

**Universidade de São Paulo
Escola Politécnica
Departamento de Engenharia Naval**

**Projeto Básico de Tanque Antijogo para
Navio Oceanográfico**

Orientador:

Prof. Dr. Jessé D'Assunção Rebello de Souza Júnior

Autores:

André Valentim Lucafó
Taty Ribeiro Guimarães

São Paulo, Dezembro de 2003

ÍNDICE

1. Introdução	4
2. Objetivo	5
3. Nomenclatura	5
4. Metodologia	6
4.1 Seleção do melhor tanque	7
4.2 Cálculo da resposta do navio em mar regular	10
4.3 Análise Espectral	12
4.3.1 Análise Dimensional	14
5. Análise de Resultados	16
5.1 Análise de Sensibilidade	17
6. Conclusões	18
Referências	20
Anexo 1: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado o comprimento do tanque	21
Anexo 2: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado a porcentagem de massa relativa a massa do navio	23
Anexo 3: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado a distância ao fundo do tanque	25
Anexo 4: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado a altura do duto central	27
Anexo 5: Programa para a seleção do melhor tanque sendo dado a distância entre os centros do reservatório	29
Anexo 6: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado a altura metacêntrica (GM)	31
Anexo 7: Programa para fazer o cruzamento espectral e obter a resposta do sistema para uma dada configuração do tanque	33
Anexo 8: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação do comprimento do tanque	34
Anexo 9: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da porcentagem de massa de água do tanque	35
Anexo 10: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da distância do fundo do tanque ao fundo do navio	36
Anexo 11: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da altura do duto central	37
Anexo 12: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da distância entre centros do reservatório	38
Anexo 13 – Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da altura metacêntrica (GM) do navio	39
Anexo 14: Programa que faz a integração numérica através do método de Simpson	40
Anexo 15: Gráficos da resposta do sistema	41
Anexo 16: Gráficos da resposta do sistema	45
Anexo 17: Gráficos da resposta do sistema	47
Anexo 18: Dados usados nos cálculos das equações do sistema	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Definições das características principais do tanque.....	9
Figura 2: gráfico para avaliar a influência do comprimento no RMS.....	41
Figura 3: gráfico para avaliar a influência da massa do tanque no RMS.....	42
Figura 4: gráfico para avaliar a influência da distância entre centros dos reservatórios no RMS.....	42
Figura 5: gráfico para avaliar a influência da altura do duto central no RMS.....	43
Figura 6: gráfico para avaliar a influência da distância do tanque ao fundo do barco no RMS.....	43
Figura 7: gráfico para avaliar a influência do raio metacêntrico no RMS.....	44
Figura 8: gráfico para avaliar a influência do comprimento do tanque no RMS.....	45
Figura 9: gráfico para avaliar a influência da massa do tanque no RMS.....	46
Figura 10: gráfico para avaliar a influência do comprimento do tanque no RMS.....	47
Figura 11: gráfico para avaliar a influência da massa do tanque no RMS.....	48

1. Introdução

O Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da EPUSP está empenhado, juntamente com a Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP e o Instituto Oceanográfico da USP, no projeto do novo Navio Oceanográfico da Universidade de São Paulo que substituirá o atual *Professor Besnard*. Os trabalhos tiveram início há três anos e encontram-se atualmente em fase de projeto conceitual.

Navios oceanográficos, assim como navios de coleta de dados meteorológicos, trabalham a maior parte do seu tempo em baixas velocidades (ou mesmo ancorados) e seu aproamento é freqüentemente definido em função da operação que o navio realiza, o que, por vezes, pode acarretar a exposição da embarcação a direções de mar indesejáveis. Conseqüentemente, a embarcação pode ficar sujeita à ação de ondas que provoquem consideráveis oscilações em jogo. Estas, por sua vez, podem ser prejudiciais à precisão das medições e especialmente ao conforto da tripulação e pesquisadores, os quais em sua maioria são profissionais não acostumados ao mar. É, portanto, essencial que o navio seja dotado de dispositivos de redução de movimento de jogo, os quais devem ser apropriados às condições esperadas de operação.

Neste cenário, uma solução comprovadamente eficiente é a adoção de tanques antijogo, que não dependem da sustentação gerada pela velocidade relativa navio-água, como ocorre com as aletas estabilizadoras, [1], [2]. Existem diversos tipos de tanques antijogo, incluindo tanques passivos e ativos, [2], [3]. Nestes últimos, uma bomba ou compressor atua com o intuito de imprimir ao fluido o movimento desejado. A grande vantagem dos tanques ativos (bem como dos tanques passivos controlados por válvula) é a possibilidade de ajustar a freqüência do movimento do fluido a variações na freqüência natural de jogo do navio. No caso do navio oceanográfico, a freqüência natural não sofre grandes variações durante a operação, o que coloca em vantagem a adoção de um tanque antijogo passivo.

Dos diferentes arranjos possíveis para tanques antijogo passivos, um dos mais eficientes é o arranjo em “U”, [3]. Este tipo de tanque antijogo é basicamente composto por dois reservatórios verticais situados um em cada bordo do navio, conectados por um duto horizontal. Os reservatórios são parcialmente preenchidos com água ou outro fluido, cujo movimento vertical produz a ação de estabilização do navio. Esta última deve-se ao acoplamento adequado do movimento do fluido com o do navio, de modo que o fluido atua como um absorvedor de vibração, [4], [5].

A definição detalhada da geometria e demais características do tanque mais efetivo para cada projeto resulta de um estudo que envolve a concepção de modelos matemáticos adequados e seu emprego na avaliação da dinâmica do sistema navio-tanque sob todas as condições de projeto, permitindo assim a seleção de parâmetros “ótimos”. Estes devem levar em conta também as limitações de projeto do tanque e o impacto negativo deste na disposição de espaços dentro do navio.

O desenvolvimento dos modelos matemáticos necessários e seu emprego na determinação da melhor geometria para o tanque antijogo constituem-se no foco deste trabalho.

2. Objetivo

Este trabalho tem por objetivo determinar as melhores dimensões para o tanque antijogo que equipará o Navio Oceanográfico. Para tanto, será desenvolvido um modelo matemático para a estimativa da resposta do navio em mar regular e irregular. Tendo em vista que os critérios adotados para o conforto da tripulação são estatísticos, os modelos empregados determinarão as principais estatísticas da resposta do navio em jogo.

3. Nomenclatura

Para este trabalho será adotada a seguinte nomenclatura:

A → coeficiente do espectro de mar
 $(a_{44}+I_{44})$ → coeficiente de inércia e momento adicionado do navio
 $a_{\tau\tau}$ → coeficiente de inércia do tanque
 $a_{4\tau}$ e $a_{\tau 4}$ → coeficientes de inércia acoplados
 B → coeficiente do espectro de mar
 b_{44} → coeficiente de amortecimento do navio
 $b_{\tau\tau}$ → coeficiente de amortecimento do tanque
 B_i → boca disponível para o tanque
 B_e → boca efetiva da embarcação
 c_{44} → coeficiente de restauração do navio
 $c_{\tau\tau}$ → coeficiente de restauração do tanque
 $c_{4\tau}$ e $c_{\tau 4}$ → coeficientes de restauração acoplados
 C_b → coeficiente de bloco do navio (adimensional)
 C_v → coeficiente de área de convés (adimensional)
 D_i → pontal disponível para o tanque
 f → coeficiente adimensional para cálculo de amortecimento em jogo
 F → momento de excitação em jogo
 F_{w40} → amplitude do momento de excitação em jogo
 g → aceleração da gravidade
 GM → altura metacêntrica estimada do navio sem tanque
 h_t → altura do reservatório
 h_b → distancia do tanque ao fundo do casco em metros
 h_r → nível da água
 h_d → altura do duto
 H_e → pontal efetivo do navio com as superestruturas
 $|H(w)|$ → função de transferência
 $H_{1/3}$ → altura significativa de onda
 $(H_{1/3})_{ang}$ → amplitude significativa da resposta
 KG → altura do centro de gravidade do navio
 K_1 → coeficiente tabelado para cálculo do coeficiente de amortecimento do navio
 m → massa do navio
 m_t → massa de água do tanque
 Q_t → coeficiente empregado no cálculo do momento do tanque
 r_d → distância do centro do duto ao centro de gravidade do navio
 T → amplitude da resposta do tanque
 T → calado do navio
 T_n → período natural do navio em jogo

w → distância entre os centros dos reservatórios
 w_r → largura de cada reservatório
 w_n → frequência natural do navio em jogo
 w_t → frequência natural de oscilação do tanque
 X_t → comprimento do tanque
 X → amplitude da resposta do navio em jogo
 $\overset{\circ}{X}_4$, $\overset{\circ}{X}_4$ e X_4 → coordenadas do navio, em radianos, em relação à vertical
 τ → ângulo máximo de inclinação da água dentro do tanque
 $\overset{\circ}{\Gamma}$, $\overset{\circ}{\Gamma}$ e Γ → coordenadas da água do tanque, em radianos, em relação ao próprio
 ζ → razão entre a massa de água no tanque e a massa do navio
 ρ → densidade da água em [kg / m³]
 η → coeficiente de amortecimento do tanque (adimensional)
 μ → coeficiente de perda de estabilidade estática

4. Metodologia

Colocada em poucas palavras, a metodologia aqui empregada consiste em comparar um valor estatisticamente significativo da resposta do navio em jogo com valores internacionalmente aceitos, disponíveis na literatura.

Para tanto, utiliza-se o método da Análise Espectral. Este método probabilístico consiste no cruzamento do espectro de mar com a função de transferência da resposta do navio para assim obter um valor médio esperado para a amplitude do movimento de jogo. Este parâmetro pode então ser comparado com valores admissíveis disponíveis na literatura e guiar a escolha do tanque mais adequado.

A noção de espectro foi introduzida na Engenharia Naval no começo dos anos 50 quando surgiram métodos matemáticos capazes de representar a superfície do mar e aplicar esta informação na predição de efeitos. Um dos primeiros trabalhos neste campo foi publicado em 1953 por M. St. Denis e W. J. Pierson [6] e a técnica então proposta mantém-se essencialmente inalterada até os dias de hoje.

O problema em estudo pode ser resumido como sendo o da determinação de um conjunto de dimensões (do tanque antijogo), de tal forma que o tanque assim definido proporcione ao navio um comportamento dinâmico adequado. É razoável supor que existam infinitas combinações de dimensões que atendam ao requisito acima. Dentre essas, interessam apenas aquelas que respeitem as restrições físicas impostas pelo arranjo geral do navio, além de outras ligadas, por exemplo, à perda de estabilidade estática da embarcação. Mais ainda, interessa determinar aquela combinação que seja, em certo sentido, ótima. Neste estudo não será empregada uma definição quantitativa de otimalidade, isto é, uma função de mérito, por duas razões. Primeiramente, toda função de mérito envolve incertezas na ponderação dos aspectos positivos e negativos das soluções. No caso em questão, dúvidas surgiriam quanto à ponderação relativa entre comprimento do tanque (espaço ocupado), resposta em jogo, massa de água, perda de estabilidade estática, etc. A segunda razão prende-se ao fato de que, dada a incerteza quanto ao comportamento de tal função no espaço dos parâmetros de projeto, correr-se-ia o risco de chegar-se a uma combinação de parâmetros “ótima”, a qual poderia oferecer resultados muito próximos aos de uma outra combinação (sub-ótima, porém também aceitável) com dimensões e/ou massa de fluido significativamente inferiores. Interessa, portanto, conhecer, mais do que valores ótimos, o comportamento da resposta do navio nas vizinhanças de soluções ótimas, de modo que a escolha recaia sobre uma configuração aceitável e ao mesmo tempo “ótima” no sentido de que não existem

soluções aceitáveis significativamente “mais eficientes” que ela. Em outras palavras, procura-se uma solução aceitável (ou seja, que proporciona um comportamento em ondas adequado) tal que se tenha razoável confiança de que não existem outras combinações muito menores, mais leves, etc, que sejam ainda assim aceitáveis.

A metodologia aplicada neste trabalho requer a capacidade de realizar três tipos de cálculos:

1. Cálculo do momento restaurador unitário de um tanque qualquer (momento de restauração para um ângulo unitário de jogo do navio);
2. Cálculo da função de transferência do navio com o referido tanque (Operador de Resposta em Amplitude – RAO – em jogo);
3. Cálculo da resposta significativa (Raiz Quadrática Média – RMS) do navio sob a ação de um espectro de mar qualquer.

Em consonância com o objetivo de avaliar o comportamento das soluções aceitáveis dentro de faixas de variação dos diversos parâmetros que definem o tanque, o procedimento consiste em cinco etapas:

1. Dispõe-se de faixas aceitáveis para todos os parâmetros que definem o tanque. Escolhe-se um parâmetro em função do qual deseja-se analisar a resposta do navio;
2. Para cada valor deste parâmetro, determina-se a combinação de dimensões que produz o maior momento unitário de restauração do tanque. Isto se obtém variando os outros parâmetros dentro de suas respectivas faixas. Como resultado obtém-se uma combinação “ótima” para este específico valor do parâmetro em questão;
3. Calcula-se analiticamente o Operador de Resposta em Amplitude do navio equipado com o tanque definido na etapa anterior e procede-se ao cruzamento espectral do RAO com espectros de mar correspondentes a estados de mar 4, 5 e 6 na Escala Beaufort (foi empregada a formulação da ITTC), obtendo-se o valor da resposta significativa ($H_{\frac{1}{3}}$) da amplitude de jogo;
4. Cada valor de resposta significativa assim calculado produzirá um ponto no gráfico do comportamento da resposta em função do parâmetro selecionado;
5. O procedimento se repete para todos os parâmetros de interesse do tanque, cada um deles produzindo um gráfico.

