



MÉTODO DA EVOLUÇÃO DIFERENCIADA PARA A OTIMIZAÇÃO DO CÁLCULO DO ALINHAMENTO DE EIXOS PROPULSORES

Yuri de Souza Duarte

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Oceânica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Oceânica.

Orientador: Luiz Antonio Vaz Pinto

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2022

MÉTODO DA EVOLUÇÃO DIFERENCIADA PARA A OTIMIZAÇÃO DO
CÁLCULO DO ALINHAMENTO DE EIXOS PROPULSORES

Yuri de Souza Duarte

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO
INSTITUTO ALBERTO LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E
PESQUISA DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO
RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM
ENGENHARIA OCEÂNICA.

Orientador: Luiz Antonio Vaz Pinto

Aprovada por: Prof. Luiz Antonio Vaz Pinto

Dr. Luiz Augusto Rocha Baptista

Prof. Fernando Augusto Noronha Castro Pinto

Prof. Ulisses Admar Barbosa Vicente Monteiro

Dr. Antonio Carlos Ramos Troyman

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

FEVEREIRO DE 2022

Duarte, Yuri de Souza

Método da Evolução Diferenciada para a Otimização do Cálculo do Alinhamento de Eixos Propulsores/ Yuri de Souza Duarte. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2022.

XIV, 114 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Luiz Antonio Vaz Pinto

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia Oceânica, 2022.

Referências Bibliográficas: p. 83-86.

1. Eixos Propulsores. 2. Cálculo do Alinhamento. 3. Otimização. I. Pinto, Luiz Antonio Vaz. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Oceânica. III. Título.

Dedico esse trabalho a Deus, à minha esposa Daniele e às minhas filhas, Ana Luísa e Isabela, por acreditarem e me apoiarem na realização desse sonho, compreendendo em todos os momentos minha ausência e dedicação voltada aos estudos.

Agradecimentos

Gostaria de agradecer a Deus, por todos os seus planos para minha vida.

A minha esposa Daniele por sempre acreditar e apoiar-me nos momentos mais difíceis ao longo de toda nossa vida juntos.

A Marinha do Brasil por oferecer mais uma oportunidade de qualificação profissional.

À Diretoria de Engenharia Naval (DEN) pela liberação em tempo integral de minhas atividades para dedicar-me totalmente ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu orientador na Marinha do Brasil, o Capitão de Corveta (EN) Thiago da Silva Lopes, pelas orientações.

Ao meu orientador acadêmico, Prof. Dr. Luiz Antonio Vaz Pinto, pelos conselhos, orientações e por acreditar na realização deste trabalho.

Ao engenheiro Luiz Augusto Rocha Baptista, pelas orientações fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e funcionários do Laboratório de Ensaio Dinâmico e Análise de Vibração (LEDAV), da COPPE/UFRJ, pela estrutura física disponibilizada e pela amizade construída.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

MÉTODO DA EVOLUÇÃO DIFERENCIADA PARA A OTIMIZAÇÃO DO CÁLCULO DO ALINHAMENTO DE EIXOS PROPULSORES

Yuri de Souza Duarte

Fevereiro/2022

Orientador: Luiz Antonio Vaz Pinto

Programa: Engenharia Oceânica

O presente trabalho apresenta em detalhes uma metodologia de alinhamento que consistiu na utilização do método dos elementos finitos na modelagem de uma linha de eixo e no desenvolvimento de um algoritmo utilizado para a otimização do cálculo do alinhamento de eixos propulsores, empregando o método de otimização Evolução Diferenciada, desenvolvido por STORN e PRICE (1997). Para a otimização do cálculo, foram utilizados os critérios de alinhamento estabelecidos pela SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers), onde esses critérios foram inseridos no desenvolvimento do algoritmo. Foram demonstrados quatro exemplos de aplicação do algoritmo na determinação do conjunto de deslocamentos dos mancais, a fim de se obter um alinhamento adequado. Uma análise da condição final de alinhamento de cada exemplo foi realizada. Os cálculos de alinhamento realizados para as linhas de eixo obtiveram sucesso e atenderam aos critérios estabelecidos pela SNAME. O trabalho demonstrou que a aplicação do algoritmo foi eficiente na otimização do alinhamento de eixos propulsores.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

DIFFERENTIAL EVOLUTION METHOD FOR PROPELLER SHAFTS
ALIGNMENT CALCULATION OPTIMIZATION

Yuri de Souza Duarte

February/2022

Advisor: Luiz Antonio Vaz Pinto

Department: Ocean Engineering

In this work, an alignment methodology is presented in detail, which consisted in the use of finite element method in the modeling of a shaft line and in the development of an algorithm used to optimize the propeller shafts alignment calculation, using the Differential Evolution optimization method, developed by STORN and PRICE (1997). For the calculation optimization, the alignment criteria established by SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers) were used, where these criteria were inserted in the development of the algorithm. Four examples of application of the algorithm were demonstrated in the bearings displacements determination in order to obtain an adequate alignment. An analysis of the final alignment condition of each example was performed. Alignment calculations for these shaft lines were successfully performed and met the criteria established by SNAME. The work showed that the application of the algorithm was efficient in alignment optimizing of propeller shafts.

Sumário

1. Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivo	2
1.3 Organização da Dissertação	2
2. Revisão Bibliográfica	4
2.1 Alinhamento de Eixos Propulsores	4
2.2 Otimização no Cálculo do Alinhamento	6
3. Fundamentação Teórica.....	9
3.1 Sistema de Propulsão	9
3.2 Alinhamento de eixo	10
3.3 Alinhamento em eixos propulsores	11
3.3.1. Fatores que afetam o alinhamento de eixos propulsores	12
3.3.2. Importância do Alinhamento	14
3.4 Critérios para Alinhamento	15
3.5 Otimização	16
3.5.1. Introdução	16
3.5.2. Definições	17
3.5.3. Métodos de Otimização	18
3.5.4. Métodos Determinísticos	19
3.5.5. Métodos Heurísticos	22
4. Alinhamento de Eixos: Metodologia.....	29
4.1 Análise da condição inicial	29
4.2 Determinação dos coeficientes de influência	30
4.3 Determinação dos deslocamentos a serem aplicados aos mancais	31
4.4 Análise do alinhamento após a aplicação dos deslocamentos.....	32
5. Desenvolvimento do Algoritmo	34
5.1 Leitura dos dados de entrada.....	34
5.2 Definição dos limites de cada critério de alinhamento	35
5.3 Definição das restrições da execução do alinhamento	35
5.4 Transformação dos dados de entrada em Escalares	35
5.5 Definição do Critério de Parada.....	35
5.6 Geração da População Inicial.....	36

5.7	Geração da População Mutada.....	36
5.8	Substituição dos indivíduos fora das restrições de alinhamento.....	37
5.9	Alteração dos indivíduos para a inclusão da condição dos mancais fixos.....	38
5.10	Cálculo das funções objetivo para cada indivíduo da população.....	38
5.11	Teste dos indivíduos de acordo com os limites de cada critério.....	39
5.12	Geração da População Cruzada.....	39
5.13	Reinício do ciclo iterativo.....	39
5.14	Fim do ciclo iterativo.....	40
5.15	Geração de grupos de soluções.....	40
5.16	Teste das soluções encontradas.....	41
5.17	Remoção das soluções repetidas.....	42
5.18	Inclusão dos deslocamentos referentes à dilatação térmica.....	42
5.19	Cálculo da condição final para as soluções encontradas.....	42
5.20	Apresentação dos resultados obtidos.....	43
5.21	Exportação dos dados do Processamento.....	43
6.	Resultados e Discussões.....	45
6.1	Corvetas Classe “Inhauma”.....	45
6.1.1.	Modelagem.....	46
6.1.2.	Otimização.....	49
6.1.3.	Comparação com o Cálculo Original.....	51
6.1.4.	Resultados.....	53
6.1.5.	Discussão.....	55
6.2	Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.....	55
6.2.1.	Modelagem.....	56
6.2.2.	Otimização.....	58
6.2.3.	Resultados.....	60
6.2.4.	Comparação com estudo de BAPTISTA (1993).....	61
6.2.5.	Discussão.....	62
6.3	Navio Tanque.....	63
6.3.1.	Modelagem.....	63
6.3.2.	Otimização.....	65
6.3.3.	Resultados.....	68
6.3.4.	Comparação com estudo de BAPTISTA (1993).....	70

6.3.5.	Discussão	71
6.4	Navio Mercante – Casco Verolme - B72	72
6.4.1.	Modelagem	72
6.4.2.	Otimização	74
6.4.3.	Resultados	77
6.4.4.	Comparação com estudo de BAPTISTA (1993)	78
6.4.5.	Discussão	79
7.	Conclusões e Recomendações	81
7.1	Conclusões	81
7.2	Sugestões Para Trabalhos Futuros	82
	Referências Bibliográficas	83
	Apêndice A - Algoritmo de Otimização	87
	Apêndice B – Arranjo da Linha de Eixo da Corveta Classe “Inhaúma”	97
	Apêndice C – Relatórios Gerados Pelo Processo de Otimização	99

Lista de Figuras

Figura 3.1: Arranjo típico de uma linha de eixo.....	10
Figura 3.2: Desalinhamento Angular e Radial.	10
Figura 3.3: Comportamento para as condições de carregamento ŠVERKO (2003).	13
Figura 3.4: Deslocamento devido à deformação no casco KORBETIS (2014).	14
Figura 3.5: Classificação dos métodos de otimização.	19
Figura 3.6: Fluxograma básico do Algoritmo Genético.	23
Figura 3.7: Operação de Cruzamento.	24
Figura 4.1: Mancais concêntricos.	29
Figura 4.2: Obtenção dos coeficientes de influência.	31
Figura 5.1: Ilustração do Processo de Mutação.	37
Figura 5.2: Processo Iterativo.	40
Figura 5.3: Processo de geração do Grupo de Soluções.	41
Figura 5.4: Fluxograma do Algoritmo de Otimização de Deslocamentos dos Mancais.	44
Figura 6.1: Elemento de pórtico plano.	46
Figura 6.2: Arranjo da linha de eixo – Corvetas da Classe “Inhaúma”.....	47
Figura 6.3: Arranjo da linha de eixo – Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.....	56
Figura 6.4: Arranjo da linha de eixo – Navio Tanque.	64
Figura 6.5: Variação da reação do mancal 1.	67
Figura 6.6: Variação da diferença de carga nos mancais 3 e 4.....	68
Figura 6.7: Variação da inclinação no mancal 1.	68
Figura 6.8: Arranjo da linha de eixo – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	72
Figura 6.9: Arranjo da linha de eixo na nova configuração - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	75

Lista de Tabelas

Tabela 6.1. Principais características da linha de eixo.	46
Tabela 6.2 - Valores na condição inicial – Corvetas da Classe “Inhaúma”.	48
Tabela 6.3 – Coeficientes de Influência – Corvetas da Classe “Inhaúma”.	48
Tabela 6.4. Soluções encontradas - Corvetas Classe “Inhaúma”.	50
Tabela 6.5 – Reações dos mancais – Cálculo Original.....	51
Tabela 6.6 – Matriz de influência das reações – Cálculo Original.....	52
Tabela 6.7 – Resultado das reações dos mancais – Cálculo Original.....	52
Tabela 6.8 – Comparação entre os resultados - Corvetas Classe “Inhaúma”.....	53
Tabela 6.9 - Diferença entre as reações dos mancais da engrenagem redutora.....	54
Tabela 6.10 - Resultados das reações dos mancais - Corvetas Classe “Inhaúma”.....	54
Tabela 6.11 – Momento fletor na linha de eixo - Corvetas Classe “Inhaúma”.	54
Tabela 6.12 – Momento fletor e Força cortante máximos- Corvetas Classe “Inhaúma”.	55
Tabela 6.13 - Valores na condição inicial – Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”....	57
Tabela 6.14 – Coeficientes de Influência – Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.....	57
Tabela 6.15 – Soluções encontradas - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.....	59
Tabela 6.16 - Resultados das reações dos mancais - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.	60
Tabela 6.17 – Momento fletor na linha de eixo - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.	61
Tabela 6.18 – Momento fletor e força cortante máximos - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.	61
Tabela 6.19 - Comparação entre os resultados – Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.	62
Tabela 6.20 - Valores na condição inicial – Navio Tanque.....	64
Tabela 6.21 – Matrizes dos Coeficientes de Influência – Navio Tanque.....	65
Tabela 6.22 – Deslocamentos devido à dilatação térmica - Navio Tanque.....	66
Tabela 6.23 - Deslocamentos a serem aplicados nos mancais - Navio Tanque.	66
Tabela 6.24 - Diferença entre as reações dos mancais da engrenagem redutora.....	69
Tabela 6.25 - Resultados das reações dos mancais – Navio Tanque.....	69
Tabela 6.26 - Momento fletor ao longo da linha de eixo – Navio Tanque.....	69

Tabela 6.27 - Momento fletor e força cortante máximos – Navio Tanque.	70
Tabela 6.28 - Inclinação no mancal do tubo telescópico – Navio Tanque.....	70
Tabela 6.29 - Comparação entre os resultados – Navio Tanque.	71
Tabela 6.30 - Condição inicial – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	73
Tabela 6.31 – Coeficientes de Influência – Navio Mercante – Casco Verolme – B72..	73
Tabela 6.32 – Soluções Iniciais– Navio Mercante – Casco Verolme – B72.....	74
Tabela 6.33 - Resultados na nova configuração – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	75
Tabela 6.34 –Coeficientes de Influência – Navio Mercante – Casco Verolme – B72..	76
Tabela 6.35 – Soluções encontradas - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	76
Tabela 6.36 - Reação nos mancais - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.....	77
Tabela 6.37 - Momentos fletores - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	77
Tabela 6.38 - Momento fletor e força cortante máximos - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	78
Tabela 6.39 - Inclinação no mancal do tubo telescópico - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	78
Tabela 6.40 - Comparação entre resultados – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.	79

Lista de Símbolos

Letras

x	Vetor das variáveis de projeto	-
α	Passo de procura	-
k	Número da interação	-
d_k	Direção de busca da interação k	-
∇U	Gradiente da função objetivo	-
γ_k	Coefficiente de Conjugação	-
u_i^k	O i-ésimo indivíduo da k-ésima interação	-
v_i^{k+1}	Vetor que confere as características individual e social	-
ΔE	Alteração de energia	-
K_b	Constante de Boltzmann	-
T_i	Temperatura Inicial	-
T_f	Temperatura Final	-
K_{ij}	Coefficiente de influência do mancal i sobre o mancal j	-
δ_i	Deslocamento do mancal i	-
f_j	Mudança no valor da reação do mancal j devido ao deslocamento δ_i	-
P_i	Vetor de um parâmetro para a condição final	-
P_i^a	Vetor de um parâmetro para a condição inicial	-
S_{ij}	Matriz do coeficiente de influência do referido parâmetro	-
D_j	Vetor de deslocamento dos mancais	-

1. Introdução

1.1 Contextualização

O desalinhamento da linha de eixo causa sérios danos ao sistema de propulsão de uma embarcação. Na década de 1960 descobriu-se que um eixo desalinhado era capaz de causar danos nos dentes da engrenagem redutora. Naquela época a maioria das linhas de eixo possuíam muitos mancais e um alinhamento concêntrico era considerado um alinhamento adequado. A partir daquela época, a análise computacional foi utilizada para a determinação das condições de alinhamento da linha de eixo e com isso deu-se início a uma série de estudos sobre fatores que influenciam no alinhamento, assim como formas para o cálculo do alinhamento da linha de eixo.

De acordo com o Manual de Alinhamento Practices And Procedures for The Alignment of Marine Main Propulsion Shafting Systems, da *Society of Naval Architects and Marine Engineers* (SNAME), o objetivo do cálculo do alinhamento é ter conhecimento de como a linha de eixo irá se comportar durante as diversas condições de operação do navio e garantir que o seu alinhamento esteja dentro dos limites estabelecidos para um funcionamento adequado de todos os seus componentes.

Como resultado do conhecimento acumulado, os estaleiros construíram embarcações com cada vez menos problemas de alinhamento no eixo propulsor. No entanto, ainda ocorrem falhas devido ao desalinhamento e o alinhamento do eixo continua sendo uma tarefa desafiadora para estaleiros e projetistas.

Atualmente vêm sendo estudados novos métodos de realizar o cálculo do alinhamento de forma mais eficiente e mais confiável. A utilização de métodos de otimização para auxiliar no cálculo do alinhamento tem se mostrado uma alternativa viável e muito eficaz nesse contexto. Muitos estudos têm sido realizados com o intuito de se conhecer as melhores formas de aplicação destes métodos.

1.2 Objetivo

O alinhamento de eixos de navios é alcançado por diferentes conjuntos de soluções (deslocamentos verticais dos mancais) e deve obedecer a alguns critérios. A principal contribuição desse trabalho foi a aplicação de um método de otimização na escolha destes deslocamentos verticais e a inclusão dos critérios estabelecidos pela SNAME na determinação destas soluções. Esse objetivo foi alcançado através do desenvolvimento de um algoritmo empregando o método de otimização Evolução Diferenciada (DE), apresentado por STORN e PRICE (1997), onde foi demonstrado, por meio de testes, que o método possuía melhor desempenho que outros métodos de otimização conhecidos.

O DE foi escolhido por ser um método de otimização simples e ao mesmo tempo poderoso, possuindo poucos parâmetros de controle para conduzir a otimização, além de permitir que as variáveis sejam otimizadas como números reais, ou seja, sem a necessidade de transformação das variáveis em números binários, o que tornou sua utilização mais adequada na otimização de alinhamento de eixo.

1.3 Organização da Dissertação

A fim de obter uma melhor compreensão da linha de raciocínio desenvolvida neste trabalho, apresenta-se a seguir um índice explicativo, contendo as principais ideias de cada capítulo.

- O Capítulo 1 apresenta a contextualização da evolução e do desenvolvimento dos estudos e das práticas utilizadas no cálculo do alinhamento de eixo. Este Capítulo contém também a apresentação dos objetivos do trabalho.
- O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, fundamentos anteriores consagrados, consistindo dos principais estudos feitos até este momento a respeito dos fatores que influenciam no alinhamento de um eixo propulsor e dos métodos de otimização utilizados.

- O Capítulo 3 apresenta toda a fundamentação teórica que serviu de base para este trabalho, as principais características de um sistema de propulsão, a importância e as consequências do alinhamento na linha de eixo, assim como os conceitos utilizados em todo o procedimento de cálculo do alinhamento de eixo. Também são apresentados os principais conceitos sobre otimização e seus métodos mais conhecidos na literatura.
- O Capítulo 4 apresenta a metodologia do alinhamento com a utilização do algoritmo e todas as etapas que são realizadas no processo de otimização.
- O Capítulo 5 explica como foi o desenvolvimento do algoritmo, todas as premissas adotadas, modificações e implementações necessárias para a solução do problema do alinhamento de eixos propulsores.
- O Capítulo 6 apresenta exemplos de aplicação da metodologia. Para isso, foram feitas simulações para quatro embarcações com diferentes configurações de linha de eixo.
- O Capítulo 7 apresenta uma análise conclusiva a respeito do estudo realizado e as considerações finais, mostrando as contribuições que o trabalho trouxe a respeito do tema e apresenta as possibilidades de futuras pesquisas que podem ser realizadas a partir deste trabalho.

2. Revisão Bibliográfica

2.1 Alinhamento de Eixos Propulsores

RAO (1991) demonstrou um método de alinhamento de eixo propulsor a partir da instalação de extensômetros e aplicação de cálculo com elementos finitos. Nesse método, as deformações por flexão do eixo foram medidas e os valores usados para determinar os momentos fletores ao longo da linha de eixo do navio. A partir dos momentos fletores medidos, as reações nos mancais foram calculadas pelo método do equilíbrio estático. A partir das informações obtidas pelos extensômetros, foi possível calcular as reações ótimas em cada mancal e a compensação necessária em cada um deles. O processo de alinhamento do eixo envolveu ajustar os mancais adequadamente para que as reações se aproximassem dos valores desejados. O trabalho mostrou que a técnica de utilização de extensômetros é mais rápida e prática do que métodos anteriores como, o do macaco-hidráulico. Mostrou também que o método é capaz de verificar o alinhamento atual do eixo.

BAPTISTA (1993) realizou um estudo a respeito do cálculo do alinhamento de eixos propulsores, detalhando os métodos para o cálculo de alinhamento. Inicialmente foram demonstrados os métodos de cálculo desenvolvidos nas décadas de 40 e 50 que utilizavam na sua formação o *método dos três momentos* e a equação geral dos momentos em cada apoio. Depois foi apresentada a utilização do *método dos elementos finitos* no cálculo do alinhamento, mostrando que o método pode ser vantajoso comparando com os primeiros. Por fim, foram apresentados alguns exemplos do cálculo do alinhamento, executados pelo método convencional e por elementos finitos, sendo os seus resultados listados e comparados em tabelas e gráficos.

LEI SHI *et al.* (2010) analisaram a influência das deformações do casco do navio no alinhamento da linha de eixo. Para isso, realizaram uma modelagem em elementos finitos de todo o casco da embarcação e consideraram, como fatores que mais influenciam nas deformações, o peso e a carga do navio, a condição de mar e a temperatura externa. Foi realizado o cálculo do alinhamento do eixo considerando a

influência de cada um destes fatores no deslocamento vertical dos mancais da linha de eixo. Por fim, os autores concluíram que, dos três fatores citados, o estado de carregamento do navio é o que tem maior influência nas deformações do casco e conseqüentemente no alinhamento do eixo. O estado de mar também exerce influência no alinhamento, porém menos significativa do que o carregamento. Diferentemente, a mudança de temperatura externa apresenta grande influência no alinhamento, causando grande variação nas reações dos mancais entre o inverno e o verão.

BATRAK *et al.* (2013) fizeram uma abordagem a respeito das formas de se determinar as deformações no casco da embarcação e as cargas geradas pelo hélice, e para isso utilizaram o software ShaftDesigner. Através do software foi possível determinar o deslocamento sofrido por cada mancal devido à deformação do casco do navio. Também compararam as diferentes metodologias de cálculo para as cargas do hélice e concluíram que não há uma metodologia confiável e adotada universalmente para a determinação destas cargas e que seriam necessários mais estudos para uma definição melhor. Os autores também constataram que, quando o procedimento de alinhamento do eixo ocorre em dique seco, as cargas causadas pelos suportes da docagem devem ser levadas em consideração para a determinação da deformação do casco.

KORBETIS *et al.* (2014) analisaram a influência das deformações do casco sobre o alinhamento da linha de eixo da embarcação. Para isso eles consideraram três situações distintas de carregamento do navio: navio em lastro, navio parcialmente carregado e navio totalmente carregado. Para determinar a deformação de cada situação, os autores fizeram a modelagem em elementos finitos da estrutura do casco. Inicialmente os autores calcularam o valor da reação dos mancais para a condição da linha de eixo concêntrica. De posse das deformações calculadas, os autores determinaram o valor de deslocamento que cada mancal deveria sofrer a fim de atender as condições de carregamento citadas. Por fim, foi calculada e comparada a reação final nos mancais para cada condição. Os autores chegaram ao resultado que as diferenças nas forças de reação nos mancais para cada condição de carregamento não foram muito

relevantes. Sendo assim, eles concluíram que se o alinhamento na condição inicial for adequado ele apresenta um bom desempenho em outras condições de carregamento.

LEE (2018) investigou os efeitos da força hidrodinâmica do hélice no movimento do eixo por meio de medições realizadas com extensômetros e sensores. Foram instalados sete extensômetros ao longo do eixo para a medição da flexão, dois sensores de deslocamento sem contato para medições de deslocamento vertical e horizontal e um sensor para a medição da rotação do eixo. As medições foram realizadas para duas condições do navio: tanque de ré vazio e cheio. Foi observado que houve deslocamento do eixo para o lado inferior esquerdo à medida que se aumentava a carga do motor nas duas condições do navio. A direção do movimento do eixo na medida de um dos extensômetros foi o oposto da direção do movimento do eixo na posição do hélice, indicando que isso foi devido à força hidrodinâmica do hélice. Foi observado também que, quando o navio estava navegando existiam forças atuando no hélice que elevavam o eixo na região da popa, reduzindo a possibilidade de avaria no mancal do tubo telescópico.

2.2 Otimização no Cálculo do Alinhamento

ŠVERKO (2003) utilizou o Algoritmo Genético (GA) para desenvolver um algoritmo capaz de realizar a otimização do alinhamento do eixo propulsor de uma embarcação. A ideia da otimização era encontrar um conjunto de deslocamentos dos mancais que fossem satisfatórios para o alinhamento da linha de eixo. O algoritmo desenvolvido pelo autor, diferentemente do GA original, não buscava apenas “otimizar os parâmetros” e sim, buscar soluções próximas do ótimo, o que o torna mais viável para a aplicação, não sendo, portanto necessária a convergência total, mas sim um conjunto de soluções dentro do domínio. O algoritmo tinha como objetivo final encontrar soluções em que as restrições, parâmetros e critérios fossem satisfeitos. O autor utilizou na análise duas condições de carregamento do navio (em lastro e plena carga) e usou como parâmetros os deslocamentos nos mancais causados pelas deformações no casco para cada condição. O autor concluiu que o algoritmo

desenvolvido foi capaz de encontrar um número desejado de soluções aceitáveis dentro das restrições impostas, em um tempo relativamente curto.

