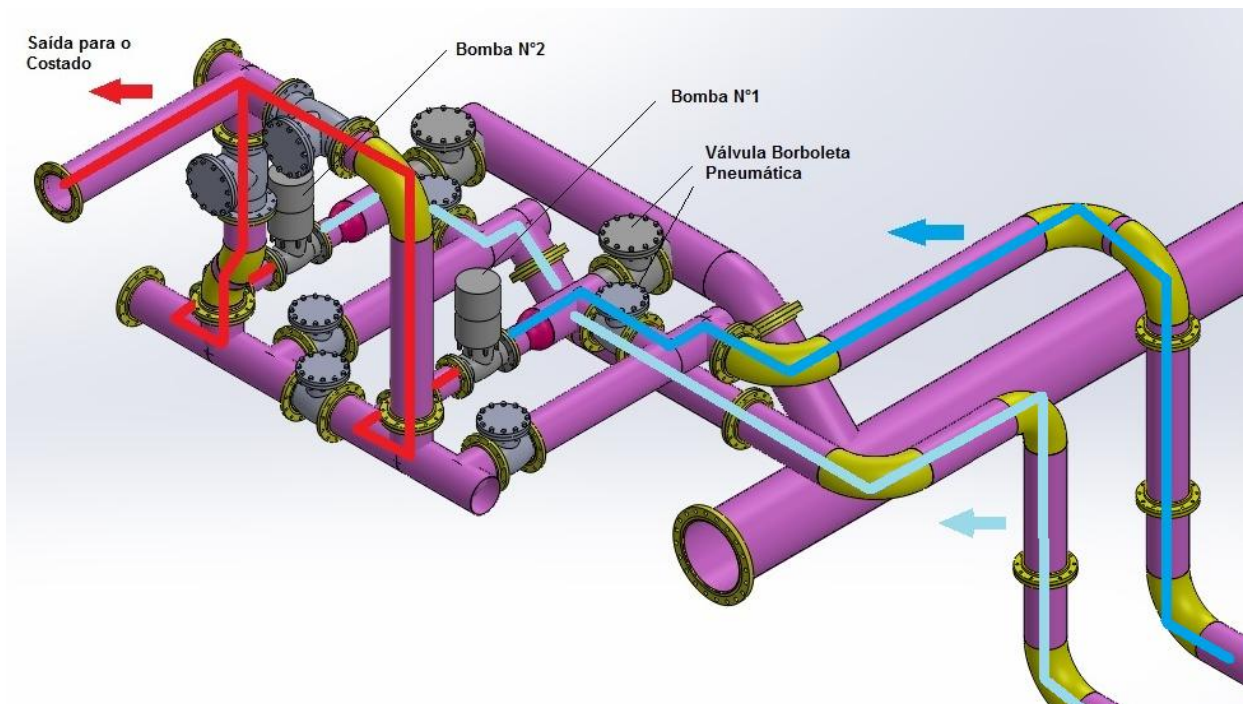


Figura 25 Operação de Deslasto na Praça de Máquinas - Vista Isométrica

5 Bomba de Lastro

A tarefa de selecionar uma bomba centrífuga para um sistema consiste em calcular os seguintes parâmetros para a bomba: vazão e pressão. Com esses valores em mãos é possível encontrar uma bomba adequada no catálogo de um fabricante. Há também, além desses dois principais parâmetros, a necessidade de verificarmos o NPSH da bomba para evitar a cavitação.

5.1 Cálculo da Vazão da Bomba

A vazão de trabalho da bomba é obtida dividindo-se o volume total dos tanques de lastro pelo tempo de lastreamento/deslastreamento. O tempo máximo determinado para essa operação, nesse caso, é o de um dia ou 24h.

Um detalhe importante que deve ser levado em conta é o número de bombas utilizado em cada operação, como já foi dito no capítulo anterior. Pelo fato de no lastreamento só uma bomba operar, o cálculo da vazão deverá ser feito para essa situação, que por razões óbvias, é considerada o pior caso.

Dessa forma, temos a seguinte vazão de trabalho para cada bomba:

$$Q = \frac{11762 \text{ m}^3}{24 \text{ h}} \cong 500 \text{ m}^3/\text{h}$$

5.2 Cálculo da Pressão da Bomba

O cálculo da pressão da bomba é um cálculo mais complexo por se tratar do bombeamento para vários reservatórios. O manual de treinamento da KSB recomenda que nesse caso, devemos tratar cada reservatório como um caminho independente. Dessa forma, através da fórmula da altura manométrica, será feita a curva característica do sistema para cada um dos caminhos separadamente. Então, levando-se em conta que os caminhos para os tanques estão associados em paralelo, será feita a curva de associação desses sistemas, gerando assim, uma única curva

para o sistema. Todo esse processo será visto com mais detalhes ao longo do capítulo.

5.2.1 Considerações para o Cálculo

Algumas considerações devem ser feitas para o cálculo da pressão. Em primeiro lugar, a condição de operação para o qual o cálculo será feito é a condição de deslastro. Trata-se da condição mais crítica de operação, pelo fato da bomba ter que vencer a resistência imposta pela coluna d'água que mede, na pior situação, do fundo do tanque de lastro do fundo duplo, até o nível do mar.

Outra questão, é que na condição de deslastro a operação é feita por 2 bombas, sendo cada uma responsável por um bordo do navio. De acordo com o diagrama de lastro, a bomba responsável pelo bombordo, irá fazer o deslastro de 12 tanques, enquanto que a bomba responsável pelo boreste fará o deslastro de 11 tanques, somando no total os 23 tanques de lastro. Dito isso, e sabendo que as bombas devem ser iguais, o cálculo deve ser feito para a bomba que fará o deslastro do maior número de tanques (pior caso). Sendo assim, será calculada a pressão da bomba para o lado bombordo.

Posteriormente, assumimos também que a bomba descarregará no máximo 3 tanques por vez e será feita a curva característica de associação entre esses sistemas. A partir daí, serão estipuladas determinadas situações, combinando os tanques para verificar a situação mais crítica que a bomba trabalhará.

5.2.2 Curvas Características do Sistema de Lastro

As curvas características mostram a relação entre a altura manométrica e a vazão num determinado sistema. Para o sistema de lastro, essas curvas foram construídas considerando-se o caminho de cada um dos tanques de forma separada, de modo que cada um desses caminhos tenha a sua própria curva.

Essas curvas são feitas a partir da fórmula da altura manométrica total, variando os pontos de vazão e assim, obtendo outros valores de pressão, além do ponto de trabalho. Nessa equação, apenas o termo da perda de carga (h_f) varia com a vazão.

Considerando-se que os dois reservatórios (mar e tanques de lastro) estão à pressão atmosférica, a equação assume a seguinte forma:

$$H = Z_d - Z_s + h_f \quad (5.1)$$

5.2.2.1 Alturas Geométricas (Z_d e Z_s)

A partir das figuras 26 e 27, podemos descobrir as alturas geométricas do sistema. Este sistema possui dois tipos de tanque, os do fundo duplo e os laterais. Lembrando que a situação é de deslastro e que o fundo desses tanques (apesar de terem distâncias diferentes para o nível onde a bomba se encontra) está abaixo do nível da bomba, a pior situação para o bombeamento será quando o nível de líquido em ambos os tanques estiverem quase no fundo destes.

A altura geométrica de descarga é constante e é encontrada subtraindo a altura medida do fundo do navio até o nível onde está a bomba do calado de projeto, que é medido do fundo do navio até o nível do mar. A altura geométrica de descarga será usada tanto para os tanques do fundo duplo, como para os tanques laterais.

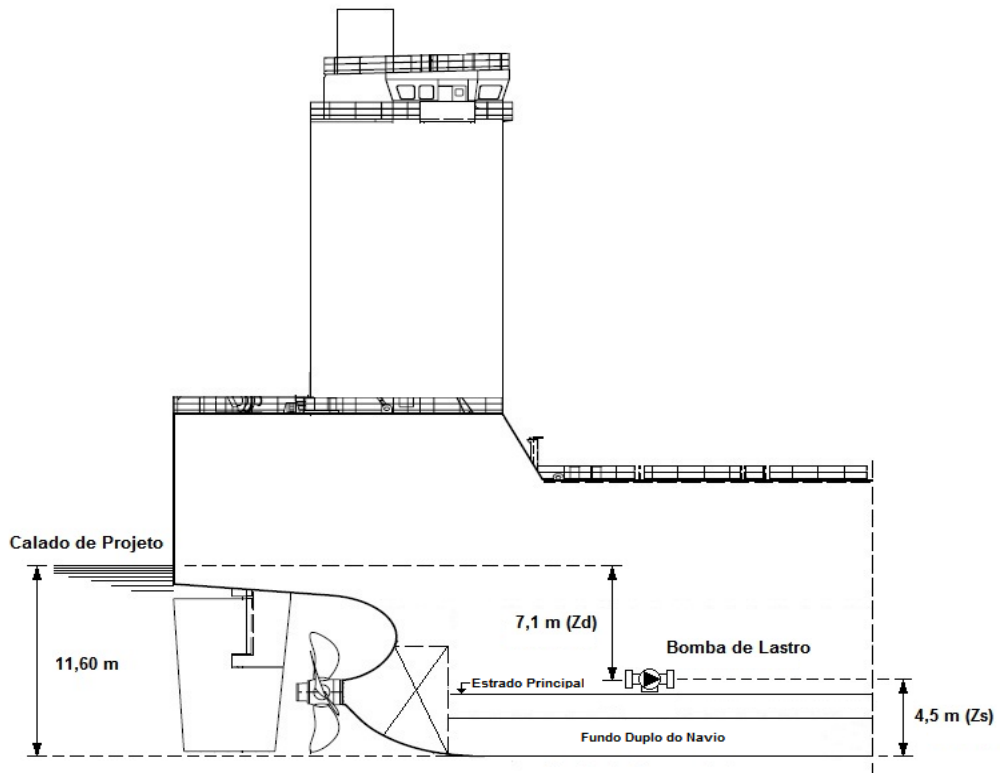


Figura 26 Alturas Geométricas dos Tanques do Fundo Duplo



Figura 27 Alturas Geométricas dos Tanques Laterais

Dessa forma, as alturas geométricas para cada tipo de tanque serão as seguintes:

a) Tanques do Fundo Duplo:

$$Z_{d_{FD}} = 11,60 - 4,5 = 7,1 \text{ m}$$

$$Z_{s_{FD}} = -4,5 \text{ m (sucção abaixo do nível da bomba)}$$

Portanto, $H_{GeoFD} = Z_{d_{FD}} - Z_{s_{FD}} = 7,1 + 4,5 = 11,60 \text{ m}$.

b) Tanques Laterais:

$$Z_{d_{LAT}} = 11,60 - 4,5 = 7,1 \text{ m}$$

$$Z_{s_{LAT}} = -0,5 \text{ m (sucção abaixo do nível da bomba)}$$

Portanto, $H_{GeoLAT} = Z_{d_{LAT}} - Z_{s_{LAT}} = 7,1 + 0,5 = 7,6 \text{ m}$.

5.2.2.2 Perda de Carga do Sistema de Lastro (hf)

A perda de carga do sistema será calculada a partir da fórmula de Darcy-Weisbach demonstrada no capítulo 3 e que segue abaixo:

$$hf = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g} \quad (5.2)$$

As perdas de carga distribuída e localizada serão detalhadas, mostrando através de tabelas e figuras, os valores e os parâmetros utilizados para o cálculo, como o Número de Reynolds, fator de atrito, velocidade do escoamento, rugosidade da tubulação, comprimento da tubulação, comprimento equivalente dos acessórios, além das propriedades da água salgada como massa específica e viscosidade absoluta.

Essas tabelas incluirão também, além da perda de carga para a vazão de trabalho, a perda para mais outros 3 pontos de vazão, de modo que, posteriormente, sejam utilizados na construção das curvas características.

Um detalhe que deve ser lembrado, é que a perda de carga está sendo calculada na tubulação que vai para os tanques do lado bombordo do navio. Assim, teremos 12 caminhos de tubulação diferentes para o cálculo da perda de carga.

A seguir, os principais parâmetros serão detalhados:

a) Propriedades da Água Salgada e da Tubulação

As propriedades da água salgada podem ser vistas na tabela abaixo, do livro Fluid Mechanics (WHITE, FRANK, 1998).

Tabela 7 Propriedades da Água do Mar

Liquid	ρ , kg/m ³	μ , kg/(m · s)	γ , N/m ³	ρ_{sp} , N/m ²	Bulk modulus, N/m ²	Viscosity parameter C^*
Ammonia	608	2.20 E-4	2.13 E-2	9.10 E+5	—	1.05
Benzene	881	6.51 E-4	2.88 E-2	1.01 E+4	1.4 E+9	4.34
Carbon tetrachloride	1,590	9.67 E-4	2.70 E-2	1.20 E+4	9.65 E+8	4.45
Ethanol	789	1.20 E-3	2.28 E-2	5.7 E+3	9.0 E+8	5.72
Ethylene glycol	1,117	2.14 E-2	4.84 E-2	1.2 E+1	—	11.7
Freon 12	1,327	2.62 E-4	—	—	—	1.76
Gasoline	680	2.92 E-4	2.16 E-2	5.51 E+4	9.58 E+8	3.68
Glycerin	1,260	1.49	6.33 E-2	1.4 E-2	4.34 E+9	28.0
Kerosine	804	1.92 E-3	2.8 E-2	3.11 E+3	1.6 E+9	5.56
Mercury	13,550	1.56 E-3	4.84 E-1	1.1 E-3	2.55 E+10	1.07
Methanol	791	5.98 E-4	2.25 E-2	1.34 E+4	8.3 E+8	4.63
SAE 10W oil	870	1.04 E-1 [‡]	3.6 E-2	—	1.31 E+9	15.7
SAE 10W30 oil	876	1.7 E-1 [‡]	—	—	—	14.0
SAE 30W oil	891	2.9 E-1 [‡]	3.5 E-2	—	1.38 E+9	18.3
SAE 50W oil	902	8.6 E-1 [‡]	—	—	—	20.2
Water	998	1.00 E-3	7.28 E-2	2.34 E+3	2.19 E+9	Table A.1
Seawater (30%)	1,025	1.07 E-3	7.28 E-2	2.34 E+3	2.33 E+9	7.28

Da tabela, vemos que os valores da massa específica (ρ) e da viscosidade absoluta (μ) são, respectivamente, 1.025 kg/m³ e 0,00107 kg/(m·s) ou Pa·s.

A propriedade da tubulação é a rugosidade (e) que tem o seu material, aço carbono. Como já mencionado no capítulo 4 e mostrado na tabela 1, a rugosidade do aço é de 0,00015 m.

b) Número de Reynolds (Re)

O Número de Reynolds irá determinar o tipo de escoamento: turbulento ou laminar. Este será calculado, num primeiro momento, para a vazão de trabalho da bomba. A equação (3.9) abaixo nos mostra:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (3.9)$$

Da equação (3.3), vemos que para uma vazão de trabalho de 500 m³/h e uma tubulação com diâmetro de 0,3 m, a velocidade do escoamento será de aproximadamente 1,96 m/s, como mostra o cálculo abaixo:

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{500}{\frac{\pi(0,3)^2}{4}} \cong 1,96 \text{ m/s}$$

Calculando o Número de Reynolds com base nesses valores, temos o seguinte resultado:

$$Re = 5,6 \times 10^5$$

Portanto, de acordo com os critérios mostrados no capítulo 3, o escoamento é turbulento.

c) Fator de Atrito (f)

O fator de atrito pode ser determinado utilizando-se o Ábaco de Moody (figura 6). Para isso, devemos ter o valor do Número de Reynolds (Re) e da rugosidade relativa (e/D).