4.1 Seleção do melhor tanque

A seleção do melhor tanque descrita a seguir corresponde à etapa 2 do item anterior. Antes de começar esta descrição é necessário deixar claro que esta parte do projeto foi feita pela aluna Taty Ribeiro Guimarães, bolsista de Iniciação Científica da Escola Politécnica, também sob a orientação do Professor Doutor Jessé D’Assunção Rebello de Souza Júnior. Este foi o passo inicial do projeto.

Para a escolha do melhor tanque foram necessárias algumas considerações iniciais sobre seu movimento e formas. Elas estão relacionadas abaixo.

Primeiramente foi suposto que o tanque terá a seção plana, paralela ao plano de secção das balizas, da forma constante de um U, ou seja, constante ao longo do comprimento do navio.

Outra hipótese é que os dutos laterais serão fechados e isolados sem comunicação pela parte superior. Já o duto inferior de comunicação não terá restrição.

O tanque terá a largura total igual à da boca disponível do navio, portanto quando se variar a distância entre centros dos dutos laterais influenciar-se-á a largura do duto lateral também, ou seja, estes dois parâmetros estarão acoplados.

Será considerado também que, quando a embarcação estiver sem banda e trim, a altura da água dentro do tanque ficará exatamente na metade da altura dos dutos verticais.

Por hipótese, um tanque antijogo tem sua frequência natural igual a do navio, então essa será também uma condição imposta durante os cálculos.

O GM do navio será um dado do projeto, já que a massa do tanque não será tão representativa em relação à massa total do navio (da ordem de 4% da massa total) e a altura do centro de massa do tanque também não será muito diferente da do navio.

Para efeitos de cálculo, todos os dados do navio, como o KG, a boca, o pontal, o calado, a massa, entre outros, já serão conhecidos, sendo que o coeficiente de amortecimento do tanque será estimado, em virtude da dificuldade de cálculo exato deste parâmetro.

O algoritmo implementado aqui seleciona como “melhor tanque” aquele de maior momento restaurador unitário. Poder-se-ia alegar que esse critério, por si só, levaria possivelmente à escolha de um tanque de dimensões muito maiores do que as de um outro tanque com momento restaurador unitário ligeiramente menor. Deve-se, porém, observar que, em virtude da variação sistemática de valores efetuada para cada uma das dimensões do tanque, se o alegado tanque existir, ele será detectado quando da variação de outra dimensão do tanque. Desta forma, julga-se ser válido tomar como “melhor tanque” aquele de maior momento restaurador unitário dentro de cada variação de parâmetro.

O algoritmo de escolha do melhor tanque em função de um dado parâmetro funciona por busca exaustiva, ou seja, todos os outros parâmetros serão combinados um a um e, se certas restrições forem aceitas, será calculado o momento restaurador para aquela combinação.

Para implementar o método da escolha do melhor tanque foram usadas as relações geométricas descritas abaixo nos cálculos do momento restaurador unitário do tanque do navio, ver Figura 1. A nomenclatura usada foi igual à contida em [1]. São elas :

$$w_r = Bi - w$$

$$h_t = Di - h_b$$

$$h_r = \frac{h_t}{2}$$

$$\tau = \tan^{-1} \left(\frac{h_t - h_d}{w} \right)$$

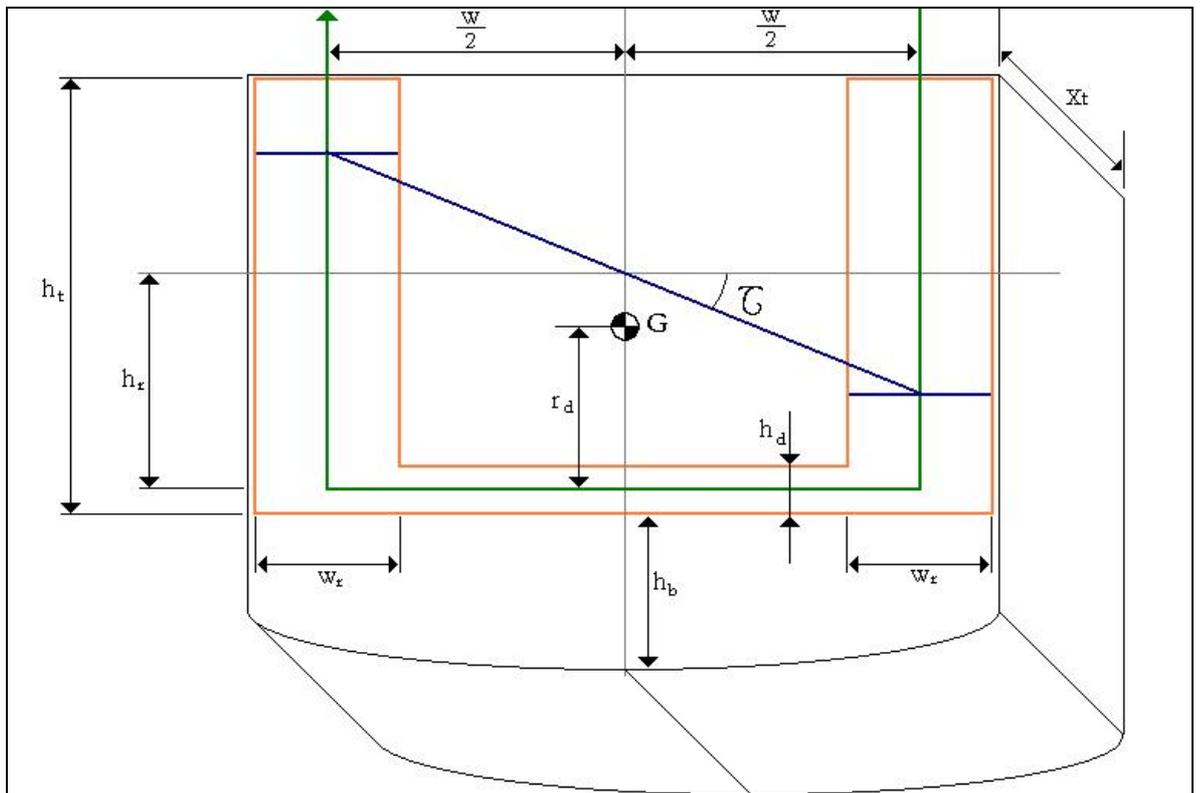


Figura 1 - Definições das características principais do tanque

$$r_d = KG - h_b - \frac{h_d}{2}$$

$$\zeta = 100 \cdot \frac{m_t}{m}$$

$$\mu = \frac{Q_t}{m \cdot GM}$$

$$m_t = \rho \cdot X_t \cdot (2 \cdot h_r \cdot w_r + h_d \cdot w)$$

$$Q_t = \frac{X_t \cdot \rho \cdot w_r \cdot w^2}{2}$$

Com estas simples relações, que foram inferidas das características geométricas do tanque, e juntamente com as hipóteses relatadas acima, pode-se calcular alguns coeficientes das equações matemáticas do tanque e do navio que serão necessários para calcular o momento restaurador unitário do tanque. O modo de calculá-los também foi extraído de [1]:

$$b_{tt} = \frac{2 \cdot \eta \cdot Q_t \cdot g}{w_t}$$

$$a_{tt} = \frac{b_{tt}}{2 \cdot \eta \cdot w_t}$$

$$a_{t4} = Q_t \cdot (rd + hr)$$

Como se pode observar nas equações acima a frequência natural de vibração do navio w_t ainda não foi calculada sendo que esta é necessária para se obter a restauração do tanque. Para isso será necessário calcular o coeficiente de inércia no ar e de inércia adicionada do navio. Entretanto, dada a dificuldade do cálculo exato deste último, será usada uma fórmula empírica encontrada em [7]:

$$a_{44} = m \cdot Be^2 \cdot f \cdot \left(C_b \cdot C_v + 1,1 \cdot C_v \cdot (1 - C_b) \cdot \left(\frac{He}{T} - 2,2 \right) + \frac{He^2}{Be^2} \right)$$

Onde “ f ” é um coeficiente estimado para cada tipo navio, dependendo ainda de algumas particularidades, tais como a presença de apêndices.

O coeficiente de restauração do navio é dado na sua forma convencional:

$$c_{44} = m \cdot g \cdot GM$$

A frequência natural do navio pode ser calculada por:

$$w_n = \sqrt{\frac{a_{44}}{c_{44}}} = w_t$$

Finalmente, o momento restaurador unitário do tanque é dado pela expressão a seguir:

$$F_t = \frac{Q_t \cdot g \cdot \left(\frac{1 - a_{t4}}{Q_t \cdot g} \right)^2}{2 \cdot \eta}$$

Em resumo, o algoritmo calcula para cada combinação de dimensões (ou seja, para cada tanque) o valor correspondente de F_t . Se as restrições impostas sobre os valores das dimensões, além de outras, forem observadas, o tanque é colocado em comparação com todos os outros. Ao final da varredura de cada parâmetro, o melhor tanque (aquele de maior momento restaurador unitário) é registrado pelo programa.

Cada um dos seis programas usados na escolha do melhor tanque está impresso nos anexos de 1 a 6.

4.2 Cálculo da resposta do navio em mar regular

Para poder ser feita a análise espectral é necessário que o sistema seja, primeiramente, resolvido para um mar regular para depois se obter as equações de transferência e executar o cruzamento espectral.

As hipóteses iniciais necessárias para que se possa descrever o movimento estão explicadas abaixo.

Supõe-se que o navio será excitado somente por mar de través. Supõe-se, além disso, que navio executa um movimento de rotação pura em torno de um eixo longitudinal.

Será assumido também que o movimento do navio, em balanço, é pequeno e, portanto, poderá ser tido como linear. Também em consonância com essa hipótese, o GM do navio será admitido constante.

Dentro destas hipóteses pode-se descrever matematicamente os movimentos do navio e do tanque da seguinte forma:

Equação do movimento do navio em balanço:

$$(I_{44} + a_{44}) \ddot{X}_4 + b_{44} \dot{X}_4 + c_{44} X_4 - [a_{4\tau} \ddot{\Gamma} + c_{4\tau} \Gamma] = F_{w40} \sin(\omega t + \gamma);$$

Equação do movimento do tanque em balanço:

$$a_{\tau\tau} \ddot{\Gamma} + b_{\tau\tau} \dot{\Gamma} + c_{\tau\tau} \Gamma = - (a_{\tau 4} \ddot{X}_4 + c_{\tau 4} X_4);$$

Unindo-as na forma matricial chega-se ao seguinte resultado:

$$\begin{bmatrix} (I_{44} + a_{44}) & -a_{4\tau} \\ a_{\tau 4} & a_{\tau\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \ddot{X}_4 \\ \ddot{\Gamma} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{44} & 0 \\ 0 & b_{\tau\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \dot{X}_4 \\ \dot{\Gamma} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{44} & -c_{4\tau} \\ c_{\tau 4} & c_{\tau\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X_4 \\ \Gamma \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_{w40} \cdot \sin(\omega t + \gamma) \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Para simplificar podem ser utilizadas as seguintes simetrias existentes que estão demonstradas também em [1]:

$$c_{4\tau} = c_{\tau 4} = c_{\tau\tau};$$

$$a_{\tau 4} = a_{4\tau};$$

Sabe-se que, para uma dada excitação harmônica a resposta do sistema será também da mesma forma apenas variando a amplitude e frequência, vide [12]. Pode-se concluir então que a igualdade abaixo é válida já que a força excitante é a pressão hidrostática da onda e esta também possui a forma citada acima. Entretanto, como só a parte real é usada, a imaginária será desprezada no final da solução:

$$F_{w40} \sin(\omega t + \gamma) = F e^{i\omega t};$$

$$X_4 = X e^{i\omega t};$$

$$\Gamma = T e^{i\omega t};$$

$$\begin{bmatrix} -\omega^2 \cdot (I_{44} + a_{44}) + i \cdot \omega \cdot b_{44} + c_{44} & \omega^2 a_{4\tau} - c_{\tau\tau} \\ -\omega^2 \cdot a_{\tau 4} + c_{\tau\tau} & -\omega^2 \cdot a_{\tau\tau} + i \cdot \omega \cdot b_{\tau\tau} + c_{\tau\tau} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix}$$

Para simplificar a álgebra necessária será adotada a seguinte notação:

$$Z_1 = -w^2 \cdot (I_{44} + a_{44}) + i \cdot w \cdot b_{44} + c_{44}$$

$$Z_1 = -w^2 \cdot a_{\tau\tau} + i \cdot w \cdot b_{\tau\tau} + c_{\tau\tau}$$

$$Z_{12} = -w^2 \cdot a_{\tau 4} - c_{\tau\tau}$$

$$\begin{bmatrix} Z_1 & Z_{12} \\ -Z_{12} & Z_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} X \\ T \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F \\ 0 \end{Bmatrix}$$

A solução encontrada para a resposta do sistema em mar regular é:

$$X = \frac{F \cdot Z_2}{(Z_1 \cdot Z_2 + (Z_{12})^2)}$$

$$T = \frac{F \cdot Z_{12}}{(Z_1 \cdot Z_2 + (Z_{12})^2)}$$

4.3 Análise Espectral

O primeiro passo para a análise espectral poder ser executada é calcular o RAO (Response Amplitude Operator) do sistema que é simplesmente o quadrado da função de transferência.