BATRA *et al.* (2007) realizaram o cálculo do alinhamento do eixo com o navio em operação. Para isso, eles utilizaram extensômetros instalados ao longo do eixo a fim de determinar a condição de alinhamento atual através da obtenção do momento fletor atuante no eixo. Os valores obtidos pelos extensômetros foram inseridos em um algoritmo que, em conjunto com o cálculo de elementos finitos, fez a avaliação da condição de alinhamento do eixo. Após o cálculo das condições iniciais de alinhamento, o algoritmo determinou os deslocamentos necessários nos mancais para que se obtivessem as condições de carregamento dentro dos critérios estabelecidos. Para a validação do algoritmo, foi realizado um experimento que consistiu em um protótipo de um eixo com mancais ajustáveis verticalmente e extensômetros instalados ao longo do eixo com aplicação de cargas pontuais através de pesos pendurados. O autor concluiu que o procedimento de alinhamento feito através de medições de extensômetros e cálculo de deslocamentos por otimização mostrou-se rápido e eficaz.

LI REN *et al.* (2010) também realizaram a otimização do alinhamento de um eixo utilizando o algoritmo genético. Inicialmente, foi usado o *método dos três momentos* para determinar o valor das reações nos mancais e da matriz de influência do deslocamento dos mancais. Na formulação do algoritmo, o valor máximo para um mancal e o valor médio das reações nos mancais foram usados como parâmetros de alinhamento da linha de eixo. O algoritmo utilizou como variáveis da função os deslocamentos de cada mancal. Também foram considerados como restrições os valores máximos e mínimos permitidos nos mancais. Como resultado, foram obtidos os valores de deslocamento que cada mancal deveria sofrer para equilibrar as reações. Foram obtidos também os novos valores de reação dos mancais e de momentos fletores atuantes no eixo.

WANG *et al.* (2010) elaboraram um algoritmo de otimização para alinhamento de eixo que se baseia nos coeficientes de influência do eixo. Para realizar a trabalho, os autores determinaram as matrizes dos coeficientes de influência referentes à reação nos

mancais, ao momento fletor, e às forças cortantes. Diante destas informações, os autores calcularam as cargas, os momentos e as forças cortantes “ótimos” e os respectivos deslocamentos verticais dos mancais. Com os resultados obtidos, eles concluíram que o algoritmo baseado nos coeficientes de influência é viável e eficaz para a otimização dos parâmetros citados.

HO *et al.* (2016) desenvolveram um algoritmo híbrido baseado no algoritmo genético e no método Taguchi a fim de realizar a otimização dos deslocamentos dos mancais no alinhamento de uma linha de eixo. A ideia de desenvolver um algoritmo híbrido teve como objetivo buscar uma maior robustez e velocidade de convergência na busca por soluções. Os autores utilizaram como critério de alinhamento a tensão normal no eixo e a força cortante atuante. Eles consideraram na análise as condições de operação a quente e a frio da embarcação. Para testar o algoritmo, eles realizaram o alinhamento de um navio e compararam com o algoritmo genético simples. Como resultado final, os autores concluíram que o algoritmo desenvolvido teve melhor desempenho na otimização dos deslocamentos e que em alguns casos o algoritmo genético simples não foi capaz de realizar a otimização.

URSOLOV *et al.* (2019) analisaram a influência do filme de óleo dos mancais no alinhamento do eixo. Foi elaborado um algoritmo que utilizava dois métodos de otimização (método do enxame de partículas e o método do ponto interior). Para analisar a influência do filme de óleo, o algoritmo permitia calcular o momento de flexão do eixo levando em consideração a lubrificação de todos os mancais da linha de eixo estudada. Por fim, os autores conseguiram avaliar a influência da lubrificação nos valores das reações dos mancais, deflexões do eixo e pressão hidrodinâmica máxima no mancal do tubo telescópico.

3. Fundamentação Teórica

3.1 Sistema de Propulsão

De acordo com SHIGLEY (1983), um eixo é um elemento rotativo ou estacionário, geralmente de seção transversal circular, tendo montado sobre ele elementos como engrenagens, polias, volantes, manivelas, rodas dentadas e outros elementos de transmissão. Os eixos podem estar sujeitos à flexão, tensão, compressão ou cargas de torção, agindo individualmente ou em conjunto.

Um sistema de propulsão naval tem como objetivo principal transmitir a potência dos motores ou da engrenagem redutora ao hélice e, conseqüentemente, transmitir o empuxo desenvolvido pelo hélice ao casco do navio.

Para desempenhar sua função principal, o sistema de propulsão é composto por elementos essenciais ao seu funcionamento, porém esta composição pode variar para cada tipo de embarcação. Os principais elementos que compõem um sistema de propulsão são:

- Motor de Combustão Principal (MCP);
- Engrenagem Redutora;
- Eixo Intermediário;
- Eixo Propulsor;
- Mancal de Escora;
- Mancal Intermediário;
- Mancal do Tubo Telescópico;
- Acoplamento;
- Selo;
- Mancal Estrutural (pé de galinha); e
- Hélice.

A Figura 3.1 ilustra uma configuração típica de uma linha de eixo com alguns de seus componentes.

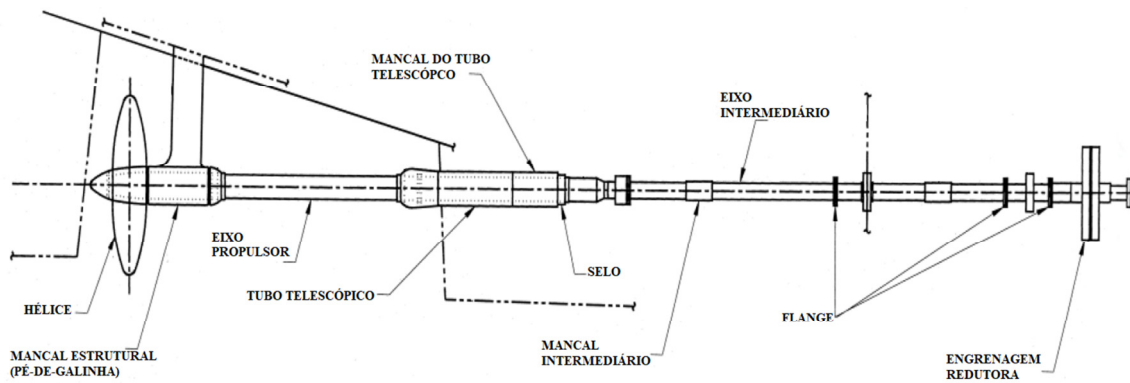


Figura 3.1: Arranjo típico de uma linha de eixo.

3.2 Alinhamento de eixo

O bom senso sugere que os mancais que suportam o eixo de propulsão de uma embarcação deveriam ser alinhados concentricamente, uma vez que deslocar um mancal em relação ao outro iria flexionar o eixo.

Segundo XU (1993), em equipamentos industriais, como bombas e compressores, os eixos são tipicamente alinhados com os seus elementos de acionamento, de forma que fiquem colineares e, conseqüentemente, estão sujeitos a desalinhamentos angular e radial, conforme mostrado na Figura 3.2. No entanto, este tipo de abordagem nem sempre é apropriada para uma linha de eixo, pois alguns mancais podem não estar sustentando carga.

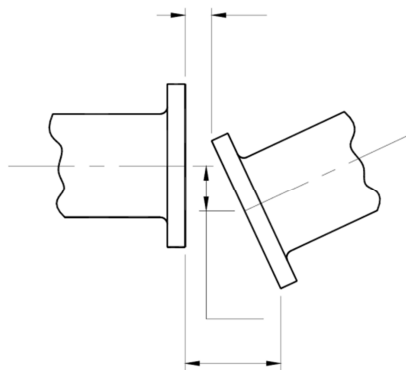


Figura 3.2: Desalinhamento Angular e Radial.

3.3 Alinhamento em eixos propulsores

BATRAK *et al.* (2013) afirmaram que o alinhamento de eixo de propulsão pode ser definido como o deslocamento vertical da posição dos mancais em relação à linha de referência do eixo que garanta uma distribuição de carga ideal nos mancais e, ao mesmo tempo, garanta que as tensões e deflexões do eixo estejam dentro dos limites especificados. Nesse sentido, não seria exagero afirmar que o que entendemos como “alinhamento” muitas vezes consiste num “desalinhamento” da linha de eixo, uma vez que o resultado é obtido pela alteração da posição vertical dos mancais que sustentam o eixo.

Este procedimento de determinação dos deslocamentos a serem aplicados aos mancais é denominado Cálculo do Alinhamento. Duas teorias são convencionalmente usadas no cálculo: A “Teoria da Curva Uniforme”, apresentada por MANN (1965) e a do “Alinhamento de Eixo Ideal”, apresentada por LARSEN (1981). Na “Teoria da Curva Uniforme”, deslocamentos verticais são impostos aos mancais a fim de se obter uma distribuição de carga mais uniforme sobre os mancais. Segundo BRADSHAW (1974), esta teoria tem esse nome devido ao fato de que a melhor condição de alinhamento é alcançada quando a linha elástica do eixo é uniforme ou regular e para isso alguns mancais devem ter sua elevação alterada. A segunda teoria, além do princípio utilizado na primeira, considera todas as possíveis influências externas atuando sobre a linha de eixo, de forma a atingir uma condição de alinhamento racional ou ótima que compense os fatores externos. Na prática, as duas teorias são usadas conjuntamente.

O cálculo do alinhamento de eixo é um procedimento que pode gerar um número infinito de deslocamentos possíveis. De acordo com ŠVERKO (2003), a grande dificuldade está em se determinar quais destes deslocamentos devem ser realizados em cada mancal. A dificuldade aumenta significativamente à medida que as soluções devam satisfazer uma série de critérios adicionais, tais como tensão de flexão máxima, forças cortantes, etc.

3.3.1. Fatores que afetam o alinhamento de eixos propulsores

Para que se possa realizar um alinhamento adequado, qualquer efeito que possa deslocar um ou mais mancais em relação aos outros deve ser considerado. Os principais fatores que afetam o alinhamento são:

a) Flexibilidade da linha de eixo – Como os navios são flexíveis por natureza, há um movimento contínuo dos suportes do sistema de propulsão, logo, a linha de eixo tem seu alinhamento influenciado por esse movimento. Sendo assim, a linha de eixo deve ser mais flexível que o navio. Uma linha de eixo de grande diâmetro e curta possui maior rigidez e tende a ser mais sensível às mudanças do comportamento do navio. Por outro lado, uma linha de eixo longa e de pequeno diâmetro é mais flexível e tende a sofrer menos as consequências da flexibilidade do casco do navio.

b) Temperatura – A expansão térmica dos equipamentos e estruturas próximas à linha de eixo decorrente do fato do navio estar em operação causa um deslocamento relativo dos mancais, o que altera o alinhamento da linha de eixo. A dilatação térmica ocorre principalmente na região da engrenagem redutora ou nos motores com conexão direta, devido ao reservatório de óleo lubrificante quente localizado abaixo destes equipamentos. O vão entre os mancais destes equipamentos é pequeno, e assim a influência da deformação térmica é alta, fazendo com que uma pequena variação da temperatura altere o alinhamento original. Como normalmente o eixo é alinhado na condição fria, o alinhamento deve ser definido de forma que compense as deformações causadas pela dilatação térmica na região da engrenagem redutora, quando estiver na condição quente.

c) Desgastes dos mancais – Dependendo da configuração da linha de eixo da embarcação, podem existir mancais externos lubrificados a água. Mancais sujeitos a esta condição apresentam desgaste mais rápido do que os mancais internos lubrificados a óleo. Geralmente, o desgaste tende a diminuir as cargas nos mancais lubrificados a água, enquanto aumenta as cargas nos mancais internos, alterando, assim, a condição do alinhamento.

d) Deformações no casco – O casco de uma embarcação sofre deformações de diferentes maneiras. O carregamento do navio pode ter um impacto significativo no alinhamento do eixo, especialmente em navios que têm uma ampla gama de opções de carregamento. Na Figura 3.3, é possível observar o comportamento da linha de eixo para um navio carregado ou em lastro.

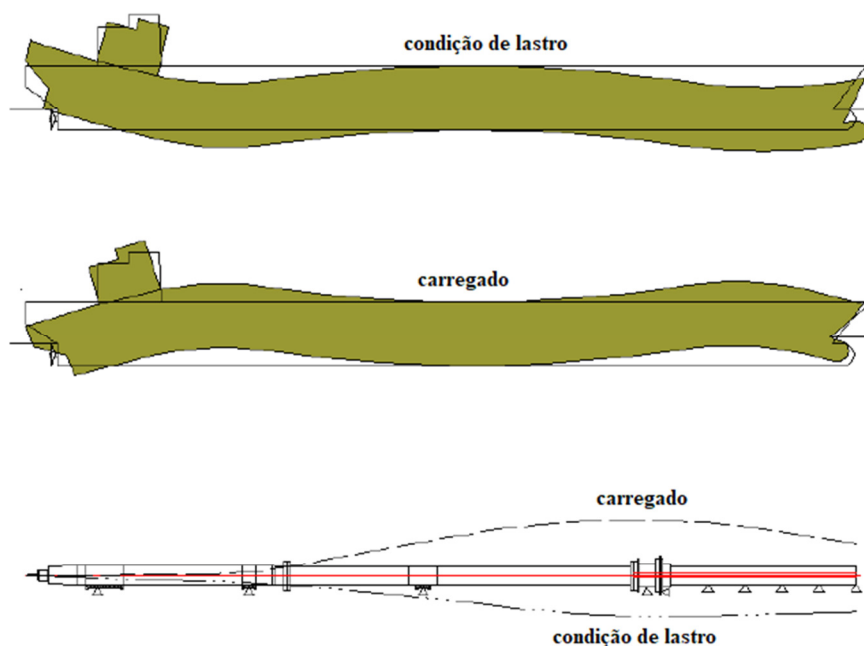


Figura 3.3: Comportamento para as condições de carregamento ŠVERKO (2003).

Cargas de lastro e cargas de combustível são frequentemente negligenciadas ao se considerar os fatores que afetam o alinhamento. A análise dos efeitos do carregamento do navio nas deformações do casco é uma tarefa difícil, o que explica esse fator ser frequentemente ignorado. Outro fator que contribui para a deformação do casco é o estado de mar em que o navio se encontra. Em geral, o estado de mar é considerado nas condições de tosamto (cristas da onda na proa e popa) e alquebramento (crista da onda a meia-nau). As temperaturas da água e do ambiente também influenciam na deformação do casco de uma embarcação. A Figura 3.4 ilustra como a deformação do casco afeta o alinhamento do eixo.

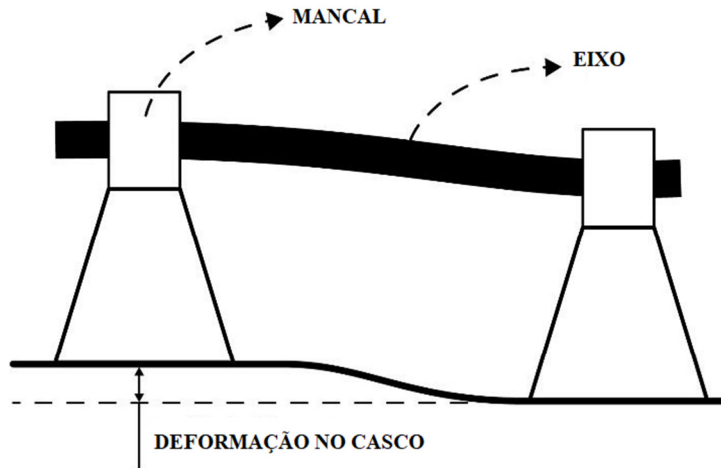


Figura 3.4: Deslocamento devido à deformação no casco KORBETIS (2014).

3.3.2. Importância do Alinhamento

Analisando do ponto de vista estático, o eixo de um sistema de propulsão pode ser considerado como uma viga hiperestática, por ser sustentada por múltiplos (mais do que dois) apoios. As posições destes mancais em relação à linha central do sistema, ou "deslocamentos", devem ser definidas de modo que os critérios de alinhamento estejam dentro dos limites aceitáveis, evitando a ocorrência de falha no eixo ou nos componentes do sistema.

De acordo com HARRINGTON (1992), os principais motivos para se buscar um alinhamento adequado são:

- a) Conexão do eixo com caixa redutora ou com o motor - Um dos principais objetivos do alinhamento é garantir que o valor das cargas nos mancais internos da engrenagem redutora ou do motor diretamente conectado esteja dentro do limite aceitável, de forma a evitar danos aos componentes internos. Além dos limites máximos e mínimos, a diferença de carga entre os mancais também deve ser levado em consideração. Este limite na diferença de carga busca evitar tensões nos dentes das engrenagens internas. Uma diferença grande entre as cargas nos mancais pode gerar tensões elevadas nos dentes, podendo ocasionar desgaste, corrosão ou falha.

- b) Sobrecarga nos mancais – Todo mancal tem um limite máximo de pressão permitida definida pelo fabricante. Um mancal que trabalha com uma carga acima desse limite de pressão pode sofrer desgaste prematuro do material ou até mesmo vir a falhar.
- c) Vibração do eixo – Determinadas condições de alinhamento podem acarretar mancais pouco carregados ou até mesmo descarregados. Nesta condição, o mancal descarregado faz com que os vãos dos mancais adjacentes a ele tornem-se um único vão. Esse aumento drástico do vão pode gerar uma excessiva vibração lateral no eixo.
- d) Limite de Tensões Mecânicas – Determinadas condições de alinhamento podem gerar ao longo da linha de eixo momentos fletores excessivos que podem ocasionar tensões internas no eixo acima da permitida e, conseqüentemente, falha no eixo.

3.4 Critérios para Alinhamento

A "Society of Naval Architects and Marine Engineers" - SNAME - possui uma publicação onde são apresentados os critérios utilizados para avaliar os resultados do cálculo do alinhamento de eixos propulsores. Esses critérios foram estabelecidos com base em publicações técnicas e de Sociedades Classificadoras. Quando os resultados do cálculo satisfazem esses critérios, garante-se que a condição de alinhamento selecionada garantirá um bom desempenho do sistema de propulsão, bem como sua segurança. Estes critérios foram adotados e incluídos no algoritmo desenvolvido neste trabalho, sendo apresentados a seguir:

- a) Diferença máxima nos mancais da engrenagem redutora - Normalmente o fabricante da engrenagem redutora informa qual a diferença máxima de carga que os mancais podem estar sujeitos. No entanto, se este valor não é informado, a regra geral é que a diferença não seja superior a 25% do somatório das cargas dos mancais.
- b) Carga máxima de cada mancal - A carga máxima permitida no mancal é resultado da pressão máxima suportada por ele, que normalmente é informada pelo fabricante, e da área projetada do mancal. Esta área corresponde ao produto do comprimento efetivo do mancal e do diâmetro externo do eixo. Algumas vezes o eixo não se acomoda em

toda a extensão do mancal, ficando inclinado em relação ao seu eixo longitudinal. Essa inclinação ocorre mais comumente no mancal externo do tubo telescópico ou no mancal do pé de galinha, devido à sua proximidade ao hélice.

c) Carga mínima de cada mancal - Conforme dito anteriormente, uma carga mínima é necessária para evitar vibração no eixo. No entanto, especificar uma carga mínima é uma tarefa arbitrária. Um mancal descarregado não é aceitável, pois aumenta a chance de ocorrência de vibração no eixo. Uma diretriz aceita, mas não obrigatória, é que a carga mínima não seja inferior a 50% da carga de projeto do mancal. A carga mínima deve ser estabelecida para cada caso específico.

d) Tensões mecânicas máximas - Atender ao critério de tensão do eixo é um objetivo de alta relevância, pois o risco de falha associado à excessiva tensão é grande. Para evitar que o eixo não exceda a tensão máxima permitida é necessário que se determine o momento fletor máximo permissível ao longo do eixo de acordo com a seção transversal de cada trecho.

e) Momento fletor e Força cortante máximos - Fabricantes de motores normalmente definem limites de momento fletor e força cortante no acoplamento com o eixo propulsor que, quando obedecidos, garantem que os componentes internos do motor não serão afetados pela condição de alinhamento selecionada.

3.5 Otimização

3.5.1. Introdução

De acordo com COLAÇO *et. al* (2006), a otimização pode ser definida como um conjunto de procedimentos que busca minimizar ou maximizar um determinada função, denominada função objetivo, a fim de se encontrar variáveis que irão resultar em um estado desejado.

Em um problema de otimização, as variáveis, que são chamadas de variáveis de projeto ou de decisão, estão sujeitas, ou não, a restrições de igualdade ou desigualdade.

Estas restrições definem a região de busca onde se espera encontrar as melhores soluções, denominada soluções ótimas.

Existem muitos métodos de otimização e cada um deles possui melhor desempenho dependendo do tipo de problema considerado. A escolha do método depende de uma série de características do problema a ser otimizado, principalmente do comportamento da função que o representa.

Para uma melhor compreensão a respeito deste tema, serão apresentados a seguir os principais termos utilizados na área de otimização.

3.5.2. Definições

Alguns termos são utilizados com frequência na literatura como forma de padronizar os conceitos aplicados ao tema. POLAK (1971) apresentou alguns destes conceitos como a seguir:

- a) **Função Objetivo** - Função a qual se pretende minimizar ou maximizar, podendo ser classificada como *multidimensional*, quando se pretende otimizar mais de uma variável, ou *unidimensional*.
- b) **Variáveis do Projeto** - São os parâmetros que se alteram durante o processo de otimização. Elas podem ser classificadas em dois tipos: variáveis de dimensionamento (contínuas ou discretas) e variáveis de decisão.
- c) **Restrições** - São as funções de igualdade e/ou desigualdade que descrevem e caracterizam as condições de limite do problema.
- d) **Espaço de Busca** - É o conjunto, espaço ou região que compreende as soluções possíveis ou viáveis do problema a ser otimizado, sendo caracterizado pelas funções de restrição.
- e) **Ponto Ótimo** - É o conjunto de valores para as variáveis do problema que permite maximizar ou minimizar a função objetivo, satisfazendo às restrições.

- f) **Valor Ótimo** – É o valor da função objetivo no ponto ótimo.
- g) **Ótimo Local** – É o conjunto de valores para as variáveis do problema que maximiza ou minimiza a função objetivo em um subespaço de espaço de busca.
- h) **Ótimo Global** – Se o espaço de busca apresentar vários pontos de ótimos locais, o maior (ou menor) valor entre eles é considerado o ótimo global.

3.5.3. Métodos de Otimização

Os métodos de otimização podem ser classificados em *métodos determinísticos*, quando possui um conjunto de entradas conhecido e do qual resultará um único conjunto de saídas, ou *heurísticos*, que pode ser entendido como um método no qual não há uma formulação matematicamente comprovada e que seu desenvolvimento é baseado em observações de fenômenos da natureza. Alguns destes métodos podem ser observados no esquema da Figura 3.5. A maioria dos métodos determinísticos é baseada no cálculo ou em aproximações de derivadas, necessitando de informações do vetor gradiente, seja procurando o ponto onde ele se anula ou usando a direção para a qual ele aponta. Segundo IZMAILOV & SOLODOV (2005), para utilizar este tipo de método, a função objetivo e as restrições precisam ser representadas por funções matemáticas ou relações funcionais, sendo que a função objetivo precisa ser contínua e diferenciável.

Métodos determinísticos baseiam-se teoremas que garantem sua convergência a soluções ótimas, não sendo estas necessariamente um ótimo global. As soluções encontradas por estes métodos são dependentes do ponto de referência escolhido para a busca. Normalmente seu desempenho é limitado quando se pretende trabalhar com problemas que possuem múltiplos ótimos locais.

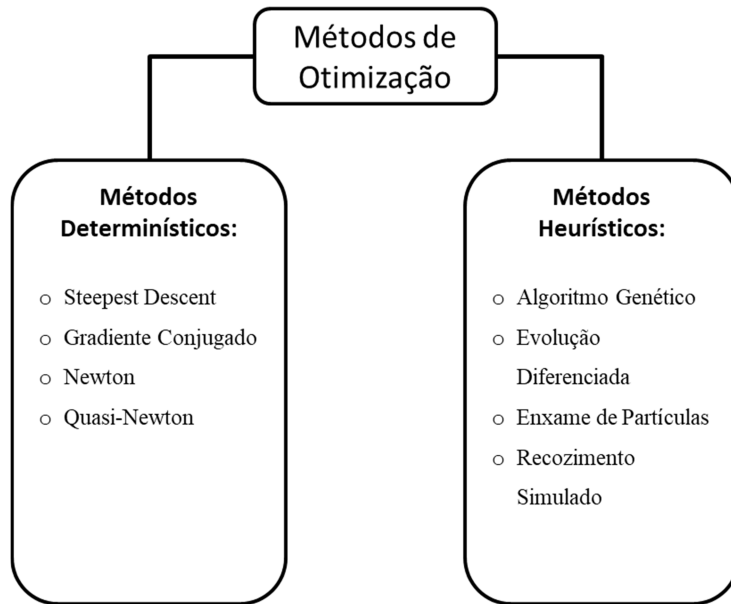


Figura 3.5: Classificação dos métodos de otimização.