Dados:

$$Re = 5,6 \times 10^5$$

$$\frac{e}{D} = \frac{0,00015}{0,3} = 0,0005$$

Com esses valores, o fator de atrito determinado é 0,0177.

b) Comprimento de Trechos Retos da Tubulação

Os trechos retos da tubulação foram identificados nos desenhos tridimensionais e na tabela com os respectivos comprimentos, mostrados no Anexo 2.

Para facilitar o entendimento, os comprimentos da tubulação foram separados em trechos retos na praça de máquinas e trechos retos fora da praça de máquinas. Na

praça de máquinas não há mudança no comprimento dos trechos com relação ao caminho da tubulação para cada um dos tanques. Obviamente, isso se dá porque o caminho de saída de todos os tanques deve obrigatoriamente passar pelos mesmos trechos na praça de máquinas.

Os trechos retos de tubulação considerados são os trechos pelos quais a água salgada passa para ser jogada fora do navio, sendo considerados tanto a tubulação de sucção como de descarga, como é mostrado nas figuras 23 a 25 na praça de máquinas. De acordo com o Anexo 2 e considerando o caso do deslastro dos tanques de bombordo pela bomba n°1, temos o seguinte comprimento de trechos retos na praça de máquinas:

$$L_{PM} = 14,6 \text{ m}$$

Para os trechos fora da praça de máquinas, onde surgem as ramificações para os tanques, foram contabilizados os comprimentos para cada tanque/caminho separadamente, mostrados na tabela abaixo:

Tabela 8 Trecho Retos de Tubulação Fora da Praça de Máquinas

Trechos Retos de Tubulação Fora da Praça de Máquinas	
Tanque/Caminho da Tubulação	L_{FPM} (m)
Tanque N°6 (BB) Fundo Duplo	2,92
Tanque N°5 (BB) Fundo Duplo	14,72
Tanque N°5 (BB) Lateral	38,6
Tanque N°4 (BB) Fundo Duplo	41,72
Tanque N°4 (BB) Lateral	61,98
Tanque N°3 (BB) Fundo Duplo	66,52
Tanque N°3 (BB) Lateral	80,63
Tanque N°2B (BB) Fundo Duplo	97,52
Tanque N°2A (BB) Fundo Duplo	108,22
Tanque N°1B (BB) Fundo Duplo	121,06
Tanque N°1A (BB) Fundo Duplo	134,1
Tanque de Colisão de Vante	146,09

Somando os comprimentos de trechos retos de tubulação das duas regiões, temos o comprimento total para cada caminho:

Tabela 9 Comprimento Total de Trechos Retos por Caminho/Tanque

Comprimento Total de Trechos Retos	
Tanque/Caminho da Tubulação	L_{Tot} (m)
Tanque N°6 (BB) Fundo Duplo	17,5
Tanque N°5 (BB) Fundo Duplo	29,3
Tanque N°5 (BB) Lateral	53,2
Tanque N°4 (BB) Fundo Duplo	56,3
Tanque N°4 (BB) Lateral	76,6
Tanque N°3 (BB) Fundo Duplo	81,1
Tanque N°3 (BB) Lateral	95,2
Tanque N°2B (BB) Fundo Duplo	112,1
Tanque N°2A (BB) Fundo Duplo	122,8
Tanque N°1B (BB) Fundo Duplo	135,6
Tanque N°1A (BB) Fundo Duplo	148,7
Tanque de Colisão de Vante	160,7

c) Comprimento Equivalente dos Acessórios

O comprimento equivalente nada mais é do que expressar a perda de carga de um acessório através de um comprimento de trecho reto equivalente a essa perda de carga. Essa correlação se dá através de tabelas que para cada tipo de acessório tem um respectivo comprimento equivalente, que podem ser vistas no capítulo 3.

Da mesma forma como foi feito para o comprimento dos trechos retos da tubulação, os acessórios e seus comprimentos equivalentes também serão detalhados separadamente - na região da praça de máquinas e fora da praça de máquinas.

Na região da praça de máquinas a tabela abaixo mostra os acessórios relevantes e os comprimentos equivalentes da tubulação que leva a água para o lado bombordo do navio:

Tabela 10 Comprimentos Equivalente dos Acessórios da Praça de Máquinas

Comprimento Equivalente dos Acessórios da Praça de Máquinas (LEPM)			
Acessórios	Quant.	Compr. Equiv.	Compr. Equiv. Total (m)
Válvula Borboleta DN 300	2	12,2	24,4
Válvula Borboleta DN 150	1	7,01	7,01
Cotovelo 90°	2	7,9	15,8
Curva 90°	4	3,6	14,4
Redução	1	3,66	3,66
Tês	5	19	95
Total (m)			160,27

Os acessórios fora da praça de máquinas foram contabilizados para cada um dos caminhos de tubulação que levam até os tanques, de forma exatamente igual ao que foi feito para os trechos retos fora da praça de máquinas. A tabela a seguir mostra esses acessórios:

Tabela 11 Comprimentos Equivalentes dos Acessórios Fora da Praça de Máquinas

Caminho/Tanques N°6, 5, 4, 3, 2B, 2A (BB) Fundo Duplo			
Acessório	Quant.	Compr. Equiv. (m)	Compr. Equiv. Total para cada Caminho/Tanque (m)
Tês	1	19	19
Válvula Borboleta	1	12,2	12,2
Total (m)			31,20

Caminho/Tanques N°5, 4, 3 (BB) Lateral			
Acessório	Quant.	Compr. Equiv. (m)	Compr. Equiv. Total para cada Caminho/Tanque (m)
Tês	1	19	19
Válvula Borboleta	1	12,2	12,2
Curva 90°	3	3,6	10,8
Total (m)			42,00

Caminho/Tanques N°1B (BB) Fundo Duplo			
Acessório	Quant.	Compr. Equiv. (m)	Compr. Equiv. Total (m)
Tês	1	19	19
Válvula Borboleta	1	12,2	12,2
Curva 90°	1	3,6	3,6
Total (m)			34,80

Caminho/Tanque N°1A (BB) Fundo Duplo			
Acessório	Quant.	Compr. Equiv. (m)	Compr. Equiv. Total (m)
Válvula Borboleta	1	12,2	12,2
Curva 45°	2	2,2	4,4
Total (m)			16,6

Caminho/Tanque de Colisão de Vante			
Acessório	Quant.	Compr. Equiv. (m)	Compr. Equiv. Total (m)
Tês	1	19	19
Válvula Borboleta	1	12,2	12,2
Curva 90°	1	3,6	3,6
Curva 45°	6	2,2	13,2
Total (m)			48,00

Na tabela a seguir, teremos os comprimentos equivalentes totais por caminho/tanque:

Tabela 12 Comprimento Equivalente Total dos Acessórios

Comprimento Equivalente Total dos Acessórios	
Caminho/Tanque	LE_{TOT} (m)
Tanque N°6 (BB) Fundo Duplo	191,47
Tanque N°5 (BB) Fundo Duplo	191,47
Tanque N°5 (BB) Lateral	202,27
Tanque N°4 (BB) Fundo Duplo	191,47
Tanque N°4 (BB) Lateral	202,27
Tanque N°3 (BB) Fundo Duplo	191,47
Tanque N°3 (BB) Lateral	202,27
Tanque N°2B (BB) Fundo Duplo	191,47
Tanque N°2A (BB) Fundo Duplo	191,47
Tanque N°1B (BB) Fundo Duplo	195,07
Tanque N°1A (BB) Fundo Duplo	176,9
Tanque de Colisão de Vante	208,27

Com todos os dados definidos, agora podemos calcular a perda de carga.

c) Perda de Carga Total para a Vazão de Trabalho

A perda de carga total para a vazão de trabalho, $Q=500 \text{ m}^3/\text{h}$, para cada um dos caminhos dos tanques é mostrada na tabela abaixo.

Tabela 13 Perda de Carga Total na Vazão de Trabalho

Tanque	Perda de Carga		
	Distribuída	Localizada	Total
	hfr (m)	hfl (m)	hf (m)
Tanque N°6 (BB) Fundo Duplo	0,20	2,22	2,42
Tanque N°5 (BB) Fundo Duplo	0,34	2,22	2,56
Tanque N°5 (BB) Lateral	0,62	2,34	2,96
Tanque N°4 (BB) Fundo Duplo	0,65	2,22	2,87
Tanque N°4 (BB) Lateral	0,89	2,34	3,23
Tanque N°3 (BB) Fundo Duplo	0,94	2,22	3,16
Tanque N°3 (BB) Lateral	1,10	2,34	3,45
Tanque N°2B (BB) Fundo Duplo	1,30	2,22	3,52
Tanque N°2A (BB) Fundo Duplo	1,42	2,22	3,64
Tanque N°1B (BB) Fundo Duplo	1,57	2,26	3,83
Tanque N°1A (BB) Fundo Duplo	1,72	2,09	3,82
Tanque de Colisão de Vante	1,86	2,41	4,28

Esses resultados mostram exatamente o esperado. Os tanques/caminhos mais próximos da bomba tem uma perda de carga menor do que os mais distantes.

d) Perda de Carga para Outros Pontos de Vazão

O mesmo procedimento que foi feito para determinar a perda de carga na vazão de trabalho vai ser feito utilizando outras vazões. Serão escolhidos mais 3 pontos de vazão, sendo eles 200, 350 e 700 m^3/h .

Ponto 1:

Tabela 14 Dados Principais do Ponto 1

Dados Principais				
Q (m^3/h)	V (m/s)	D (m)	Re	f
200	0,79	0,3	225869	0,0187

Tabela 15 Perda de Carga Total do Ponto 1

Ponto 1			
Tanque	Perda de Carga		
	Distribuída	Localizada	Total
	hfr (m)	hfl (m)	hf (m)
Tanque N°6 (BB) Fundo Duplo	0,03	0,38	0,41
Tanque N°5 (BB) Fundo Duplo	0,06	0,38	0,43
Tanque N°5 (BB) Lateral	0,10	0,40	0,50
Tanque N°4 (BB) Fundo Duplo	0,11	0,38	0,49
Tanque N°4 (BB) Lateral	0,15	0,40	0,55
Tanque N°3 (BB) Fundo Duplo	0,16	0,38	0,54
Tanque N°3 (BB) Lateral	0,19	0,40	0,58
Tanque N°2B (BB) Fundo Duplo	0,22	0,38	0,60
Tanque N°2A (BB) Fundo Duplo	0,24	0,38	0,62
Tanque N°1B (BB) Fundo Duplo	0,27	0,38	0,65
Tanque N°1A (BB) Fundo Duplo	0,29	0,35	0,65
Tanque de Colisão de Vante	0,32	0,41	0,73

Ponto 2:

Tabela 16 Dados Principais do Ponto 2

Dados Principais				
Q (m3/h)	V (m/s)	D (m)	Re	f
350	1,38	0,3	395271	0,0180

Tabela 17 Perda de Carga Total do Ponto 2

Ponto 2			
Tanque	Perda de Carga		
	Distribuída	Localizada	Total
	hfr (m)	hfl (m)	hf (m)
Tanque N°6 (BB) Fundo Duplo	0,10	1,11	1,21
Tanque N°5 (BB) Fundo Duplo	0,17	1,11	1,28
Tanque N°5 (BB) Lateral	0,31	1,17	1,48
Tanque N°4 (BB) Fundo Duplo	0,33	1,11	1,43
Tanque N°4 (BB) Lateral	0,44	1,17	1,61
Tanque N°3 (BB) Fundo Duplo	0,47	1,11	1,58
Tanque N°3 (BB) Lateral	0,55	1,17	1,72
Tanque N°2B (BB) Fundo Duplo	0,65	1,11	1,76
Tanque N°2A (BB) Fundo Duplo	0,71	1,11	1,82
Tanque N°1B (BB) Fundo Duplo	0,78	1,13	1,91
Tanque N°1A (BB) Fundo Duplo	0,86	1,04	1,90
Tanque de Colisão de Vante	0,93	1,20	2,13

Ponto 3:

Tabela 18 Dados Principais do Ponto 3

Dados Principais				
Q (m³/h)	V (m/s)	D (m)	Re	f
700	2,75	0,3	790541	0,0174

Tabela 19 Perda de Carga Total do Ponto 3

Ponto 3	Perda de Carga		
	Distribuída	Localizada	Total
	hfr (m)	hfl (m)	hf (m)
Tanque N°6 (BB) Fundo Duplo	0,39	4,29	4,68
Tanque N°5 (BB) Fundo Duplo	0,66	4,29	4,95
Tanque N°5 (BB) Lateral	1,19	4,53	5,72
Tanque N°4 (BB) Fundo Duplo	1,26	4,29	5,55
Tanque N°4 (BB) Lateral	1,72	4,53	6,25
Tanque N°3 (BB) Fundo Duplo	1,82	4,29	6,11
Tanque N°3 (BB) Lateral	2,13	4,53	6,67
Tanque N°2B (BB) Fundo Duplo	2,51	4,29	6,80
Tanque N°2A (BB) Fundo Duplo	2,75	4,29	7,04
Tanque N°1B (BB) Fundo Duplo	3,04	4,37	7,41
Tanque N°1A (BB) Fundo Duplo	3,33	4,04	7,38
Tanque de Colisão de Vante	3,60	4,67	8,27

5.2.2.3 Construção das Curvas Características

As curvas características para esse sistema de lastro foram construídas a partir da equação (5.1). Substituindo o termo das diferenças das alturas geométricas de descarga e sucção ($Z_d - Z_s$) por H_{GEO} , temos:

$$H = H_{GEO} + hf \quad (5.3)$$

A construção das curvas será feita simplesmente somando as alturas geométricas respectivas aos tanques do fundo duplo e laterais com as perdas de carga relativas às vazões determinadas, incluindo o ponto onde $Q=0$. Nos gráficos, a

altura manométrica (H) está no eixo das ordenadas em metros e a vazão (Q) no eixo das abscissas em m³/h. Desse modo, temos as seguintes curvas:

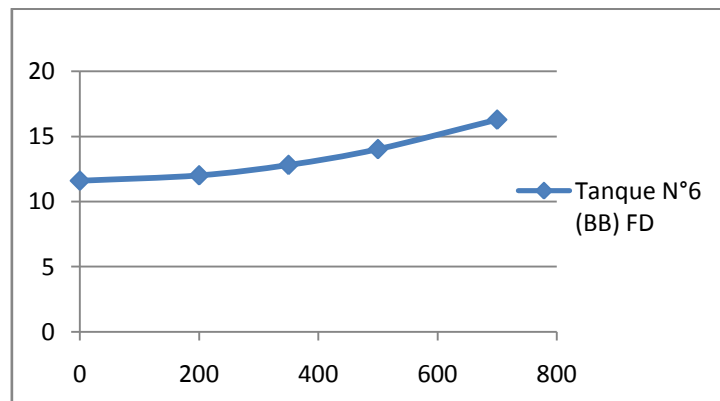


Figura 28 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°6 (BB) FD

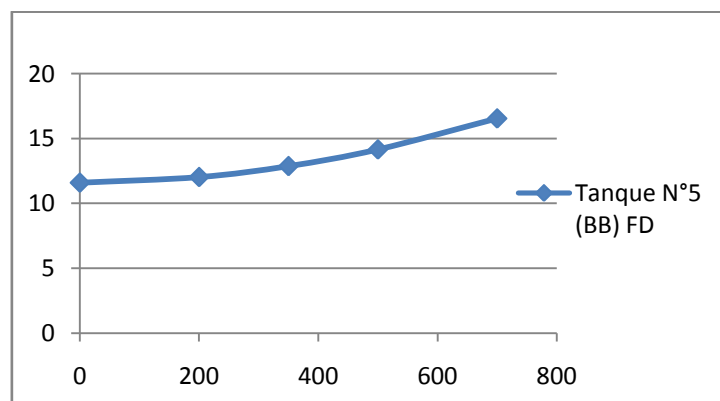


Figura 29 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°5 (BB) FD

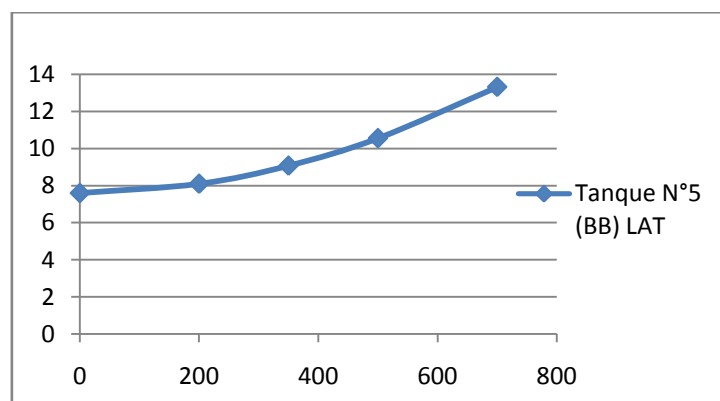


Figura 30 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°5 (BB) LAT

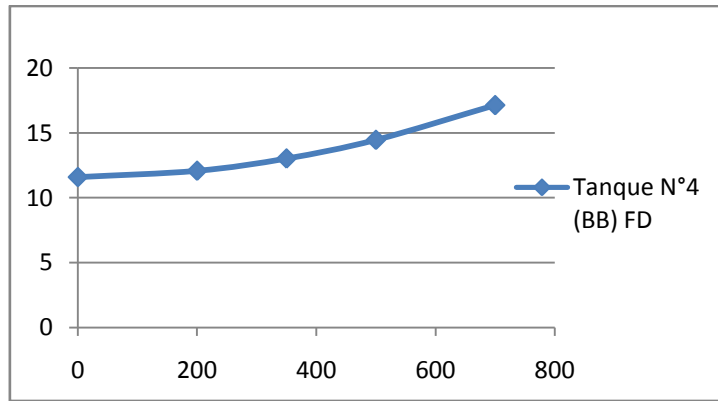


Figura 31 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°4 (BB) FD

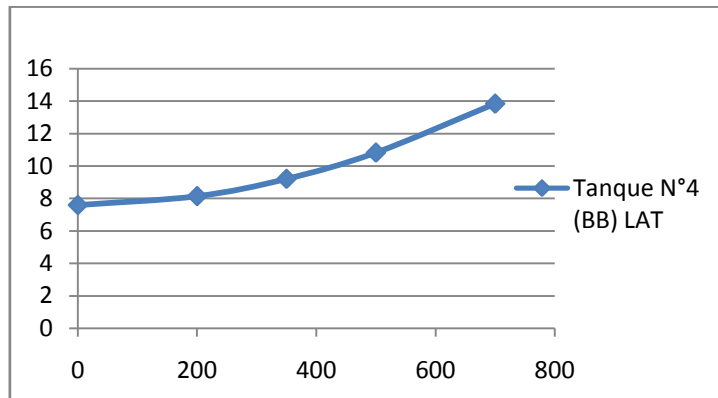


Figura 32 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°4 (BB) LAT

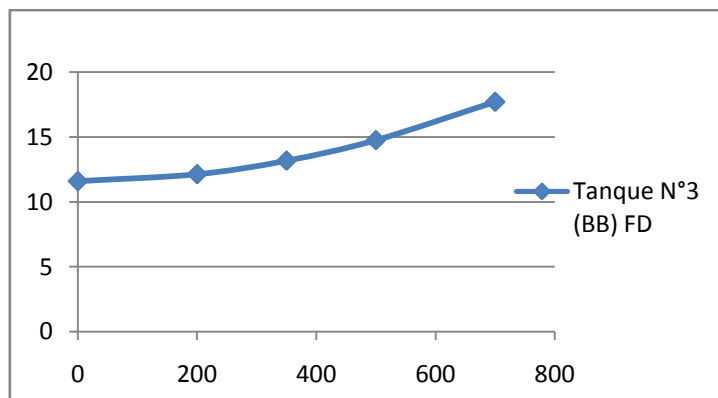


Figura 33 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°3 (BB) FD

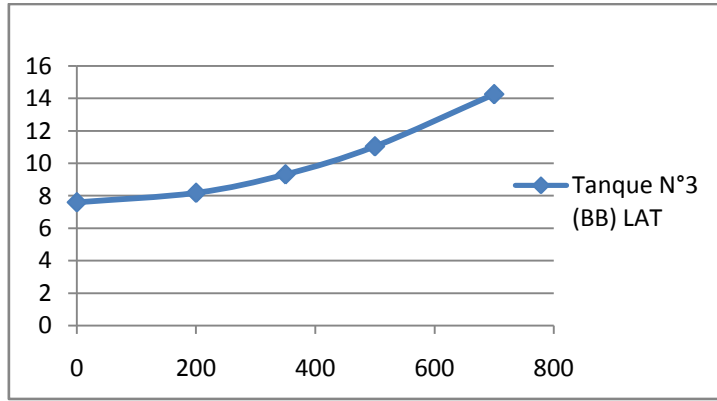


Figura 34 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°3 (BB) LAT

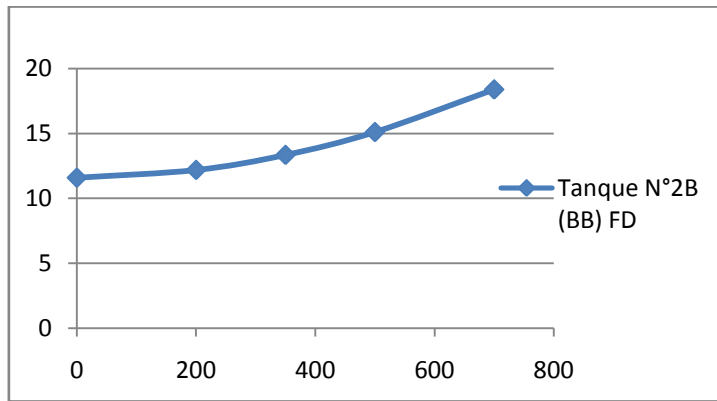


Figura 35 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°2B (BB) FD

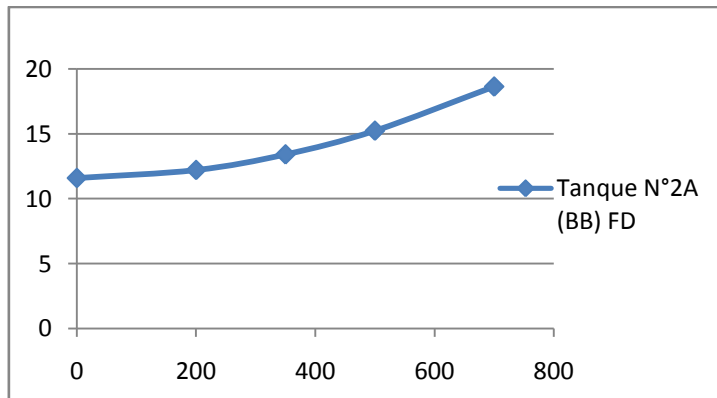


Figura 36 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°2A (BB) FD

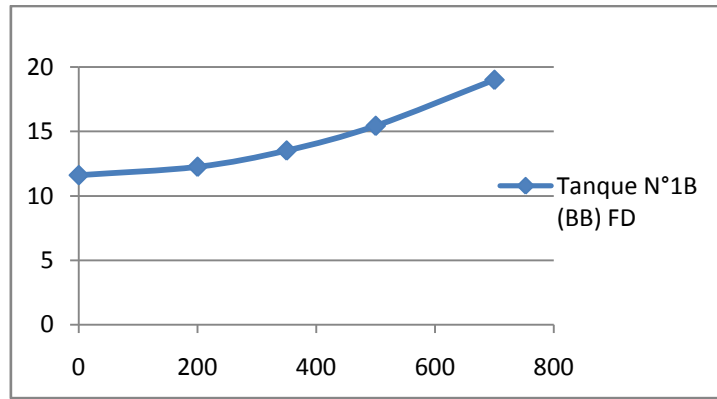


Figura 37 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°1B (BB) FD

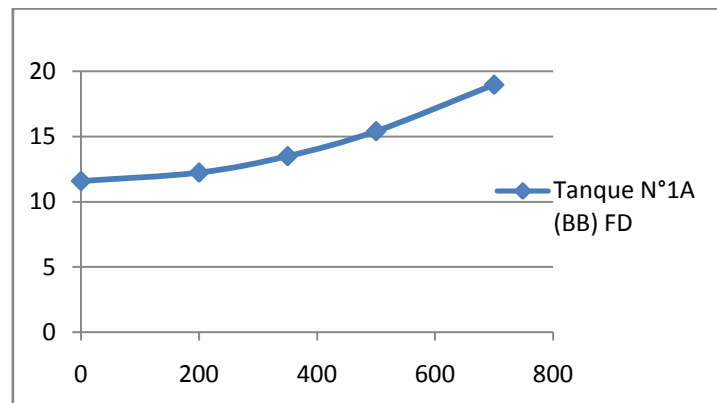


Figura 38 Curva Característica do Caminho para o Tanque N°1A (BB) FD

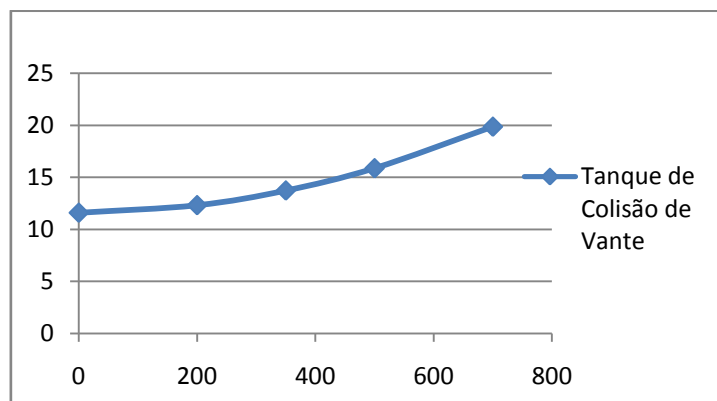


Figura 39 Curva Característica do Caminho para o Tanque de Colisão de Vante

Podemos comparar as curvas umas com as outras no gráfico abaixo, que reúne todas elas:

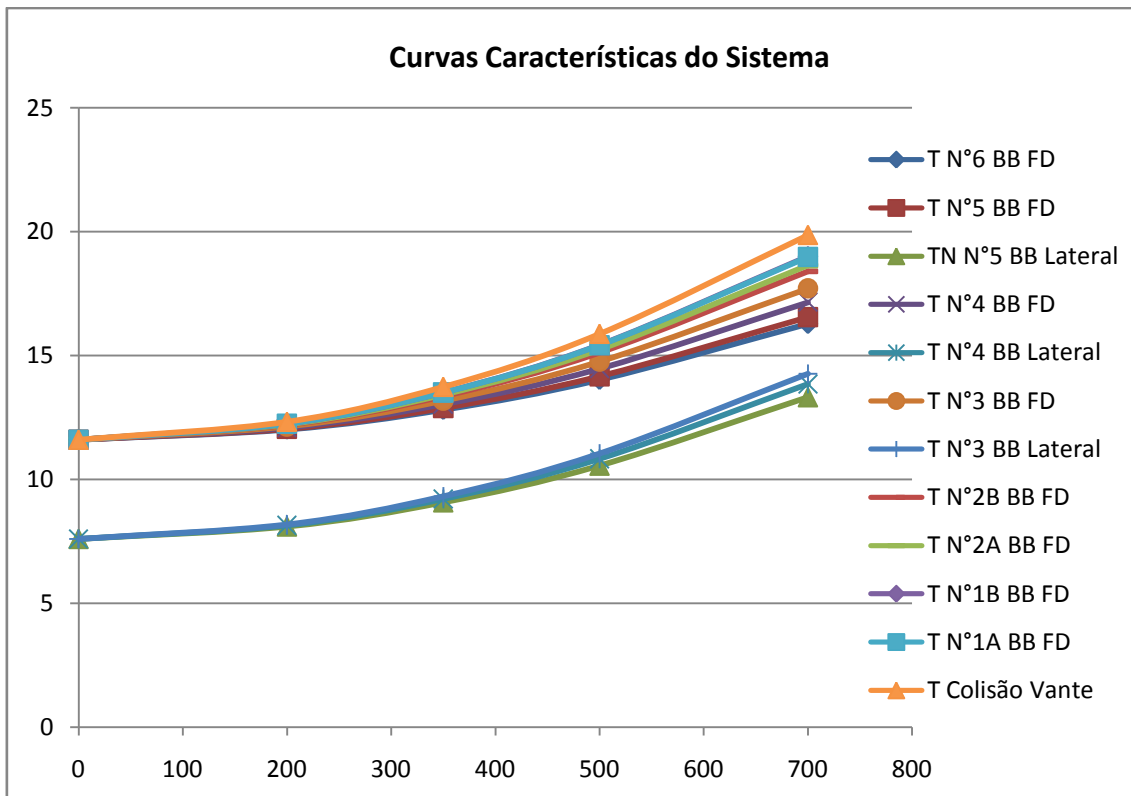


Figura 40 Gráfico comparativo das Curvas Características do Sistema

A partir desses resultados podemos constatar o que realmente já era previsto. Os tanques que estão mais à vante do navio, e que conseqüentemente, estão mais longe das bombas são os que têm maior perda de carga no seu caminho.

5.2.3 Associação das Curvas Características dos Sistemas

Cada curva característica construída para os caminhos dos tanques representa um sistema. Pelo diagrama do sistema de lastro, podemos ver que esses sistemas estão associados em paralelo. Dito isso, devemos fazer a associação dessas curvas em paralelo para que tenhamos a curva geral do sistema de lastro.

De acordo com o Manual de Treinamento da KSB, a associação em paralelo dos sistemas é feita estipulando-se, primeiro, valores para a altura manométrica total. A partir daí, para cada uma dessas alturas manométricas, devemos somar as vazões de cada um dos sistemas para obter a curva resultante dessa associação.

Para esses sistemas foram escolhidos 6 valores de altura manométrica. Os valores são os seguintes: H₁=11,6 m; H₂=13 m; H₃=15 m; H₄=17 m; H₅=19 m e H₆=21 m. O valor de H₁ foi coincido com o maior valor da altura geométrica. A questão agora é descobrir em cada sistema para quais vazões essas alturas manométricas estão relacionadas. Para isso, foi utilizada a equação (5.3) como base e, resolvendo o termo da perda de carga (hf) em função da vazão, chegamos a uma nova equação:

$$H = H_{GEO} + KQ^2 \quad (5.4)$$

Sendo, $K = 0,0826 \cdot f \cdot L/D^5$ e a vazão (Q) medida em m³/s.