As equações abaixo se referem ao navio; as do tanque são análogas. A função de transferência do tanque se faria necessária somente para informar se o tanque iria ou não ficar saturado para certas condições de mar. Essa verificação não foi feita neste trabalho.

A função de transferência $|H(w)|$ é a relação entre a amplitude da resposta do sistema para mar regular e a amplitude da força de excitação, sendo considerada somente sua parte real:

$$|H(w)| = REAL \left[\frac{F \cdot Z_2}{(Z_1 \cdot Z_2 + (Z_{12})^2)} \cdot \frac{1}{F} \right] = REAL \left[\frac{Z_2}{(Z_1 \cdot Z_2 + (Z_{12})^2)} \right]$$

Para o cálculo dessa função de transferência há a necessidade de calcular os coeficientes da equação matemática do navio e do tanque. Alguns coeficientes já foram calculados durante o programa de escolha do melhor tanque. Será aqui apresentado o cálculo dos demais coeficientes necessários. O coeficiente de restauração do tanque é dado por:

$$c_{tt} = Q_t \cdot g$$

Para o cálculo do coeficiente de amortecimento do navio será utilizada uma formulação empírica contida em [7]. Vale ressaltar que quando há a necessidade de uma

precisão muito alta geralmente constrói-se um modelo em escala reduzida e estima-se o coeficiente desejado. Nesse trabalho ele será dado por:

$$b_{44} = \frac{K_1 \cdot Tn \cdot m \cdot GM}{\pi^2}$$

Então o RAO será:

$$RAO = [|H(w)|]^2$$

Para fazer o cruzamento espectral há ainda a necessidade de se definir o espectro de mar que será extraído da literatura. Para esse estudo será utilizando o espectro de mar da ITTC (International Towing Tank Conference), o qual define o estado de mar em função de uma frequência e uma altura significativas de onda e é dado pela seguinte formulação:

$$S(w) = \left(\frac{A}{w^5} \right) \cdot e^{\left(\frac{-B}{w^4} \right)}$$

Onde:

$$A = 0,78$$

$$B = \frac{3,11}{H_{13}^2}$$

O cruzamento espectral consiste em multiplicar o espectro de mar pelo RAO. A faixa de frequências usada nestes cálculos foi:

$$0 < w < 1,5 \text{ (rad/s)}$$

Com a resposta do sistema para cada uma das frequências estipuladas faz-se uma integração numérica em todo o intervalo da frequência, obtendo-se o momento de primeira ordem do espectro de resposta:

$$m_0 = \sigma_0^2 = \int_w (RAO(w) \cdot S(w)) \cdot dw$$

Nesse trabalho a integração foi realizada pelo método de Simpson e o programa utilizado encontra-se no anexo 14.

O momento de primeira ordem do espectro da resposta é a variância da resposta do sistema em torno do valor de frequência igual a zero. Com o momento de ordem zero pode-se calcular o RMS do ângulo de jogo do navio como sendo:

$$RMS_{\text{angulo}} = \sigma_0 = \sqrt{m_0}$$

No presente estudo, os limites aceitáveis de movimento do navio são expressos em termos do RMS do ângulo de jogo verificado para estados de mar pré-estabelecidos.

Pode-se ainda calcular o *RMS* da velocidade e, por conseguinte, da aceleração para assim medir o nível de conforto da tripulação. Para isto há a necessidade do cálculo do momento de segunda e quarta ordens que são dados pelas formulações abaixo:

$$m_2 = \int_w (w^2 \cdot RAO(w) \cdot S(w)) \cdot dw$$

$$m_4 = \int_w (w^4 \cdot RAO(w) \cdot S(w)) \cdot dw$$

Note-se que o momento de segunda ordem é o momento de inércia.

O RMS da velocidade e da aceleração serão dados por:

$$RMS_{velocidade} = \sqrt{m_2}$$

$$RMS_{aceleração} = \sqrt{m_4}$$

Existem na literatura tabelas com valores admissíveis deste *RMS* em função da frequência de excitação, mostrando o quão pequeno deve ser este parâmetro para haver um nível de conforto satisfatório. Um estudo como este não será feito neste trabalho, pois conforme explicitado acima, o requisito imposto neste projeto foi sobre a amplitude do ângulo de jogo.

Poderia ainda ser calculado, através do RMS do ângulo, a média do um terço mais elevado das observações através de:

$$(H_{1/3})_{ang} = 4 \cdot \sigma_0$$

O programa que foi utilizado para fazer o cruzamento espectral está impresso no anexo 7.

4.3.1 Análise Dimensional

Procede-se a seguir a uma Análise Dimensional das equações relativas à Análise Espectral, com o objetivo de efetuar uma verificação das expressões utilizadas.

Os coeficientes utilizados e suas respectivas dimensões são:

$$Q_t = \mu \cdot m \cdot GM \rightarrow [Q_t] = [kg] \cdot [m] = kg \cdot m$$

$$\mu \rightarrow \text{adimensional}$$

$$\eta \rightarrow \text{adimensional}$$

$$[r_d] = [h_r] = [H_e] = [B_e] = m$$

$$[g] = m \cdot s^{-2}$$

$$[w_t] = s^{-1}$$

Verifica-se que os coeficientes das equações do movimento do navio e do tanque têm as dimensões:

$$a_{tt} = \frac{b_{tt}}{2 \cdot \eta \cdot w_t} \rightarrow [a_{tt}] = [kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}] \cdot [s] = kg \cdot m^2$$

$$b_{tt} = \frac{2 \cdot Q_t \cdot \eta \cdot g}{w_t} \rightarrow [b_{tt}] = [kg \cdot m] \cdot [m \cdot s^{-2}] \cdot [s] = kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$$

$$c_{tt} = Q_t \cdot g \rightarrow [c_{tt}] = [kg \cdot m] \cdot [m \cdot s^{-2}] = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$

$$a_{t4} = Q_t \cdot (r_d + h_r) \rightarrow [a_{t4}] = [kg \cdot m] \cdot [m] = kg \cdot m^2$$

$$a_{44} = m \cdot Be^2 \cdot f \cdot \left(C_b \cdot C_v + 1,1 \cdot C_v \cdot (1 - C_b) \cdot \left(\frac{He}{T} - 2,2 \right) + \frac{He^2}{Be^2} \right) \rightarrow [a_{44}] = [kg] \cdot [m^2] = kg \cdot m^2$$

$$b_{44} = \frac{K_1 \cdot T_n \cdot m \cdot GM \cdot g}{\pi^2} \rightarrow [b_{44}] = [s] \cdot [kg] \cdot [m] \cdot [m \cdot s^{-2}] = kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$$

$$c_{44} = m \cdot g \cdot GM \rightarrow [c_{44}] = [kg] \cdot [m \cdot s^{-2}] \cdot [m] = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$

Como os coeficientes adotados são dados por:

$$Z_1 = -w^2 \cdot (I_{44} + a_{44}) + i \cdot w \cdot b_{44} + c_{44}$$

$$Z_1 = -w^2 \cdot a_{\tau\tau} + i \cdot w \cdot b_{\tau\tau} + c_{\tau\tau}$$

$$Z_{12} = -w^2 \cdot a_{\tau 4} - c_{\tau\tau}$$

Então suas respectivas dimensões ficam:

$$[Z_1] = [s^{-1}]^2 \cdot [kg \cdot m^2] + [s^{-1}] \cdot [kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}] + [kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}] = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$

$$[Z_2] = [s^{-1}]^2 \cdot [kg \cdot m^2] + [s^{-1}] \cdot [kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}] + [kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}] = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$

$$[Z_{12}] = [s^{-1}]^2 \cdot [kg \cdot m^2] - [kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}] = kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}$$

A dimensão do fator de magnificação pode ser obtida através da seguinte formulação:

$$H(w) = \frac{m \cdot g \cdot Z_2}{Z_1 \cdot Z_2 + Z_{12}^2} \rightarrow [H(w)] = \frac{[kg] \cdot [m \cdot s^{-2}] \cdot [kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}]}{[kg \cdot m^2 \cdot s^{-2}]^2} = m^{-1}$$

E a do espectro do mar pode ser obtida como:

$$S_w = \frac{A}{w^5} \cdot e^{\left(\frac{-B}{w^4}\right)} \rightarrow [S_w] = m^2 \cdot s$$

Portanto a dimensão do espectro de resposta fica sendo:

$$R = H_x^2 \cdot S_w \rightarrow [R] = [m^{-1}]^2 \cdot [m^2 \cdot s] = s$$

E finalmente, temos:

$$RMS = \sqrt{\int R(w) \cdot dw} \rightarrow [RMS] = ([s] \cdot [s^{-1}])^{0,5} = rad$$

5. Análise de Resultados

A metodologia usada para avaliar a variação na resposta do sistema navio-tanque com a variação de cada um dos parâmetros pode ser descrita como a seguir.

Fornece-se uma dimensão principal para o algoritmo de seleção do melhor tanque; este retorna as dimensões e alguns coeficientes da equação de movimento do sistema. Estes dados servem de entrada para o programa que faz o cruzamento espectral fornecendo o *RMS* do ângulo do navio. Após repetir esta seqüência para uma faixa de valores da dimensão em estudo, o algoritmo de comparação imprime um gráfico da resposta do navio em radianos para os estados de mar 4, 5 e 6 em função do parâmetro estudado.

Pode-se, então, saber em que faixa de valores os melhores tanques estão se concentrando para cada um dos parâmetros e, através de uma restrição cada vez maior, chegar à escolha do melhor tanque.

Os programas que comparam os tanques estão contidos nos anexos de 8 a 13.

Como se pode observar nos gráficos do anexo 15 há um decréscimo no movimento de jogo do navio com o aumento da porcentagem de massa de água e com o aumento do comprimento do tanque, sendo que, a partir de determinado valor, há uma estabilização do *RMS*.

Em contrapartida, para o gráfico do *RMS* em função da altura do duto horizontal, percebe-se uma piora no comportamento do sistema com o aumento desse parâmetro. Pode-se perceber que a resposta do sistema não continua diminuindo com a redução do parâmetro, mas se estabiliza para um certo valor, o que levaria a concluir que existe uma região ótima para este parâmetro. Deve-se, porém, considerar que para pequenas alturas do duto fenômenos não modelados podem se tornar relevantes (“estrangulamento” do escoamento, maior amortecimento, etc).

Em relação aos gráficos do *RMS* em função da distância entre os centros dos reservatórios verticais e em função da elevação do tanque, nota-se que, dentro das faixas analisadas, a resposta do sistema permanece praticamente constante, ou seja, esses parâmetros não têm grande influência no comportamento dinâmico do navio. Entretanto a elevação do tanque tem grande influência no comportamento estático do navio, sendo preferível um tanque com centro de gravidade o mais baixo possível.

O gráfico do *RMS* em função do *GM* (altura metacêntrica do navio) nos leva a confirmar a validade do programa elaborado pois está de acordo com a literatura existente, ou seja, há uma piora do comportamento do navio com o aumento do *GM*.

Este gráfico não será explicitamente utilizado na definição do melhor tanque, pois o GM será considerado como um dado de projeto da embarcação.

Para selecionar o melhor tanque procurou-se, primeiramente, buscar o tanque com a menor resposta absoluta, sem se preocupar com a possibilidade de encontrar um tanque de desempenho semelhante e dimensões significativamente inferiores.

O procedimento adotado consistiu em analisar apenas duas variáveis, o comprimento do tanque e a porcentagem de massa de água do tanque. Os outros parâmetros foram mantidos em valores razoáveis verificados pelas análises anteriores.

Para os dois parâmetros selecionados foi feita uma busca exaustiva de “soluções ótimas”. Posteriormente, foi conduzida uma análise de sensibilidade.

O melhor tanque obtido nesta etapa teve as seguintes características:

- Comprimento: $X_t = 2.50$ metros
- Porcentagem de massa: $\zeta = 3.50$ %
- Distância entre centros: $w = 8.50$ metros
- Altura do duto central: $h_d = 0.30$ metros
- Distância do centro do duto central ao de gravidade do navio: $r_d = 3.25$ metros
- Largura dos dutos verticais: $w_r = 2.50$ metros
- Distância do fundo do tanque ao fundo do navio: $h_b = 0.60$ metros
- Altura do nível de água nos dutos verticais: $h_r = 2.20$ metros
- Coeficiente de perda de estabilidade estática: $\mu = 0.23$

5.1 Análise de Sensibilidade

As respostas do sistema em função do comprimento do tanque e da porcentagem de massa de água do tanque para os valores desses parâmetros especificados acima estão impressas no anexo 16. Há de se ressaltar que, para poder especificar a resposta em torno do valor escolhido foi feita uma restrição em um intervalo bem pequeno em torno deste valor, como pode ser visto nos anexos 16 e 17. Isto foi feito para verificar se o mesmo tanque que aparece como resposta em um dos programas também aparecia no outro, aumentando a confiabilidade da solução.