3.5.4. Métodos Determinísticos

Os métodos determinísticos, também denominados de *métodos clássicos*, em geral são baseados no cálculo de derivadas de primeira ordem ou em aproximações destas, ou também no cálculo de derivadas parciais de segunda ordem. Conforme afirmado por COLAÇO *et. al* (2006), esses tipos de métodos, quando aplicados a problemas de minimização não linear, geralmente dependem da determinação de um procedimento iterativo, que, após um certo número de iterações, irá convergir para o mínimo ou máximo da função objetivo. O procedimento iterativo pode ser escrito conforme a Equação 3.1.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{d}_k \quad (3.1)$$

onde:

x – Vetor das variáveis de projeto;

α – Passo de procura;

d – Direção de busca; e

k – Número da interação.

A diferença entre os métodos determinísticos para solução de problemas de otimização consiste no modo de determinação do vetor d_k .

a) **Método Steepest Descent** - É um dos mais antigos e conhecidos métodos de minimização de funções, sendo bastante simples em termos computacionais, mas tem convergência lenta chegando muitas vezes a não convergir em um tempo razoável. É um método que utiliza poucas informações, exigindo apenas as derivadas de primeira ordem para o cálculo do gradiente. Como o gradiente aponta na direção de maior crescimento da função no ponto, o método procura em cada ponto caminhar na direção oposta ao gradiente. Portanto, a direção de busca é dada pela Equação 3.2.

$$\mathbf{d}_k = -\nabla U(\mathbf{x}_k) \quad (3.2)$$

onde ∇U é o gradiente da função objetivo.

b) **Método Gradiente Conjugado** - O método do gradiente conjugado apresenta melhor taxa de convergência em relação ao Método Steepest Descent, pois neste método a direção de busca é uma combinação linear da direção do gradiente na iteração atual com a direção da iteração anterior. De uma forma geral, a direção de busca é dada pela Equação 3.3.

$$\mathbf{d}_k = -\nabla U(\mathbf{x}_k) + (\gamma_k \mathbf{d}_{k-1}) \quad (3.3)$$

onde γ_k é o Coeficiente de Conjugação e tem como objetivo compensar magnitudes diferentes. Existem vários métodos para o cálculo de γ_k , sendo o Método de Fletcher-Reeves o mais usado. Neste método, o γ_k pode ser calculado pela Equação 3.4.

$$\gamma_k = \frac{\|\nabla U(\mathbf{x}_k)\|^2}{\|\nabla U(\mathbf{x}_{k-1})\|^2} \quad (3.4)$$

onde $\gamma_k = 0$ para $k = 0$.

c) **Método de Newton** – Enquanto o Steepest Descent e o Gradiente Conjugado usam o gradiente da função objetivo em um processo iterativo, o *método de Newton* usa informações da segunda derivada da função objetivo a fim de atingir uma taxa de convergência mais rápida. O princípio deste método é minimizar uma função f através de uma aproximação local por uma função quadrática.

Próximo de x_k , tem-se uma aproximação para $f(x)$ dada pela Série de Taylor truncada e calculada pela Equação 3.5.

$$f(x) \cong f(x_k) + \nabla f(x_k)(x - x_k) + 0,5(x - x_k)^T F(x_k)(x - x_k) \quad (3.5)$$

onde $F(x_k)$ é uma matriz Hessiana no ponto x_k .

O método é executado em um processo iterativo, conforme dado pela Equação 3.6.

$$x_{k+1} = x_k - \alpha_k [F(x_k)]^{-1} \nabla f(x_k) \quad (3.6)$$

Assim, a direção de busca é dada por: $[F(x_k)]^{-1} \nabla f(x_k)$ e o parâmetro α_k corresponde ao intervalo de busca.

Embora a taxa de convergência do método de Newton seja quadrática, o cálculo do Hessiano tem um custo computacional alto. Como resultado, foram desenvolvidos outros métodos que utilizam uma aproximação do Hessiano como forma de se ter um custo computacional menor.

d) **Métodos Quasi-Newton** - Nestes tipos de métodos, a matriz Hessiana que aparece no método de Newton é aproximada de forma que não envolva derivadas de segunda ordem. Normalmente, as aproximações para o Hessiano são baseadas nas primeiras derivadas. Como resultado, os métodos Quasi-Newton têm uma taxa de convergência mais lenta do que o método Newton, porém possuem custo computacional menor. O processo iterativo é dado pela Equação 3.7.

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k - \alpha_k [D(\mathbf{x}_k)]^{-1} \nabla f(\mathbf{x}_k) \quad (3.7)$$

onde $[D(\mathbf{x}_k)]^{-1}$ é a aproximação da matriz inversa do Hessiano. A forma de aproximação varia de acordo com os diferentes métodos, desde a mais simples, que se mantém fixa durante todo o processo iterativo, até as mais avançadas que implementam aproximações melhoradas baseadas nas informações anteriores, coletadas durante o processo.

3.5.5. Métodos Heurísticos

Diferentemente dos *métodos determinísticos*, os *métodos heurísticos* não possuem uma comprovação matemática na sua formulação e não utilizam a derivada da função objetivo. Eles imitam, de forma simplificada, fenômenos ou processos encontrados na natureza. Esses métodos de otimização usam a avaliação da função objetivo e introduzem no processo de otimização dados e parâmetros estocásticos. São apresentados a seguir alguns dos principais métodos deste grupo.

a) Algoritmo Genético – Sendo um dos métodos heurísticos mais conhecidos, o *Algoritmo Genético* é um método de otimização global que se baseia no processo de seleção natural das espécies. Seu uso foi popularizado por GOLDENBERG (1989), que apresentou boas soluções para problemas de engenharia utilizando esse algoritmo.

O algoritmo inicialmente define uma *população* aleatória de *indivíduos*, que são as possíveis soluções para o problema. Esses indivíduos sofrem uma série de procedimentos que consistem em avaliar, selecionar, recombinar e modificar os indivíduos, gerando assim, novas populações. Cada iteração desse processo recebe o nome de *geração*. Esses procedimentos são efetuados com base na aptidão de cada solução, em que indivíduos com melhores aptidões terão maior possibilidade de serem selecionados para a próxima geração. Normalmente, o processo iterativo é finalizado quando o número de gerações atinge um valor pré-estabelecido, ou quando algum indivíduo apresenta um valor de aptidão suficiente para a função objetivo. A Figura 3.6 apresenta um fluxograma básico de um Algoritmo Genético.

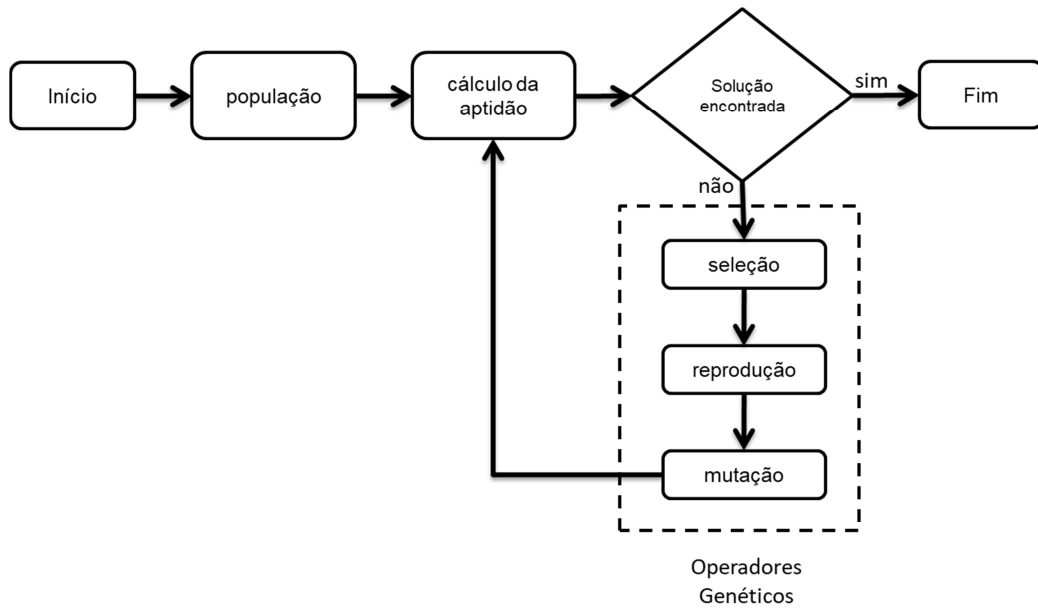


Figura 3.6: Fluxograma básico do Algoritmo Genético.

b) Evolução Diferenciada - O algoritmo da *Evolução Diferenciada* (ED) foi proposto por STORN e PRICE (1997) como uma alternativa ao Algoritmo Genético. Apesar de o ED utilizar conceitos “emprestados” da ampla classe dos *Algoritmos Evolutivos*, os resultados experimentais apresentados por STORN (1999) mostraram que o desempenho do ED é melhor do que muitos dos Algoritmos Evolutivos mais comuns. Neste sentido, o algoritmo ganhou popularidade por demonstrar ser um algoritmo robusto, de fácil compreensão e com poucos parâmetros de controle a serem definidos, como o tamanho da população (NP), o fator de mutação (F) e o fator de cruzamento (CR).

A principal característica que difere o ED do Algoritmo Genético é o *operador de mutação*. Na operação de mutação do ED são escolhidos, de maneira aleatória, três indivíduos distintos, I_α, I_β e I_γ dentre todos os que compõem a população inicial. O indivíduo I_α sofre uma perturbação resultante da diferença vetorial entre I_β e I_γ . Essa diferenciação é multiplicada pelo fator de mutação (F). Esse operador gera uma nova população de indivíduos “mutados”. Isso pode ser resumido pela Equação 3.8.

$$\text{População "Mutada"} = I_\alpha + F(I_\beta - I_\gamma) \quad (3.8)$$

Portanto, em resumo, a mutação gera uma nova população.

Com o intuito de aumentar a diversidade no processo, foi introduzida também a *operação de cruzamento*. Essa operação é usada para gerar um novo indivíduo advindo de um cruzamento entre indivíduos da população original e da população “mutada”. Ao fim dessa operação, todos os indivíduos cruzados formarão uma nova população, chamada de *população cruzada*, de mesmo tamanho da população inicial e da população “mutada”. A Figura 3.7 ilustra o processo da operação de cruzamento.

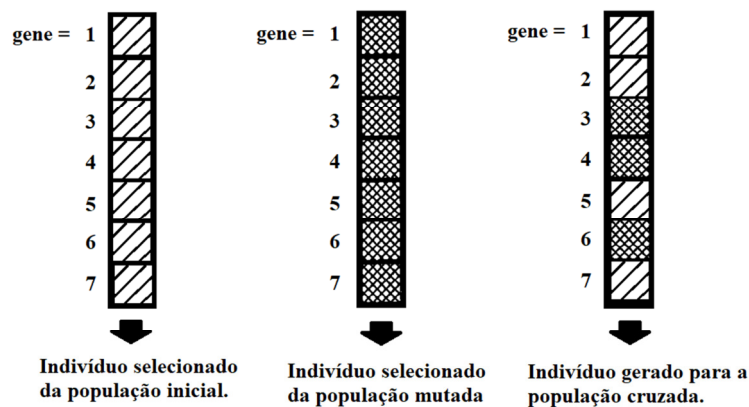


Figura 3.7: Operação de Cruzamento.

Por fim, é realizada a *operação de seleção*. O operador de seleção visa simplesmente escolher, dentre a população inicial e a população cruzada, os melhores indivíduos. Se a aptidão de um indivíduo da população inicial é melhor do que a aptidão de um indivíduo da população cruzada, esse indivíduo passa para próxima geração, que será chamada de *população nova*. Sendo assim, os indivíduos mais aptos são passados para a próxima geração, formando a população dos melhores indivíduos. Com isso, é finalizada uma iteração do algoritmo. Na próxima iteração, a população inicial será a população nova e todo o processo é realizado novamente até que um critério de parada seja atingido. Ao final de todo o processo, basta escolher o indivíduo da população nova que possua o melhor valor na avaliação da função objetivo.

c) **Enxame de Partículas** - O método de *enxame de partículas* (*Particle Swarm*) foi proposto por KENNEDY & EBERHART (1995) também como uma alternativa ao Algoritmo Genético. A essência do desenvolvimento do algoritmo reside na observação

do comportamento de pássaros em busca de locais para construção de seus ninhos e tenta equilibrar a individualidade e sociabilidade dos indivíduos.

A ideia original de Kennedy e Eberhart veio da observação de pássaros em busca de locais de nidificação. Quando se aumenta a individualidade, a busca por lugares alternativos para o aninhamento também aumenta. No entanto, se a individualidade se tornar muito alta, o indivíduo pode nunca encontrar o melhor lugar. Por outro lado, quando a sociabilidade é elevada, o indivíduo aprende pela experiência de seus vizinhos. Porém, se a sociabilidade se tornar muito alta, todos os indivíduos podem convergir para os primeiros mínimos encontrados, que possivelmente pode ser um mínimo local.

Dessa forma, o algoritmo parte de uma população inicial do mesmo modo estabelecido no método da evolução diferenciada. O indivíduo da geração seguinte é gerado por meio da alteração das características do indivíduo da população anterior, como mostra a Equação 3.9.

$$u_i^{k+1} = u_i^k + v_i^{k+1} \quad (3.9)$$

Onde u_i^k é o i -ésimo indivíduo da k -ésima iteração (geração), e v_i^{k+1} é o vetor que confere ao indivíduo da nova geração u_i^{k+1} as características individual e social. O vetor de alteração v_i^{k+1} considera as características de sociabilidade e a individualidade dos melhores indivíduos das gerações passadas.

A característica de sociabilidade, que considera o aprendizado com a experiência dos demais, leva em conta as características do melhor membro da geração originadora dos novos indivíduos.

A individualidade, que torna um novo membro mais independente, considera as características do melhor indivíduo da i -ésima posição. As condições de parada implementadas neste método são os mesmos critérios adotados para o algoritmo da Evolução Diferenciada.

d) Recozimento Simulado – O algoritmo *Recozimento Simulado* surgiu em 1983 através de um estudo realizado por KIRKPATRICK *et. al* (1983) e se baseou nas ideias de METROPOLIS *et al.* (1953). O algoritmo consiste em uma combinação entre

mecânica e otimização, ou seja, foi utilizada a ideia de um sistema em equilíbrio térmico a uma temperatura finita em busca pelo mínimo de uma dada função.

Este método de otimização faz uma analogia ao processo de recozimento da metalurgia. Sabe-se da metalurgia que, se o metal é resfriado em condições apropriadas, um cristal simples pode ser obtido (KIRKPATRICK et al., 1983). No recozimento, o metal é aquecido a altas temperaturas, causando um choque violento nos átomos. Se o metal for resfriado de forma brusca, a microestrutura tende a um estado randomicamente instável, porém, se o metal for resfriado de forma suficientemente lenta, o sistema procurará um ponto de equilíbrio caracterizado por uma microestrutura ordenada e estável.

METROPOLIS *et al.* (1953) introduziram um método numérico simples que representa o estado de equilíbrio de um conjunto de átomos a uma dada temperatura

Cada configuração é definida por um conjunto de átomos de energia E e temperatura T . A cada passo do algoritmo, os átomos sofrem um pequeno deslocamento aleatório provocando uma pequena alteração de energia ΔE no sistema. Se esta nova energia é menor ou igual a zero, o deslocamento é aceito e esta configuração é usada como ponto de partida do próximo passo. Caso contrário, o deslocamento ainda pode ser aceito dependendo da probabilidade da configuração dada, como mostra a Equação 3.10.

$$P(\Delta E) = e^{(-\Delta E/K_b T)} \quad (3.10)$$

onde K_b é a constante de Boltzmann.

Um número aleatório *rand*, uniformemente distribuído, deve ser gerado no intervalo $[0, 1]$. Se $rand \leq P(\Delta E)$, a nova configuração é aceita. Se $rand \geq P(\Delta E)$, a configuração anterior é utilizada para iniciar um novo passo.

A escolha da função de probabilidade $P(\Delta E)$, conforme descrito acima, deve-se ao fato de que o sistema evolui segundo uma distribuição de Boltzmann, mas outras funções de distribuição podem ser testadas.

Os parâmetros do algoritmo são: a função objetivo, que representa a energia do sistema, as variáveis de projeto, que descrevem sua configuração e a temperatura, que é um parâmetro de controle.

Se T tiver magnitude muito superior ao desvio padrão da função no intervalo, quase todos os pontos são aceitos. Ao passo que, se T for igual a zero, o método se torna uma busca aleatória do mínimo. Assim, adota-se T_i como o valor do desvio padrão da função objetivo no intervalo estudado e T_f como a ordem de grandeza desejada para a precisão do ponto ótimo (SARAMAGO & FARIA, 2001).

Na otimização via Recozimento Simulado, considera-se a perturbação aleatória das variáveis de projeto e a manutenção do melhor valor da função objetivo. As variáveis de projeto são perturbadas aleatoriamente e armazena-se o melhor valor da função objetivo a cada perturbação. A temperatura é então reduzida e novas tentativas executadas. Este procedimento continua até escapar de um mínimo local. Ao final do processo pretende-se obter um mínimo global.

Após algumas tentativas o melhor valor da função é chamado de centro (*center*), em torno do qual ocorrerão as perturbações na próxima temperatura.

Os parâmetros de controle para iniciar o procedimento são: a função objetivo $f(X)$; as variáveis de projeto iniciais, X ; o número de variáveis de projeto, n ; a temperatura inicial T_i ; a temperatura final T_f ; o número de iterações para cada temperatura, n_{inters} ; o número de temperaturas n_{temp} ; e o critério de parada.

A configuração inicial das variáveis de projeto é adotada como centro, O valor inicial da função objetivo é adotado como o melhor valor.

No próximo passo, o número aleatório *rand* é gerado e as variáveis são modificadas. Quatro valores randômicos são gerados, de forma que a variável *rand* seja adotada como média zero (MASTERS 1993). Assim, uma nova configuração é obtida e um novo valor da função objetivo pode ser calculado pela Equação 3.11.

$$X = center + T * rand \quad (3.11)$$

onde $rand = rand_1 + rand_2 - rand_3 - rand_4$.

O esquema inicia-se com uma temperatura alta, que é reduzida discretamente, como na Equação 3.12, usando o fator r_t , $0 < r_t < 1$, dado pela Equação 3.13.

$$T = T * r_t \quad (3.12)$$

$$r_t = e^{\frac{\ln(T_f/T_i)}{n_{temp}-1}} \quad (3.13)$$

Após a temperatura ser reduzida, novas tentativas são executadas. Este procedimento é repetido até escapar de um mínimo local. Ao final do processo pretende-se obter um mínimo global.

4. Alinhamento de Eixos: Metodologia

A metodologia utilizada para a otimização do alinhamento foi realizada nas seguintes etapas:

- Análise da condição inicial;
- Determinação dos coeficientes de influência;
- Determinação dos deslocamentos a serem aplicados aos mancais; e
- Análise do alinhamento após a aplicação dos deslocamentos selecionados.

4.1 Análise da condição inicial

A condição inicial é caracterizada pelo posicionamento concêntrico dos mancais, ou seja, é uma condição onde se considera que todos os mancais estão em uma mesma linha de referência. Esta é a condição em que qualquer linha de eixo estaria normalmente montada e é utilizada para a verificação das reações iniciais dos mancais, como ilustrado na Figura 4.1.

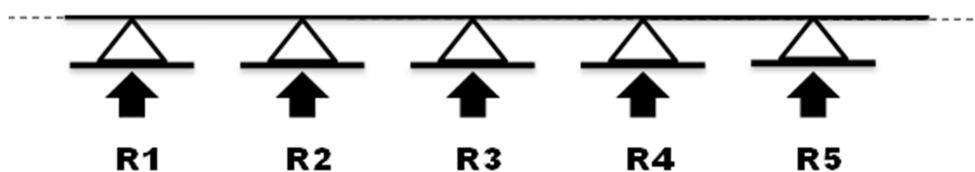


Figura 4.1: Mancais concêntricos.

Para determinar-se as reações nos mancais, deve-se realizar uma análise da linha de eixo como um estrutura, em vista disso, é necessário utilizar algum método de análise estrutural. Neste trabalho foi utilizado o *Método dos Elementos Finitos*, onde a linha de eixo foi modelada como uma viga hiperestática em duas dimensões, considerando-se toda a geometria e as propriedades dos materiais que a compõe. São indicados o posicionamento e a condição de restrição de cada mancal da linha de eixo, bem como a localização e magnitude das cargas atuantes no sistema. Como resultado,

são obtidas as reações em todos os apoios ou mancais, momentos fletores, forças cortantes, inclinações e deflexões ao longo da linha de eixo.

A partir desses resultados obtidos, é verificado se essa condição inicial atende aos critérios e se pode ser utilizada, ou, se será necessário realizar o alinhamento da linha de eixo.

4.2 Determinação dos coeficientes de influência

Como mencionado, o alinhamento é obtido pela escolha de um conjunto de deslocamentos dos mancais em relação a uma linha de referência. Entretanto, é importante observar que não existe uma solução única para o alinhamento. Na verdade, o número de conjuntos de deslocamentos é infinito. A ideia de se deslocar o mancal como forma de alinhar a linha de eixo é baseada na “Teoria da Curva Uniforme”, como uma alternativa aos problemas de alinhamento à época em que o método foi proposto. No entanto, como a solução era muito complicada para um número elevado de mancais, um método computacional foi desenvolvido, o qual resultou no conceito matemático do *Coefficiente de Influência*, proposto por ANTKOWIAK (1957). Por definição, o Coeficiente de Influência é a mudança causada no valor da reação de um mancal devido ao deslocamento vertical de outro mancal do sistema, e é definido como mostrado na Equação 4.1.

$$(K_{ij})\delta_i = f_j \quad (4.1)$$

onde:

K_{ij} = Coeficiente de influência do mancal i sobre o mancal j ;

δ_i = Deslocamento do mancal i ; e

f_j = Mudança no valor da reação do mancal j devido ao deslocamento δ_i .

Os coeficientes de influência representam a rigidez do vão do mancal e levam em consideração o comprimento do vão, a elasticidade do material e o módulo de inércia da seção do eixo, sendo expressos em função de um deslocamento vertical unitário do mancal.

Além do coeficiente de influência das reações nos mancais, são determinadas também as matrizes dos coeficientes de influência dos momentos fletores, das forças cortantes e da inclinação, para qualquer ponto da linha de eixo, em função do deslocamento unitário de um mancal.

Para determinar os valores dessas matrizes, aplica-se, como carregamento no modelo em elementos finitos, um deslocamento unitário em um apoio e a estrutura é novamente analisada. As reações nos apoios, momentos fletores, inclinações e forças cortantes obtidas constituem os coeficientes de influência. Este procedimento é repetido até o último apoio da estrutura, como ilustra a Figura 4.2.

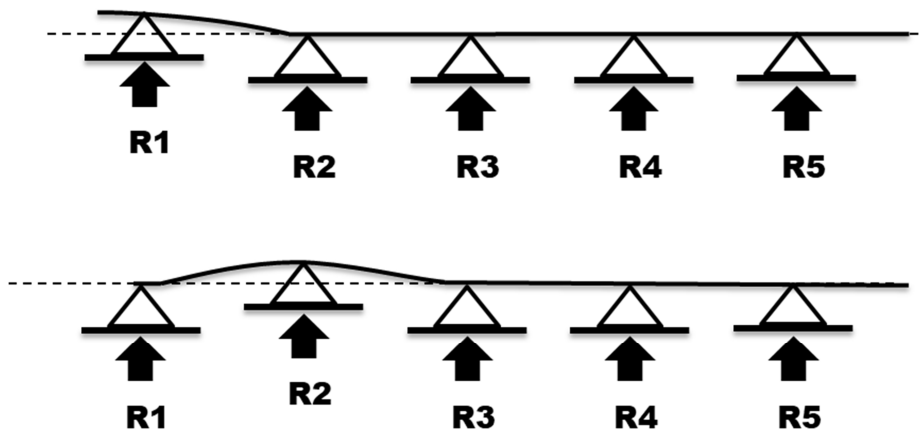


Figura 4.2: Obtenção dos coeficientes de influência.

4.3 Determinação dos deslocamentos a serem aplicados aos mancais

Conforme pode ser observado, os critérios apresentados no SNAME estão relacionados aos resultados da análise da linha de eixo tratada como uma estrutura hiperestática. Assim, teremos um critério para reações, momentos fletores, forças cortantes e inclinações. O deslocamento vertical a ser realizado em cada mancal deverá levar em consideração a sua influência em cada critério de alinhamento considerado, de modo que, com a aplicação do conjunto de deslocamentos, todos os critérios sejam atendidos.

Para a determinação destes deslocamentos, deve ser utilizada a *equação de influência*, dada pela Equação 4.2.

$$P_i = P_i^a + S_{ij}D_j \quad (4.2)$$

onde:

P_i = vetor de um critério para a condição final.

P_i^a = vetor de um critério para a condição inicial.

S_{ij} = matriz do coeficiente de influência do referido critério.

D_j = vetor de deslocamentos dos mancais.

Analisando a equação, é possível perceber que, se as posições relativas dos mancais forem alteradas, o valor resultante também é alterado. Logo, o conjunto de deslocamentos nos mancais pode ser determinado através da solução da equação. A equação deve ser utilizada em cada critério considerado no alinhamento.