Essa situação pede que seja feito o processo inverso; resolver a equação para descobrir a vazão. O grande problema nesse caso, é que o fator de atrito é um termo que depende da vazão. Então, o único jeito de acharmos o resultado é fazendo um processo iterativo. Através do software Microsoft Excel foi possível chegar a esses valores com até certa facilidade.

Abaixo, temos uma tabela mostrando os valores de vazão em cada sistema separado e para cada altura manométrica determinada. Na coluna da direita, já temos o somatório das vazões para a construção da curva geral do sistema de lastro.

Tabela 20 Vazões respectivas aos Caminhos para os Tanques e para os H's arbitrados

VAZÕES RESPECTIVAS AOS CAMINHOS PARA OS TANQUES E PARA O H ARBITRADO (m ³ /h)													Q TOTAL (m ³ /h)
H (m)	T N°6 FD	T N°5 FD	T N°5 LAT	T N°4 FD	T N°4 LAT	T N°3 FD	T N°3 LAT	T N°2B FD	T N°2A FD	T N°1B FD	T N°1A FD	T COL VT	
11,6	0	0	583,2	0	557,7	0	539,6	0	0	0	0	0	1680,50
13,0	377	367	679,6	346	650	329,2	628,9	311,4	305,9	297,9	298,6	281,6	4873,10
15,0	594,8	578,3	797,8	545,2	763,1	519,3	738,4	491,4	482,8	470,4	471,5	444,7	6897,69
17,0	752,8	732,1	900,9	690,3	861,7	657,6	833,8	622,4	611,5	595,8	597,2	563,5	8419,71
19,0	883,5	859,2	993,5	810,3	950,3	772,0	919,6	730,8	718,1	699,7	701,3	661,7	9700,06

Fazendo o gráfico head x vazão da associação das curvas a partir dos valores acima, temos a seguinte curva de associação dos sistemas:

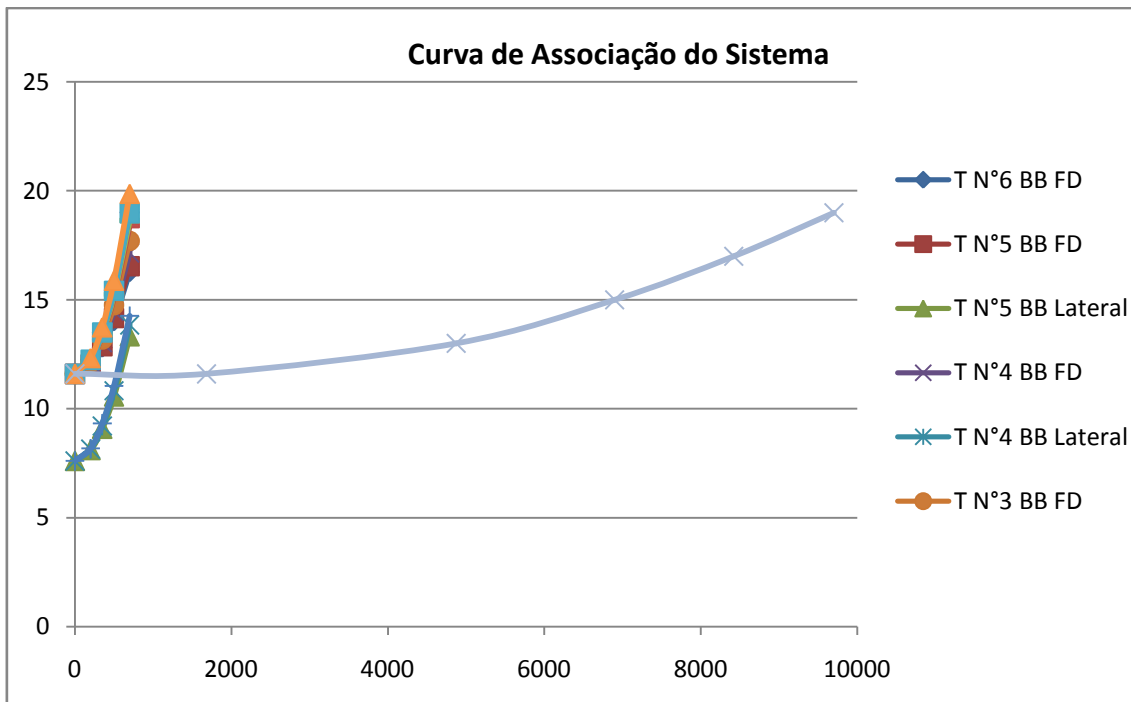


Figura 41 Curva de Associação do Sistema

Essa curva mostra como ficaria a situação do sistema caso todos os reservatórios fossem deslastrados simultaneamente. Porém, o que ocorre na realidade, é que no máximo 3 tanques são deslastrados por vez, como é dito no tópico das considerações para o cálculo, 5.2.1. Desse modo, será feita a mesma curva para diferentes combinações de caminhos/tanques escolhidos de 3 em 3.

As seguintes combinações de caminhos/tanques foram feitas: tanques da vante do navio; tanques da vante com tanques do meio do navio; tanques à ré; e tanques da vante com tanques à ré do navio.

Combinação 1:

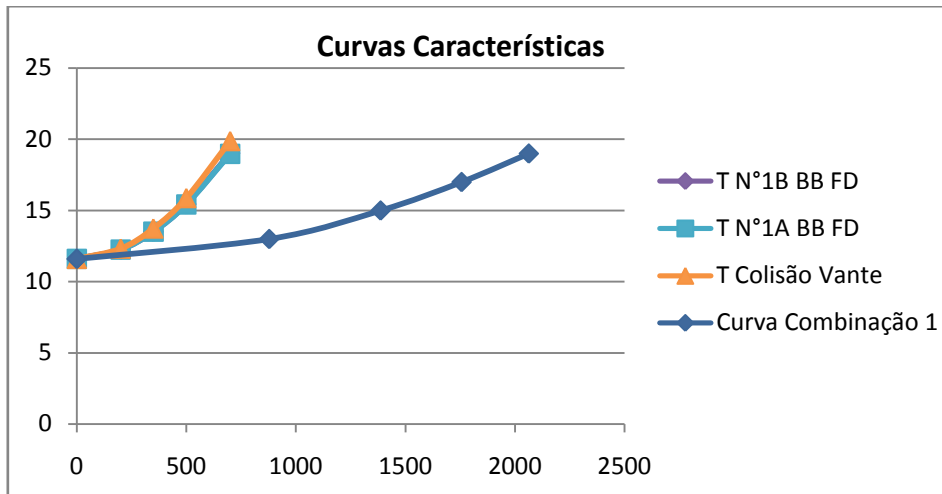


Figura 42 Curva de Associação entre Tanques da Vante

Combinação 2:

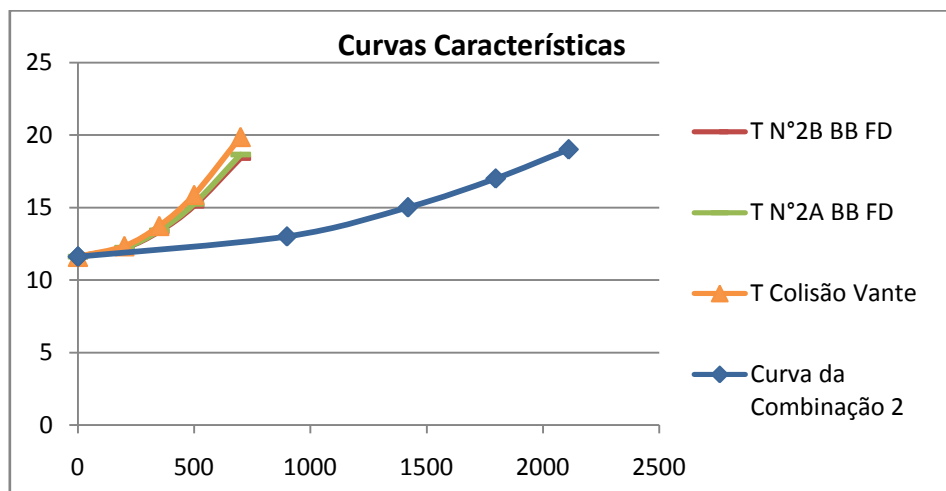


Figura 43 Curva de Associação entre Tanques da Vante e Tanques do Meio

Combinação 3:

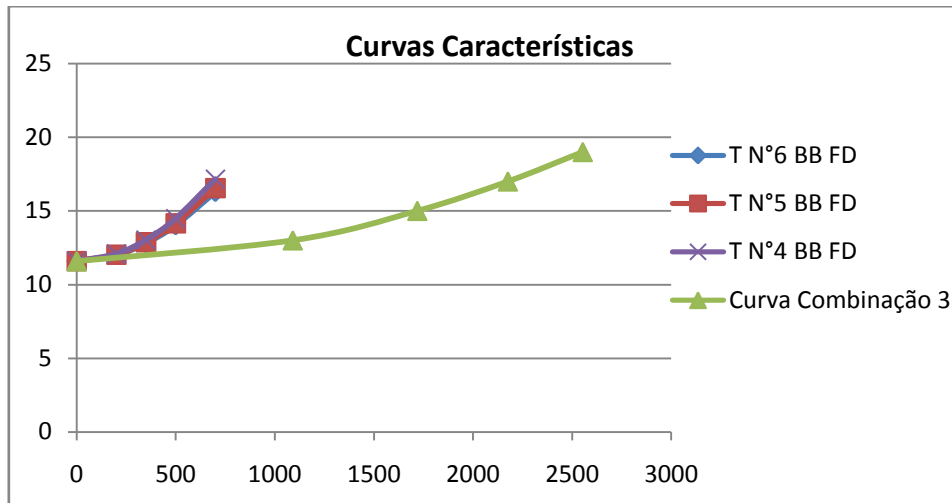


Figura 44 Curva de Associação entre Tanques da Ré

Combinação 4:

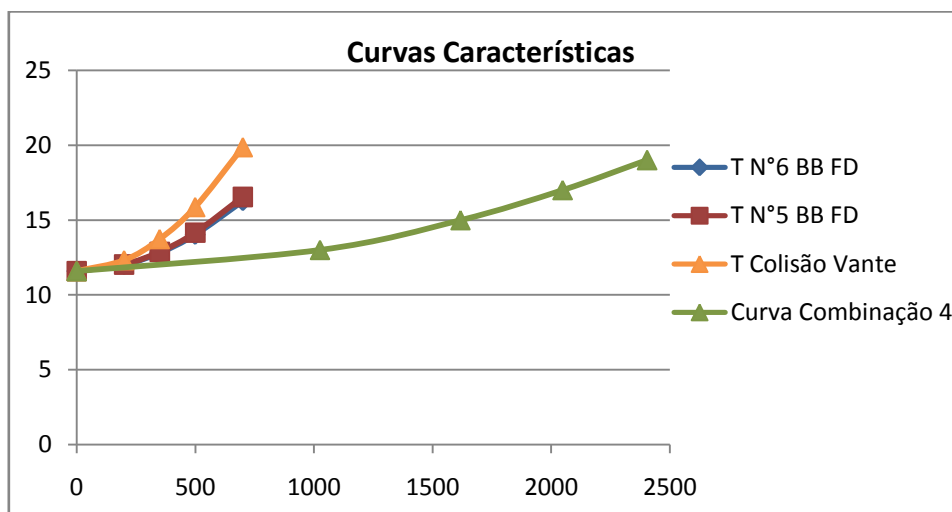


Figura 45 Curva de Associação entre Tanques da Vante e Tanques da Ré

As curvas das associações dessas combinações de caminhos/tanques foram construídas no mesmo gráfico para facilitar a comparação entre elas, como é mostrado abaixo.

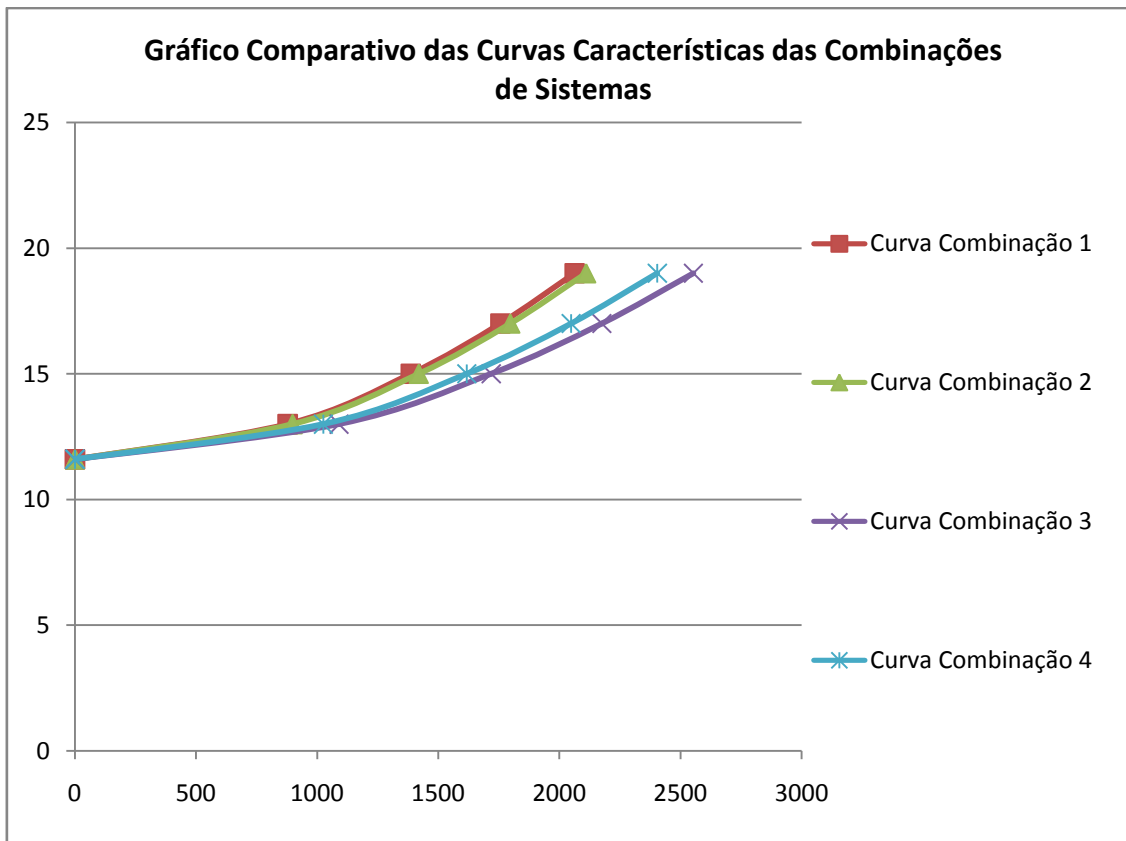


Figura 46 Gráfico Comparativo das Curvas das Combinações dos Tanques

Através do gráfico, podemos ver que a combinação que tem maior perda de carga é a combinação 1. Apesar disso, na vazão de trabalho (500m³/h), as curvas estão, praticamente, cruzando o mesmo ponto. Apenas por uma questão de conveniência, escolheremos a curva da combinação 1. Esse processo de escolha da bomba será detalhado no tópico de seleção da bomba, posteriormente.