Para poder comparar a solução obtida partiu-se para a procura de um tanque que fornecesse um RMS do ângulo do navio da ordem de 10% maior em relação à resposta da solução escolhida, o que significa um valor em torno de $6,6^\circ$ para o estado de mar 6. Usando o mesmo procedimento acima chegou-se a um tanque com as seguintes características:

- Comprimento: $X_t = 2.05$ metros
- Porcentagem de massa: $\zeta = 3.02$ %
- Distância entre centros: $w = 8.30$ metros
- Altura do duto central: $h_d = 0.30$ metros
- Distância do centro do duto central ao de gravidade do navio: $r_d = 3.25$ metros
- Largura dos dutos verticais: $w_r = 2.70$ metros
- Distância do fundo do tanque ao fundo do navio: $h_b = 0.60$ metros
- Altura do nível de água nos dutos verticais: $h_r = 2.20$ metros
- Coeficiente de perda de estabilidade estática: $\mu = 0.20$

Uma análise, mesmo bem rápida e superficial, já mostra que este tanque não será leve ou menor o suficiente para que seja escolhido em troca de uma perda de dez por cento na absorção do jogo do navio, falta agora analisar os dois parâmetros para

poder saber se o comprimento ou a massa do tanque é que podem ser mais ou menos variados sem perder, em demasia, a absorção do jogo.

Para tanto, os programas de comparação dos tanques para os dois parâmetros citados acima foram processados. No programa de comparação do comprimento manteve-se fixa a massa do tanque em 3.5% da massa do navio (massa do primeiro tanque escolhido) de modo a determinar qual comprimento corresponderia a um RMS de 6.6 graus para o estado de mar seis.

O tanque que satisfazia esses parâmetros comparativos tinha, entre outras medidas, o seguinte comprimento:

$$X_t = 1.96 \text{ metros}$$

Isto mostra que o parâmetro comprimento influência muito no valor da resposta do sistema e uma perda significativa na absorção, da ordem de 10%, não fornece um tanque suficientemente menor.

Já no programa de comparação da massa do tanque foi fixado um comprimento de 2.5 metros e suportando-se uma perda de apenas 5%, ou seja, um RMS de no máximo 6.3° para um estado de mar seis, a sua massa relativa a do navio ficou em:

$$\zeta = 3.05 \%$$

Isto mostra que se poderia relaxar um pouco no parâmetro da massa do tanque sem perder muito a absorção do jogo.

Entretanto, no projeto do navio, existe um requisito de ângulo máximo de inclinação que precisa ser atendido. Nesta parte do projeto há, portanto, a necessidade de se comparar ou estimar um ângulo máximo para que se possa dizer se o tanque é suficiente ou se aceita um relaxamento em alguma das variáveis. Isto foi feito através dos argumentos contidos nos procedimentos da SNAME [10] para desenvolvimento e projeto de navios oceanográficos no qual há a citação da avaliação do navio oceanográfico hidrográfico canadense que forneceu uma resposta de apenas 3° de jogo para um estado de mar 5 em ondas de bochecha. Para efeito de comparação, a resposta pretendida para o sistema em análise ficou, para estado de mar 5, igual a 3,5°.

Isto significa que, mesmo sabendo que a resposta de um barco é menor quando este é excitado por um mar de bochecha em vez de um mar de través (como é o caso desse estudo), a resposta conseguida com a melhor configuração possível ainda está um pouco pior que a necessária o que leva a uma única solução possível que é a de se escolher o tanque com menor RMS do ângulo sem nenhum refinamento.

6. Conclusões

Foi desenvolvida neste trabalho uma metodologia para a definição de dimensões básicas de um tanque antijogo passivo para um navio oceanográfico. A metodologia é baseada na estimativa da resposta do sistema em jogo como grau exclusivo de liberdade. A massa de água no interior do tanque é modelada como um grau de liberdade adicional. A resposta média esperada em mar irregular é obtida a partir do cruzamento espectral da função de transferência do sistema-navio com o espectro de mar. Sobre a resposta média esperada (expressa pelo RMS do movimento de jogo), foi aplicado um critério de conforto operacional, resultando nas dimensões do tanque desejado.

Foi ainda efetuada uma análise de sensibilidade para verificação da possibilidade de relaxamento em algum dos parâmetros do tanque (massa, comprimento). Com base neste análise se pode notar que o decaimento do RMS em função dos dois parâmetros estudados se estabilizava a partir de um determinado valor fazendo com que uma primeira escolha, que mais tarde foi tomada como a definitiva, estivesse claramente demarcada.

Ficou claro por fim que o tanque escolhido será determinado pelas seguintes características:

- Comprimento: $X_t = 2.50$ metros
- Porcentagem de massa: $\zeta = 3.50$ %
- Distância entre centros: $w = 8.50$ metros
- Altura do duto central: $h_d = 0.30$ metros
- Distância do centro do duto central ao de gravidade do navio: $r_d = 3.25$ metros
- Largura dos dutos verticais: $w_r = 2.50$ metros
- Distância do fundo do tanque ao fundo do navio: $h_b = 0.60$ metros
- Altura do nível de água nos dutos verticais: $h_r = 2.20$ metros
- Coeficiente de perda de estabilidade estática: $\mu = 0.23$

Referências

- [1] Lloyd, A. R. J. M. *Seakeeping: Ship Behavior in Rough Weather*, Ellis Horwood Limited, England, 1989.
- [2] Lewis, E. V. *Principles of Naval Architecture*, SNAME, New York, 1988.
- [3] Vasta, J., Giddings, A. J., Taplin, A. and Stilwell, Capt. J. J. *Roll Stabilization by Means of Passive Tanks*, SNAME, New York, N.Y., 1961.
- [4] Meirovitch, L. *Elements of Vibration Analysis*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1975.
- [5] Den Hartog, J. P. *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill Book Co., New York, 1956.
- [6] M. St Denis and Pierson, W.J. *On the motion of ships in confused seas*, SNAME Transactions, 1953.
- [7] Bhattacharyya, R. *Dynamics of Marine Vehicles*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1978.
- [8] Price, W. G. and Bishop, R. E. D. *Probabilistic Theory of Ship Dynamics*, Chapman and Hall Ltd, London, 1974.
- [9] Biran, A. e Breiner, M. *Matlab for Engineers*, Harlow, Addison-Wesley, 1995.
- [10] Michel, W. H. “Sea Spectra Simplified”, Meeting of Gulf Section, SNAME, 1968.
- [11] Kambisseri, R. e Ikeda, Y. “Ship Roll Motions with Water Inside Compartments Due to Damage”, *Proceedings of the Ninth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Brest, France, 1999.
- [12] Aranha, J. A. P. “Notas de Aula”, PNV-2340, São Paulo, Brasil, 2003.
- [13] Daidola, J. C. and Griffin, J. J.: “Developments in the Design of Oceanographic Ships”, *Transactions of the SNAME*, vol.94, New York N.Y., 1986, pp. 121-158.

Anexo 1: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado o comprimento do tanque

```
%Dados de Entrada
Pi = 3.14159;
rho = 1025.0; % Densidade da água em kg/m3
g = 9.8; % Aceleração da gravidade em m/s2
m = 1000000.0; % massa do navio em kg
Bi = 11.0; % Boca disponível para o tanque em m
Di = 5.0; %Pontal disponível para o tanque em m
GM = 1.0; % GM estimado do navio sem tanque em m
KG = 4.0; % KG do navio em m
eta = 0.1; %coeficiente de amortecimento do tanque (adimensional)

%calculo da freqüência do tanque que é igual a do navio
Cb = 0.555; %coeficiente de bloco.
Cv = 0.720; %coeficiente de área de convés.
T = 3.4; %calado do navio, em metros.
He = 9.81; %pontal efetivo do navio com as super estruturas, em metros.
Be = 11; %boca efetiva da embarcação.
a44 = m*(Be^2)*(0.172)*(Cb*Cv+1.1*Cv*(1-Cb)*((He/T)-2.2)+((Be^2)/(He^2)));
c44 = m*g*GM;
wn = sqrt(c44/a44); %freqüência natural de vibração do navio.
wt = wn;

%Limites das variáveis

%Altura do duto
hd_max = 1.1;
hd_min = 0.3;
delta_hd = 0.05;
%distância do tanque ao fundo do casco em m
hb_max = 0.6;
hb_min = 0.0;
delta_hb = 0.05;
%Distância entre centros dos reservatórios
w_max = 9.5;
w_min = 7.5;
delta_w = 0.05;

%Início dos cálculos
wr_otimo = 0.0;
hb_otimo = 0.0;
att_otimo = 0.0;
btt_otimo = 0.0;
at4_otimo = 0.0;
mt_otimo = 0.0;
mu_otimo = 0.0;
Ft_otimo = 0.0;
Xt_otimo = 0.0;
W_otimo = 0.0;
hr_otimo = 0.0;
hd_otimo = 0.0;
rd_otimo = 0.0;
epsilon_otimo = 0.0;
tau_otimo = 0.0;
for hd = hd_min : delta_hd : hd_max
    for w = w_min : delta_w : w_max
        for hb = hb_min : delta_hb : hb_max
```

```

wr = Bi-w;
Qt = (Xt*rho*wr*w*w)/2;
mu = Qt/(m*GM);
btt = 2.0*eta*Qt*g/wt;
att = btt/(2.0*eta*wt);
ht = Di-hb;
hr = ht/2;
tau = atan((ht-hd)/w);
rd = KG-hb-0.5*hd;
mt = rho*Xt*(2.0*hr*wr+hd*w);
epsilon = 100.0*mt/m;
at4 = Qt*(rd+hr);
Ft = (Qt*g*(1-at4/(Qt*g))^2)/(2.0*eta);
if((epsilon>1)&(epsilon<5)&(mu<0.25)&(hr>hd/2))
    if (Ft>Ft_otimo)
        wr_otimo = wr;
        hb_otimo = hb;
        att_otimo = att;
        btt_otimo = btt;
        at4_otimo = at4;
        mt_otimo = mt;
        mu_otimo = mu;
        Ft_otimo = Ft;
        Xt_otimo = Xt;
        W_otimo = w;
        rd_otimo = rd;
        hr_otimo = hr;
        hd_otimo = hd;
        epsilon_otimo = epsilon;
        tau_otimo = tau;
    end
end
end
end
end
end

```

Anexo 2: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado a porcentagem de massa relativa a massa do navio

```
%Dados de Entrada
Pi = 3.14159;
rho = 1025.0; % Densidade da água em kg/m3
g = 9.8; % aceleração da gravidade em m/s2
m = 1000000.0; % massa do navio em kg
Bi = 11.0; % Boca disponível para o tanque em m
GM = 1.0; % GM estimado do navio sem tanque em m
Di = 5.0; %Pontal disponível para o tanque em m
KG = 4.0; % KG do navio em m
eta = 0.1; %coeficiente de amortecimento do tanque (adimensional)

%calculo da frequência do tanque que é igual a do navio
Cb = 0.555; %coeficiente de bloco.
Cv = 0.720; %coeficiente de área de convés.
T = 3.4; %calado do navio, em metros.
He = 9.81; %pontal efetivo do navio com as super estruturas, em metros.
Be = 11; %boca efetiva da embarcação.
a44 = m*(Be^2)*(0.172)*(Cb*Cv+1.1*Cv*(1-Cb)*((He/T)-2.2)+((Be^2)/(He^2)));
c44 = m*g*GM;
wn = sqrt(c44/a44); %frequência natural de vibração do navio.
wt = wn;

%Limites das variáveis

%Altura do duto
hd_max = 1.1;
hd_min = 0.3;
delta_hd = 0.05;
%distância do tanque ao fundo do casco em m
hb_max = 0.6;
hb_min = 0.0;
delta_hb = 0.05;
%Distância entre centros dos reservatórios
w_max = 9.5;
w_min = 7.5;
delta_w = 0.05;

%Início dos cálculos
wr_otimo = 0.0;
hb_otimo = 0.0;
att_otimo = 0.0;
btt_otimo = 0.0;
at4_otimo = 0.0;
mt_otimo = 0.0;
mu_otimo = 0.0;
Ft_otimo = 0.0;
Xt_otimo = 0.0;
W_otimo = 0.0;
hr_otimo = 0.0;
hd_otimo = 0.0;
rd_otimo = 0.0;
epsilon_otimo = 0.0;
tau_otimo = 0.0;
for hd = hd_min : delta_hd : hd_max
    for w = w_min : delta_w : w_max
        for hb = hb_min : delta_hb : hb_max
```

```

wr = Bi-w; %largura do duto
ht = Di-hb; %altura da lateral do duto
mt = (m*epsilon)/100; %massa do tanque
rd = KG-hb-0.5*hd; %distancia do duto horizontal ao CG
hr = ht/2; %nivel da agua
tau = atan((ht-hd)/w); %angulo de inclinacao da agua
Xt = mt/(rho*(2*hr*wr+hd*w)); %comprimento do tanque
Qt = (Xt*rho*wr*w*w)/2;
mu = Qt/(m*GM); %perda de estabilidade estatica
btt = 2.0*eta*Qt*g/wt;
att = btt/(2.0*eta*wt);
at4 = Qt*(rd+hr);
Ft = (Qt*g*(1-at4/(Qt*g))^2)/(2.0*eta);
if ((Xt>1)&(Xt<2.5)&(mu<0.25)&(hr>hd/2))
    if (Ft>Ft_otimo)
        wr_otimo = wr;
        hb_otimo = hb;
        att_otimo = att;
        btt_otimo = btt;
        at4_otimo = at4;
        mt_otimo = mt;
        mu_otimo = mu;
        Ft_otimo = Ft;
        Xt_otimo = Xt;
        W_otimo = w;
        rd_otimo = rd;
        hr_otimo = hr;
        hd_otimo = hd;
        epsilon_otimo = epsilon;
        tau_otimo = tau;
    end
end
end
end
end
end