Na equação, os componentes P_i^a e S_{ij} são obtidos a partir da análise estrutural. O elemento P_i representa o limite de cada critério para a condição final e o vetor D_j a solução da equação.

A equação pode ser resolvida pelo método da tentativa e erro, aplicando deslocamentos aleatórios e analisando o resultado final. Porém, conforme dito, essa forma pode ser muito demorada e ineficiente.

O algoritmo de otimização desenvolvido neste trabalho foi utilizado para buscar soluções da equação de forma a atender simultaneamente aos limites estabelecidos para cada um dos critérios.

4.4 Análise do alinhamento após a aplicação dos deslocamentos

Analisando-se a Equação 4.2, é possível observar que não existe somente uma solução para o sistema. O objetivo da otimização de alinhamento de eixo é fornecer um conjunto de soluções que atendam aos limites e restrições dos critérios adotados. O grande desafio na otimização é fazer com que as soluções atendam a diversos critérios simultaneamente, o que torna a otimização mais complexa. Conforme dito, foi utilizado

o método de otimização *Evolução Diferenciada* apresentado no capítulo 3, sendo este método aplicado no algoritmo para a determinação do conjunto de deslocamentos.

Com o conjunto de deslocamentos determinado, é possível conhecer-se a condição final de alinhamento diretamente no próprio algoritmo desenvolvido, sem a necessidade de uma nova modelagem em elementos finitos com a adição dos deslocamentos. Os resultados incluem as reações dos mancais, momentos fletores, inclinações e forças cortantes para esta nova condição.

5. Desenvolvimento do Algoritmo

O algoritmo deste trabalho foi desenvolvido utilizando-se o MATLABTM, da *The MathWorks, Inc*, baseado no método da Evolução Diferenciada (ED). A escolha deste método se deu principalmente pelo fato de ser um algoritmo simples e ao mesmo tempo poderoso, possuir poucos parâmetros de controle para conduzir à otimização e permitir que as variáveis sejam otimizadas como números reais, ou seja, sem a necessidade de utilização de números binários, como acontece no *algoritmo genético*.

Um dos objetivos do algoritmo foi tornar o processo de determinação dos deslocamentos dos mancais mais simples, ou seja, foi necessário tornar o algoritmo o mais “autônomo” possível, de forma que não houvesse a necessidade de se alterar muitos parâmetros de configuração do algoritmo para cada cálculo de alinhamento realizado.

Outra preocupação no desenvolvimento foi tornar o algoritmo flexível, fazendo com que ele pudesse ser utilizado para as mais diferentes configurações de linha de eixo.

Diante destas preocupações, foram implementadas as rotinas mostradas a seguir.

5.1 Leitura dos dados de entrada

As informações iniciais do processo de otimização foram obtidas a partir da importação dos resultados gerados na análise do modelo em elementos finitos.

O MATLAB trabalha essencialmente com um tipo de objeto: uma matriz numérica retangular podendo conter elementos complexos. Sua forma de trabalho e processamento considera que um escalar é uma matriz de dimensão 1x1 e que um vetor é uma matriz que possui somente uma linha ou uma coluna. Neste sentido, foram criados objetos a partir de cada informação importada dos resultados da modelagem da linha de eixo, ou seja, foi criado um objeto para cada critério na condição inicial, assim como, para cada matriz dos coeficientes de influência desses critérios. Esses objetos criados foram utilizados para o procedimento de cálculo, através de operações e funções matriciais.

5.2 Definição dos limites de cada critério de alinhamento

Uma vez gerado os objetos da condição inicial da linha de eixo, foi necessário definir os limites aceitáveis para cada um dos critérios adotados no alinhamento. Para cada valor de limite, foram criados objetos, que foram representados por escalares.

5.3 Definição das restrições da execução do alinhamento

É importante se conhecer a configuração da linha de eixo no que se refere à possibilidade de execução de deslocamento nos mancais, e com isso, devem ser definidos um limite máximo e um mínimo para o deslocamento vertical que podem ser aplicados aos mancais. Os valores desses limites foram inseridos no algoritmo para serem considerados no processo de otimização. Logo, foi necessário criar um objeto, representado por escalares, para esses valores.

5.4 Transformação dos dados de entrada em Escalares

De forma a viabilizar o processo de otimização, os objetos que foram criados pelos dados importados são agora tratados. Cada elemento das matrizes geradas na etapa de importação foi transformado em escalar, de modo a analisar individualmente cada elemento. O objetivo dessa separação é viabilizar o “teste” do elemento quanto ao atendimento do limite do critério que ele representa.

5.5 Definição do Critério de Parada

Antes do início do processo iterativo, faz-se necessário definir o critério de parada do ciclo de otimização. Como o objetivo do ciclo é chegar a uma solução que atenda aos critérios estabelecidos, a forma escolhida foi calcular o desvio padrão da população gerada e configurar para que o processo fosse interrompido quando o desvio padrão dessa população fosse igual a zero. Isso significaria que naquela população todos os indivíduos eram iguais e, conseqüentemente, esse indivíduo seria uma solução encontrada.

5.6 Geração da População Inicial

O início do método Evolução Diferenciada se dá com a geração de uma população inicial. Essa população é formada por indivíduos que representam uma possível solução para o cálculo do alinhamento.

Uma solução para o alinhamento é representada por um vetor, onde os elementos desse vetor correspondem ao valor de deslocamento que cada mancal da linha de eixo deverá sofrer. No algoritmo, a população é representada por uma matriz $N \times M$, onde N é a quantidade de indivíduos da população, e M representa a quantidade de mancais do sistema. Um exemplo de uma população de 4 indivíduos em uma linha de eixo com 3 mancais é mostrada na Equação 5.1.

$$\text{população inicial} = \begin{bmatrix} 1,1 & 3,2 & -1,0 \\ 2,3 & 2,0 & 2,9 \\ 1,7 & -2,2 & 3,5 \\ -2,6 & 1,1 & 2,4 \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

A escolha da quantidade de indivíduos da população é arbitrária. A determinação da quantidade se deu após diversas execuções do algoritmo, quando se chegou à conclusão de que a quantidade de 10 indivíduos era suficiente para que o processo ocorresse de forma satisfatória.

A população inicial é gerada aleatoriamente, cobrindo todo o espaço de busca, ou seja, os valores que compõe os indivíduos da população estarão dentro do limite de execução de alinhamento definidos previamente, como mostrado no item 5.3.

5.7 Geração da População Mutada

A idéia principal da evolução diferenciada é gerar novos indivíduos pela adição da diferença vetorial ponderada entre dois indivíduos aleatórios da população inicial a um terceiro indivíduo. Esta operação, chamada de mutação, foi realizada para que fosse gerada a população “mutada”. Assim, foi obtida uma nova matriz com as mesmas dimensões, onde foram gerados novos indivíduos diferentes

daqueles da população inicial.

O processo de mutação no algoritmo foi realizado conforme a Equação 5.2, tal que:

$$V^{(q+1)} = X_{\alpha}^{(q)} + F(X_{\beta}^{(q)} - X_{\gamma}^{(q)}) \quad (5.2)$$

onde $V^{(q+1)}$ é o indivíduo que será gerado no processo de mutação; F é um fator constante e real $[0, 2]$ o qual controla a amplificação da variação diferencial (STORN e PRICE, 1997); e $X_{\alpha}^{(q)}$, $X_{\beta}^{(q)}$ e $X_{\gamma}^{(q)}$ representam indivíduos distintos, escolhidos aleatoriamente da população inicial. A literatura apresenta diversas formas de definir o parâmetro F , não havendo um consenso sobre tal questão (DAS e SUGANTHAN, 2011). De acordo com STORN e PRICE (1997) iniciar com $F = 0,5$ é geralmente uma escolha apropriada. A Figura 5.1 ilustra o processo de mutação, onde população possui 4 indivíduos e foram escolhidos aleatoriamente os indivíduos 1, 2 e 4 para realizar a operação.

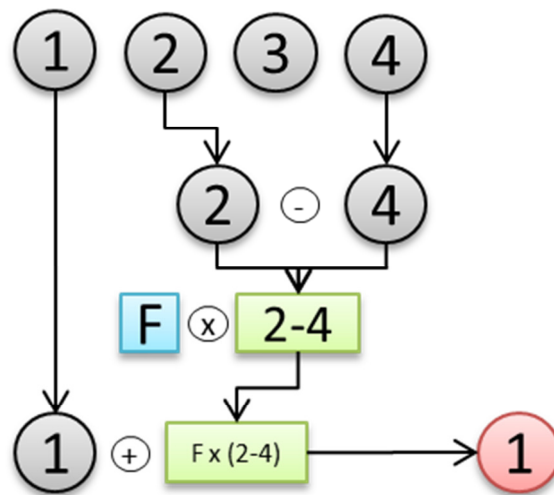


Figura 5.1: Ilustração do Processo de Mutação.

5.8 Substituição dos indivíduos fora das restrições de alinhamento

Como mostrado no item anterior, a população “mutada” é resultado de adições vetoriais. Por essa razão, essa operação pode resultar em indivíduos com valores fora da

faixa limite de execução do alinhamento, como definido no item 5.3. Sendo assim, foi necessário criar uma rotina que substituísse esses indivíduos da população “mutada” pelo indivíduo da posição correspondente da população inicial, mantendo assim, um indivíduo que atendesse ao limite de execução.

5.9 Alteração dos indivíduos para a inclusão da condição dos mancais fixos

Como mostrado, a população inicial é gerada por um processo aleatório, de modo que seus indivíduos possuam valores dentro do limite de execução. Na maioria dos casos de linhas de eixo, existem um ou mais mancais que não podem sofrer deslocamentos verticais, pois são mancais estruturais. Para gerar uma população inicial com indivíduos que possuíssem valores nulos no deslocamento dos mancais estruturais, foi necessário criar uma rotina para incluir o valor zero no componente correspondente ao deslocamento do mancal estrutural. Desta forma, qualquer solução encontrada possuía deslocamento nulo nos mancais estruturais. A Equação 5.3 mostra um exemplo de uma população em que um dos três mancais da linha de eixo é um mancal estrutural.

$$população = \begin{bmatrix} 1,1 & 3,2 & 0,0 \\ 2,3 & 2,0 & 0,0 \\ 1,7 & -2,2 & 0,0 \\ -2,6 & 1,1 & 0,0 \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

5.10 Cálculo das funções objetivo para cada indivíduo da população

Para que se possa realizar a comparação entre as populações inicial e a população “mutada”, é necessário se conhecer a “afinidade” de cada indivíduo dessas populações. A afinidade de um indivíduo é definida como a capacidade de atendimento aos critérios de alinhamento estabelecidos.

Para verificar a afinidade de um indivíduo, é necessário primeiramente determinar o valor resultante de cada critério (função objetivo), com a aplicação dos deslocamentos do indivíduo. Os valores da função objetivo foram obtidos com a inserção da Equação

4.2 no algoritmo. Como resultado, foram criados objetos representando cada um desses valores resultantes, que foram posteriormente usados para a verificação da afinidade.

5.11 Teste dos indivíduos de acordo com os limites de cada critério

De posse dos valores resultantes das funções objetivos de cada critério, para cada indivíduo, foi possível verificar a afinidade desses indivíduos, comparando esses valores com os valores limites estabelecidos para os critérios, como mostrado no item 5.2.

A afinidade de cada indivíduo foi verificada através de uma rotina, onde era comparado cada valor resultante individualmente.

5.12 Geração da População Cruzada

Depois de verificada a afinidade de cada indivíduo das populações inicial e “mutada”, aqueles com a melhor afinidade são selecionados para a nova população a ser formada. Conseqüentemente, essa nova população terá indivíduos somente das duas populações, diferentemente do que ocorre no processo de mutação, onde são gerados novos indivíduos. Essa nova população formada é chamada de população cruzada.

5.13 Reinício do ciclo iterativo

Com a definição da população cruzada, o processo de otimização retorna para o estágio em que população inicial é gerada, iniciando assim, um novo ciclo iterativo. A população cruzada agora será a população inicial deste novo ciclo, e todo processo descrito até se chegar a este estágio irá se repetir até que o critério de parada estabelecido seja atendido. A Figura 5.2 ilustra esse processo iterativo.

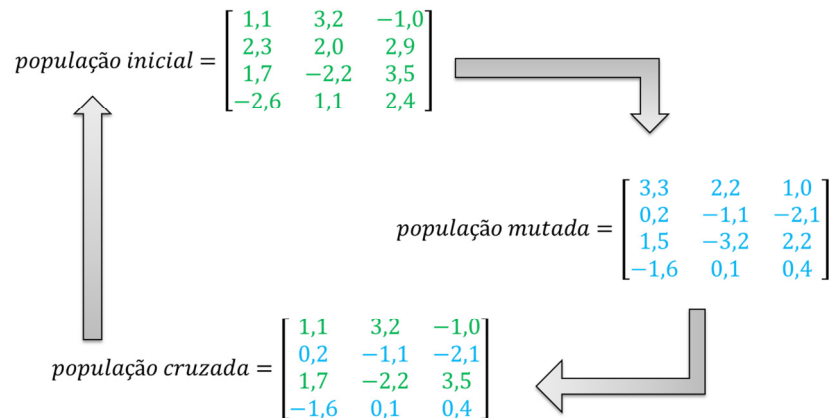


Figura 5.2: Processo Iterativo.

5.14 Fim do ciclo iterativo

O processo de otimização propriamente dito e a definição da solução do cálculo de alinhamento se dá quando o ciclo iterativo é finalizado. Ao final do processo iterativo, a população da última geração terá todos os seus indivíduos iguais, e este indivíduo será a solução do alinhamento, atendendo aos critérios estabelecidos.

5.15 Geração de grupos de soluções

O processo de otimização até o final do ciclo iterativo mostrou que a população da última geração possuía os seus indivíduos iguais. Desta forma, o processo só seria capaz de encontrar uma única solução para o cálculo do alinhamento.

Com o intuito de se ter uma análise mais profunda no alinhamento da linha de eixo que está sendo estudada, foi criada uma rotina para se obter mais de uma solução. O objetivo de se ter mais de uma solução para o alinhamento é que a escolha da solução final fosse determinada pelo fator humano, visto que, podem existir especificidades na linha de eixo que não são consideradas no cálculo de alinhamento. Esse objetivo foi alcançado através da elaboração de uma rotina que, após o final do ciclo iterativo, fosse iniciado um novo ciclo a partir de uma nova população inicial aleatória. A primeira solução encontrada foi armazenada em um objeto denominado “grupo de soluções”, e à medida que novas soluções fossem encontradas, seriam armazenadas nesse mesmo

objeto. Assim, este objeto consistiu em uma matriz onde cada linha representava uma solução encontrada. A Figura 5.3 ilustra esse processo.

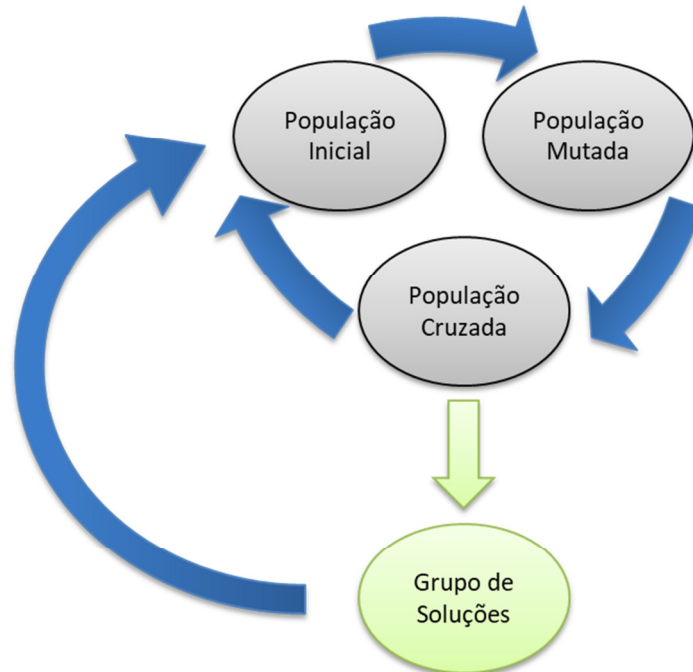


Figura 5.3: Processo de geração do Grupo de Soluções.

5.16 Teste das soluções encontradas

Considerando que o critério de parada adotado no processo iterativo foi que o valor do desvio padrão da população fosse zero, e considerando que existia a possibilidade de que este desvio padrão pudesse ser zero sem que aquele indivíduo fosse de fato uma solução para o alinhamento, foi elaborada uma rotina para se realizar uma nova verificação quanto ao atendimento dos critérios.

Nessa rotina, todas as soluções que formaram o grupo de soluções foram novamente testadas. Para garantir que fosse de fato uma solução, um novo objeto era criado com as soluções que atendiam aos critérios. Deste modo, um novo grupo de soluções foi formado com aquelas que passassem no teste realizado nesta rotina.

5.17 Remoção das soluções repetidas

Como na formação do grupo de soluções cada solução é gerada independentemente uma da outra, pode existir a ocorrência de soluções repetidas. Desta forma, foi criada uma rotina para retirar aquelas soluções que fossem iguais.

5.18 Inclusão dos deslocamentos referentes à dilatação térmica

Como explicado no item 3.3.1 b), a dilatação térmica pode alterar a posição dos mancais em relação à linha de centro. Diante desta informação, foi incluída no algoritmo uma rotina que ajustasse as soluções encontradas de acordo com as informações de deslocamento devido à dilatação térmica. Com os valores desses deslocamentos, o ajuste das soluções ocorreu através da adição vetorial das soluções com os referidos deslocamentos. Essa operação gerou o resultado final das soluções.

Podem ocorrer casos em que não seja possível se determinar qual o valor do deslocamento devido à dilatação térmica. Nestes casos, algoritmo faz a soma com um vetor nulo.

Dentre as soluções encontradas neste último conjunto, a escolha daquela como solução definitiva, a ser de fato aplicada no eixo, vai depender de fatores específicos da linha de eixo em questão, tais como, facilidade de aplicação dos deslocamentos nos mancais, quantidade de mancais que devem ser deslocados ou acessibilidade dos mancais.

5.19 Cálculo da condição final para as soluções encontradas

Após a determinação e da formação do grupo de soluções definitivo, foi realizado o cálculo da condição final para cada solução encontrada. Para a realização desse cálculo, foi utilizada a Equação 4.2 em cada um dos critérios, de forma que fosse possível verificar o atendimento ao critério de cada solução. No algoritmo, cada resultado gerou um objeto representado por um vetor, em que a quantidade de elementos era igual à quantidade de soluções.

5.20 Apresentação dos resultados obtidos

Os resultados do algoritmo de otimização desenvolvido são apresentados através da janela de resultados do Matlab.

5.21 Exportação dos dados do Processamento

Com o intuito de se ter o controle e o registro de todas as informações utilizadas e encontradas pelo algoritmo, a última rotina elaborada realizou a exportação de todas essas informações para um arquivo externo ao ambiente do Matlab. Foi gerado um arquivo em Excel contendo detalhadamente todos os dados da condição inicial, dos limites e restrições e dos resultados finais, de forma separada e organizada.

Para um melhor entendimento do algoritmo desenvolvido, foi elaborado o fluxograma apresentado na Figura 5.4.

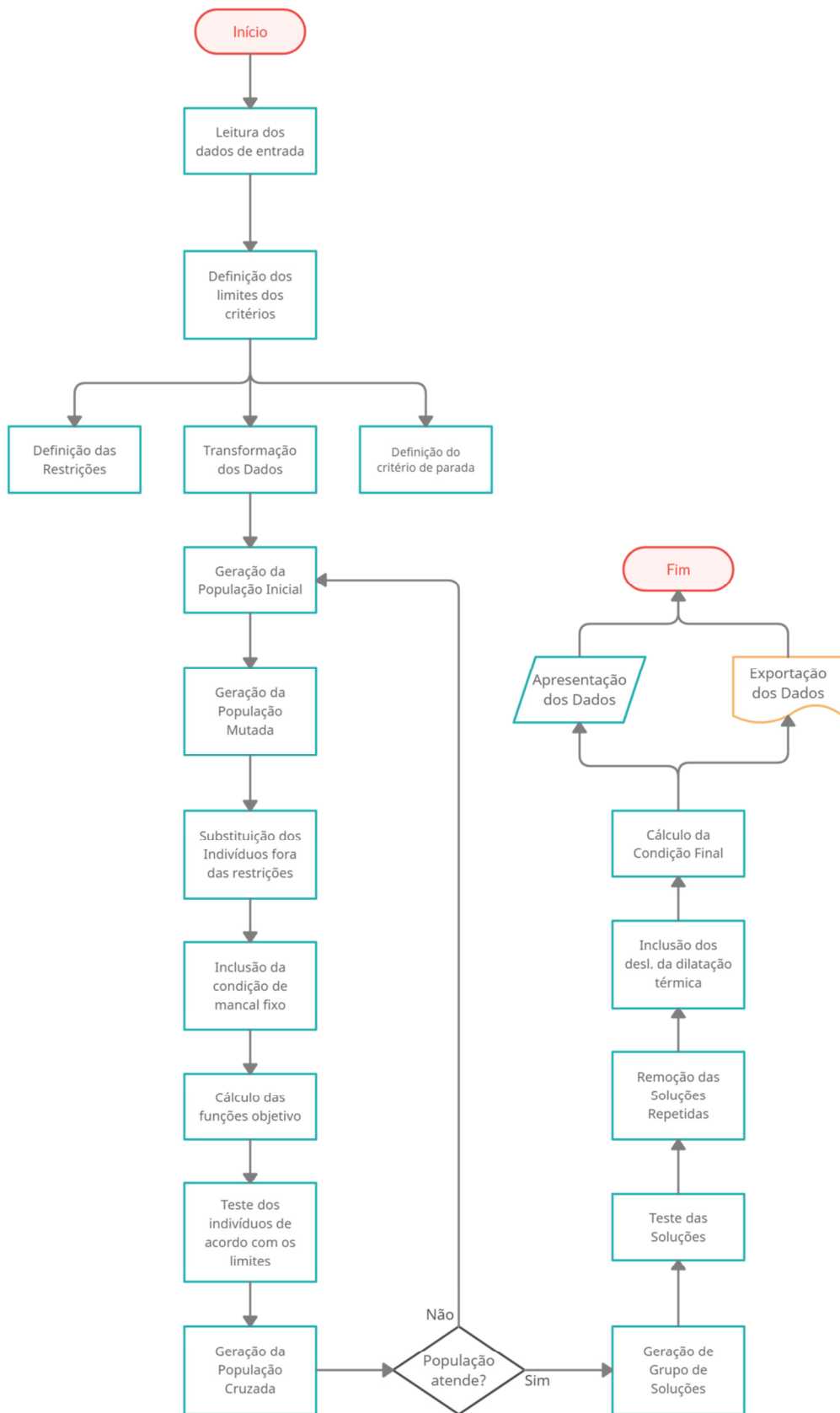


Figura 5.4: Fluxograma do Algoritmo de Otimização de Deslocamentos dos Mancais.

6. Resultados e Discussões

Neste capítulo são apresentados alguns exemplos de aplicação da metodologia e do algoritmo no cálculo de alinhamento de eixo propulsores. Os exemplos apresentados já possuíam algum cálculo de alinhamento realizado, porém sem a aplicação da otimização dos deslocamentos dos mancais. Cada exemplo apresenta características particulares que demonstram a complexidade e as dificuldades de um processo de alinhamento de um eixo de propulsão.

6.1 Corvetas Classe “Inhauma”.

Este primeiro exemplo realizado diz respeito à linha de eixo das Corvetas “Julio de Noronha” e “Frontin”, ambas da Classe “Inhauma”.

O sistema de propulsão desses navios é composto por combinação de turbinas a gás e motores diesel acoplados a caixas redutoras e linhas de eixo. Os propulsores são de passo controlável (HPC), que são um tipo de hélice com pás que podem girar em torno do seu eixo para alterar seu ângulo, tendo como objetivo absorver o máximo de potência do motor para diferentes velocidades de navegação. Os eixos são vazados para a passagem da haste de comando de válvula.

A linha de eixo é constituída principalmente por:

- Um eixo propulsor;
- Dois eixos intermediários;
- Eixo da engrenagem redutora;
- Dois mancais intermediários;
- Dois mancais estruturais (“pé de galinha” e ré do tubo telescópico); e
- Acoplamentos.

A Tabela 6.1 apresenta as principais características da linha de eixo.

Tabela 6.1. Principais características da linha de eixo.

DIÂMETRO MÉDIO	340 mm
DIÂMETRO INTERNO	240 mm
COMPRIMENTO TOTAL	35 m
MATERIAL	Aço
INCLINAÇÃO	60 mm/m

6.1.1. Modelagem

Na discretização da linha de eixo em elementos finitos utilizou-se elementos de viga, barra ou pórtico plano, os quais contém dois nós por elemento e seis graus de liberdade por nó, sendo perfeitamente adequado à análise de vigas hiperestáticas. A Figura 6.1 apresenta o elemento de pórtico plano.