5.3 Cálculo do NPSH Disponível

O NPSH disponível vai ser calculado a partir da equação 3.24. Será considerada a situação mais crítica no deslastro, que ocorre quando a bomba puxa a água salgada do ponto mais fundo dos tanques de fundo duplo. Então os caminhos/tanques utilizados para cálculo serão: tanque de colisão de vante, tanque do fundo duplo nº1A e 1B. A seguir, veremos o cálculo de forma detalhada.

$$NPSH_{DISP} = h_{atm} + Z_s - h_{vp} - h_{fs} \quad (3.24)$$

Os valores da pressão atmosférica e da pressão de vapor foram achados com o auxílio das tabelas 4 e 5, respectivamente. O valor de Z_s foi demonstrado no tópico 5.2.2.1. Esses valores são destacados abaixo:

$h_{atm} = 10,33 \text{ m}$; para a altitude em relação ao mar igual a zero.

$h_{vp} = 0,433 \text{ m}$; para uma temperatura de projeto da água salgada de 30°C .

$Z_s = -4,5 \text{ m}$; altura do fundo dos tanques de fundo duplo até a bomba.

O parâmetro que falta é a perda de carga na sucção da bomba. A perda de carga foi calculada considerando os caminhos para os tanques mencionados acima.

Comprimento total de trechos retos:

$L_{Reto} = 174,15 \text{ m}$;

Comprimento equivalente dos acessórios:

Tabela 21 Comprimento Equivalente dos Acessórios para os Caminhos/Tanques de Colisão de Vante, N°1A e N°1B

Comprimentos Equivalentes (m)			
Acessórios	Quant.	Compr. Equiv. Parcial (m)	Compr. Equiv. Total (m)
Redução	1	3,66	7,32
Válvula Borboleta DN 300	3	12,2	36,6
Cotovelo 90°	3	3,6	10,8
Curva 90°	6	3,6	21,6
Curva 45°	8	2,2	13,2
Tês	2	19	38
Total (m)			127,52

$L_{EQV} = 127,52 \text{ m}$;

Perda de Carga da total da sucção na vazão de trabalho:

$h_{fs} = 3,5 \text{ m}$;

Agora, já podemos calcular o NPSH disponível. Substituindo os valores na equação 3.24, temos:

$$NPSH_{Disp} = 2,0 \text{ m};$$

5.4 Características Necessárias para a Seleção da Bomba

Como mostrado no tópico anterior, as curvas de associação para as diversas combinações de 3 em 3 tanques na vazão de trabalho, se mostraram bem próximas umas das outras. Sendo assim, foi escolhida a curva de associação da combinação 1 para a tarefa de verificarmos as características que a bomba deverá ter.

Ampliando o gráfico da figura 42, onde estão mostradas as curvas características independentes para cada um dos tanques de colisão de vante, tanque N°1A e 1B (BB) e a curva de associação correspondente a esse sistema, podemos observar claramente a situação:

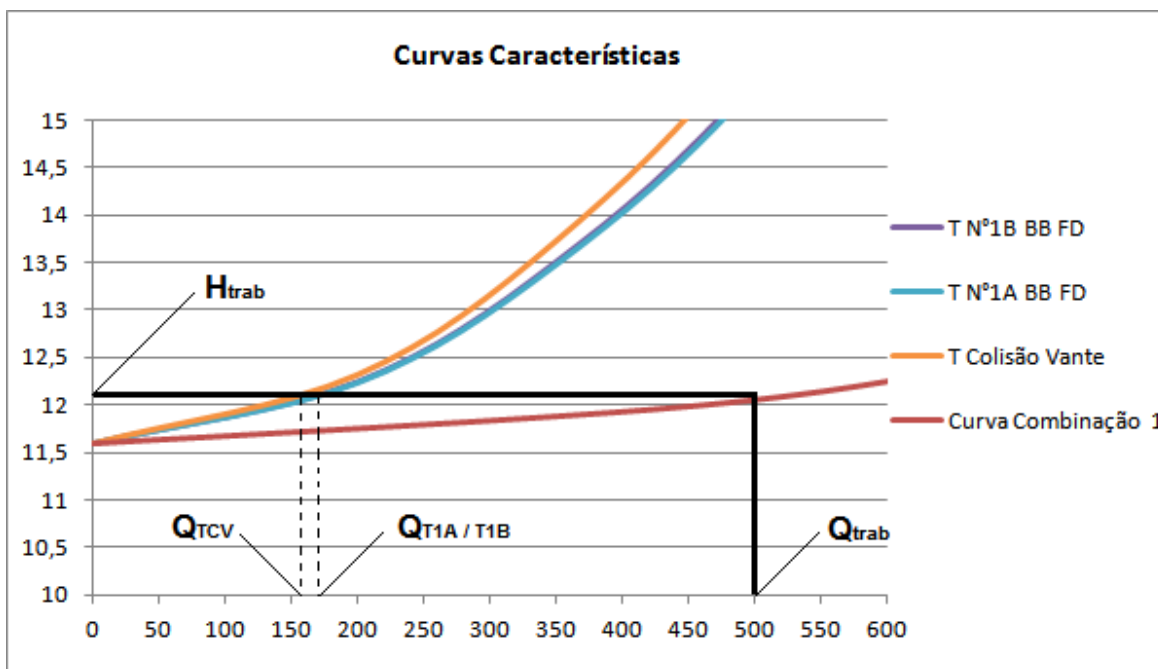


Figura 47 Gráfico indicativo da Vazão de Trabalho e Altura Manométrica necessária ao Sistema

O gráfico mostra que para uma vazão de trabalho (Q_{trab}) de 500 m³/h, teremos uma altura manométrica correspondente de 12,2 m, aproximadamente. E as vazões que saem de cada um dos tanques podem ser lidas no ponto de encontro das curvas independentes deles, com a linha preta imaginária mostrada no gráfico. As vazões correspondentes ao tanque de colisão de vante (Q_{TCV}) e aos tanques do fundo duplo N°1A (Q_{T1A}) e N°1B (Q_{T1B}) são as seguintes:

$Q_{\text{TCV}} = 160 \text{ m}^3/\text{h}$; (no ramal do tanque de colisão de vante)

$Q_{\text{T1A}} / \text{T1B} = 170 \text{ m}^3/\text{h}$; (em cada ramal dos tanques)

E o somatório dessas vazões resulta, obviamente, no total de 500 m³/h.

Dessa forma, a bomba deve ser escolhida para uma vazão de trabalho de 500 m³/h e uma altura manométrica de 12,2 m. Deve ser levado em conta também, o NPSH disponível do sistema, que de acordo com os cálculos no tópico 5.3, é de 2,0 m. Seguindo as recomendações mostradas no tópico 3.8, o NPSH requerido da bomba deve ser 0,6 m menor que o NPSH disponível. Portanto, a bomba deverá ter um NPSH requerido de 1,4 m no máximo. O motor elétrico da bomba será calculado no tópico posterior.

5.5 Cálculo da Potência do Motor Elétrico

A potência que o motor elétrico deverá ter, na prática, é a potência consumida pela bomba que é feito a partir da equação 3.5:

$$Pot_{\text{Cons}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75 \cdot \eta} \quad (3.5)$$

Os dados a serem utilizados na equação devem estar com as unidades de acordo com o que está mostrado no tópico 3.4. Os valores são os seguintes:

$\gamma = 1025 \text{ kgf}/\text{m}^3$; (ρ é encontrado na tabela 7)

$Q = 0,14 \text{ m}^3/\text{s}$; (500 m³/h)

$$H = 12,2 \text{ m.}$$

$\eta = 0,75$; (Será usado, nesse caso, um rendimento da bomba de 75%)

Substituindo na equação 3.5, temos o seguinte resultado:

$$\mathbf{Pot_{CONS} = 31 CV}$$

O motor elétrico, portanto, deverá ter uma potência de 31 cv.

6. Conclusão

A seleção da bomba para o sistema de lastro se mostrou uma tarefa mais complexa pelo fato deste ser um sistema com vários reservatórios. A dificuldade estava, principalmente, em saber os valores de vazão em cada ramal da tubulação que se dividia para os tanques, para que se pudesse, posteriormente, calcular a perda de carga do sistema. Devido a isso, foi preciso recorrer a uma outra solução. Esta foi obtida através da associação das curvas características do sistema para uma determinada combinação de tanques, como é mostrado pelo Manual de Treinamento da KSB.

Para chegarmos a esses dados finais, foi preciso levar em conta algumas considerações, como mostrado no tópico 5.2.1. Tudo para que a bomba pudesse ter as características adequadas à pior situação que o sistema iria impor. Pelo que se pode ver, os resultados foram bem satisfatórios.

Podemos concluir que a complexidade do sistema de lastro gerou um desafio maior para encontrar uma solução diferente dos sistemas triviais, com apenas um reservatório de sucção e um de descarga, e isso trouxe um maior conhecimento no campo da mecânica dos fluidos.

Referências Bibliográficas

DA SILVA, MARCOS A., *Manual de Treinamento KSB - Seleção e Aplicação de Bombas Centrífugas*, 5ª Ed., 2003.

DE MATTOS, EDSON E., DE FALCO, REINALDO, *Bombas Industriais*, 2ª Ed, Rio de Janeiro, Interciência 1998.

FOX, ROBERT W., MCDONALD, ALAN T., PRITCHARD, PHILIP J., *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, 6ª Ed. LTC 2006.

KREITH, FRANK, *Mechanical Engineering Handbook*, Boca Raton, CRC Press LLC, 1999.

MOLLAND, ANTHONY F., *The Maritime Engineering Reference Book – A Guide to Ship Design, Construction and Operation*, 2008.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL, *Stemming The Tide – Controlling Introductions of Nonindigenous Species by Ship's Ballast Water*, National Academy Press, Washington D.C., 1996

RAWSON, K.J., TUPPER, E.C., *Basic Ship Theory*, 5ª Ed, Vol. 2, ch. 10-16: Ship dynamics and design.

RODRIGUES, LUIZ E. M. J., *Apostila de Mecânica dos Fluidos*, <<http://www.engbrasil.eng.br/pp/mf/aula10.pdf>> (acessado em 15/10/2012)

WHITE, FRANK M., *Fluid Mechanics*, 4ª Ed., Mcgraw-Hill College.