```

Anexo 3: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado a distância ao fundo do tanque

```
%Dados de Entrada
Pi = 3.14159;
rho = 1025.0; % Densidade da água em kg/m3
g = 9.8; % aceleração da gravidade em m/s2
m = 1000000.0; % massa do navio em kg
Bi = 11.0; % Boca disponível para o tanque em m
Di = 5.0; %Pontal disponível para o tanque em m
GM = 1.0; % GM estimado do navio sem tanque em m
KG = 4.0; % KG do navio em m
eta = 0.1; %coeficiente de amortecimento do tanque (adimensional)

%calculo da frequência do tanque que é igual a do navio
Cb = 0.555; %coeficiente de bloco.
Cv = 0.720; %coeficiente de área de convés.
T = 3.4; %calado do navio, em metros.
He = 9.81; %pontal efetivo do navio com as super estruturas, em metros.
Be = 11; %boca efetiva da embarcação.
a44 = m*(Be^2)*(0.172)*(Cb*Cv+1.1*Cv*(1-Cb)*((He/T)-2.2)+((Be^2)/(He^2)));
c44 = m*g*GM;
wn = sqrt(c44/a44); %frequência natural de vibração do navio.
wt = wn;

%Limites das variáveis

%comprimento do tanque em m
Xt_max = 2.5;
Xt_min = 1;
delta_Xt = 0.1;
%Altura do duto
hd_max = 0.9;
hd_min = 0.3;
delta_hd = 0.1;
%Distância entre centros dos reservatórios
w_max = 9.5;
w_min = 7.5;
delta_w = 0.1;

%Início dos cálculos
wr_otimo = 0.0;
hb_otimo = 0.0;
att_otimo = 0.0;
btt_otimo = 0.0;
at4_otimo = 0.0;
mt_otimo = 0.0;
mu_otimo = 0.0;
Ft_otimo = 0.0;
Xt_otimo = 0.0;
W_otimo = 0.0;
hr_otimo = 0.0;
hd_otimo = 0.0;
rd_otimo = 0.0;
epsilon_otimo = 0.0;
tau_otimo = 0.0;
for hd = hd_min : delta_hd : hd_max
    for w = w_min : delta_w : w_max
        for Xt = Xt_min : delta_Xt : Xt_max
```

```

wr = Bi-w;
Qt = (Xt*rho*wr*w*w)/2;
mu = Qt/(m*GM);
btt = 2.0*eta*Qt*g/wt;
att = btt/(2.0*eta*wt);
ht = Di-hb;
hr = ht/2;
tau = atan((ht-hd)/w);
rd = KG-hb-0.5*hd;
mt = rho*Xt*(2.0*hr*wr+hd*w);
epsilon = 100.0*mt/m;
at4 = Qt*(rd+hr);
Ft = (Qt*g*(1-at4/(Qt*g))^2)/(2.0*eta);
if ((epsilon>1)&(epsilon<4)&(mu<0.25)&(hr>hd/2))
    if (Ft>Ft_otimo)
        wr_otimo = wr;
        hb_otimo = hb;
        att_otimo = att;
        btt_otimo = btt;
        at4_otimo = at4;
        mt_otimo = mt;
        mu_otimo = mu;
        Ft_otimo = Ft;
        Xt_otimo = Xt;
        W_otimo = w;
        rd_otimo = rd;
        hr_otimo = hr;
        hd_otimo = hd;
        epsilon_otimo = epsilon;
        tau_otimo = tau;
    end
end
end
end
end
end

```

Anexo 4: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado a altura do duto central

```
%Dados de Entrada
Pi = 3.14159;
rho = 1025.0; % Densidade da água em kg/m3
g = 9.8; % aceleração da gravidade em m/s2
m = 1000000.0; % massa do navio em kg
Bi = 11.0; % Boca disponível para o tanque em m
Di = 5.0; %Pontal disponível para o tanque em m
GM = 1.0; % GM estimado do navio sem tanque em m
KG = 4.0; % KG do navio em m
eta = 0.1; %coeficiente de amortecimento do tanque (adimensional)

%calculo da frequência do tanque que é igual a do navio
Cb = 0.555; %coeficiente de bloco.
Cv = 0.720; %coeficiente de área de convés.
T = 3.4; %calado do navio, em metros.
He = 9.81; %pontal efetivo do navio com as super estruturas, em metros.
Be = 11; %boca efetiva da embarcação.
a44 = m*(Be^2)*(0.172)*(Cb*Cv+1.1*Cv*(1-Cb)*((He/T)-2.2)+((Be^2)/(He^2)));
c44 = m*g*GM;
wn = sqrt(c44/a44); %frequência natural de vibração do navio.
wt = wn;

%Limites das variáveis

%Variação da distancia ao fundo do tanque
hb_min = 0.0;
hb_max = 0.5;
delta_hb = 0.1;
%comprimento do tanque em m
Xt_max = 2.5;
Xt_min = 1;
delta_Xt = 0.1;
%Distância entre centros dos reservatórios
w_max = 9.5;
w_min = 7.5;
delta_w = 0.1;

%Início dos cálculos
wr_otimo = 0.0;
hb_otimo = 0.0;
att_otimo = 0.0;
btt_otimo = 0.0;
at4_otimo = 0.0;
mt_otimo = 0.0;
mu_otimo = 0.0;
Ft_otimo = 0.0;
Xt_otimo = 0.0;
W_otimo = 0.0;
hr_otimo = 0.0;
hd_otimo = 0.0;
rd_otimo = 0.0;
epsilon_otimo = 0.0;
tau_otimo = 0.0;
for hb = hb_min : delta_hb : hb_max
    for w = w_min : delta_w : w_max
        for Xt = Xt_min : delta_Xt : Xt_max
```

```

wr = Bi-w;
Qt = (Xt*rho*wr*w*w)/2;
mu = Qt/(m*GM);
btt = 2.0*eta*Qt*g/wt;
att = btt/(2.0*eta*wt);
ht = Di-hb;
hr = ht/2;
tau = atan((ht-hd)/w);
rd = KG-hb-0.5*hd;
mt = rho*Xt*(2.0*hr*wr+hd*w);
epsilon = 100.0*mt/m;
at4 = Qt*(rd+hr);
Ft = (Qt*g*(1-at4/(Qt*g))^2)/(2.0*eta);
if ((epsilon>1)&(epsilon<2.5)&(mu<0.25)&(hr>hd/2))
    if (Ft>Ft_otimo)
        wr_otimo = wr;
        hb_otimo = hb;
        att_otimo = att;
        btt_otimo = btt;
        at4_otimo = at4;
        mt_otimo = mt;
        mu_otimo = mu;
        Ft_otimo = Ft;
        Xt_otimo = Xt;
        W_otimo = w;
        rd_otimo = rd;
        hr_otimo = hr;
        hd_otimo = hd;
        epsilon_otimo = epsilon;
        tau_otimo = tau;
    end
end
end
end
end
end

```

Anexo 5: Programa para a seleção do melhor tanque sendo dado a distância entre os centros do reservatório

```
%Dados de Entrada
Pi = 3.14159;
rho = 1025.0; % Densidade da água em kg/m3
g = 9.8; % aceleração da gravidade em m/s2
m = 1000000.0; % massa do navio em kg
Bi = 11.0; % Boca disponível para o tanque em m
Di = 5.0; %Pontal disponível para o tanque em m
GM = 1.0; % GM estimado do navio sem tanque em m
KG = 4.0; % KG do navio em m
eta = 0.1; %coeficiente de amortecimento do tanque (adimensional)

%calculo da frequência do tanque que é igual a do navio
Cb = 0.555; %coeficiente de bloco.
Cv = 0.720; %coeficiente de área de convés.
T = 3.4; %calado do navio, em metros.
He = 9.81; %pontal efetivo do navio com as super estruturas, em metros.
Be = 11; %boca efetiva da embarcação.
a44 = m*(Be^2)*(0.172)*(Cb*Cv+1.1*Cv*(1-Cb)*((He/T)-2.2)+((Be^2)/(He^2)));
c44 = m*g*GM;
wn = sqrt(c44/a44); %frequência natural de vibração do navio.
wt = wn;

%Limites das variáveis

%Variação da distancia ao fundo do tanque
hb_min = 0.0;
hb_max = 0.5;
delta_hb = 0.1;
%comprimento do tanque em m
Xt_max = 2.5;
Xt_min = 1;
delta_Xt = 0.1;
%Distância entre centros dos reservatórios
w_max = 9.5;
w_min = 7.5;
delta_w = 0.1;

%Início dos cálculos
wr_otimo = 0.0;
hb_otimo = 0.0;
att_otimo = 0.0;
btt_otimo = 0.0;
at4_otimo = 0.0;
mt_otimo = 0.0;
mu_otimo = 0.0;
Ft_otimo = 0.0;
Xt_otimo = 0.0;
W_otimo = 0.0;
hr_otimo = 0.0;
hd_otimo = 0.0;
rd_otimo = 0.0;
epsilon_otimo = 0.0;
tau_otimo = 0.0;
for hb = hb_min : delta_hb : hb_max
    for w = w_min : delta_w : w_max
        for Xt = Xt_min : delta_Xt : Xt_max
```

```

wr = Bi-w;
Qt = (Xt*rho*wr*w*w)/2;
mu = Qt/(m*GM);
btt = 2.0*eta*Qt*g/wt;
att = btt/(2.0*eta*wt);
ht = Di-hb;
hr = ht/2;
tau = atan((ht-hd)/w);
rd = KG-hb-0.5*hd;
mt = rho*Xt*(2.0*hr*wr+hd*w);
epsilon = 100.0*mt/m;
at4 = Qt*(rd+hr);
Ft = (Qt*g*(1-at4/(Qt*g))^2)/(2.0*eta);
if ((epsilon>1)&(epsilon<2.5)&(mu<0.25)&(hr>hd/2))
    if (Ft>Ft_otimo)
        wr_otimo = wr;
        hb_otimo = hb;
        att_otimo = att;
        btt_otimo = btt;
        at4_otimo = at4;
        mt_otimo = mt;
        mu_otimo = mu;
        Ft_otimo = Ft;
        Xt_otimo = Xt;
        W_otimo = w;
        rd_otimo = rd;
        hr_otimo = hr;
        hd_otimo = hd;
        epsilon_otimo = epsilon;
        tau_otimo = tau;
    end
end
end
end
end
end