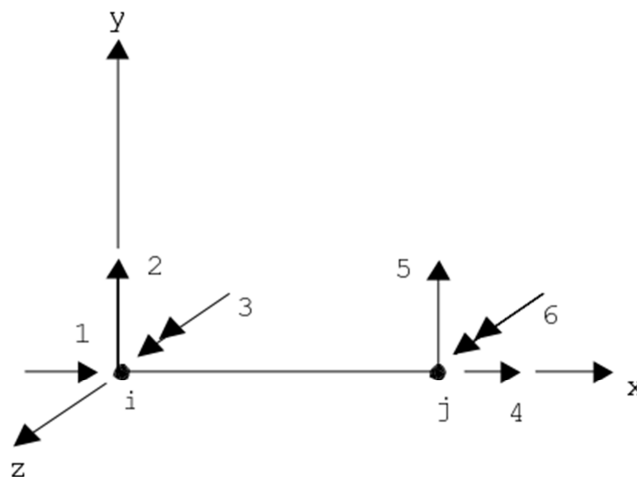


Figura 6.1: Elemento de pórtico plano.

Nos nós i e j estão representados: 1 - força ou deslocamento na direção de x no nó i ; 2 - força ou deslocamento na direção de y no nó i ; 3 - momento fletor ou inclinação/rotação na direção de z no nó i ; 4 - força ou deslocamento na direção de x no nó j ; 5 - força ou deslocamento na direção de y no nó j e 6 - momento fletor ou inclinação/rotação na direção de z no nó j .

A modelagem da linha de eixo em elementos finitos foi realizada do flange do acoplamento do hélice, até a extremidade do eixo da engrenagem redutora e foi discretizada em 130 nós e 129 elementos.

Os dados referentes ao comprimento e ao diâmetro dos trechos da linha de eixo foram retirados do desenho de Arranjo da Linha de Eixo original do navio que consta no Apêndice B.

A modelagem do eixo da engrenagem redutora foi realizada a partir do desenho do fabricante, onde foi possível verificar as variações dos diâmetros e o posicionamento dos seus mancais, assim como o local de aplicação e o valor do peso da engrenagem redutora.

A Figura 6.2 mostra um esboço da modelagem da linha de eixo com o posicionamento dos mancais e as cargas atuantes.

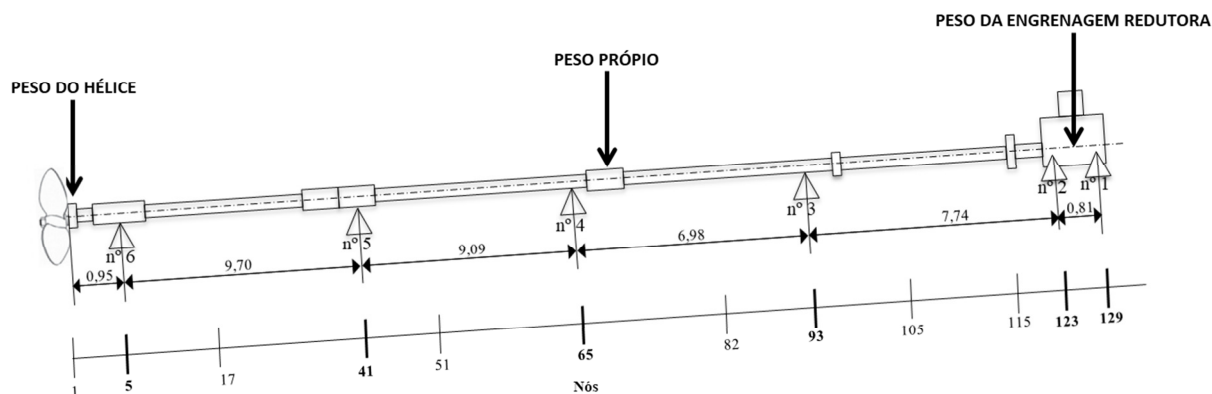


Figura 6.2: Arranjo da linha de eixo – Corvetas da Classe “Inhaúma”.

A Tabela 6.2 apresenta os resultados obtidos da análise por elementos finitos da linha de eixo na condição inicial, com os mancais concêntricos. Na tabela, os valores positivos das reações nos mancais indicam que o sentido da força está para baixo, ou seja, a carga está sendo sustentada pelo mancal, enquanto que o valor negativo indica que o sentido da carga está para cima, isto é, o mancal está “puxando” o eixo para baixo. A primeira análise a ser feita é se essa condição inicial atende aos critérios e se pode ser utilizada, ou, se será necessário realizar o alinhamento da linha de eixo. Pelo valor negativo da reação do mancal 1, verifica-se que foi necessário realizar a determinação dos deslocamento dos mancais.

Tabela 6.2 - Valores na condição inicial – Corvetas da Classe “Inhaúma”.

Mancais	Reações [N]	Nós	Momento Fletor [N m]	Nó	Força Cortante [N]	Mancal	Inclinação (rad)
1	-6.432,8	5	56.580,5	115	-17.909,1	6	0,000374
2	92.998,2	17	-4.753,4				
3	26.133,0	51	-10.297,9				
4	39.040,5	82	-6.466,7				
5	39.800,0	105	-7.395,2				
6	75.924,7	115	10.867,7				

Além do resultado da condição inicial, também foram obtidas as matrizes dos coeficientes de influência de cada um destes parâmetros, dado pela Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Coeficientes de Influência – Corvetas da Classe “Inhaúma”.

Matriz de Influência das Reações [N / mm]						
Mancal	Mancal					
	1	2	3	4	5	6
1	76.286	-86.494	13.435	-3.923	834	-137
2	-86.494	98.390	-16.014	5.011	-1.069	177
3	13.435	-16.014	4.746	-3.001	1.000	-167
4	-3.923	5.011	-3.001	3.285	-1.824	451
5	834	-1.069	1.000	-1.824	1.598	-539
6	-137	177	-167	451	-539	226

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [N.m / mm]						
Nó	Mancal					
	1	2	3	4	5	6
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	63,58	-81,16	76,06	-202,35	245,43	-101,56
51	-154,62	197,35	-184,96	134,60	95,89	-88,27
82	626,32	-799,43	153,54	156,10	-164,24	27,71
105	-2.123,34	2.276,29	-56,39	-117,43	25,11	-4,24
115	-5.413,89	6.111,52	-889,18	232,95	-49,81	8,40

Matriz de Influência do Força Cortante [N / mm]						
Nó	Mancal					
	1	2	3	4	5	6
115	1.040,72	-1.212,99	263,39	-110,82	23,69	-4,00

Matriz de Influência da Inclinação [rad / mm]						
Mancal	Mancal					
	1	2	3	4	5	6
6	0,000019	-0,000025	0,000023	-0,000061	0,000178	-0,000134

6.1.2. Otimização

Para a otimização dos momentos fletores foram selecionados os nós localizados nas regiões consideradas mais críticas, sendo selecionados os nós dos vãos entre os mancais (nós 17, 51, 82 e 105), o nó relativo ao acoplamento do eixo com a engrenagem redutora (nó 115) e o nó relativo ao mancal 6 (nó 5). As posições dos nós podem ser observadas na Figura 6.2.

Como o mancal 6, que está mais próximo do hélice, é um mancal estrutural do tipo pé-de-galinha lubrificado a água, não foi realizada a análise da necessidade de usinagem inclinada no mancal.

De forma a evitar o desalinhamento interno da engrenagem redutora e a evitar o contato inadequado interno de seus dentes, foi realizada a otimização da força cortante no nó localizado na conexão do eixo com a engrenagem redutora (nó 115).

Neste exemplo, como os mancais 5 e 6 são mancais estruturais, eles não sofrem deslocamentos verticais.

A otimização foi realizada para o navio na condição de operação a quente, ou seja, condição em que os equipamentos do sistema de propulsão estão em operação. Esta condição implica em um deslocamento de 0,057 mm nos mancais 1 e 2 devido à dilatação térmica.

Foi considerado como limite para o deslocamento vertical o valor de 20 mm acima ou abaixo da linha de referência.

De posse dos valores iniciais, dos coeficientes de influência, da variação dos mancais devido à dilatação térmica e dos limites de cada parâmetro, foi possível realizar a otimização do cálculo do alinhamento e determinar os deslocamentos dos mancais.

A Tabela 6.4 apresenta o resultado obtido pela otimização, apresentando 5 soluções que podem ser utilizadas para o alinhamento da linha de eixo. Cada solução apresenta o deslocamento que deve ser realizado em cada mancal.

Tabela 6.4. Soluções encontradas - Corvetas Classe “Inhaúma”.

Mancais	Deslocamento [mm]				
	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
1	0,00	0,00	0,00	-19,06	3,94
2	0,00	0,00	-1,06	-17,06	2,94
3	3,00	6,00	-2,00	2,00	0,00
4	0,00	9,00	1,00	3,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

É possível observar, que cada solução apresenta diferentes deslocamentos para os mancais. Na Solução 1, é necessário apenas o deslocamento do mancal 3. A solução 2 é realizada com o deslocamento dos dois mancais intermediários (3 e 4) da linha de eixo. Na Solução 3, além dos deslocamentos intermediários, também existe a necessidade de deslocamento de um dos mancais da engrenagem redutora (mancal 2). Na Solução 4, o alinhamento é obtido com o deslocamento de todos os quatros mancais possíveis, os dois intermediários e os dois da engrenagem de redutora. Já na Solução 5, faz-se necessário apenas o deslocamento dos dois mancais da engrenagem redutora (mancal 1 e 2).

De forma a possibilitar uma comparação com o cálculo de alinhamento original realizado pela Diretoria de Engenharia Naval – Marinha do Brasil, a solução escolhida para analisar os resultados finais foi a Solução 1. Além disso, analisando o perfil das cinco soluções, a melhor escolha, é a Solução 1, pois é a solução que necessita de um menor número de mancais deslocados, visto que, somente o mancal 3 sofre deslocamento.

A determinação da solução foi realizada dentre aquelas que atenderam aos critérios estabelecidos pelo manual da SNAME para a linha de eixo, logo, a escolha da solução 1 não significa, necessariamente, que ela possui a linha elástica mais uniforme dentre as opções apresentadas. Para que a escolha levasse em consideração o comportamento da linha elástica, haveria a necessidade de uma análise específica e aprofundada de seu comportamento. No entanto, segundo a Teoria da Curva Uniforme, é esperado que, após a aplicação dos deslocamentos nos mancais, a linha elástica torne-se mais uniforme em comparação à condição em que o eixo se encontra desalinhado.

Com o intuito de validar do processo de otimização, os resultados encontrados foram comparados com o cálculo realizado por BAPTISTA (1993) e com o Cálculo Original do alinhamento. No cálculo de alinhamento realizado por BAPTISTA (1993), o alinhamento foi feito utilizando como critério a melhor distribuição das reações dos mancais e a menor diferença entre as reações nos mancais da engrenagem reductora. Partindo deste princípio, foram pesquisados os deslocamentos dos mancais 1 e 2. Os valores encontrados para estes mancais foram -3,614 mm e -3,727 mm, respectivamente. É importante considerar que não foi realizada otimização do cálculo do alinhamento, de modo que os critérios utilizados no estudo de BAPTISTA (1993) não foram os mesmos usados neste trabalho.

6.1.3. Comparação com o Cálculo Original

Este tópico tem como objetivo realizar uma comparação dos resultados obtidos a partir da otimização realizada, com o os resultados no cálculo de alinhamento realizado à época da construção das corvetas.

O objetivo do cálculo original foi obter uma distribuição uniforme das reações nos mancais através do deslocamento vertical do menor número possível de mancais. A partir destes resultados, procurou-se uniformizar a carga distribuída ao longo dos mancais através da alteração da posição vertical dos mesmos, objetivando sempre que o maior número de mancal estivesse alinhando segundo a linha de referência.

O cálculo original não considerou o efeito da deformação do casco sobre o alinhamento. Na influência devido à dilatação térmica adotou-se uma aproximação a partir de outro estudo anterior. Foi considerada a inclinação da linha de eixo com um valor de 65 mm/m, diferente do valor considerado neste exemplo, que foi de 60 mm/m, mas o que não inviabilizou a comparação dos resultados encontrados.

Sendo assim, o cálculo original apresentou os seguintes resultados para reações nos mancais, conforme Tabela 6.5.

Tabela 6.5 – Reações dos mancais – Cálculo Original.

Mancal	1	2	3	4	5	6
Reação (N)	15.115	76.550	47.071	46.356	45.561	68.283

Os resultados mostram que as cargas nos mancais não estavam uniformes, portanto foi necessário realizar o deslocamento dos mancais.

A matriz de influência das reações encontrada é apresentada na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 –Matriz de influência das reações – Cálculo Original.

Matriz de Influência das Reações [N / mm]						
Mancal	Mancal					
	1	2	3	4	5	6
1	46.557	-55.397	11.684	-3.473	759	-131
2	-55.397	66.551	-15.378	5.157	-1.128	195
3	11.684	-15.378	7.017	-4.537	1.467	-253
4	-3.473	5.157	-4.537	4.746	-2.556	660
5	759	-1.128	1.467	-2.556	2.294	-837
6	-131	195	-253	660	-837	366

A partir das hipóteses descritas, o cálculo original obteve como resultado o deslocamento vertical positivo de 2,54 mm do mancal 3 e o alinhamento com a linha de referência dos outros mancais, tendo como resultado final os seguintes valores para a reação dos mancais, como mostrado na Tabela 6.7.

Tabela 6.7 – Resultado das reações dos mancais – Cálculo Original.

Mancal	1	2	3	4	5	6
Reação (N)	39.403	39.403	62.645	35.863	34.607	67.685

É possível observar pela Tabela 6.7 que o estudo conseguiu atingir o objetivo de uniformizar as reações dos mancais, principalmente os da engrenagem reductora, deslocando apenas um mancal.

Comparando os resultados obtidos pelo cálculo original e pela otimização realizada, pode-se chegar a algumas conclusões:

- Os dois trabalhos encontraram como solução o deslocamento do mancal 3, com valores próximos, 2,54 mm no estudo original e 3,00 mm na otimização, apesar do diferente valor de inclinação.
- Apesar da utilização de diferentes critérios no cálculo original e na otimização, as soluções encontradas ainda foram parecidas.

- Essa comparação demonstra a efetividade da otimização na determinação dos deslocamentos a serem aplicados aos mancais, pela metodologia apresentada neste trabalho.

A Tabela 6.8 apresenta os valores dos deslocamentos e das reações dos mancais para os cálculos realizados pelo estudo de BAPTISTA (1993), a otimização e o cálculo original.

Tabela 6.8 – Comparação entre os resultados - Corvetas Classe “Inhaúma”.

Mancais	Deslocamento [mm]		
	BAPTISTA (1993)	Otimização	Cálculo Original
1	-3,61	0,00	0,00
2	-3,73	0,00	0,00
3	0,00	3,00	2,54
4	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00

Mancais	Reações [N]		
	BAPTISTA (1993)	Otimização	Cálculo Original
1	39.989	33.887	39.403
2	38.982	44.900	39.403
3	37.285	40.376	62.645
4	34.550	30.016	35.863
5	40.762	42.803	34.607
6	75.770	75.389	67.685

6.1.4. Resultados

Os valores obtidos para os deslocamentos dos mancais da Solução 1 foram inseridos na Equação 4.2 para se conhecer os valores dos parâmetros na condição final. Para analisar os resultados, foram empregados os critérios adotados do Manual de Alinhamento da SNAME:

A Tabela 6.9 apresenta o valor da diferença entre as reações dos mancais da engrenagem redutora (mancais 1 e 2) e a diferença máxima permissível. Para atender ao critério, era necessário que a diferença entre a reação dos dois mancais fosse menor que 25% do valor do somatório dessas duas reações.

Tabela 6.9 - Diferença entre as reações dos mancais da engrenagem redutora.

Mancais	Reações [N]	Critério	Resultado
R1 + R2	78.786	$(R1 - R2) \leq 25\% (R1 + R2)$	ATENDIDO
25% (R1 + R2)	19.481		
R1 - R2	11.013		

A Tabela 6.10 mostra os resultados das reações e os limites máximo e mínimo para cada mancal. O valor máximo permissível de carga foi calculado a partir da área útil e da pressão máxima de cada mancal. O valor mínimo permissível levou em consideração um percentual da carga máxima do mancal, pois o objetivo foi evitar a ocorrência de carga nula ou negativa.

Tabela 6.10 - Resultados das reações dos mancais - Corvetas Classe “Inhaúma”.

Mancais	Reações [N]	Máximo Permissível [N]	Mínimo Permissível [N]	Resultado
1	33.886	52.792	20.000	ATENDIDO
2	44.899	52.792	20.000	
3	40.376	124.200	20.000	
4	30.015	124.200	20.000	
5	42.802	208.980	20.000	
6	75.389	358.330	20.000	

Para atender ao critério do momento fletor ao longo do eixo, é necessário avaliar a tensão máxima de flexão e a tensão admissível no material do eixo em cada nó selecionado. O momento fletor máximo permissível foi calculado a partir da tensão admissível do material do eixo. A Tabela 6.11 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 6.11 – Momento fletor na linha de eixo - Corvetas Classe “Inhaúma”.

Nós	Momento Fletor [N m]	Máximo Permissível [N m]	Resultado
5	56.560	2.285.606	ATENDIDO
17	-2.514	1.317.000	
51	-15.735	1.317.000	
82	-1.947	1.106.367	
105	-9.051	1.106.367	
115	-15.295	1.858.323	

Os limites do momento fletor e da força cortante para evitar danos à engrenagem reductora foram estimados de acordo com o limite máximo de tensão na conexão do eixo com a engrenagem reductora. O valor máximo foi determinado pela dimensão da seção transversal do nó 115, que corresponde ao ponto da conexão do eixo com a engrenagem reductora, conforme Tabela 6.12.

Tabela 6.12 – Momento fletor e Força cortante máximos- Corvetas Classe “Inhaúma”.

Nó	Momento Fletor [N m]	Máximo Permissível [N m]	Resultado
115	15.295	1.858.323	ATENDIDO
	Força Cortante [N]	Máximo Permissível [N]	
	-741	49.033	

6.1.5. Discussão

Analisando-se os resultados das Tabelas 6.9 a 6.12, é possível perceber que os valores das reações dos mancais apresentam uma distribuição mais uniforme do que a condição inicial.

O mancal 1, que estava inicialmente descarregado, apresenta um valor positivo e dentro do limite de carga.

O mancal 2, que estava sobrecarregado com o valor acima do permitido, apresenta agora um valor dentro do limite estabelecido.

A diferença de carga entre os mancais da engrenagem reductora, mancais 1 e 2, foi de 14%, atendendo ao limite de 25%.

O alinhamento atendeu ao critério relativo ao momento fletor, ou seja, os momentos fletores nos nós selecionados estão dentro do limite permissível, evitando que a tensão de flexão máxima no eixo seja excedida.

Os valores finais do momento fletor e da força cortante no acoplamento da engrenagem reductora também ficaram abaixo do limite permissível.

6.2 Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”

Esta classe de navio foi construída na década de 50, e, por se tratar de uma embarcação militar, possui um arranjo de linha de eixo diferente da maioria dos navios

mercantes. A linha de bombordo é mais curta que a de boreste, apresentando somente dois mancais intermediários. As linhas de eixo são inclinadas lateralmente de $1,47^\circ$ em relação à linha de centro e possuem uma elevação de $0,47^\circ$ a BB e $0,14^\circ$ a BE.

Esta embarcação não possui engrenagem redutora, sendo os seus eixos conectados diretamente aos MCP's. As embarcações desta classe são equipadas com dois motores diesel de seis cilindros com 1080 cv de potência, a 300 RPM, cada um.

6.2.1. Modelagem

De forma a possibilitar uma comparação dos resultados com o cálculo de alinhamento anterior, realizado por BAPTISTA (1993), a origem do sistema de coordenadas não está na extremidade da linha de eixo que contém o hélice, mas sim no MCP.

Foi usada a linha de eixo de BB para a modelagem e estudo do alinhamento e foram considerados como cargas atuantes na linha de eixo: o peso do hélice, o peso do mancal de escora e o peso do volante do motor, assim como o peso próprio do eixo. Os valores das cargas foram estimados pelo cálculo anteriormente realizado.

Na discretização da linha de eixo em elementos finitos utilizou-se elementos de viga, barra ou pórtico plano, conforme a Figura 6.1. Na discretização foram gerados 37 elementos e 38 nós.

A linha de eixo é suportada por dois mancais intermediários (4 e 5), pelos dois mancais estruturais do tubo telescópico (6 e 7) e pelo mancal estrutural do tipo pé-de-galinha (8). Na modelagem do MCP foram considerados três mancais (1, 2 e 3), totalizando oito mancais. A Figura 6.3 mostra a modelagem da linha de eixo com o posicionamento dos mancais e as cargas atuantes.

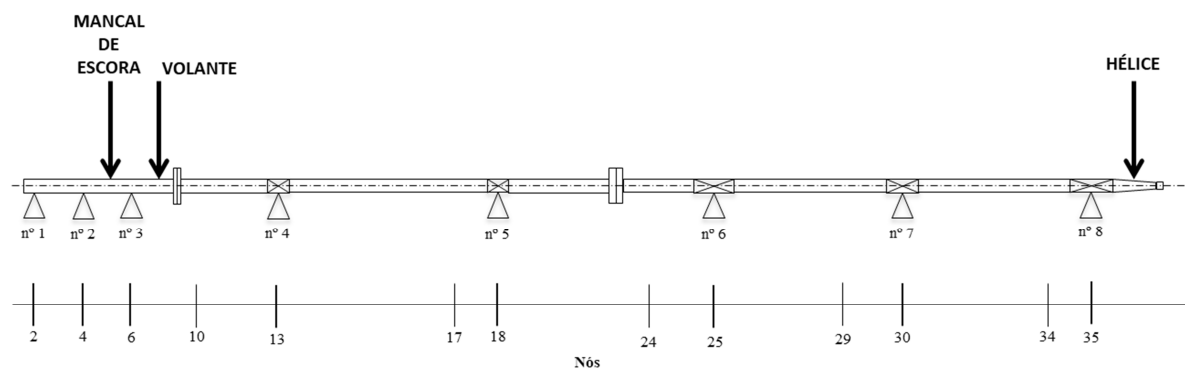


Figura 6.3: Arranjo da linha de eixo – Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.

A Tabela 6.13 apresenta os resultados da análise da linha de eixo pelo método dos elementos finitos na condição de referência com os mancais concentricamente alinhados.

Tabela 6.13 - Valores na condição inicial – Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.

Mancais	Reações [N]	Nós	Momento Fletor [N m]	Nó	Força Cortante [N]	Mancal	Inclinação (rad)
1	939,2	10	-940,2	10	-757,2	8	-0,000453
2	-5.202,4	17	-137,0				
3	19.637,6	24	766,7				
4	4.788,3	29	-1.645,8				
5	2.834,0	34	5.654,3				
6	7.564,0	35	10.168,7				
7	3.184,8						
8	19.538,4						

Assim como os valores iniciais, também foram obtidas as matrizes dos coeficientes de influência de cada um destes parâmetros, conforme a Tabela 6.14.

Tabela 6.14 – Coeficientes de Influência – Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.

Matriz de Influência das Reações [N / mm]								
Mancal	Mancal							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	11.865,35	-34.251,65	22.835,31	-517,43	94,45	-29,95	4,60	-0,68
2	-34.251,65	116.678,77	-87.868,14	6.270,02	-1.144,48	362,98	-55,72	8,22
3	22.835,31	-87.868,14	71.317,30	-7.473,81	1.641,95	-520,75	79,95	-11,80
4	-517,43	6.270,02	-7.473,81	2.560,61	-1.325,69	559,52	-85,90	12,68
5	94,45	-1.144,48	1641,95	-1.325,69	1.836,32	-1.497,78	463,65	-68,42
6	-29,95	362,98	-520,75	559,52	-1.497,78	1.792,86	-854,37	187,50
7	4,60	-55,72	79,95	-85,90	463,65	-854,37	662,43	-214,63
8	-0,68	8,22	-11,80	12,68	-68,42	187,50	-214,63	87,13

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [N.m / mm]								
Nós	Mancal							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10	289,94	-3.513,43	3.671,19	-376,81	-97,86	31,04	-4,76	0,70
17	6,24	-75,57	108,42	-305,05	660,86	-454,36	69,75	-10,29
24	2,59	-31,39	45,04	-48,39	-423,86	815,78	-422,05	62,28
29	-0,70	8,44	-12,12	13,02	-70,26	-111,30	357,77	-184,85
34	0,49	-5,92	8,49	-9,13	49,26	-135,00	154,53	-62,73
35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Matriz de Influência da Força Cortante [N / mm]								
Nó	Mancal							
	1	2	3	4	5	6	7	8
10	449,01	-5.441,01	6.284,46	-1.721,22	591,91	-187,73	28,82	-4,25

Matriz de Influência da Inclinação [rad / mm]								
Mancal	Mancal							
	1	2	3	4	5	6	7	8
8	-0,000001	0,000008	-0,000012	0,000013	-0,000070	0,000192	-0,000533	0,000403

6.2.2. Otimização

A otimização foi realizada considerando-se apenas deslocamentos nos mancais intermediários (mancais 4 e 5) e nos mancais do motor (mancais 1, 2 e 3). Os mancais 6, 7 e 8 não sofreram deslocamentos por serem mancais estruturais. Observou-se também, na busca por soluções, aquelas em que os mancais do eixo de manivelas não fossem deslocados em valores diferentes, pois o motor poderia ser deslocado por igual para cima e para baixo bem como poderia ser inclinado. Caso houvesse diferenças de elevações dos mancais do motor, haveria inclinação do eixo de manivelas.