ANEXO 1

DESENHOS TRIDIMENSIONAIS DA TUBULAÇÃO DO SISTEMA DE LASTRO

TUBULAÇÃO DA PRAÇA DE MÁQUINAS

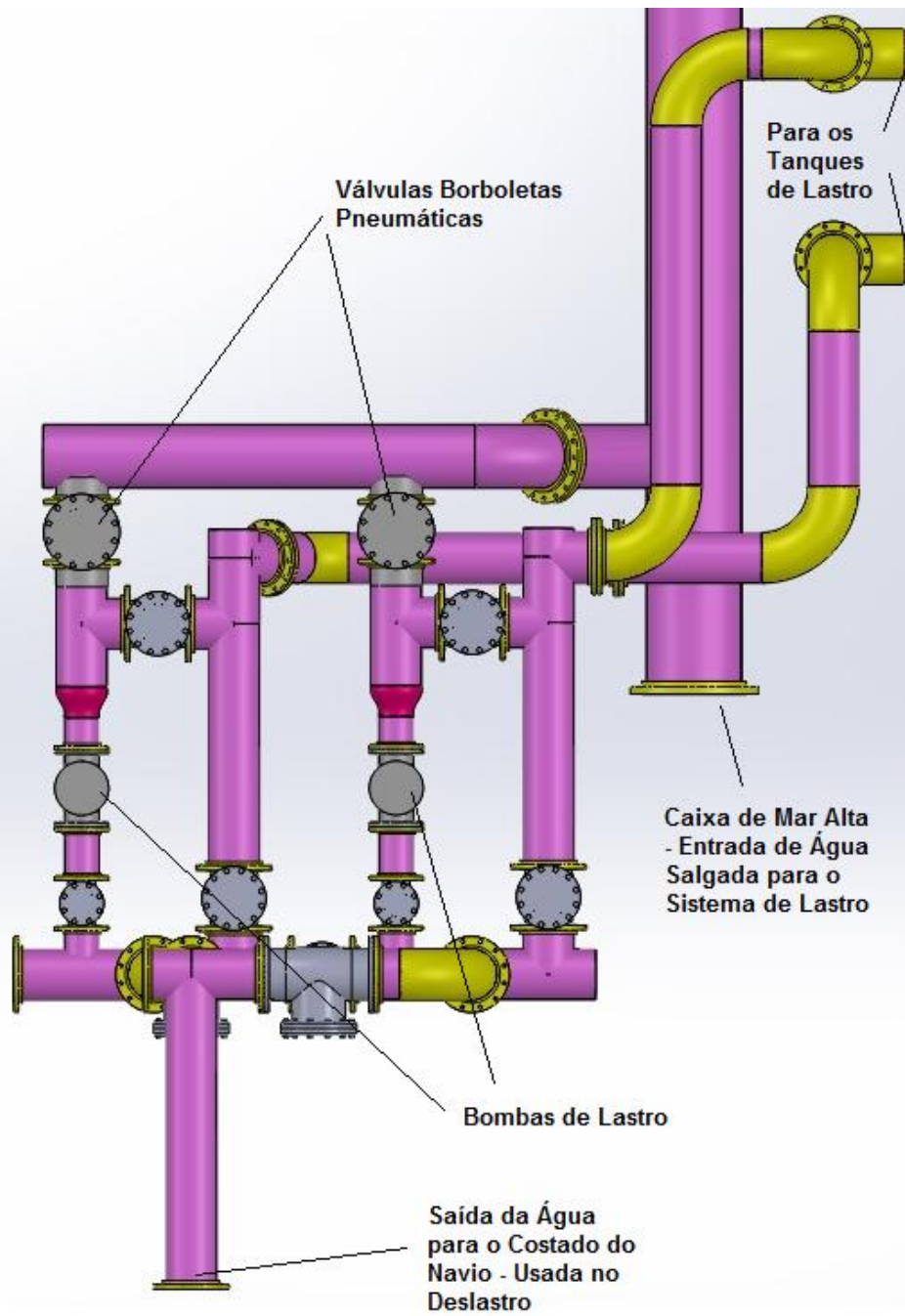


Figura 48 Vista Superior

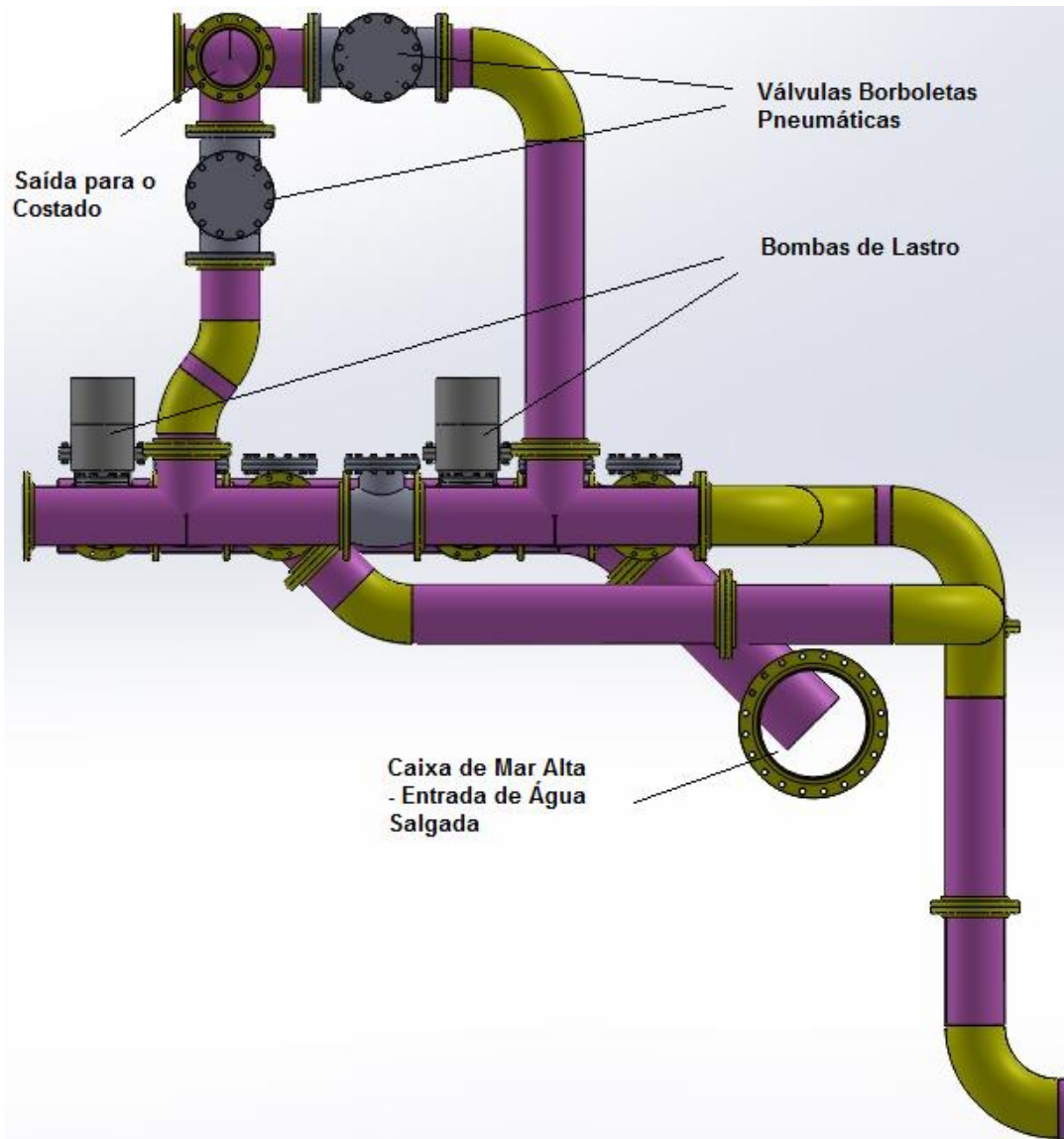


Figura 49 Vista Lateral

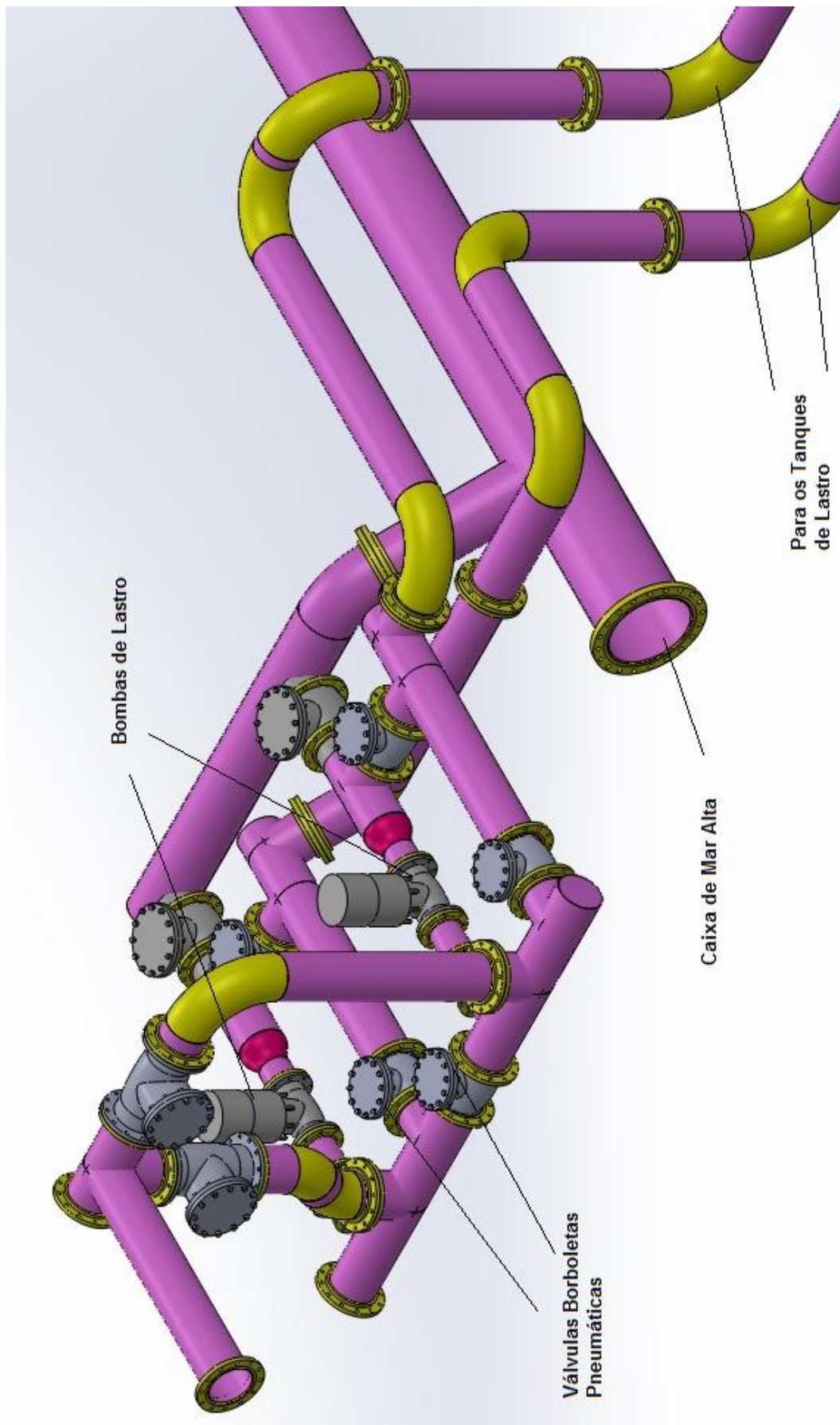


Figura 50 Vista Isométrica

TUBULAÇÃO FORA DA PRAÇA DE MÁQUINAS

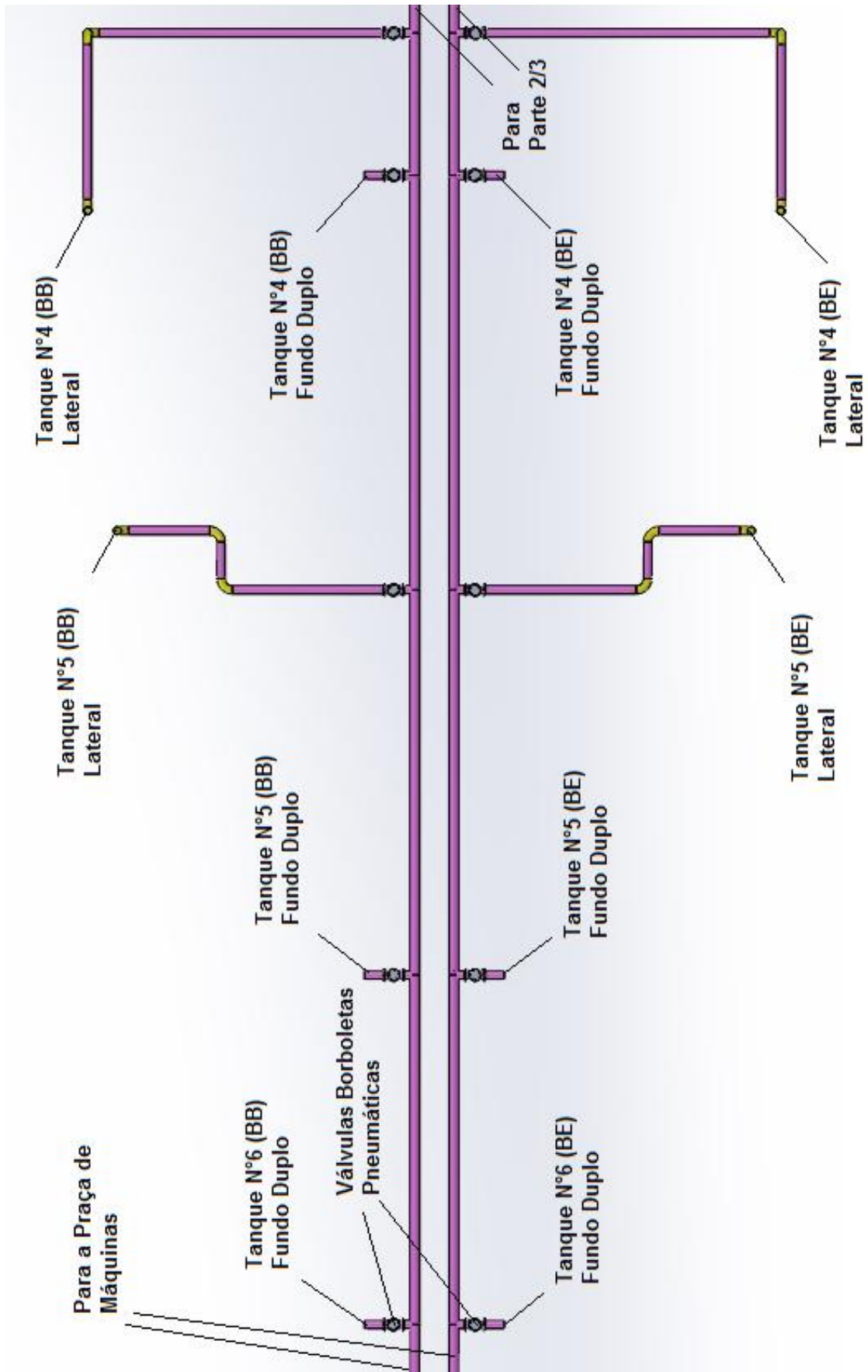


Figura 51 Vista Superior Parte 1/3

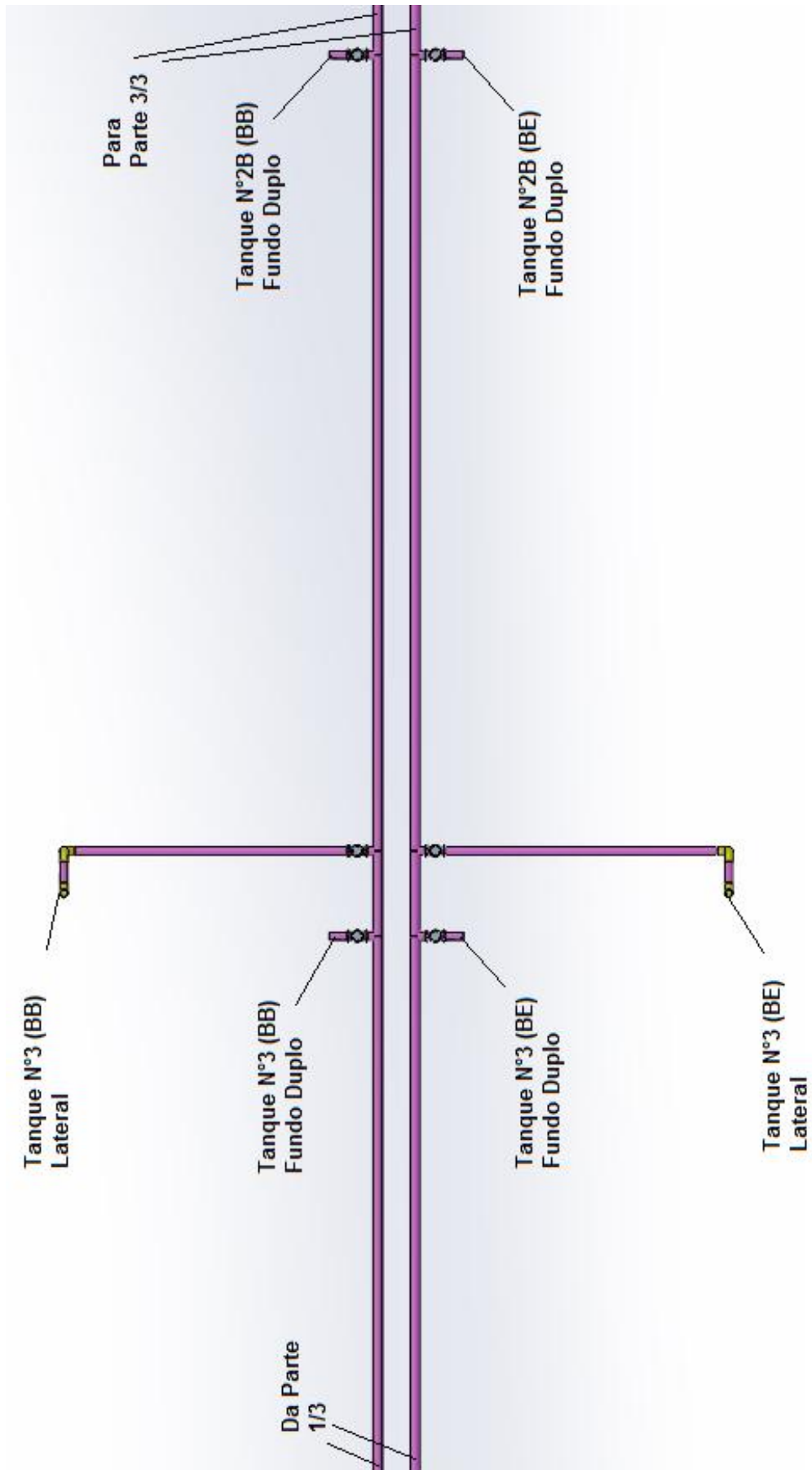


Figura 52 Vista Superior - Parte 2/3

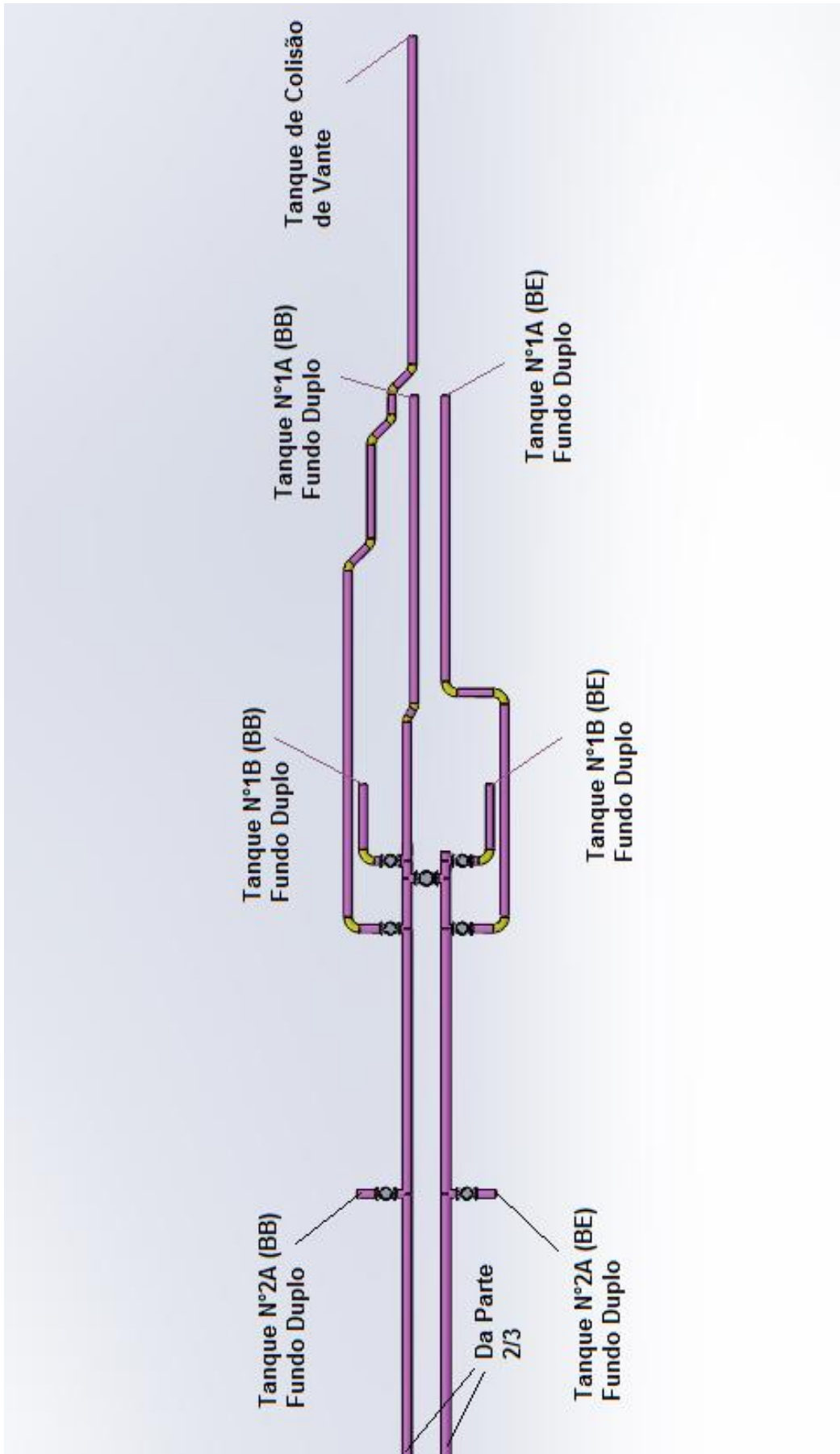


Figura 53 Vista Superior - Parte 3/3

VISTA GERAL DA TUBULAÇÃO DO SISTEMA DE LASTRO

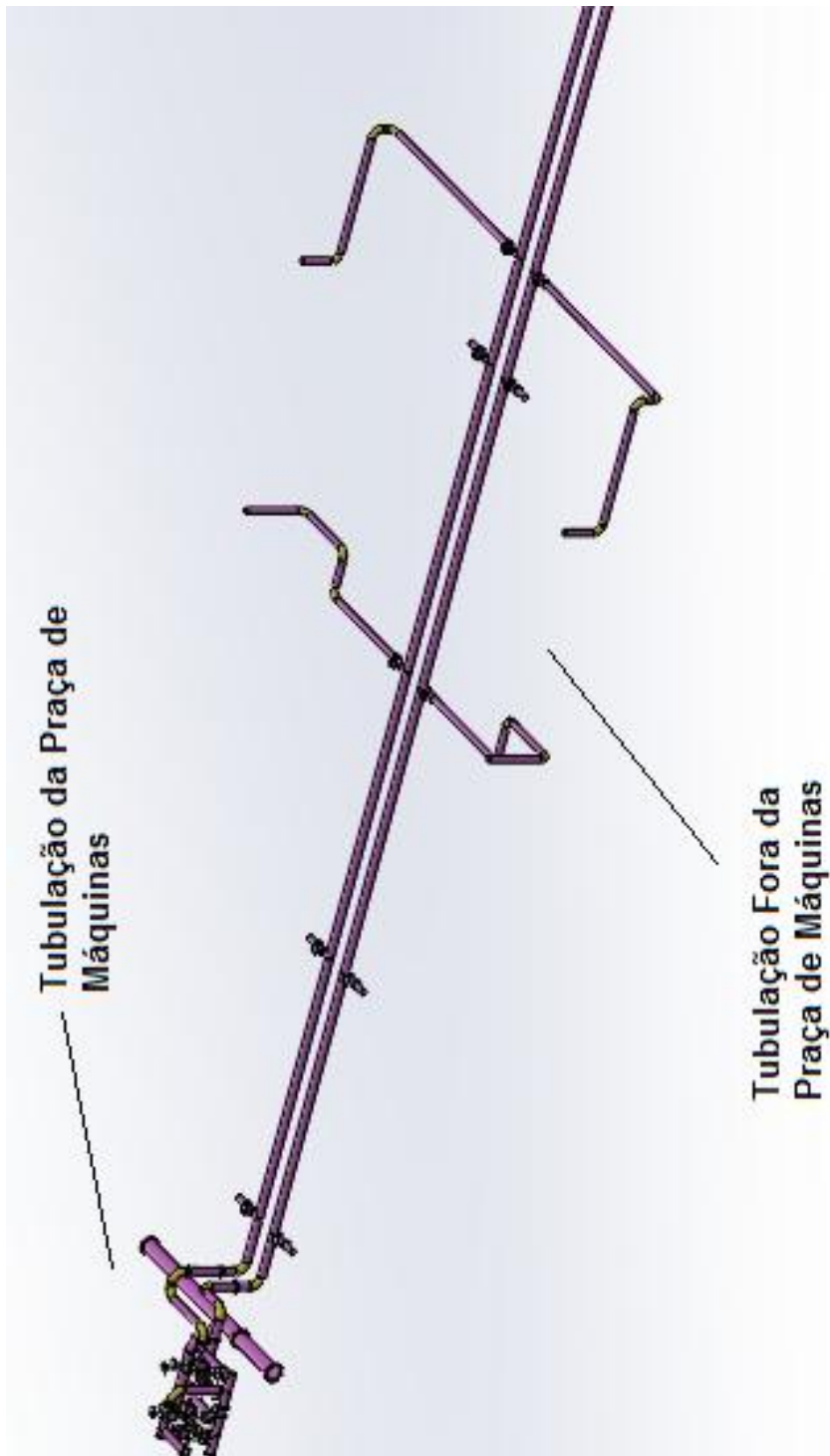


Figura 54 Vista Isométrica - Parte 1/2



Figura 55 Vista Isométrica - Parte 2/2

ANEXO 2

COMPRIMENTO DOS TRECHOS RETOS DA TUBULAÇÃO DO SISTEMA DE LASTRO

Tabela 22 Comprimento dos Trechos Retos da Tubulação da Praça de Máquinas

Praça de Máquinas	
Parte	Comprimento
Trecho 1	1300 mm
Trecho 2	3000 mm
Trecho 3	800 mm
Trecho 4	200 mm
Trecho 5	320 mm
Trecho 6	2200 mm
Trecho 3'	800 mm
Trecho 4'	200 mm
Trecho 5'	320 mm
Trecho 6'	2200 mm
Trecho 7	1800 mm
Trecho 8	1600 mm
Trecho 9	300 mm
Trecho 10	100 mm
Trecho 11	330 mm
Trecho 12	250 mm