```

Anexo 6: Programa para seleção do melhor tanque sendo dado a altura metacêntrica (GM)

```
%Dados de Entrada
Pi = 3.14159;
rho = 1025.0; % Densidade da água em kg/m3
g = 9.8; % Aceleração da gravidade em m/s2
m = 1000000.0; % massa do navio em kg
Bi = 11.0; % Boca disponível para o tanque em m
Di = 5.0; %Pontal disponível para o tanque em m
KG = 4.0; % KG do navio em m
eta = 0.1; %coeficiente de amortecimento do tanque (adimensional)

%calculo da freqüência do tanque que é igual a do navio
Cb = 0.555; %coeficiente de bloco.
Cv = 0.720; %coeficiente de área de convés.
T = 3.4; %calado do navio, em metros.
He = 9.81; %pontal efetivo do navio com as super estruturas, em metros.
Be = 11; %boca efetiva da embarcação.
a44 = m*(Be^2)*(0.172)*(Cb*Cv+1.1*Cv*(1-Cb)*((He/T)-2.2)+((Be^2)/(He^2)));
c44 = m*g*GM;
wn = sqrt(c44/a44); %freqüência natural de vibração do navio.
wt = wn;

%Limites das variáveis

%comprimento do tanque em m
Xt_max = 3;
Xt_min = 1;
delta_Xt = 0.1;
%Altura do duto
hd_max = 1.1;
hd_min = 0.3;
delta_hd = 0.1;
%distância do tanque ao fundo do casco em m
hb_max = 0.6;
hb_min = 0.0;
delta_hb = 0.1;
%Distancia entre centros dos reservatórios
w_max = 9;
w_min = 8;
delta_w = 0.01;

%Inicio dos cálculos
wr_otimo = 0.0;
hb_otimo = 0.0;
att_otimo = 0.0;
btt_otimo = 0.0;
at4_otimo = 0.0;
mt_otimo = 0.0;
mu_otimo = 0.0;
Ft_otimo = 0.0;
Xt_otimo = 0.0;
W_otimo = 0.0;
hr_otimo = 0.0;
hd_otimo = 0.0;
rd_otimo = 0.0;
epsilon_otimo = 0.0;
tau_otimo = 0.0;
```

```

for hb = hb_min : delta_hb : hb_max
    for w = w_min : delta_w : w_max
        for Xt = Xt_min : delta_Xt : Xt_max
            for hd = hd_min : delta_hd : hd_max
                ht = Di-hb; %altura da lateral do duto
                wr = Bi-w;
                Qt = (Xt*rho*wr*w*w)/2;
                mu = Qt/(m*GM);
                btt = 2.0*eta*Qt*g/wt;
                att = btt/(2.0*eta*wt);
                hr = ht/2;
                tau = atan((ht-hd)/w);
                rd = KG-hb-0.5*hd;
                mt = rho*Xt*(2.0*hr*wr+hd*w);
                epsilon = 100.0*mt/m;
                at4 = Qt*(rd+hr);
                Ft = (Qt*g*(1-at4/(Qt*g))^2)/(2.0*eta);
                if ((epsilon>1)&(epsilon<4)&(mu<0.25)&(hr>hd/2))
                    if (Ft>Ft_otimo)
                        wr_otimo = wr;
                        hb_otimo = hb;
                        att_otimo = att;
                        btt_otimo = btt;
                        at4_otimo = at4;
                        mt_otimo = mt;
                        mu_otimo = mu;
                        Ft_otimo = Ft;
                        Xt_otimo = Xt;
                        W_otimo = w;
                        rd_otimo = rd;
                        hr_otimo = hr;
                        hd_otimo = hd;
                        tau_otimo = tau;
                        epsilon_otimo = epsilon;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end
end

```

Anexo 7: Programa para fazer o cruzamento espectral e obter a resposta do sistema para uma dada configuração do tanque

```

%Calculo dos coeficientes b44 e ctt
Qt = mu_otimo*m*GM;
ctt = Qt*g;
Tn = (2*Pi)/wn; %período natural de vibração do navio.
K1 = 0.04; %coeficiente tabelado para calculo de b44.
b44 = K1*Tn*m*GM*g;

%definição dos estados de mar com a altura significativa das ondas.
x = 0.01:0.01:1.5;
H13 = [0.4 0.79 1.0 1.1 1.43 1.8 2.0 2.2 2.68 3.2 3.75 4.36]; %altura
em metros
Rb = zeros(12,150);
Rt = zeros(12,150);
if ((a44>0) & (at4_otimo>0) & (att_otimo>0) & (b44>0) & (btt_otimo>0)
& (c44>0) & (ctt>0))
    for n = 1:12
        A = 0.78; %coeficientes para o calculo
        B = (3.11)/(H13(1,n))^2; %do espectro de resposta do mar.
        j=1;
        for wpr=0.01:0.01:1.5
            z1 = (-wpr^2 * (a44) + c44) + i*(wpr*b44);
            z2 = (-wpr^2 * (att_otimo) + ctt) + i*(wpr*btt_otimo);
            z12 = wpr^2 * at4_otimo - ctt;
            Hx = real(m*z2/(z1*z2+(z12)^2)); %fator de magnificação do
barco.
            Hxt = real(mt_otimo*z12/(z1*z2+(z12)^2)); %fator de
magnificação do tanque.
            RAO = (Hx)^2; %operador de respostas - RAO.
            Sw = ((A/wpr^5)*exp(-B/wpr^4)); %espectro de resposta do
mar.
            Rb(n,j) = (RAO) * Sw; %resposta do navio.
            Rt(n,j) = ((Hxt)^2) * Sw; %resposta do tanque.
            j = j+1; %atualiza o j para gravar outro valor de R e Hw.
        end
    end
end

%calculo dos momentos de área.
rms = zeros(1,12);
rms_t = zeros(1,12);
for n = 1:12
    m0(1,n) = simp(x,Rb(n,:)); %momento de ordem zero do barco
    m0t(1,n) = simp(x,Rt(n,:)); %momento de ordem zero do tanque
    rms(1,n) = sqrt(m0(1,n))*180/Pi;
    rms_t(1,n) = sqrt(m0t(1,n))*180/Pi;
end

```

Anexo 8: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação do comprimento do tanque

```
%grafico em função do comprimento do tanque

%Variação do comprimento do tanque
Xt_min = 1;
Xt_max = 2.5;
delta_Xt = 0.05;

%cálculos
mar = [1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.33 4.66 5 5.5 6]; %define os estados de
mar
j2 = 1;
xt_graf1 = [1:0.05:2.5];
Xt_graf = xt_graf1';
for Xt = Xt_min : delta_Xt : Xt_max
    tanque_Xt;
    resp_navio;
    dados(j2,:) = rms(1,:);
    dados_t(j2,:) = rms_t(1,:);
    medidas(:,j2) =
[mu_otimo;Xt_otimo;epsilon_otimo;tau_otimo;W_otimo;rd_otimo;hr_otimo;h
d_otimo;hb_otimo;wr_otimo];
    j2 = j2 + 1;
end

%gráfico com a resposta
figure(1)
plot(Xt_graf,dados(:,7),Xt_graf,dados(:,10),Xt_graf,dados(:,12))
grid
title('gráfico do RMS para o melhor tanque em função do comprimento')
xlabel('comprimento do tanque Xt')
ylabel('RMS em graus')

%escreve arquivos de saída
fid = fopen('medidas_graf_Xt.txt','w');
fprintf(fid,'mu \b Xt \b epsilon \b tau \b W \b rd \b hr \b hd \b hb
\b wr \n');
fprintf(fid,'%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f
%4.2f \n',medidas);
fclose(fid);
```

Anexo 9: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da porcentagem de massa de água do tanque

```
%grafico do RMS em função da razão de massa do tanque

%razão entre a massa do tanque e a massa do navio em porcentagem
epsilon_max = 3.2;
epsilon_min = 1.2;
delta_epsilon = 0.05;

%cálculos
mar = [1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.33 4.66 5 5.5 6]; %define os estados de
mar
j2 = 1;
epsilon_graf1 = [1.2:0.05:3.2];
epsilon_graf = epsilon_graf1';
for epsilon = epsilon_min : delta_epsilon : epsilon_max
    tanque_epsilon;
    resp_navio;
    dados(j2,:) = rms(1,:);
    dados_t(j2,:) = rms_t(1,:);
    medidas(:,j2) =
[mu_otimo;Xt_otimo;epsilon_otimo;tau_otimo;W_otimo;rd_otimo;hr_otimo;h
d_otimo;hb_otimo;wr_otimo];
    j2 = j2 + 1;
end

%gráfico com a resposta
figure(2)
plot(epsilon_graf,dados(:,7),epsilon_graf,dados(:,10),epsilon_graf,dad
os(:,12))
grid
title('gráfico do RMS para o melhor tanque em função da massa do
tanque')
xlabel('razão da massa do tanque')
ylabel('RMS em graus')

%escreve arquivos de saída
fid = fopen ('medidas_graf_epsilon.txt','w');
fprintf (fid,'mu \b Xt \b epsilon \b tau \b W \b rd \b hr \b hd \b hb
\b wr \n');
fprintf (fid,'%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f
%4.2f \n',medidas);
fclose(fid);
```

Anexo 10: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da distância do fundo do tanque ao fundo do navio

```
%programa para comparar os resultados dos ensaios do navio com tanque
antijogo

%Variação da distancia ao fundo do navio
hb_min = 0.0;
hb_max = 0.6;
delta_hb = 0.05;

%abre arquivos de saída
fid = fopen ('medidas_graf_hb.txt','w+');
fprintf (fid,'mu \b Xt \b epsilon \b tau \b W \b rd \b hr \b hd \b hb
\n');

%cálculos
mar = [1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.33 4.66 5 5.5 6]; %define os estados de
mar
j2 = 1;
hb_graf = [0;0.1;0.2;0.3;0.4;0.5;0.6];
grau = 20;
for hb = hb_min : delta_hb : hb_max
    tanque_hb;
    resp_navio;
    dados(j2,:) = rms(1,:);
    dados_t(j2,:) = rms_t(1,:);
    fprintf (fid,'%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f
\n',mu_otimo,Xt_otimo,epsilon_otimo,tau_otimo,W_otimo,rd_otimo,hr_otim
o,hd_otimo,hb_otimo);
    j2 = j2 + 1;
end

%gráfico com a resposta
figure(2)
plot(hb_graf,dados(:,7),hb_graf,dados(:,10),hb_graf,dados(:,12))
grid
title('gráfico do RMS para o melhor tanque em função da distancia ao
fundo do barco')
xlabel('distancia do tanque ao fundo do barco hb')
ylabel('RMS em graus')
fclose(fid);
```

Anexo 11: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da altura do duto central

```
%programa para comparar os resultados dos ensaios do navio com tanque
antijogo

%Altura do duto
hd_max = 1.1;
hd_min = 0.3;
delta_hd = 0.05;

%abre arquivos de saída
fid = fopen ('medidas_graf_hd.txt', 'w+');
fprintf (fid, 'mu \b Xt \b epsilon \b tau \b W \b rd \b hr \b hd \b hb
\n');

%cálculos
mar = [1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.33 4.66 5 5.5 6]; %define os estados de
mar
j2 = 1;
hd_graf1 = [0.3:0.05:1.1];
hd_graf = hd_graf1';
for hd = hd_min : delta_hd : hd_max
    tanque_hd;
    resp_navio;
    dados(j2,:) = rms(1,:);
    dados_t(j2,:) = rms_t(1,:);
    fprintf (fid, '%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f
\n', mu_otimo, Xt_otimo, epsilon_otimo, tau_otimo, W_otimo, rd_otimo, hr_otim
o, hd_otimo, hb_otimo);
    j2 = j2 + 1;
end

%gráfico com a resposta
figure(1)
plot(hd_graf, dados(:,7), hd_graf, dados(:,10), hd_graf, dados(:,12))
grid
title('gráfico do RMS para o melhor tanque em função da altura do
duto')
xlabel('altura do duto hd')
ylabel('RMS em graus')
fclose(fid);
```

Anexo 12: Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da distância entre centros do reservatório

```
%programa para comparar os resultados dos ensaios do navio com tanque
antijogo

%Distancia entre centros dos reservatórios
w_max = 9.5;
w_min = 6.5;
delta_w = 0.01;

%cálculos
mar = [1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.33 4.66 5 5.5 6]; %define os estados de
mar
j2 = 1;
w_graf1 = [6.5:0.01:9.5];
w_graf = w_graf1';
for w = w_min : delta_w : w_max
    tanque_w;
    resp_navio;
    dados(j2,:) = rms(1,:);
    dados_t(j2,:) = rms_t(1,:);
    medidas(:,j2) =
[mu_otimo;Xt_otimo;epsilon_otimo;tau_otimo;W_otimo;rd_otimo;hr_otimo;h
d_otimo;hb_otimo];
    j2 = j2 + 1;
end

%gráfico com a resposta
figure(2)
plot(w_graf,dados(:,7),w_graf,dados(:,10),w_graf,dados(:,12))
grid
title('gráfico do RMS para o melhor tanque em função da distancia
entre centros')
xlabel('distancia entre os centros dos reservatórios')
ylabel('RMS em graus')

%abre arquivos de saída
fid = fopen ('medidas_graf_w.txt','w');
fprintf (fid,'mu \b Xt \b epsilon \b tau \b W \b rd \b hr \b hd \b hb
\n');
fprintf (fid,'%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f
\n',medidas);
fclose(fid);
```

Anexo 13 – Programa para comparar a resposta do sistema para cada variação da altura metacêntrica (GM) do navio

```
%programa para comparar os resultados dos ensaios do navio com tanque
antijogo

%GM estimado do navio sem tanque em m
GM_max = 1.2;
GM_min = 0.8;
delta_GM = 0.05;

%cálculos
mar = [1 1.5 2 2.5 3 3.5 4 4.33 4.66 5 5.5 6]; %define os estados de
mar
j2 = 1;
GM_graf = [0.8;0.85;0.9;0.95;1.0;1.05;1.1;1.15;1.2];
for GM = GM_min : delta_GM : GM_max
    tanque_GM;
    resp_navio;
    dados(j2,:) = rms(1,:);
    dados_t(j2,:) = rms_t(1,:);
    medidas(:,j2) =
[mu_otimo;Xt_otimo;epsilon_otimo;tau_otimo;W_otimo;rd_otimo;hr_otimo;h
d_otimo;hb_otimo];
    j2 = j2 + 1;
end
dados(:,10)
dados(:,12)
figure(3)
plot(GM_graf,dados(:,7),GM_graf,dados(:,10),GM_graf,dados(:,12))
grid
title('gráfico do RMS para o melhor tanque em função do raio
metacêntrico GM')
xlabel('raio metacêntrico GM')
ylabel('RMS em graus')

%abre arquivos de saída
fid = fopen('medidas_graf_GM.txt','w');
fprintf(fid,'mu \b Xt \b epsilon \b tau \b W \b rd \b hr \b hd \b hb
\n');
fprintf(fid,'%4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f %4.2f
\n',medidas);
fclose(fid);
```

Anexo 14: Programa que faz a integração numérica através do método de Simpson

```
function y=simp(x,z)

%SIMP(X,Z) Simpson Integration of tabular data z(x), it integrates Z
with respect to X
%using Simpson's first rules.

if nargin<2
    z=x;
end
[n,m]=size(z);
if n==1
    z=z(:);
    n=m;
end
if nargin<2
    x=1:n;
end

x=x(:);
[n,m]=size(z);
if length(x)~=n
    error('input argumetns must be of same length')
end
c=[1 4 1];
dx=diff(x);
y=0;
for i=1:2:(n-2)
    if abs(dx(i) - dx(i+1)) > 0.00001
        error('two sequential intervals not equal')
    end
    y=y+(c*[z(i,:);z(i+1,:);z(i+2,:)]*dx(i));
end
y=y/3;
```

Anexo 15: Gráficos da resposta do sistema.