Em virtude da quantidade de mancais, a alteração da posição dos mancais torna-se mais sensível, e, devido a isso, foi considerado como limite de deslocamento, o valor de apenas 1 mm abaixo ou acima da linha de referência.

Para a otimização dos momentos fletores foram selecionados os nós localizados nos vãos entre os mancais (nós 17, 24, 29 e 34), o nó relativo ao mancal 8 (nó 35) e o nó referente ao acoplamento do MCP com o eixo (nó 10).

Para a força cortante, foi selecionado o nó referente à conexão do eixo com o motor (nó 10).

Assim como no exemplo anterior, o mancal mais próximo ao hélice é um mancal do tipo pé-de-galinha, não sendo então realizada a análise da inclinação neste mancal.

A otimização foi realizada para a condição de navio flutuando - frio, pois os dados referentes aos deslocamentos dos mancais devido à dilatação térmica não estavam disponíveis.

Foram realizadas simulações com deslocamentos verticais paralelos nos 3 mancais do MCP (mancais 1, 2 e 3) ou deslocamentos desiguais dos mancais, gerando uma inclinação do motor.

Após o processo de otimização, algumas soluções foram selecionadas e apresentadas na Tabela 6.15.

Tabela 6.15 – Soluções encontradas - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.

Mancais	Deslocamento [mm]				
	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
1	1,70	1,00	-1,90	-1,48	-0,42
2	1,32	0,62	-1,94	-1,50	-0,80
3	1,12	0,42	-1,94	-1,50	-0,98
4	0,70	0,00	-1,36	-1,06	-1,00
5	0,50	0,00	-0,22	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Analisando as soluções, é possível perceber que em todas elas se faz necessário o deslocamento dos 3 mancais do MCP (mancal 1, 2 e 3). Entretanto, nas soluções 3 e 4 o deslocamento dos mancais do motor são aproximadamente iguais. Na solução 2, apesar de não haver deslocamento nos mancais intermediários (mancal 4 e 5), os deslocamentos dos mancais do motor são diferentes. Não foram encontradas soluções de deslocamentos iguais e positivos dos mancais do motor, somente com valor negativo, a exemplo das soluções 3 e 4, indicando que o melhor caminho para o alinhamento é o rebaixamento do MCP. Comparando as soluções 3 e 4, é possível perceber que na solução 4 é necessário deslocar apenas um mancal intermediário (mancal 4), enquanto que na solução 5, é necessário deslocar os dois mancais intermediários. De forma a evitar a inclinação do eixo de manivelas do motor e de modo a realizar o deslocamento

de apenas um mancal intermediário, a solução escolhida para o alinhamento da linha de eixo foi a solução 4.

6.2.3. Resultados

Os valores obtidos para deslocamentos dos mancais na solução 4 foram inseridos na Equação 4.2 para se obter os valores dos parâmetros na condição final.

Como neste exemplo a linha de eixo do navio é conectada diretamente ao MCP, sem a presença de engrenagem redutora, não houve a necessidade de avaliar o critério de diferença máxima de reação nos mancais.

A Tabela 6.16 apresenta os resultados das reações e os limites máximo e mínimo para cada mancal. O valor máximo permissível de carga foi calculado a partir da área útil e da pressão máxima de cada mancal e a carga mínima foi determinada de modo que o mancal não ficasse descarregado ou com carga nula, sendo considerado então um percentual da carga máxima.

Tabela 6.16 - Resultados das reações dos mancais - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.

Mancais	Reações [N]	Máximo Permissível [N]	Mínimo Permissível [N]	Resultado
1	2.041	33.013	1.650	ATENDIDO
2	2.943	33.013	1.650	
3	9.359	33.013	1.650	
4	3.388	42.257	2.112	
5	7.928	42.257	2.112	
6	4.502	159.959	2.112	
7	3.655	51.187	2.112	
8	19.469	159.959	2.112	

Assim como no exemplo anterior, o momento fletor máximo permissível foi calculado a partir da tensão admissível do material do eixo. A Tabela 6.17 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 6.17 – Momento fletor na linha de eixo - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.

Nós	Momento Fletor [N m]	Máximo Permissível [N m]	Resultado
17	250,87	198.700	ATENDIDO
24	105,15	353.160	
29	-175,02	353.160	
34	581,48	353.160	
35	1.036,56	353.160	

Neste exemplo, também não estavam disponíveis os valores máximos permissíveis especificados pelo fabricante do motor para o momento fletor e força cortante no acoplamento com o eixo, sendo assim, os valores foram estimados de acordo com o limite máximo de tensão do eixo na região da conexão com o MCP, conforme a Tabela 6.18.

Tabela 6.18 – Momento fletor e força cortante máximos - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.

Nó	Momento Fletor [N m]	Máximo Permissível [N m]	Resultado
10	-362,17	3.271.536	ATENDIDO
	Força Cortante [N]	Máximo Permissível [N]	
	-182,41	4.905.000	

6.2.4. Comparação com estudo de BAPTISTA (1993)

Na definição dos deslocamentos necessários, BAPTISTA (1993) apresentou os valores obtidos do cálculo original do navio, realizado pela Marinha do Brasil, quando foram levados em consideração o valor da reação do mancal 3 e a condição de descarregamento do mancal 2. Com isso, foram pesquisados deslocamentos que deixassem as reações da linha de eixo mais uniforme, eliminando principalmente estas duas condições indesejadas. A partir destas considerações foi encontrado como solução o deslocamento de 0,102 mm para o mancal 4 e de 0,189 mm para o mancal 5.

A Tabela 6.19 apresenta um comparativo dos resultados dos deslocamentos e das reações dos mancais entre a otimização e o estudo anterior.

Tabela 6.19 - Comparação entre os resultados – Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”.

Mancais	Deslocamento [mm]	
	BAPTISTA (1993)	Otimização
1	0,000	-1,480
2	0,000	-1,500
3	0,000	-1,500
4	0,102	-1,060
5	0,189	0,000
6	0,000	0,000
7	0,000	0,000
8	0,000	0,000

Mancais	Reações [N]	
	BAPTISTA (1993)	Otimização
1	597	2.041
2	-1.055	2.943
3	15.210	9.359
4	4.885	3.388
5	4.953	7.928
6	5.236	4.502
7	4.168	3.655
8	16.944	19.469

É importante considerar que, no estudo anterior, não foi realizada otimização do cálculo do alinhamento, de modo que os critérios utilizados naquele trabalho não foram os mesmos usados neste, e em razão disso, os resultados encontrados pela otimização são mais adequados.

A discrepância observada no mancal 2 deveu-se ao fato de que no estudo anterior foi encontrada uma condição de descarregamento do mancal. No entanto, neste trabalho, uma condição de descarregamento no mancal foi considerada como não permissível, dentre os critérios de alinhamento considerados.

6.2.5. Discussão

Observando os resultados nas tabelas acima é possível verificar que as reações nos mancais estão uniformemente distribuídas, diferentemente da condição inicial, e que, após a aplicação dos deslocamentos, todos os mancais ficaram dentro dos limites permissíveis para a reação.

O mancal 2, que estava abaixo do valor mínimo, encontra-se dentro do limite estabelecido.

É importante também observar que, apesar de o mancal 3 estar inicialmente abaixo do limite máximo de carga, este estava muito mais carregado que os outros dois mancais do motor.

O alinhamento também alcançou o objetivo desejado para os critérios de momento fletor ao longo da linha de eixo, assim como para a força cortante e momento fletor na conexão do eixo com o MCP.

A otimização foi capaz de encontrar uma solução onde houvesse um deslocamento aproximadamente igual dos três mancais do MCP, evitando assim uma inclinação do eixo de manivelas.

Apesar do mancal 5 não ser estrutural e poder ser deslocado, foi possível encontrar uma solução na qual não houve a necessidade de aplicar deslocamentos neste mancal, o que facilita e reduz o tempo da execução do alinhamento.

6.3 Navio Tanque

Este é um navio tanque - mercante com linha de eixo típica destes tipos de navios, conforme a Figura 6.4. Seu sistema de propulsão apresenta turbina a vapor e caixa redutora. A principal diferença na configuração de sua linha de eixo se dá pela maior rigidez, onde o eixo apresenta um diâmetro consideravelmente maior, e por uma menor quantidade de mancais que a sustentam.

A linha de eixo possui 4 mancais, sendo 1 mancal estrutural no tubo telescópico, 1 mancal intermediário e 2 mancais na engrenagem redutora.

6.3.1. Modelagem

Para a modelagem em elementos finitos da linha de eixo foram considerados como cargas atuantes o peso e o momento do hélice, o peso da engrenagem redutora e o peso próprio do eixo. Os valores foram obtidos no trabalho realizado por BAPTISTA (1993).

Na discretização da linha de eixo em elementos finitos utilizou-se elementos de viga, barra ou pórtico plano, conforme a Figura 6.1. Na discretização foram gerados 39 elementos e 40 nós. A Figura 6.4 mostra um esboço da modelagem da linha de eixo com o posicionamento dos mancais e as cargas atuantes.

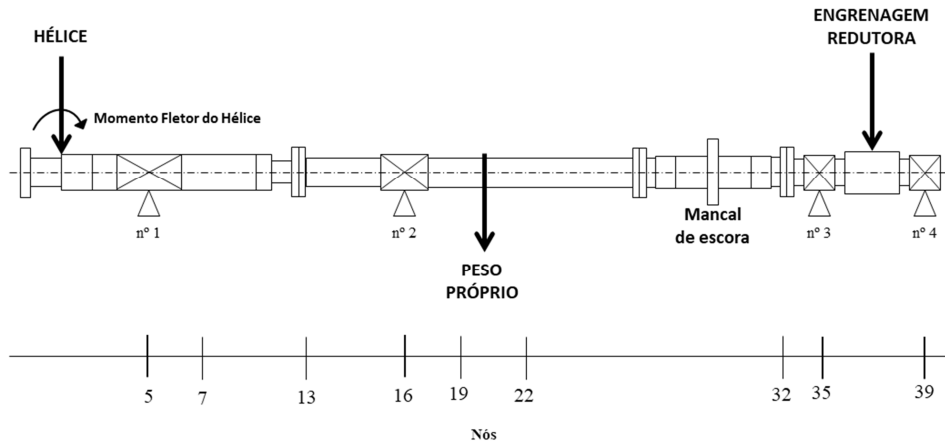


Figura 6.4: Arranjo da linha de eixo – Navio Tanque.

A Tabela 6.20 apresenta os resultados da análise da linha de eixo pelo método dos elementos finitos na condição de referência com os mancais concentricamente alinhados.

Tabela 6.20 - Valores na condição inicial – Navio Tanque.

Mancais	Reações [N]	Nós	Momento Fletor [N m]	Nó	Força Cortante [N]	Mancal	Inclinação (rad)
1	981.409,8	5	1.206.497,0	32	-204.865,2	1	0,000357
2	101.773,7	7	654.325,1				
3	663.795,6	13	173.803,7				
4	20.477,9	19	-151.049,5				
		22	-197.374,5				
		32	198.868,8				

Assim como os valores iniciais, também foram obtidas as matrizes dos coeficientes de influência de cada um destes parâmetros, conforme a Tabela 6.21.

Tabela 6.21 – Matrizes dos Coeficientes de Influência – Navio Tanque.

Matriz de Influência das Reações [N / mm]				
Mancal	Mancal			
	1	2	3	4
1	11.613	-25.468	35.746	-21.891
2	-25.468	67.998	-148.702	106.172
3	35.746	-148.702	517.034	-404.078
4	-21.891	106.172	-404.078	319.797

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [N.m / mm]				
Nós	Mancal			
	1	2	3	4
5	0	0	0	0
7	-23.226	50.936	-71.492	43.782
13	-55.628	121.993	-171.223	104.858
19	-52.068	87.343	-4.879	-30.395
22	-16.503	-21.830	285.077	-246.743
32	29.910	-164.306	663.479	-529.084

Matriz de Influência da Força Cortante [N / mm]				
Nó	Mancal			
	1	2	3	4
32	-13.854	42.529	-112.955	84.280

Matriz de Influência da Inclinação [rad / mm]				
Mancal	Mancal			
	1	2	3	4
1	-0,000163	0,000189	-0,000068	0,000042

6.3.2. Otimização

A otimização foi realizada aplicando-se deslocamentos nos mancais da engrenagem redutora (mancais 3 e 4) e no mancal intermediário (mancal 2). O mancal do tubo telescópico (mancal 1) não sofreu deslocamento por ser um mancal estrutural.

Para a otimização dos momentos fletores foram selecionados os nós localizados nos vãos entre os mancais (nós 7, 13, 19, 22 e 32) e nó referente ao mancal 1 (nó 5).

Diferentemente dos outros dois exemplos anteriores, o mancal mais próximo do hélice é o mancal do tubo telescópico, que é um mancal lubrificado a óleo, e por isso

torna-se adequada a análise da inclinação do eixo com este mancal. Para esta análise, foi selecionado o nó relativo a este mancal (nó 5).

Para a otimização da força cortante foi selecionado o nó relativo à conexão do eixo com a engrenagem redutora (nó 32).

A otimização foi realizada para o navio na condição de operação a quente. Os deslocamentos devido à dilatação térmica considerados foram extraídos do Manual NV5060, da Norske Veritas (1981), e estão apresentados na Tabela 6.22.

Tabela 6.22 – Deslocamentos devido à dilatação térmica - Navio Tanque.

Deslocamento [mm]	Mancal			
	1	2	3	4
	0,00	2,10	1,18	0,89

Nas primeiras simulações por busca de soluções, foram considerados os deslocamentos nos três mancais possíveis de serem deslocados (mancais 2, 3 e 4). Também foi considerada a possibilidade de deslocamento apenas dos mancais da engrenagem redutora (mancais 3 e 4).

Durante o processo de otimização foram encontradas soluções para os dois casos citados, como pode ser visto na Tabela 6.23.

Tabela 6.23 - Deslocamentos a serem aplicados nos mancais - Navio Tanque.

Mancais	Deslocamento [mm]				
	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	-4,80	-1,10	-2,10	-2,10	0,00
3	-3,68	0,12	0,22	-1,38	0,12
4	-2,19	1,41	1,71	-0,39	0,91

As soluções encontradas já consideram os deslocamentos para compensar a dilatação térmica. Na solução 1 e 2, existe a necessidade de deslocamento dos dois mancais da engrenagem redutora (mancal 3 e 4) e do mancal intermediário (mancal 2). Nas soluções 3 e 4, percebe-se que o deslocamento no mancal 2 possui o mesmo valor de -2,10 mm, em virtude da necessidade de compensar a dilatação térmica sofrida, como pode ser visto na Tabela 6.22. É interessante notar que mesmo havendo a necessidade

de se deslocar o mancal 2 para compensar a dilatação térmica, a solução 5 não possui deslocamento no mancal 2, pois esta compensação foi obtida através dos deslocamentos dos mancais da engrenagem redutora (mancais 3 e 4). Em virtude de haver somente deslocamentos dos mancais da engrenagem redutora, a solução 5 foi escolhida para o alinhamento do linha de eixo.

Com o intuito de ilustrar o processo de evolução da otimização dos parâmetros, são apresentados os gráficos das Figuras 6.5, 6.6 e 6.7.

Na Figura 6.5, é apresentado o valor da reação no mancal 1 para cada geração. É possível observar que a convergência ocorre por volta da geração de número 100. A Figura 6.6, apresenta a reação nos mancais da engrenagem redutora, mancais 3 e 4, de forma a visualizar a diferença de carga entre os mancais. É possível verificar que a convergência também ocorre próxima à geração de número 100. A Figura 6.7 mostra a variação da inclinação no nó do mancal do tubo telescópico. É possível observar que, apesar da convergência destes três critérios ter ocorrido aproximadamente na centésima geração, o processo de otimização só foi interrompido por volta da 250^a geração. Isso ocorreu pelo fato de existirem outros critérios a serem atendidos que não foram mostrados nestes três gráficos.

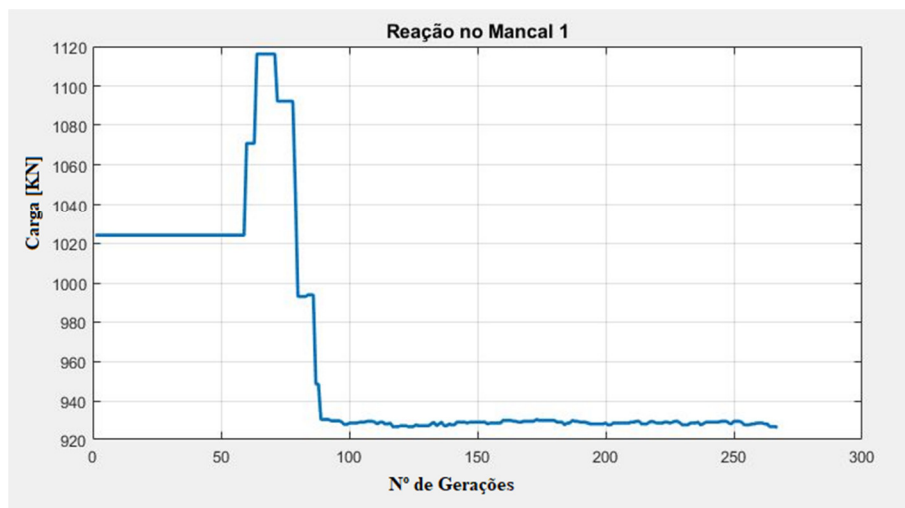


Figura 6.5: Variação da reação do mancal 1.

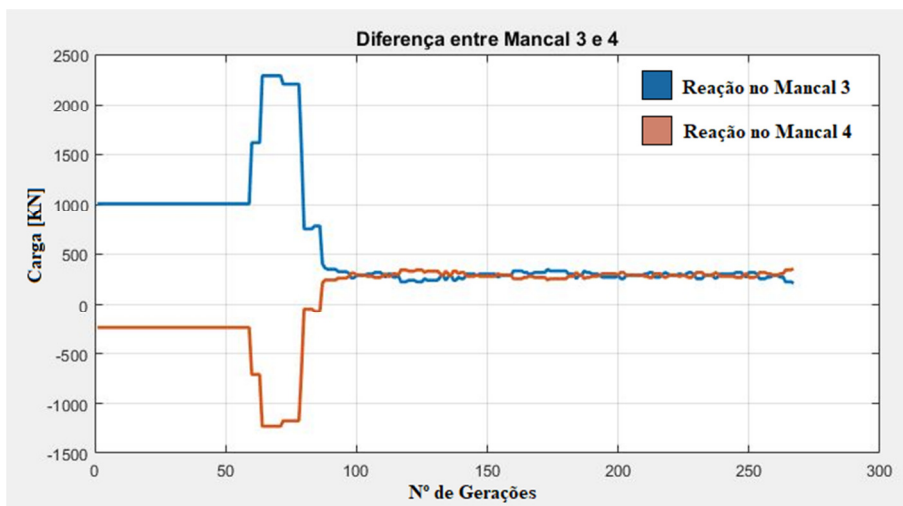


Figura 6.6: Variação da diferença de carga nos mancais 3 e 4.

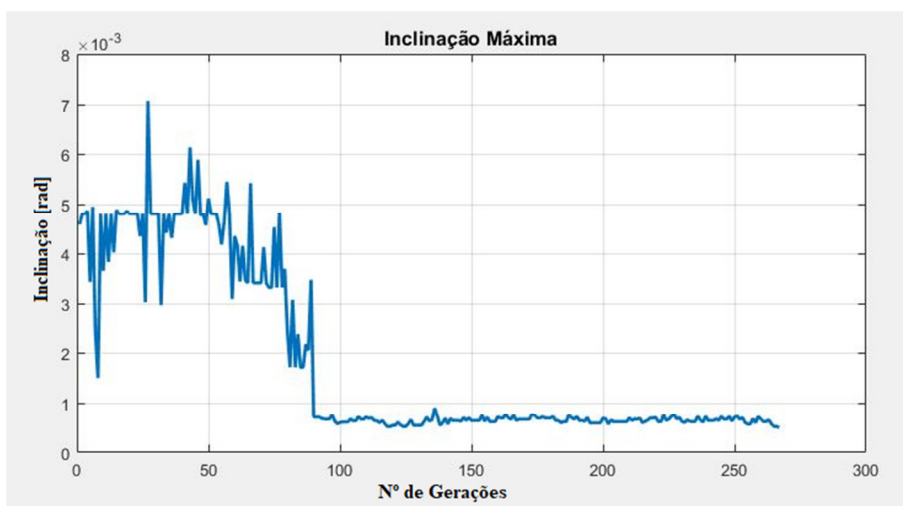


Figura 6.7: Variação da inclinação no mancal 1.

6.3.3. Resultados

Os valores obtidos para os deslocamentos dos mancais da solução 5 foram inseridos na Equação 4.2 para se determinar os valores dos parâmetros na condição final. A Tabela 6.24 apresenta os valores da diferença entre as reações dos mancais da engrenagem redutora e a diferença máxima permitível.

Tabela 6.24 - Diferença entre as reações dos mancais da engrenagem redutora.

Mancais	Reações [N]	Critério	Resultado
R3	296.325	$ R3-R4 < 100.000 N$	ATENDIDO
R4	293.773		
 R3-R4 	2.553		

A Tabela 6.25 apresenta os resultados das reações e os limites máximo e mínimo para cada mancal da linha de eixo. O valor máximo permissível de carga foi calculado a partir da área útil e da pressão máxima de cada mancal e o valor mínimo como sendo um percentual da carga máxima permitida.

Tabela 6.25 - Resultados das reações dos mancais – Navio Tanque.

Mancais	Reações [N]	Máximo Permissível [N]	Mínimo Permissível [N]	Resultado
1	934.992	1.000.000	417.000	ATENDIDO
2	242.367	600.000	100.000	
3	296.325	400.000	100.000	
4	293.773	400.000	200.000	

O momento fletor máximo permissível foi calculado a partir da tensão admissível do material do eixo. A Tabela 6.26 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 6.26 - Momento fletor ao longo da linha de eixo – Navio Tanque.

Nós	Momento Fletor [N m]	Máximo Permissível [N m]	Resultado
5	1.206.497	32.206.000	ATENDIDO
7	747.161	32.206.000	
13	396.145	118.647.000	
19	-28.683	15.153.000	
22	-316.757	15.153.000	

Neste exemplo também não estavam disponíveis os valores especificados pelo fabricante da engrenagem redutora para o máximo permissível do momento fletor e da força cortante no acoplamento do eixo com o a engrenagem redutora, de forma que os valores foram estimados de acordo com o limite máximo de tensão do eixo na região da conexão com a engrenagem redutora, conforme a Tabela 6.27.

Tabela 6.27 - Momento fletor e força cortante máximos – Navio Tanque.

Nó	Momento Fletor [N m]	Máximo Permissível [N m]	Resultado
32	-236.002	118.647.000	ATENDIDO
	Força Cortante [N]	Máximo Permissível [N]	
	-110.690	1.000.000	

Além de verificar se os critérios foram atendidos, é importante também analisar a inclinação do eixo em relação ao mancal do tubo telescópico. O eixo deve estar alinhado com o mancal de forma que seu peso esteja distribuído pela maior parte da área do mancal, caso contrário, o peso total do hélice ficará concentrado em uma pequena área na extremidade posterior do mancal. Devido a esta condição, é importante analisar a inclinação após a aplicação do conjunto de deslocamentos dos mancais. Se a inclinação estiver acima do limite permitido, é necessário realizar um ajuste no mancal, por meio de usinagem, para que o mancal possa acomodar o eixo sobre toda sua área. Como valor de orientação, recomenda-se que este ângulo de inclinação não exceda 0,0003 rad. A inclinação na condição final está apresentada na Tabela 6.28 e mostra que seu valor ficou acima do limite estabelecido, portanto, sendo necessário realizar um ajuste no mancal.

Tabela 6.28 - Inclinação no mancal do tubo telescópico – Navio Tanque.

Mancal	Inclinação (rad)	Máximo permissível [rad]	Resultado
1	0,00074	0,00030	NECESSITA DE AJUSTE

6.3.4. Comparação com estudo de BAPTISTA (1993)

BAPTISTA (1993) também realizou o cálculo do alinhamento do eixo para este navio. Na ocasião, foram selecionados como solução os deslocamentos de -2,1 mm para o mancal 2, -1,32 mm para o mancal 3 e -1,61 mm para o mancal 4.

A Tabela 6.29 mostra o comparativo para os deslocamentos e a reação nos mancais. É possível perceber que os resultados finais encontrados para a reação dos mancais são semelhantes. No entanto, na solução 5, encontrada pela otimização, houve somente a necessidade de se deslocar os mancais 3 e 4. Adicionalmente, por se assemelhar com a solução encontrada por BAPTISTA (1993), também foi inserida na tabela a solução 4.

Tabela 6.29 - Comparação entre os resultados – Navio Tanque.

Mancais	Deslocamento [mm]		
	BAPTISTA (1993)	Otimização (Solução 4)	Otimização (Solução 5)
1	0,00	0,00	0,00
2	-2,10	-2,10	0,00
3	-1,32	-1,38	0,12
4	-1,61	-0,39	0,91

Mancais	Reações [N]		
	BAPTISTA (1993)	Otimização (Solução 4)	Otimização (Solução 5)
1	756.610	963.315	934.992
2	454.050	184.600	242.367
3	253.180	358.350	296.325
4	302.600	261.192	293.773

6.3.5. Discussão

Analisando-se os resultados das tabelas pode-se verificar que as reações nos mancais estão dentro dos limites de carga para cada mancal.