Trecho 13	800 mm
Trecho 14	2000 mm
Trecho 15	160 mm
Trecho 16	1900 mm
Trecho 17	400 mm
Trecho 18	2700 mm
Trecho 19	1000 mm
Trecho 20	1800 mm
Trecho 21	2300 mm
Trecho 22	100 mm
Trecho 23	2200 mm
Total	31080 mm

Tabela 23 Comprimento dos Trechos Retos da Tubulação Fora da Praça de Máquinas

Fora da Praça de Máquinas	
Parte	Comprimento
Trecho 24	2000 mm
Trecho 25	2000 mm
Trecho 26	920 mm
Trecho 27	920 mm
Trecho 28	11800 mm
Trecho 29	11800 mm
Trecho 30	920 mm
Trecho 31	920 mm
Trecho 32	13000 mm
Trecho 33	13000 mm
Trecho 34	11800 mm
Trecho 35	11800 mm
Trecho 36	14000 mm
Trecho 37	14000 mm
Trecho 38	920 mm
Trecho 39	920 mm
Trecho 40	4800 mm
Trecho 41	4800 mm
Trecho 42	16380 mm
Trecho 43	16380 mm
Trecho 44	20000 mm
Trecho 45	20000 mm

Fora da Praça de Máquinas	
Parte	Comprimento
Trecho 46	920 mm
Trecho 47	920 mm
Trecho 48	3000 mm
Trecho 49	3000 mm
Trecho 50	12030 mm
Trecho 51	12030 mm
Trecho 52	28000 mm
Trecho 53	28000 mm
Trecho 54	920 mm
Trecho 55	920 mm
Trecho 56	10700 mm
Trecho 57	10700 mm
Trecho 58	920 mm
Trecho 59	920 mm
Trecho 60	9000 mm
Trecho 61	9000 mm
Trecho 62	29790 mm
Trecho 63	18940 mm
Trecho 64	2300 mm
Trecho 65	2600 mm
Trecho 66	2460 mm
Trecho 67	2460 mm
Trecho 68	15500 mm
Total	193080 mm