Esses gráficos darão a respostas em função de cada um dos parâmetros estudado para as seguintes variações, sendo que os estados de mar são 4 (azul), 5 (verde) e 6 (vermelho):

$1 < X_t < 3$ metros

$1 < \text{epsilon} < 4$ portento

$0.3 < h_d < 1.1$ metros

$0.0 < h_b < 0.6$ metros

$7.5 < w < 9.5$ metros

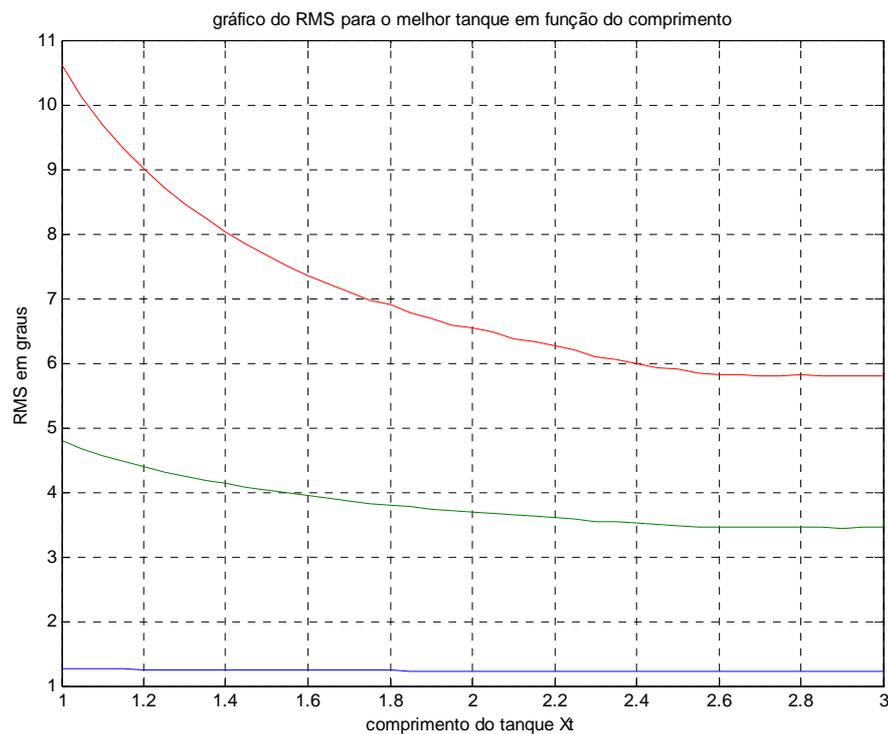


Figura 2: gráfico para avaliar a influência do comprimento no RMS

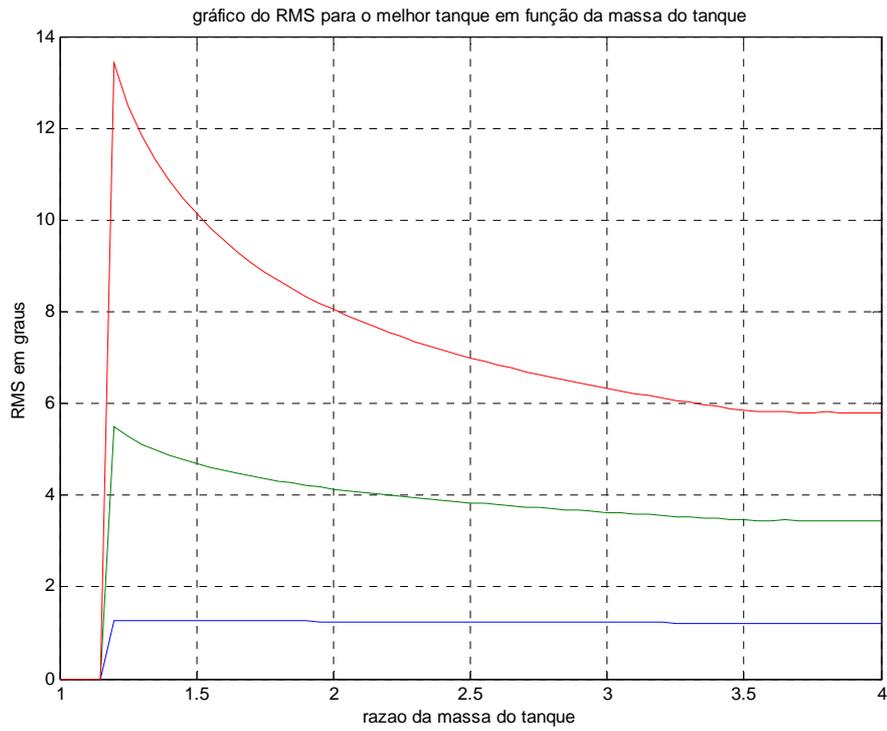


Figura 3: gráfico para avaliar a influência da massa do tanque no RMS

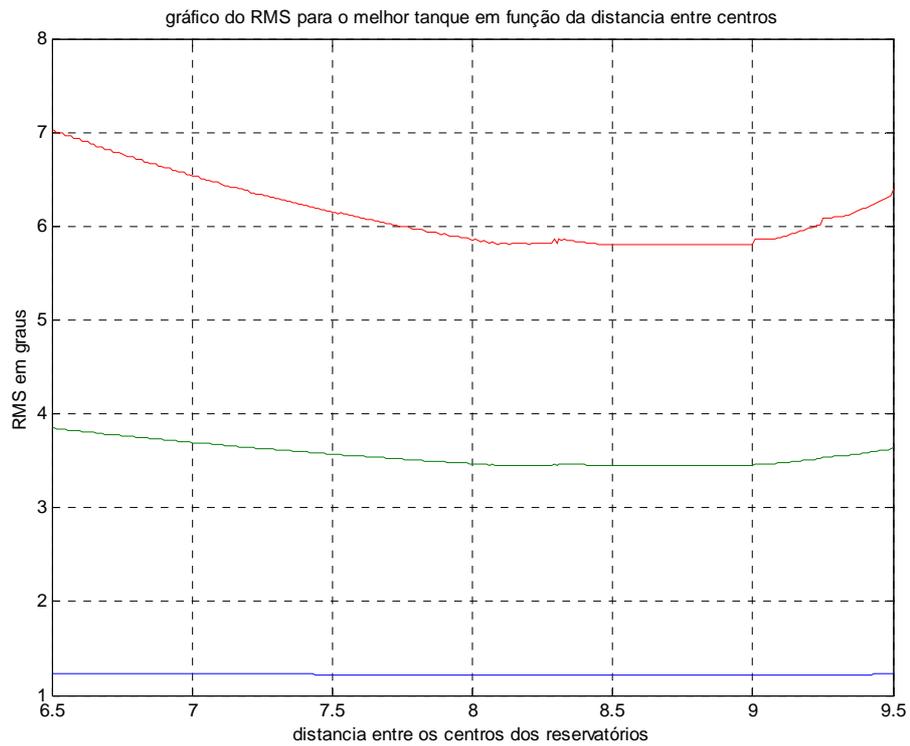


Figura 4: gráfico para avaliar a influência da distância entre centros dos reservatórios no RMS

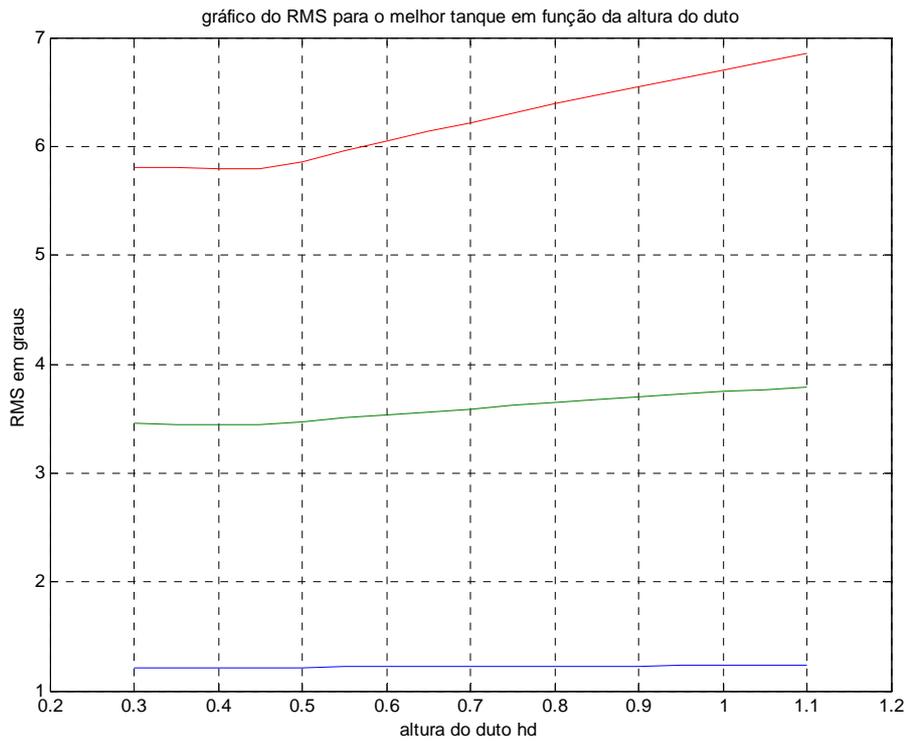


Figura 5: gráfico para avaliar a influência da altura do duto central no RMS

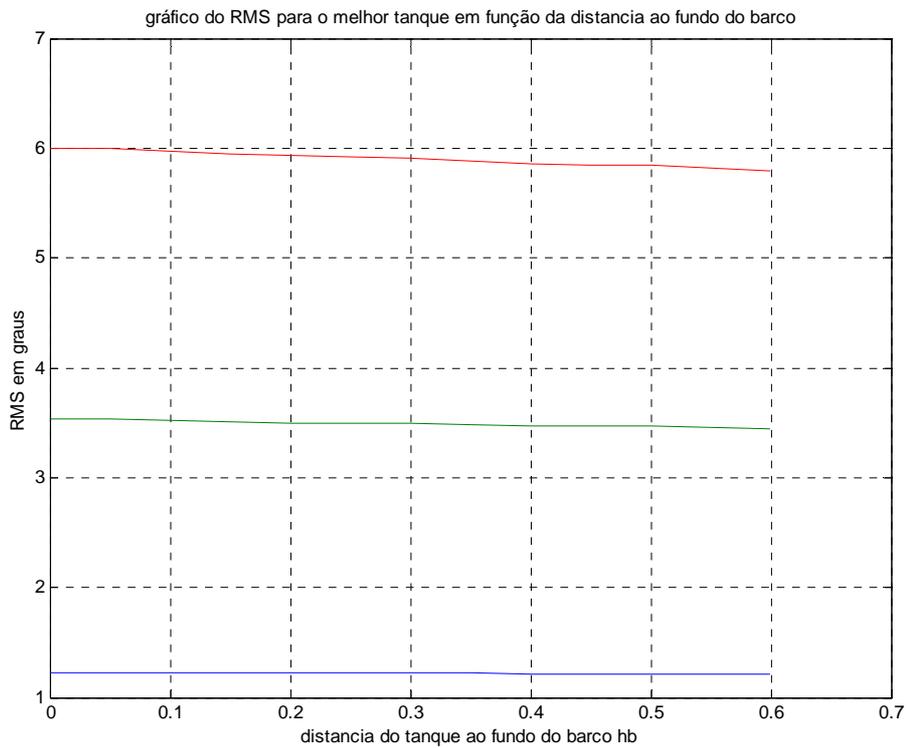


Figura 6: gráfico para avaliar a influência da distância do tanque ao fundo do barco no RMS