A diferença de carga entre os mancais da engrenagem redutora, mancais 3 e 4, está abaixo do limite máximo.

O alinhamento também alcançou o objetivo para os critérios de momento fletor ao longo da linha de eixo, assim como para a força cortante e para o momento fletor no acoplamento do eixo com a engrenagem redutora.

Apesar do deslocamento sofrido devido a dilatação térmica no mancal 2, a otimização foi capaz de encontrar uma solução onde não houvesse deslocamento deste mancal, conseguindo fazer esta compensação através dos deslocamentos dos mancais 3 e 4.

Foi percebido que haverá a necessidade de ajuste do mancal do tubo telescópico devido à inclinação do eixo em relação ao mancal estar acima do permitido.

6.4 Navio Mercante – Casco Verolme - B72

Este último exemplo traz um navio cuja linha de eixo é equipada com um motor MAN – BW5L67BGE, com 1080 BHP de potência, a 123 RPM. A linha de eixo possui um gerador de eixo diretamente acoplado.

A linha de eixo é suportada por cinco mancais, sendo: dois mancais estruturais no tubo telescópico, um mancal intermediário e dois mancais no motor, conforme mostrado na Figura 6.8.

6.4.1. Modelagem

A modelagem foi realizada considerando como cargas atuantes na linha de eixo os pesos do hélice, volante do motor e do mancal de escora. Estes pesos foram estimados a partir da geometria de cada elemento, pois os seus valores não estavam disponíveis.

Na discretização da linha de eixo em elementos finitos utilizou-se elementos de viga, barra ou pórtico plano, conforme a Figura 6.1. Na discretização foram gerados 39 elementos e 40 nós. A Figura 6.8 apresenta a modelagem da linha de eixo com o posicionamento dos mancais e as cargas atuantes.

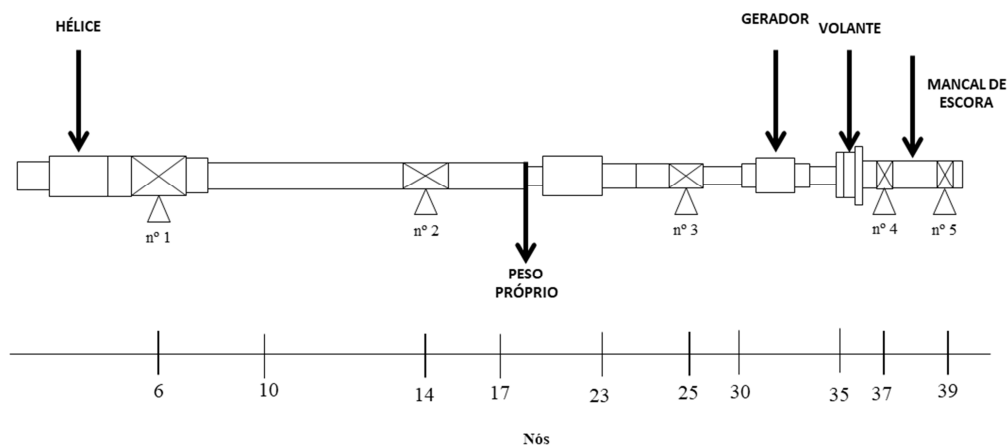


Figura 6.8: Arranjo da linha de eixo – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

A Tabela 6.30 apresenta os resultados da análise da linha de eixo pelo método dos elementos finitos na condição de referência com os mancais concentricamente alinhados.

Tabela 6.30 - Condição inicial – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Mancais	Reações [N]	Nós	Momento Fletor [N m]	Nó	Força Cortante [N]	Mancal	Inclinação (rad)
1	292.925	6	244.756	35	-129.927	1	0,000412
2	-40.287	10	82.452				
3	109.322	17	-43.558				
4	243.505	23	4.840				
5	-23.922	30	-52.699				
		35	-233				

Além dos resultados da análise na condição inicial, também foram obtidas as matrizes dos coeficientes de influência de cada um destes parâmetros, conforme a Tabela 6.31.

Tabela 6.31 – Coeficientes de Influência – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Matriz de Influência das Reações [N / mm]					
Mancal	Mancal				
	1	2	3	4	5
1	1.912,34	-3.884,94	2.513,49	-1.264,17	723,28
2	-3.884,94	8.752,82	-7.356,20	5.815,67	-3.327,36
3	2.513,49	-735,20	13.320,86	-29.627,49	21.149,34
4	-1.264,17	5.815,67	-29.627,49	104.830,45	-79.754,46
5	723,28	-3.327,36	21.149,34	-79.754,46	61.209,20

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [N.m / mm]					
Nós	Mancal				
	1	2	3	4	5
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	-3.337,03	6.779,22	-4.386,04	2205,97	-1.262,12
17	-4.680,84	8.627,12	-3.846,00	-234,38	134,10
23	-92,58	-2.695,58	7.418,14	-10.821,17	6.191,19
30	383,96	-1.766,39	-4.461,20	31.565,29	-25.721,67
35	-497,69	2.289,56	-18.280,59	72.439,16	-55.950,44

Matriz de Influência da Força Cortante [N / mm]					
Nó	Mancal				
	1	2	3	4	5
35	540,89	-2.488,31	8.478,15	-25.075,99	18.545,26

Matriz de Influência da Inclinação [rad / mm]					
Mancal	Mancal				
	1	2	3	4	5
1	-0,000353	0,000422	-0,000089	0,000045	-0,000026

6.4.2. Otimização

A otimização foi realizada considerando-se os deslocamentos nos mancais do MCP (mancais 4 e 5) e no mancal intermediário (mancal 3). Os mancais do tubo telescópico (mancais 1 e 2) não sofreram deslocamentos por serem mancais estruturais.

Para a otimização dos momentos fletores foram selecionados os nós localizados nos vãos entre os mancais (nós 10, 17, 23 e 30), o nó relativo ao mancal 1 (nó 6) e o nó do acoplamento do motor com o eixo (nó 35).

Para a força cortante, foi selecionado o nó referente ao acoplamento do eixo com o motor (nó 32).

Para a inclinação, foi selecionado o nó relativo ao mancal de ré do tubo telescópico, mancal 1 (nó 6).

A otimização foi realizada para a condição de navio flutuando - frio, pois os dados referentes aos deslocamentos dos mancais devido à dilatação térmica não estavam disponíveis.

De forma a facilitar o processo de execução do alinhamento, na otimização foram pesquisadas somente soluções em que houvesse o rebaixamento dos mancais.

Durante a avaliação das soluções encontradas, foi percebido que algumas apresentavam o valor da reação do mancal 2 muito baixo dos demais, conforme mostra a Tabela 6.32, indicando que este mancal poderia ser retirado e sua carga redistribuída entre os demais. Para este novo arranjo foi necessário executar uma nova otimização.

Tabela 6.32 – Soluções Iniciais– Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Mancais	Deslocamentos [mm]	Reações [N]	Deslocamentos [mm]	Reações [N]	Deslocamentos [mm]	Reações [N]
1	0	259.529	0	233.250	0	243.778
2	0	30.811	0	27.894	0	20.730
3	-2	97.479	-5	164.239	-4	169.709
4	-3	86.810	-16	107.980	-12	18.925
5	-3	106.915	-19	48.180	-14	128.401

Diante disto, foi proposta e realizada uma nova configuração da linha de eixo com a retirada do mancal 2 e com o reposicionamento do mancal 3, 247 mm mais a ré, de forma a diminuir o vão entre este e o mancal 1, tornando a linha de eixo mais flexível e capaz de absorver melhor os deslocamentos verticais dos mancais.

A Figura 6.9 mostra o novo arranjo e modelagem em elementos finitos para a nova configuração.

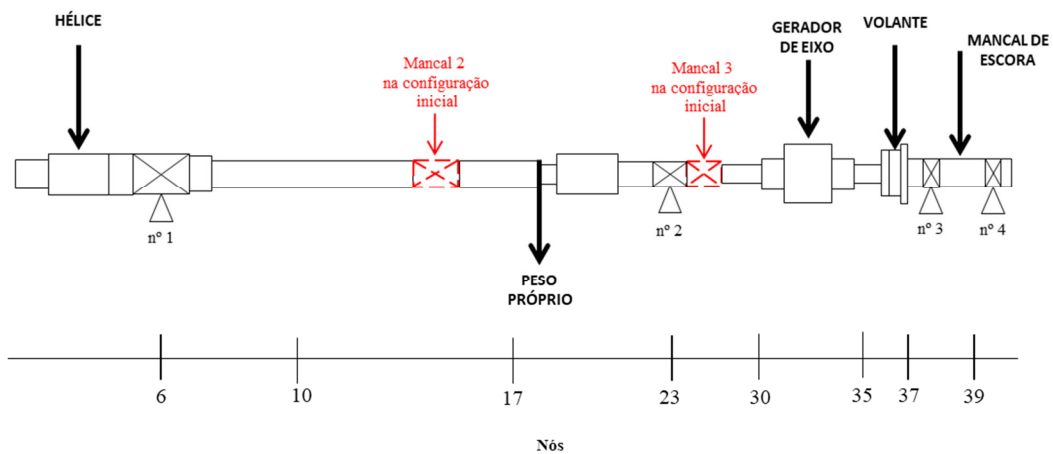


Figura 6.9: Arranjo da linha de eixo na nova configuração - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

A Tabela 6.33 apresenta os resultados da análise da linha de eixo pelo método dos elementos finitos na condição de referência com os mancais concentricamente alinhados.

Tabela 6.33 - Resultados na nova configuração – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Mancais	Reações [N]	Nós	Momento Fletor [N m]	Nó	Força Cortante [N]	Mancal	Inclinação (rad)
1	273.090	6	244.756	35	-157.814	1	0,000629
2	60.984	10	117.063				
3	319.214	17	4.999				
4	-71.745	23	5.825				
		30	-61.245				
		35	36.675				

Os novos valores de coeficientes de influência também foram determinados, como mostra a Tabela 6.34.

Tabela 6.34 – Coeficientes de Influência – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Matriz de Influência das Reações [N / mm]				
Mancal	Mancal			
	1	2	3	4
1	2.477	-8.678	17.621	-11.419
2	-8.678	53.463	-186.377	141.592
3	17.621	-186.377	799.089	-630.332
4	-11.419	141.592	-630.332	500.159

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [N.m / mm]				
Nós	Mancal			
	1	2	3	4
5	0.00	0.00	0.00	0.00
7	-440,55	1.543,60	-3.134,34	2.031,29
13	-1.143,67	4.007,17	-8.136,70	5.273,20
19	-1.730,91	6.064,72	-12.314,62	7.980,80
22	-108,25	-5.654,35	31.844,29	-26.081,68
32	922,10	-13.095,75	59.884,42	-47.710,77

Matriz de Influência da Força Cortante [N / mm]				
Nó	Mancal			
	1	2	3	4
32	-632,12	4.565,28	-17.202,53	13.269,38

Matriz de Influência da Inclinação [rad / mm]				
Mancal	Mancal			
	1	2	3	4
1	-0,000181	0,000268	-0,000249	0,000161

Uma nova otimização do alinhamento foi realizada para o novo arranjo da linha de eixo, chegando-se as soluções apresentadas na Tabela 6.35.

Tabela 6.35 – Soluções encontradas - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Mancais	Deslocamento [mm]				
	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	-1,0	0,7	0,0	0,0	0,0
3	-2,0	1,3	-1,5	0,4	-1,4
4	-1,9	1,7	-1,6	0,9	-1,4

Analisando as soluções encontradas, é possível perceber que nas soluções 1 e 2 existe a necessidade de deslocamento dos mancais do MCP (3 e 4) e do mancal intermediário (mancal 2) . Nas soluções 3, 4 e 5 não há a necessidade de deslocamento do mancal intermediário, entretanto, percebe-se que os deslocamentos dos mancais do MCP na solução 5 possuem o mesmo valor de -1,4 mm. Como ocorreu no exemplo apresentado no item 6.2, é preferível escolher um deslocamento paralelo dos mancais do MCP, de forma a evitar uma inclinação do eixo de manivelas do equipamento. Sendo assim, a solução escolhida para o alinhamento da linha de eixo foi a solução 5.

6.4.3. Resultados

De forma a verificar se a nova configuração pode ser executada, foram analisados todos os critérios da mesma forma que nos exemplos anteriores, com a aplicação dos deslocamentos da solução 5.

A Tabela 6.36 apresenta os resultados das reações e os limites máximo e mínimo para cada mancal da linha de eixo.

Tabela 6.36 - Reação nos mancais - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Mancais	Reações [N]	Máximo Permissível [N]	Mínimo Permissível [N]	Resultado
1	264.409	380.500	98.100	ATENDIDO
2	123.683	189.706	39.240	
3	82.955	196.102	39.240	
4	110.497	400.395	39.240	

A Tabela 6.37 apresenta o resultado dos momentos fletores ao longo da linha de eixo.

Tabela 6.37 - Momentos fletores - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Nós	Momento Fletor [N m]	Máximo Permissível [N m]	Resultado
6	244.756	5.358.212	ATENDIDO
10	132.213	5.197.397	
17	44.326	5.197.397	
23	65.346	2.934.956	
30	-140.389	23.304.950	

Assim como nos outros exemplos, os valores especificados pelo fabricante do motor para o momento fletor máximo permissível e para força cortante máxima permissível no acoplamento do eixo com o motor não estavam disponíveis, sendo assim, os valores foram estimados de acordo com o limite máximo de tensão do eixo na conexão do eixo com o motor, conforme Tabela 6.38.

Tabela 6.38 - Momento fletor e força cortante máximos - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Nó	Momento Fletor [N m]	Máximo Permissível [N m]	Resultado
35	-130.518	49.695.204	ATENDIDO
	Força Cortante [N]	Máximo Permissível [N]	
	-103.796	294.300	

Assim como ocorreu no exemplo anterior, o mancal do tubo telescópico é o mais próximo do hélice. Por isso, foi verificada a inclinação do mancal em relação à linha de centro do eixo após a aplicação dos deslocamentos nos mancais. A Tabela 6.39 mostra que esta inclinação foi de 0,00062 rad, sendo maior que o máximo permissível de 0,0003 rad. Isso significa que para o eixo se acomodar de forma adequada, o mancal deverá ser ajustado por um processo de usinagem.

Tabela 6.39 - Inclinação no mancal do tubo telescópico - Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Mancal	Inclinação (rad)	Máximo permissível [rad]	Resultado
1	0,00062	0,00030	NECESSITA DE AJUSTE

6.4.4. Comparação com estudo de BAPTISTA (1993)

O cálculo de alinhamento realizado por BAPTISTA (1993), para a linha de eixo em questão, teve como objetivo eliminar o valor negativo da reação do mancal 4 e distribuir uniformemente as reações dos mancais. Com isso, foram selecionados como solução os deslocamentos de -1,0 mm para o mancal 2, e de -2,0 mm para os mancais 3 e 4. A Tabela 6.40 mostra o comparativo para o deslocamento e as reações dos mancais. Observa-se uma semelhança quanto ao resultado final das reações nos mancais. No entanto, na solução 5, gerada pela otimização, houve somente a necessidade de se aplicar deslocamento nos mancais 3 e 4, tornando a execução do alinhamento mais

simples. Por se assemelhar à solução encontrada por BAPTISTA (1993), a solução 1 também foi inserida na tabela.

Tabela 6.40 - Comparação entre resultados – Navio Mercante – Casco Verolme – B72.

Mancais	Deslocamento [mm]		
	BAPTISTA (1993)	Otimização (Solução 1)	Otimização (Solução 5)
1	0,00	0,0	0,0
2	-1	-1,0	0,0
3	-2	-2,0	-1,4
4	-2	-1,9	-1,4

Mancais	Reações [N]		
	BAPTISTA (1993)	Otimização (Solução 1)	Otimização (Solução 5)
1	260.053	268.224	264.409
2	100.454	111.250	123.683
3	129.060	105.045	82.955
4	73.516	97.024	110.497

6.4.5. Discussão

Analisando-se os resultados das tabelas dos resultados, pode-se verificar que as reações nos mancais estão dentro dos limites de carga para cada mancal.

O alinhamento também alcançou o objetivo para os critérios de momento fletor ao longo da linha de eixo, assim como para a força cortante e para o momento fletor na conexão do eixo com o motor.

Foi verificado também que haverá a necessidade de ajuste do mancal do tubo telescópico devido à inclinação do eixo em relação ao mancal estar acima do permitido.

Mesmo com a retirada de um mancal, foi possível alinhar o eixo de forma que toda a carga do sistema fosse redistribuída e suportada pelos quatro mancais remanescentes, atendendo ao limite máximo e mínimo individual de cada mancal.

É importante observar que a solução selecionada exige apenas deslocamentos nos mancais do MCP (mancais 3 e 4), o que não foi possível observar-se com a configuração inicial da linha de eixo. Como dito anteriormente, uma menor quantidade de mancais sendo deslocados facilita a execução do alinhamento.

Percebe-se também que foi encontrada, durante o processo de otimização, uma solução muito próxima à solução encontrada por BAPTISTA (1993), e com resultado das reações nos mancais muito próximos, apesar de os dois estudos terem utilizados metodologias diferentes.

7. Conclusões e Recomendações

7.1 Conclusões

O maior desafio no cálculo de alinhamento de eixos propulsores é a determinação dos deslocamentos a serem aplicados nos mancais. O método de tentativa e erro não é adequado, pois demanda muito tempo, e é por isso que a otimização se torna de extrema importância. No entanto, ocorre que muitas vezes a otimização pode ser complexa e inacessível.

A escolha do método de otimização ED no desenvolvimento do algoritmo contribuiu para torná-lo simples e eficiente, em virtude do elevado número de critérios utilizados para o alinhamento.

A utilização de diversos critérios de alinhamento junto com o processo de otimização representou uma contribuição importante para o alinhamento de eixos propulsores, visto que torna a escolha dos deslocamentos dos mancais mais confiável.

A inclusão do deslocamento sofrido pelo mancal devido à dilatação térmica no algoritmo contribuiu para dar mais confiabilidade ao alinhamento, uma vez que a execução do alinhamento ocorre com o navio na condição “fria” e a operação do mesmo na condição “quente”.

A inclusão da verificação da inclinação no mancal do tubo telescópico contribuiu para uma melhor análise da condição de alinhamento, visto que, foi possível verificar a necessidade ou não de se fazer o ajuste no mancal.

A partir dos resultados obtidos pela metodologia de determinação dos deslocamentos dos mancais, foi possível observar que o algoritmo desenvolvido mostrou-se capaz de efetuar o alinhamento de forma consideravelmente mais rápida em comparação com o método da tentativa e erro.

O algoritmo mostrou-se, também, eficaz no alcance dos objetivos, pois, em todos os exemplos apresentados, a determinação dos deslocamentos foi realizada atendendo a todos os critérios adotados.

A metodologia e o algoritmo desenvolvidos aqui neste trabalho possuem grande aplicabilidade, pois podem ser utilizados em diferentes tipos e configurações de sistemas de propulsão, bastando apenas uma adaptação dos parâmetros do algoritmo.

7.2 Sugestões Para Trabalhos Futuros

Visando trabalhos futuros, são apresentadas sugestões para linhas de pesquisas adicionais:

- O comportamento da linha elástica do eixo e sua relação com o alinhamento da linha de eixo.
- Influência das cargas dinâmicas no alinhamento de eixo.
- Aplicação de Inteligência Artificial no cálculo do alinhamento de eixo.

Referências Bibliográficas

ANTKOWIAK, E. T., 1957, “Calculation of Ship Propulsion Shafting, Bearing Reactions for an IBM-650 Computer”, Development Report No. R-11, *Boston Naval Shipyard*, Boston, Massachusetts.

BAPTISTA, L. A. R., 1993, *Análise do Alinhamento de Eixos Propulsores* - Dissertação de M.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

BATRA, Amit; SHANKAR, K.; SWARNAMANI, S., 2007, “Propulsion shaft alignment measurements on warships afloat and alignment solution using multi-objective optimization”. *Proceedings of IMarEST-Part A-Journal of Marine Engineering and Technology*, v. 2007, n. 9, p. 39-49.

BATRAK, Yu; BATRAK, R.; BERIN, D., 2013, “Computer application for shaft alignment design”. *International Conference on Computer Applications in Shipbuilding*. pp. 8.

BRADSHAW, R. T., 1974, “The optimum alignment of marine shafting. Marine Technology”. *SNAME News*, v. 11, n. 3, pp. 260-269.

COLAÇO, M. J., ORLANDE, H. R., & DULIKRAVICH, G. S., 2006, “Inverse and optimization problems in heat transfer”. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 28, n.1, pp. 1-24.

DAS, S.; SUGANTHAN, P. N., 2011, “Differential evolution: a survey of the state-of-the-art”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 15, n. 1, p.04-31.

GOLBERG, David E., 1989, “Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning”. *Addion wesley*, v. 1989, n. 102, pp. 36.

HARRINGTON, Roy L. (Ed.), 1992, *Marine engineering*. Society of Naval Architects &.

HO, W. H., TSAI, J. T., CHOU, J. H., & YUE, J. B., 2016, “Intelligent hybrid Taguchi-genetic algorithm for multi-criteria optimization of shaft alignment in marine vessels”. *IEEE Access*, v. 4, pp. 2304-2313.

IZMAILOV, A., & SOLODOV, M., 2005, *Otimização*, “volume 1: condições de otimalidade, elementos de análise convexa e de dualidade”. Impa.

KENNEDY, J.; EBERHART, R., 1992, “Particle swarm optimization, in proceedings of ICNN'95-International Conference on Neural Networks”. *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, v. 1992.

KIRKPATRICK, Scott; GELATT, C. Daniel; VECCHI, Mario P., 1983, “Optimization by simulated annealing”. *science*, v. 220, n. 4598, pp. 671-680.

KORBETIS, G., VLACHOS, O., CHARITOPOULOS, A. G., & PAPADOPOULOS, C. I., 2014, “Effects of Hull Deformation on the Static Shaft Alignment Characteristics of VLCCs: A Case Study”. In: *Proceedings of the 13th International Conference on Computer Applications and Information Technology in the Maritime Industries*, pp. 12-14.

KOSIBA, R. E., WOOLACOTT, R. A., & FRANCIS, J. J., 1956, “The Alignment of Main Propulsion Shaft Bearings in Ships”. *Society of Naval Architects and Marine Engineers*.

LARSEN, O. C., 1981, “Some considerations of marine shafting design”. *Industrial Lubrication and Tribology*.

LEE, J. U., 2018, “Application of strain gauge method for investigating influence of ship shaft movement by hydrodynamic propeller forces on shaft alignment.”. *Measurement*, v. 121, pp. 261-275.

LOUREIRO, H., & BRAGATO, L. A., 1981, “EST-CV01-243-04 – Cálculo de Alinhamento do Eixo Propulsor” – *Diretoria de Engenharia Naval*.

MANN, G., 1965, “Analysis of shafting problems using fair curve alignment theory”. *Naval Engineers Journal*, v. 77, n. 1, pp. 117-133.

MASTERS, T, 1993, “Practical neural network recipes in C++”. Morgan Kaufmann.

METROPOLIS, Nicholas et al., 1953, “Equation of state calculations by fast computing machines”. *The journal of chemical physics*, v. 21, n. 6, pp. 1087-1092, 1953.

NOSKE VERITAS, 1981, Det. Shaft Alignment Calculation User's Manual. NV, v. 5060, p. 5.

OWEN, S.E., “Optimization and Stochastic Modeling Applied to Propulsion Shafting Alignment”, *SNAME Transactions*.

POLAK, E., 1971, *Computational methods in optimization: a unified approach*. v. 77. Academic press.

RAO, M. N. et al., 1991, “Computer-aided alignment of ship propulsion shafts by strain-gage methods”. *Marine Technology and SNAME News*, v. 28, n. 02, pp. 84-90.

REN, Li; ZHANG, WenXiao; YU, JingBo, 2010, “Marine shafting reasonable alignment design based on genetic algorithm. In: The 2nd International Conference on Information Science and Engineering”. *IEEE*, pp. 1288-1291.

SARAMAGO, S. F. P.; FARIA, E. D., 2001, “Constraint optimization problems using simulated annealing”. *Ciência & Engenharia, Brasil*, v. 10, n. 1, pp. 69-75.

SHIGLEY, J. E., MITCHELL, L. D., & SAUNDERS, H., 1985, *Mechanical engineering design*. New York: McGraw-Hill.

SNAME (The Society of Naval Architects and Marine Engineers), 2007, Practices and Procedures for the Alignment of Marine Main Propulsion Shafting Systems. Tech. Res. Bull. 2007, 3–51.

STORN, R., & PRICE, K., 1997, “Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces”. *Journal of global optimization*, v. 11, n. 4, pp. 341-359.

STORN, R., 1999, “System design by constraint adaptation and differential evolution”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, v. 3, n. 1, pp. 22-34.

SUCUPIRA, Igor Ribeiro, 2007, “Dissertação de Mestrado: Um Estudo Empírico de Hiper-Heurísticas.” *IME/USP*, 2007.

ŠVERKO, D., 2003, “Shaft Alignment Optimization with Genetic Algorithms”. *SNAME Propellers/Shafting Symposium*, pp. 17-18.