Tabela 24 Comprimento de Trecho Reto Total da Tubulação de Lastro

Comprimento Total	
Total Geral	224,2 m

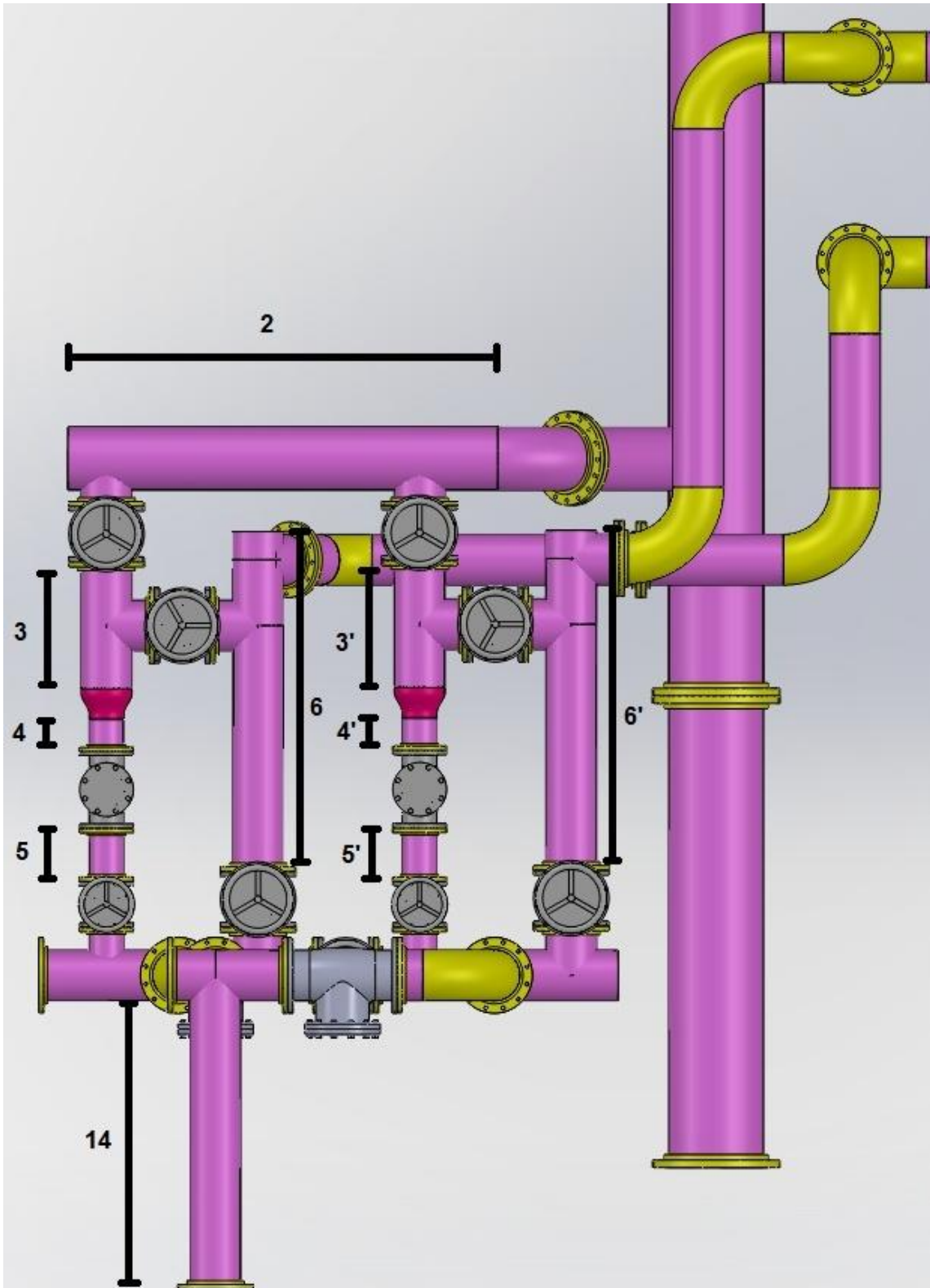


Figura 56 Vista Superior da Praça de Máquinas com os Trechos Numerados

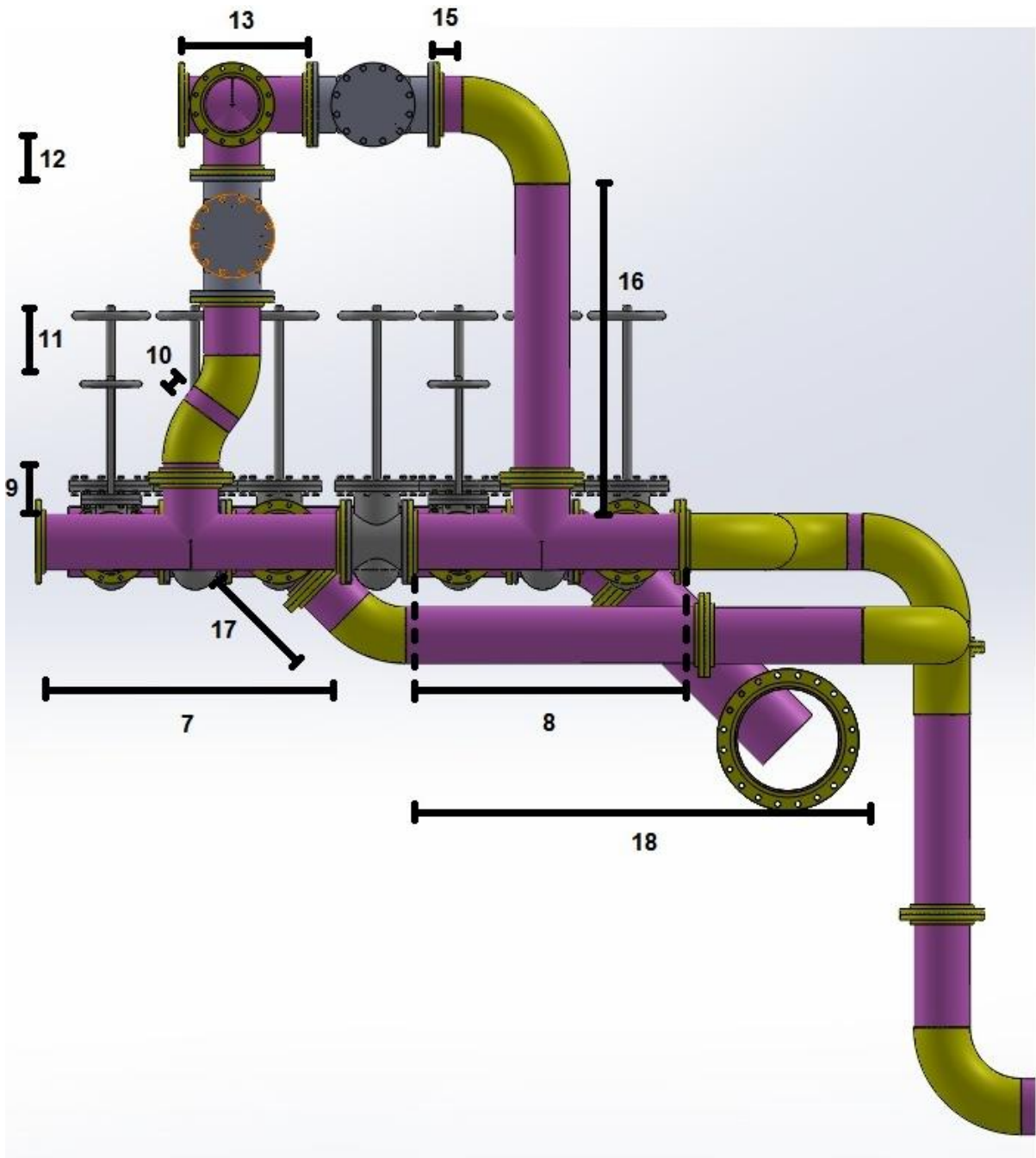


Figura 57 Vista Lateral da Praça de Máquinas com os Trechos Numerados

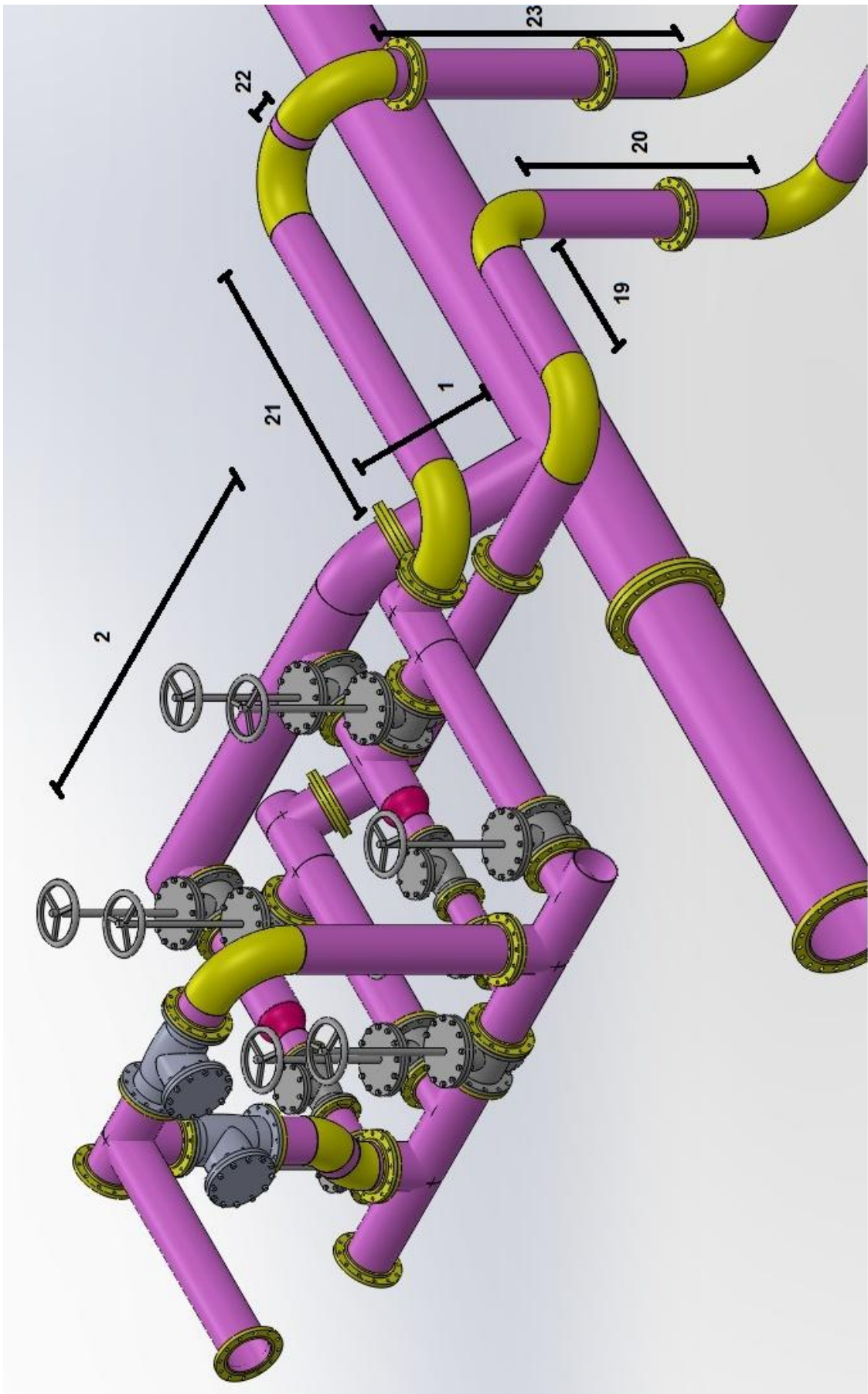


Figura 58 Vista Isométrica da Praça de Máquinas com os Trechos Numerados

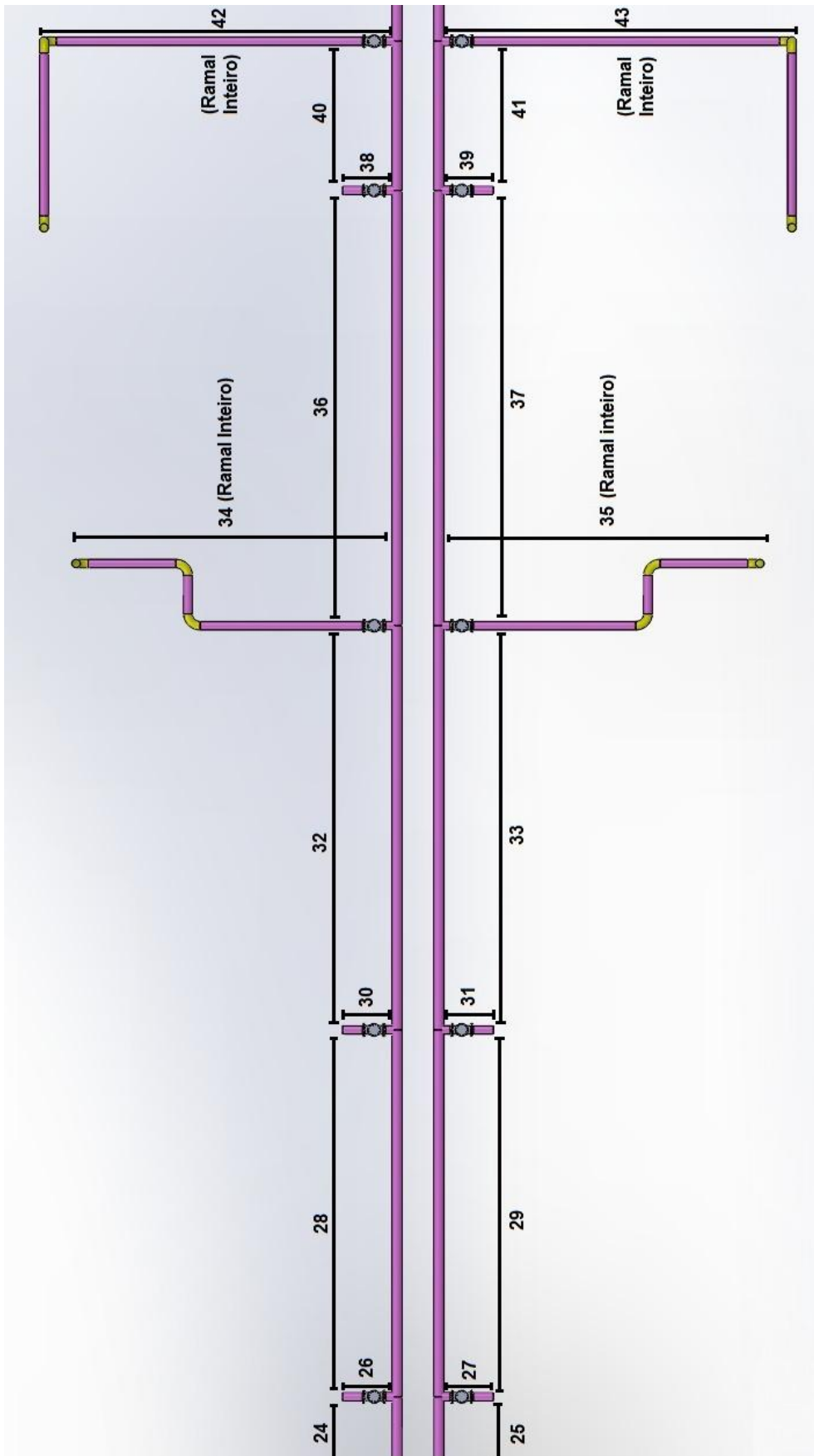


Figura 59 Vista Superior Fora da Praça de Máquinas com os Trechos Numerados - Parte 1/3

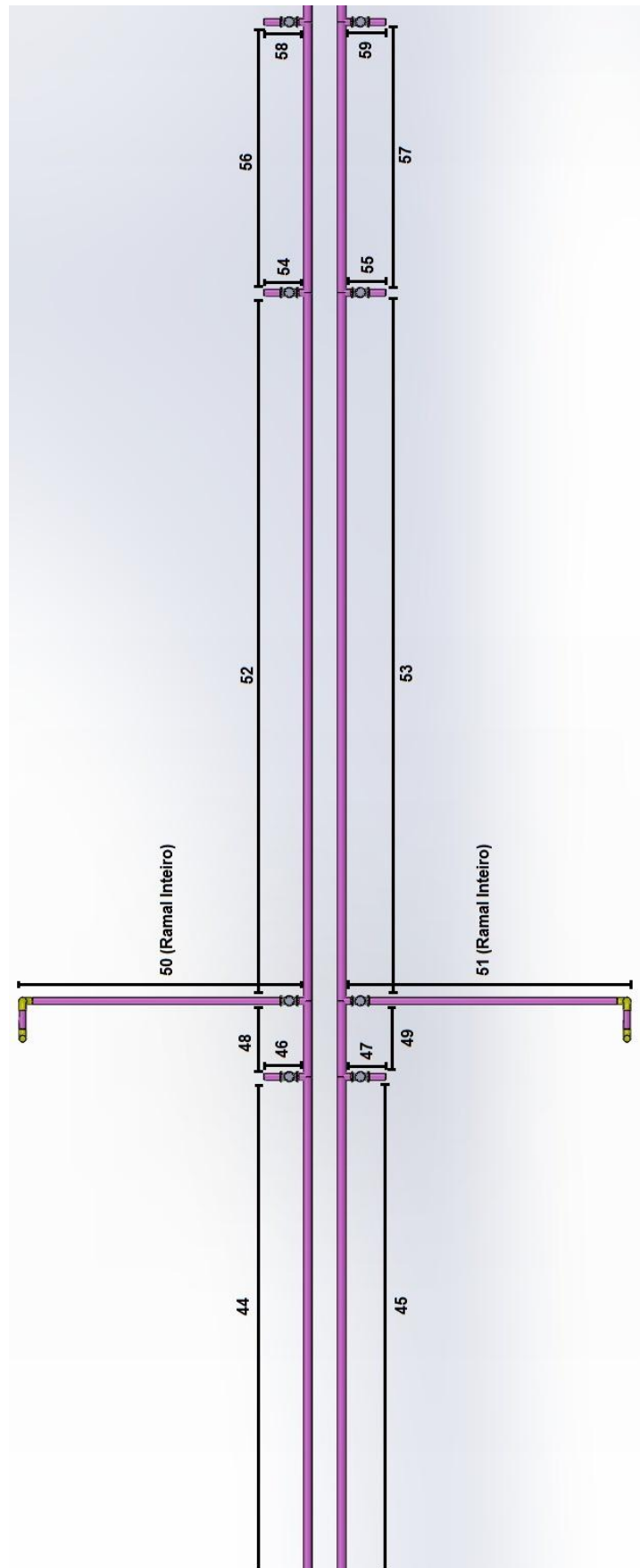


Figura 60 Vista Superior Fora da Praça de Máquinas com os Trechos Numerados -
Parte 2/3

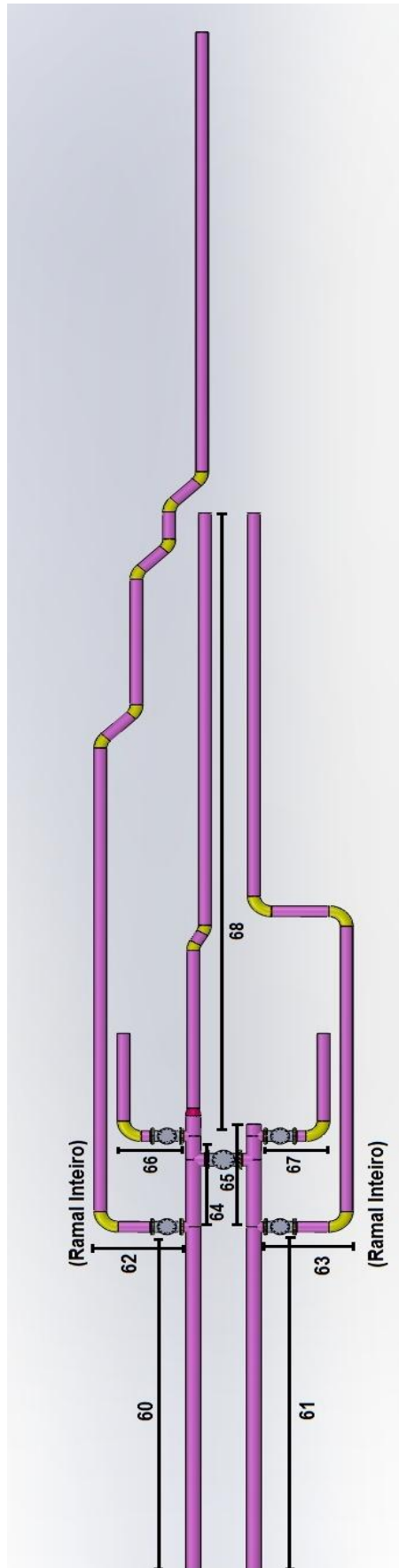


Figura 61 Vista Superior Fora da Praça de Máquinas com os Trechos Numerados - Parte 3/3