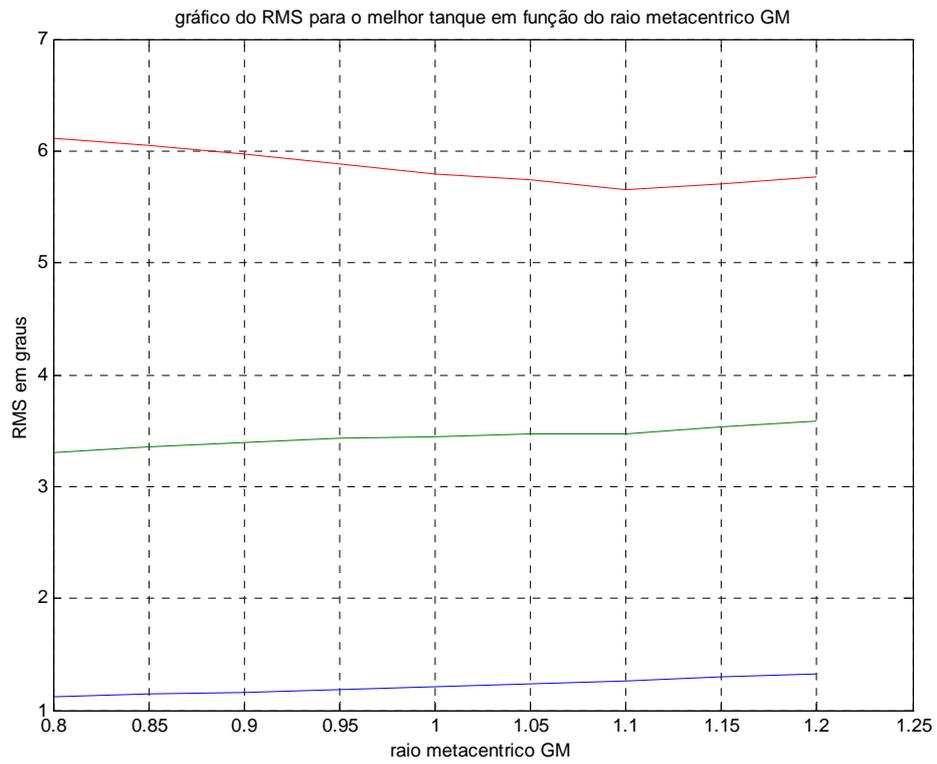


Figura 7: gráfico para avaliar a influência do raio metacêntrico no RMS

Anexo 16: Gráficos da resposta do sistema.

Esses gráficos darão a respostas em função de cada um dos parâmetros estudado para as seguintes variações, sendo que os estados de mar são 4 (azul), 5 (verde) e 6 (vermelho):

$X_t = 2.50$ metros
 $\epsilon = 3.50$ %
 $h_d = 0.3$ metros
 $h_b = 0.6$ metros
 $w = 8.46$ metros

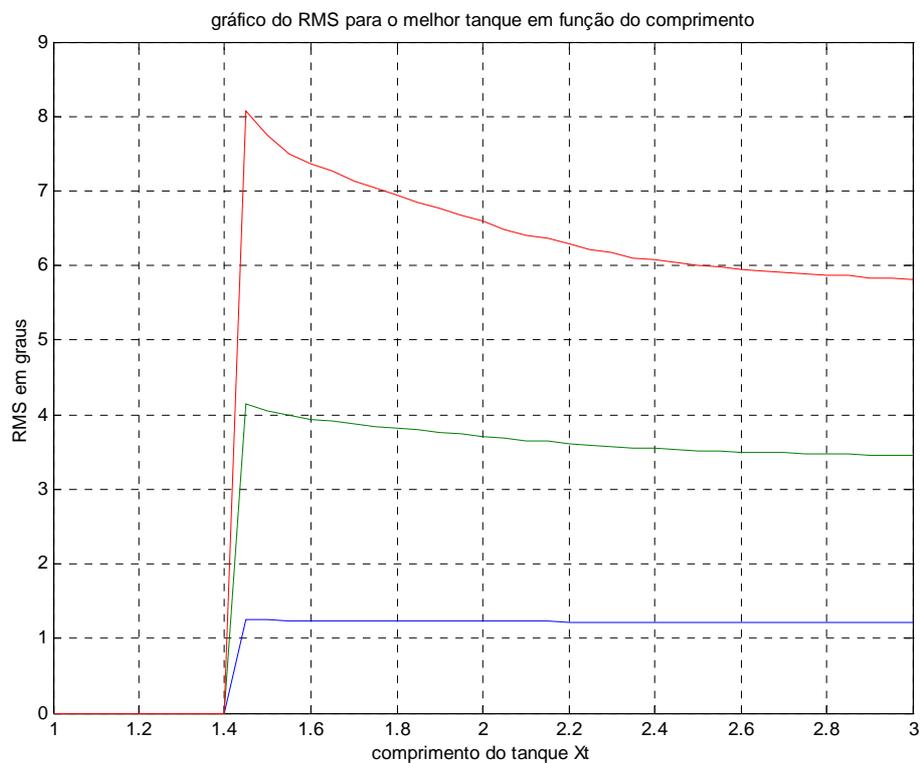


Figura 8: gráfico para avaliar a influência do comprimento do tanque no RMS

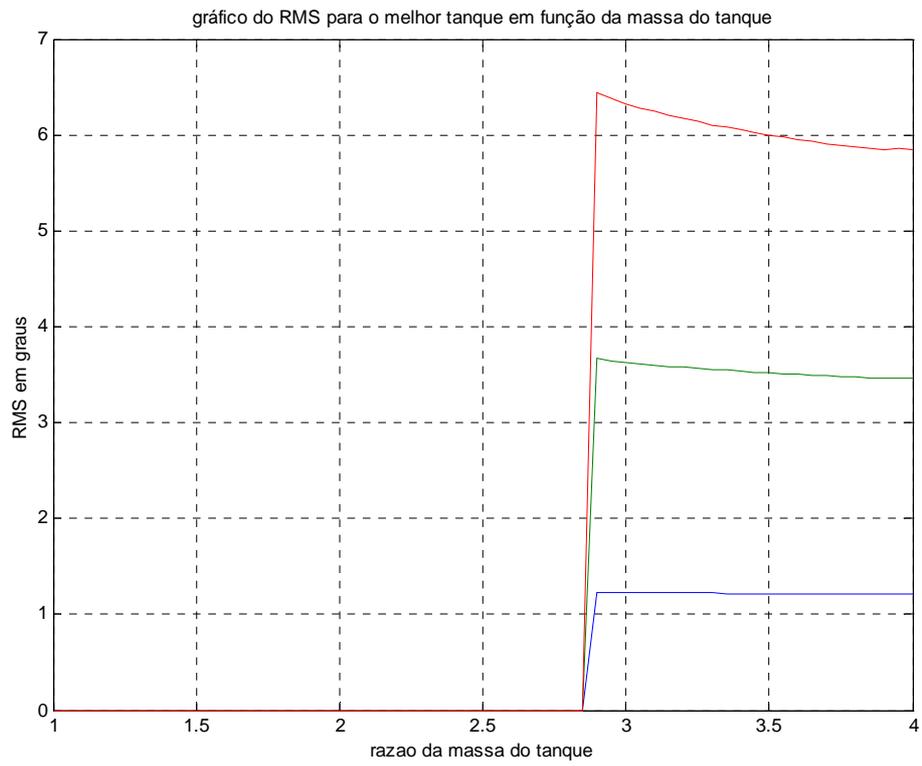


Figura 9: gráfico para avaliar a influência da massa do tanque no RMS

Anexo 17: Gráficos da resposta do sistema.

Esses gráficos darão a respostas em função de cada um dos parâmetros estudado para as seguintes variações, sendo que os estados de mar são 4 (azul), 5 (verde) e 6 (vermelho):

$X_t = 2.04$ metros

epsilon = 3.0 %

hd = 0.3 metros

hb = 0.6 metros

w = 8.3 metros

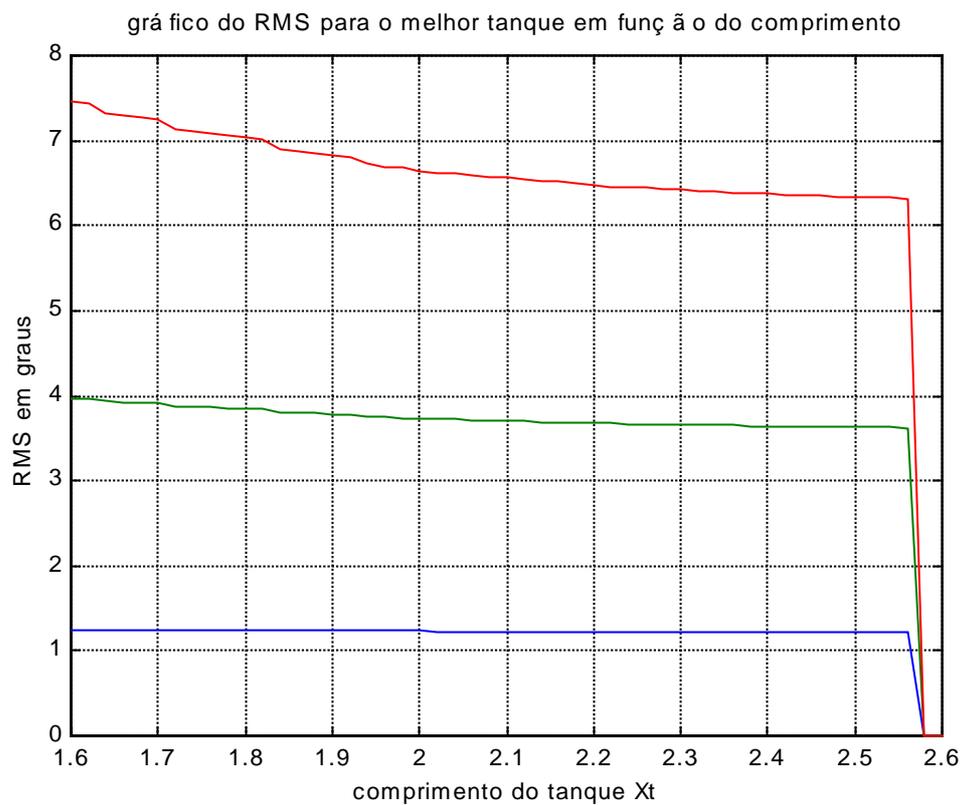


Figura 10: gráfico para avaliar a influência do comprimento do tanque no RMS

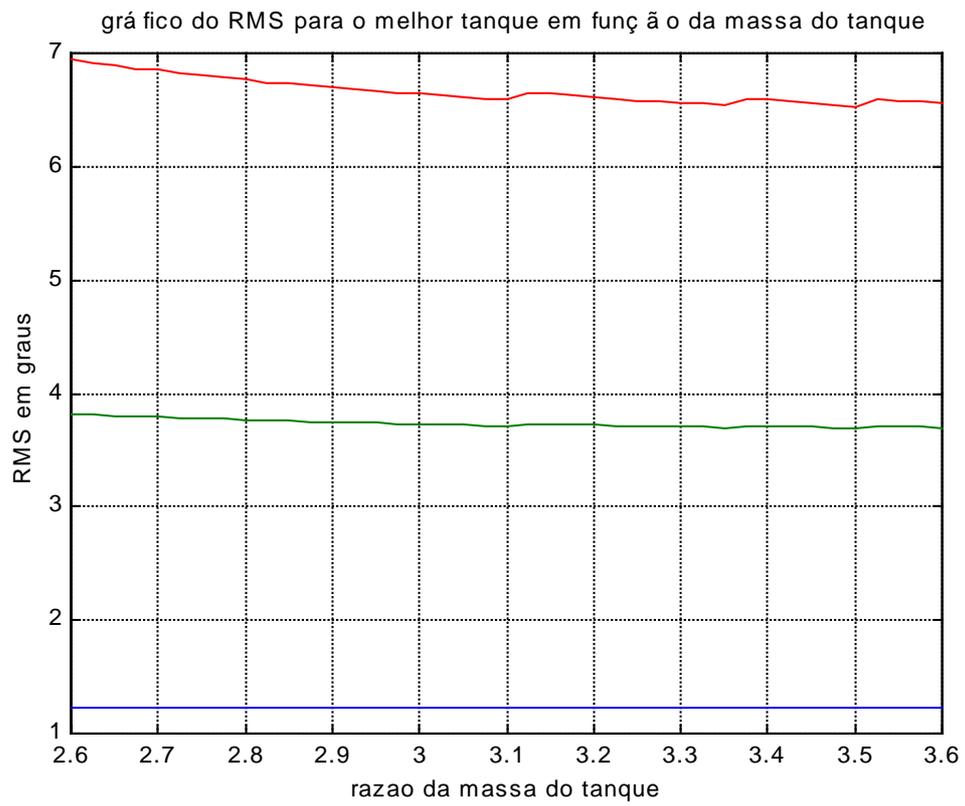


Figura 11: gráfico para avaliar a influência da massa do tanque no RMS

Anexo 18: Dados usados nos cálculos das equações do sistema

Condições da embarcação:

- zero graus de trim
- zero graus adernado

Dimensões:

Pontal efetivo = 9,81 m
Comprimento total = 52,200 m
Comprimento da linha d'água = 50,876 m
Boca = 11,000 m
Boca da linha d'água = 10,427 m
Volume = 1001,101 m³
Deslocamento = 1026,134 MT
Calado = 3,400 m

Coeficientes:

Prismático = 0,720
Bloco = 0,555

Relações:

Comprimento pela boca = 4,745
Boca pelo calado = 3.235