URSOLOV, A.; BATRAK, Y.; TARELKO, W., 2019, “Application of the optimization methods to the search of marine propulsion shafting global equilibrium in running condition”. *Polish Maritime Research*, v. 26, n. 3, pp. 172-180.

VASSILOPOULOS, L., 1988, “Static and underway alignment of main propulsion shaft systems”. *Naval engineers journal*, v. 100, n. 3, pp. 101-116.

WANG, Hongzhi; GUAN, Delin., 2010, “The optimization algorithms for ship shafting alignment”, *International Conference on Intelligent Control and Information Processing. IEEE*. pp. 624-627.

Apêndice A - Algoritmo de Otimização

Este apêndice inclui os códigos elaborados em MatLab que compõem o algoritmo de otimização, responsável pela determinação dos deslocamentos a serem aplicados aos mancais. Os códigos apresentados são referentes ao cálculo realizado para o exemplo de estudo da Corveta Classe “Inhaúma”.

```
%%-----ALGORITMO DE OTIMIZAÇÃO-----%%
%%-----%%
clc;
clear all;
close all;

%%-----DADOS DE ENTRADA-----%%

navio={'Corveta Inhauma'}; %indicativo do navio

rin=load('reacoes.txt');%reações iniciais
matriz=load('matriz.txt');%matriz de influência das reações

fletor=load('fletor_ini.txt');% momentos fletores iniciais
matriz_f=load('matriz_fletor.txt');%matriz de influência dos momentos
fletores

rot=load('rot_ini.txt');%inclinação inicial
matriz_rot=load('matriz_rot.txt');%matriz de influência da inclinação

cort=load('cort_ini.txt');%força cortante inicial
matriz_cort=load('matriz_cort.txt');%matriz de influência da força
cortante

termo=load('termo.txt');%deslocamento devido à dilatação térmica

%%-----PARÂMETROS DE CONTROLE-----%%

num_var=6; %número de mancais
num_sol=5; % Número de Soluções máxima
npop=10; %número de indivíduos da população
data=date;% data de hoje

%%-----LIMITES DE CADA CRITÉRIO-----%%

Lmax1=5383;%limite máximo do mancal 1;
Lmin1=2500;% limite mínimo do mancal 1

Lmax2=5383;%limite máximo do mancal 2;
Lmin2=2500;% limite mínimo do mancal 2
```

```

Lmax3=12664;%limite máximo do mancal 3;
Lmin3=2500;% limite mínimo do mancal 3

Lmax4=12664;%limite máximo do mancal 4;
Lmin4=2500;% limite mínimo do mancal 4

Lmax5=21310;%limite máximo do mancal 5;
Lmin5=2500;% limite mínimo do mancal 5

Lmax6=36539;%limite máximo do mancal 6;
Lmin6=2500;% limite mínimo do mancal 6

der=0.25; %Diferença entre os mancais da engrenagem redutora (Mancal 1
e 2)

LmaxM1=233066.92; %Limite para o momento fletor nó 05
LmaxM2=134296.62; %Limite para o momento fletor nó 17
LmaxM3=134296.62; %Limite para o momento fletor nó 51
LmaxM4=112818.0; %Limite para o momento fletor nó 82
LmaxM5=112818.0; %Limite para o momento fletor nó 105
LmaxM6=189496.24; %Limite para o momento fletor nó 115

LmaxRot1=0.003; %Limite para a inclinação no mancal 6.

LmaxCort=5000; % Limite para o esforço cortante no nó 115

%%-----RESTRIÇÃO DE EXECUÇÃO-----%%

xmin=-20; %valor mínimo de deslocamento [mm]
xmax=20; %valor máximo de deslocamento [mm]

%Condições dos mancais: 'sim' caso o mancal seja fixo.
mancal1fixo='não';
mancal2fixo='não';
mancal3fixo='não';
mancal4fixo='não';
mancal5fixo='sim';
mancal6fixo='sim';

%%-----TRANSFORMAÇÃO DOS DADOS DE ENTRADA EM ESCALARES-----%%

%reações iniciais.
r1=rin(1,1);
r2=rin(2,1);
r3=rin(3,1);
r4=rin(4,1);
r5=rin(5,1);
r6=rin(6,1);

%momentos iniciais
m1=fletor(1,1);
m2=fletor(2,1);
m3=fletor(3,1);
m4=fletor(4,1);

```



```

        populacao(:,3)=0;
end

if mancal4fixo == 'sim'
    populacao(:,4)=0;
end

if mancal5fixo == 'sim'
    populacao(:,5)=0;
end

if mancal6fixo == 'sim'
    populacao(:,6)=0;
end

%%---CÁLCULO DAS FUNÇÕES OBJETIVO---%%

%Cálculo da reação para a população nova
[rfn1] = U1(populacao_nova,r1,matriz,1);
[rfn2] = U1(populacao_nova,r2,matriz,2);
[rfn3] = U1(populacao_nova,r3,matriz,3);
[rfn4] = U1(populacao_nova,r4,matriz,4);
[rfn5] = U1(populacao_nova,r5,matriz,5);
[rfn6] = U1(populacao_nova,r6,matriz,6);

%Cálculo do momento para a população nova
[Mf1] = U1(populacao_nova,m1,matriz_f,1);
[Mf2] = U1(populacao_nova,m2,matriz_f,2);
[Mf3] = U1(populacao_nova,m3,matriz_f,3);
[Mf4] = U1(populacao_nova,m4,matriz_f,4);
[Mf5] = U1(populacao_nova,m5,matriz_f,5);
[Mf6] = U1(populacao_nova,m6,matriz_f,6);

%Cálculo da rotação para a população nova
[rotf1] = U1(populacao_nova,rot1,matriz_rot,1);

%Cálculo do cortante para a população nova
[cortf] = U1(populacao_nova,cort,matriz_cort,1);

%%--TESTE DOS INDIVÍDUOS DE ACORDO COM OS LIMITES DE CADA
CRITÉRIO--%%
for w = 1:npop

    if rfn1(w) < Lmax1 && rfn1(w) > Lmin1 && rfn2(w) < Lmax2 &&
rfn2(w) > Lmin2 && rfn3(w) < Lmax3 && rfn3(w) > Lmin3...
        && rfn4(w) < Lmax4 && rfn4(w) > Lmin4 && rfn5(w) < Lmax5 &&
rfn5(w) > Lmin5 && rfn6(w) < Lmax6 && rfn6(w) > Lmin6...
            && abs(rfn1(w)-rfn2(w)) < ((rfn1(w)+rfn2(w))*der) &&
abs(Mf1(w)) < LmaxM1 && abs(Mf2(w)) < LmaxM2 && abs(Mf3(w)) <
LmaxM3...
                && abs(Mf4(w)) < LmaxM4 && abs(Mf5(w)) < LmaxM5 &&
abs(Mf6(w)) < LmaxM6 && abs(rotf1(w)) < LmaxRot1...
                    && abs(cortf(w)) < LmaxCort

```



```

        populacao(w, :) = populacao_nova(w, :); %%GERAÇÃO DA POPULAÇÃO
CRUZADA%%
    end
end

parad=std(populacao(:,1)); %verificação do critério de parada

    %Geração das novas "populações intermediárias" para a adição
vetorial
    alfa = populacao(randi(npop,[1, npop]),:);
    beta = populacao(randi(npop,[1, npop]),:);
    gamma = populacao(randi(npop,[1, npop]),:);

    R = rand(1);

    %Escolha do delta.
    if R < CR

        delta1 = 0; delta2 = 1;
    else
        delta1 = 1; delta2 = 0;
    end

end %FIM DO PROCESSO ITERATIVO

%%--GERAÇÃO DE GRUPOS DE SOLUÇÕES--%%
grup1(q, :)=populacao(1, :); %grupo de soluções de deslocamentos

end

%%--DADOS NECESSÁRIO PARA O TESTE DAS SOLUÇÕES ENCONTRADAS--%%

%reações das soluções
[rfn1] = U1(grup1,r1,matriz,1);
[rfn2] = U1(grup1,r2,matriz,2);
[rfn3] = U1(grup1,r3,matriz,3);
[rfn4] = U1(grup1,r4,matriz,4);
[rfn5] = U1(grup1,r5,matriz,5);
[rfn6] = U1(grup1,r6,matriz,6);

%momento das soluções
[Mf1] = U1(grup1,m1,matriz_f,1);
[Mf2] = U1(grup1,m2,matriz_f,2);
[Mf3] = U1(grup1,m3,matriz_f,3);
[Mf4] = U1(grup1,m4,matriz_f,4);
[Mf5] = U1(grup1,m5,matriz_f,5);
[Mf6] = U1(grup1,m6,matriz_f,6);

%inclinação das soluções
[rotf1] = U1(grup1,rot1,matriz_rot,1);

```

```

%força cortante das soluções
[cortf] = U1(grup1,cort,matriz_cort,1);

%%----TESTE DAS SOLUÇÕES ENCONTRADAS----%%
a=1;
b=0;

for w = 1:q

    if rfn1(w) < Lmax1 && rfn1(w) > Lmin1 && rfn2(w) < Lmax2 &&
rfn2(w) > Lmin2 && rfn3(w) < Lmax3 && rfn3(w) > Lmin3...
        && rfn4(w) < Lmax4 && rfn4(w) > Lmin4 && rfn5(w) < Lmax5 &&
rfn5(w) > Lmin5 && rfn6(w) < Lmax6 && rfn6(w) > Lmin6...
            && abs(rfn1(w)-rfn2(w)) < ((rfn1(w)+rfn2(w))*der) &&
abs(Mf1(w)) < LmaxM1 && abs(Mf2(w)) < LmaxM2 && abs(Mf3(w)) <
LmaxM3...
                && abs(Mf4(w)) < LmaxM4 && abs(Mf5(w)) < LmaxM5 &&
abs(Mf6(w)) < LmaxM6 && abs(rotf1(w)) < LmaxRot1...
                    && abs(cortf(w)) < LmaxCort

                grup2(a,:) = grup1(w,:);%grupo de soluções testadas%

                b=length(grup2(:,1));

        end

        a=1+b;

end %FIM DO TESTE

%%---REMOÇÃO DAS SOLUÇÕES REPETIDAS---%%

[C,ia,ic] = unique(grup2(:,1:2),'rows');

grup3 = grup2(ia,:);%grupo de soluções sem solução repetida%

b=length(grup3(:,1));

%%--INCLUSÃO DOS DESLOCAMENTOS REFERENTES À DILATAÇÃO TÉRMICAS--%%
for i=1:b

    grup4(i,:)=grup3(i,:)-termo;%grupo de soluções com a dilatação
térmica%
    end
%%-----CÁLCULO DA CONDIÇÃO FINAL PARA AS SOLUÇÕES ENCONTRADAS----%%

%reações das soluções
RT1=U1(grup3,r1,matriz,1);
RT2=U1(grup3,r2,matriz,2);

```

```

RT3=U1 (grup3,r3,matriz,3);
RT4=U1 (grup3,r4,matriz,4);
RT5=U1 (grup3,r5,matriz,5);
RT6=U1 (grup3,r6,matriz,6);
reacoes=[RT1';RT2';RT3';RT4';RT5';RT6'];%agrupamento para exportação

%momento fletor das soluções
[Mf1] = U1 (grup3,m1,matriz_f,1);
[Mf2] = U1 (grup3,m2,matriz_f,2);
[Mf3] = U1 (grup3,m3,matriz_f,3);
[Mf4] = U1 (grup3,m4,matriz_f,4);
[Mf5] = U1 (grup3,m5,matriz_f,5);
[Mf6] = U1 (grup3,m6,matriz_f,6);
momentos1=[Mf1';Mf2';Mf3';Mf4';Mf5';Mf6'];%agrupamento para exportação
max_m1=max(abs(momentos1));%verificação do momento máximo no eixo

%inclinação das soluções
[rotf1] = U1 (grup3,rot1,matriz_rot,1);
rotacaol=abs(rotf1');%agrupamento para exportação

%força cortante das soluções
[cortf] = U1 (grup3,cort,matriz_cort,1);
cortantel=abs(cortf');%agrupamento para exportação

desloc=grup4'; %valores de deslocamento que devem ser aplicados

%%---DADOS PARA AUXILIAR A EXPORTAÇÃO---%%
manc={ 'Mancal 1';'Mancal 2';'Mancal 3';'Mancal 4';'Mancal 5';'Mancal
6'};
nos_fletor={'Nó 5';'Nó 17';'Nó 51';'Nó 82';'Nó 105';'Nó 115'};
nos_rot={'Nó 5'};
nos_cort={'Nó 115'};
limcarMax=[Lmax1;Lmax2;Lmax3;Lmax4;Lmax5;Lmax6];
limcarMin=[Lmin1;Lmin2;Lmin3;Lmin4;Lmin5;Lmin6];
limfletMax=[LmaxM1;LmaxM2;LmaxM3;LmaxM4;LmaxM5;LmaxM6];
limrotMax=LmaxRot1;
mancfixo=[mancal1fixo;mancal2fixo;mancal3fixo;mancal4fixo;mancal5fixo;
mancal6fixo];

%%---APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS---%%
disp(navio)
disp(['Data do ensaio: ', num2str(date)])
fprintf('\n')

disp('Reações Iniciais: ')
disp(rin)
fprintf('\n')

disp('Deslocamentos a serem aplicados: ')
disp(desloc)
fprintf('\n')

disp('Reações Finais: ')
disp(reacoes)
fprintf('\n')

```

%%%%%%%%-----EXPORTAÇÃO DOS DADOS-----%%%%%%%%

%DADOS INICIAIS%

```
xlswrite('dados.xls',navio,'Dados Iniciais','A1');
xlswrite('dados.xls',{data},'Dados Iniciais','A2');

xlswrite('dados.xls',{'Reações Iniciais [N]'},'Dados
Iniciais','A4');
xlswrite('dados.xls',manc,'Dados Iniciais','A5');
xlswrite('dados.xls',rin,'Dados Iniciais','B5');

xlswrite('dados.xls',{'Momentos Fletores Iniciais [N.m]'},'Dados
Iniciais','A12');
xlswrite('dados.xls',nos_fletor,'Dados Iniciais','A13');
xlswrite('dados.xls',fletor,'Dados Iniciais','B13');

xlswrite('dados.xls',{'Rotações Iniciais [Rad]'},'Dados
Iniciais','A20');
xlswrite('dados.xls',nos_rot,'Dados Iniciais','A21');
xlswrite('dados.xls',rot,'Dados Iniciais','B21');

xlswrite('dados.xls',{'Esforço Cortante Inicial [N]'},'Dados
Iniciais','A31');
xlswrite('dados.xls',nos_cort,'Dados Iniciais','A32');
xlswrite('dados.xls',cort,'Dados Iniciais','B32');

xlswrite('dados.xls',{'Deslocamentos nos mancais devido à Dilatação
Térmica [mm]'},'Dados Iniciais','A34');
xlswrite('dados.xls',manc,'Dados Iniciais','A35');
xlswrite('dados.xls',termo,'Dados Iniciais','B35');

xlswrite('dados.xls',{'MATRIZES DE INFLUÊNCIA:'},'Dados
Iniciais','C42');

xlswrite('dados.xls',{'Matriz de Influência das Reações
[N/mm]'},'Dados Iniciais','A44');
xlswrite('dados.xls',manc,'Dados Iniciais','B45');
xlswrite('dados.xls',manc,'Dados Iniciais','A46');
xlswrite('dados.xls',matriz,'Dados Iniciais','B46');

xlswrite('dados.xls',{'Matriz de Influência dos Momentos Fletores
[N.m/mm]'},'Dados Iniciais','A53');
xlswrite('dados.xls',manc,'Dados Iniciais','B54');
xlswrite('dados.xls',nos_fletor,'Dados Iniciais','A55');
xlswrite('dados.xls',matriz_f,'Dados Iniciais','B55');

xlswrite('dados.xls',{'Matriz de Influência da Rotação
[Rad/mm]'},'Dados Iniciais','A62');
xlswrite('dados.xls',manc,'Dados Iniciais','B63');
xlswrite('dados.xls',nos_rot,'Dados Iniciais','A64');
xlswrite('dados.xls',matriz_rot,'Dados Iniciais','B64');
```

```

xlswrite('dados.xls',{ 'Matriz de Influência do Esforço Cortante
[N/mm]'}, 'Dados Iniciais', 'A74');
xlswrite('dados.xls',manc, 'Dados Iniciais', 'B75');
xlswrite('dados.xls',nos_cort, 'Dados Iniciais', 'A76');
xlswrite('dados.xls',matriz_cort, 'Dados Iniciais', 'B76');

%LIMITES E RESTRIÇÕES%

xlswrite('dados.xls',navio, 'Limites e Restrições', 'A1');
xlswrite('dados.xls', {data}, 'Limites e Restrições', 'A2');

xlswrite('dados.xls', { 'Limite de Cargas nos Mancais
[N]'}, 'Limites e Restrições', 'A4');
xlswrite('dados.xls', { 'Máximo'}, 'Limites e Restrições', 'B5');
xlswrite('dados.xls', { 'Mínimo'}, 'Limites e Restrições', 'C5');
xlswrite('dados.xls',manc, 'Limites e Restrições', 'A6');
xlswrite('dados.xls',limcarMax, 'Limites e Restrições', 'B6');
xlswrite('dados.xls',limcarMin, 'Limites e Restrições', 'C6');

xlswrite('dados.xls', { 'Limite do Momento Fletor      [N.m]'}, 'Limites
e Restrições', 'A13');
xlswrite('dados.xls', { 'Máximo'}, 'Limites e Restrições', 'B14');
xlswrite('dados.xls',nos_fletor, 'Limites e Restrições', 'A15');
xlswrite('dados.xls',limfletMax, 'Limites e Restrições', 'B15');

xlswrite('dados.xls', { 'Limite da Inclinação      [Rad]'}, 'Limites e
Restrições', 'A22');
xlswrite('dados.xls', { 'Máximo'}, 'Limites e Restrições', 'B23');
xlswrite('dados.xls',nos_rot, 'Limites e Restrições', 'A24');
xlswrite('dados.xls',limrotMax, 'Limites e Restrições', 'B24');

xlswrite('dados.xls', { 'Limite do Esforço Cortante      [N]'}, 'Limites
e Restrições', 'A34');
xlswrite('dados.xls', { 'Máximo'}, 'Limites e Restrições', 'B35');
xlswrite('dados.xls',nos_cort, 'Limites e Restrições', 'A36');
xlswrite('dados.xls',LmaxCort, 'Limites e Restrições', 'B36');

xlswrite('dados.xls', { 'Diferença máxima entre os Mancais da Engrenagem
Redutora      [%]'}, 'Limites e Restrições', 'A38');
xlswrite('dados.xls',der, 'Limites e Restrições', 'A39');

xlswrite('dados.xls', { 'Limites de Deslocamentos dos Mancais
[mm]'}, 'Limites e Restrições', 'A41');
xlswrite('dados.xls',xmin, 'Limites e Restrições', 'A42');
xlswrite('dados.xls',xmax, 'Limites e Restrições', 'B42');

xlswrite('dados.xls', { 'Condições dos Mancais'}, 'Limites e
Restrições', 'A44');
xlswrite('dados.xls', { 'Fixo'}, 'Limites e Restrições', 'B45');
xlswrite('dados.xls',manc, 'Limites e Restrições', 'A46');
xlswrite('dados.xls', {mancal1fixo}, 'Limites e Restrições', 'B46');
xlswrite('dados.xls', {mancal2fixo}, 'Limites e Restrições', 'B47');
xlswrite('dados.xls', {mancal3fixo}, 'Limites e Restrições', 'B48');
xlswrite('dados.xls', {mancal4fixo}, 'Limites e Restrições', 'B49');
xlswrite('dados.xls', {mancal5fixo}, 'Limites e Restrições', 'B50');
xlswrite('dados.xls', {mancal6fixo}, 'Limites e Restrições', 'B51');

```

```

%%% RESULTADOS FINIAIS %%%

xlswrite('dados.xls',navio,'Resultados Finais','A1');
xlswrite('dados.xls',{data},'Resultados Finais','A2');

xlswrite('dados.xls',{'Deslocamentos a serem aplicados nos Mancais
[mm]'},'Resultados Finais','A4');
xlswrite('dados.xls',manc,'Resultados Finais','A5');
xlswrite('dados.xls',desloc,'Resultados Finais','B5');

xlswrite('dados.xls',{'Reações nos Mancais      [N]'},'Resultados
Finais','A57');
xlswrite('dados.xls',manc,'Resultados Finais','A58');
xlswrite('dados.xls',reacoes,'Resultados Finais','B58');

xlswrite('dados.xls',{'Momentos Fletores      [N.m]'},'Resultados
Finais','A65');
xlswrite('dados.xls',nos_fletor,'Resultados Finais','A66');
xlswrite('dados.xls',momentos1,'Resultados Finais','B66');

xlswrite('dados.xls',{'Inclinação      [Rad]'},'Resultados
Finais','A73');
xlswrite('dados.xls',nos_rot,'Resultados Finais','A74');
xlswrite('dados.xls',rotacao1,'Resultados Finais','B74');

xlswrite('dados.xls',{'Esforço Cortante      [N]'},'Resultados
Finais','A84');
xlswrite('dados.xls',nos_cort,'Resultados Finais','A85');
xlswrite('dados.xls',cortantel,'Resultados Finais','B85');

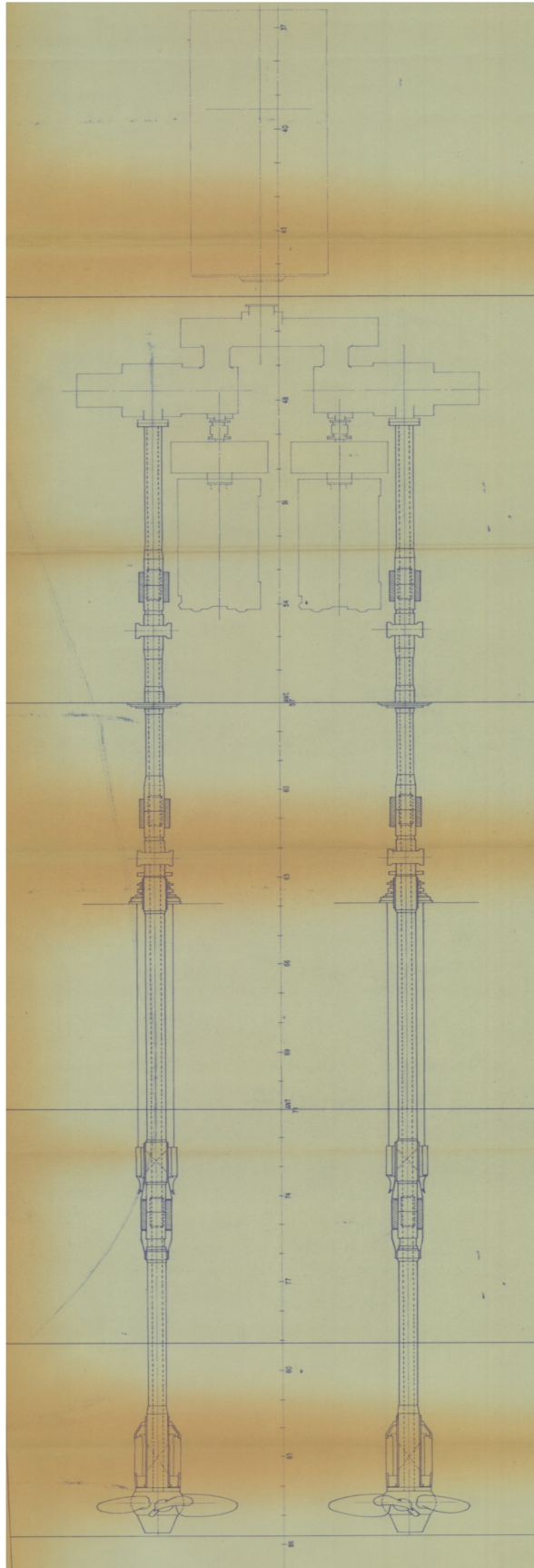
xlswrite('dados.xls',{'VALORES MÁXIMOS'},'Resultados Finais','C88');

xlswrite('dados.xls',{'Momentos Fletores Máximos
[N.m]'},'Resultados Finais','A90');
xlswrite('dados.xls',max_ml,'Resultados Finais','B92');

xlswrite('dados.xls',{'Inclinação Máxima      [Rad]'},'Resultados
Finais','A94');
xlswrite('dados.xls',rotacao1,'Resultados Finais','B95');

xlswrite('dados.xls',{'Esfoços Cortantes Máximos      [N]'},'Resultados
Finais','A98');
xlswrite('dados.xls',cortantel,'Resultados Finais','B100');

```

Apêndice C – Relatórios Gerados Pelo Processo de Otimização

As simulações realizadas no MatLab para o processo de otimização geraram relatórios em arquivo de Excel para cada exemplo de estudo apresentado no item 6. Alguns destes relatórios gerados são apresentados a seguir.

C.1 - Corvetas Classe “Inhauma”

Dados Iniciais

Corveta Inhauma

01-May-2022

Reações Iniciais [N]

Mancal 1 -655,74

Mancal 2 9479,94

Mancal 3 2663,91

Mancal 4 3979,66

Mancal 5 4057,08

Mancal 6 7739,52

Momentos Fletores Iniciais [N.m]

Nó 5 5767,63

Nó 17 -484,55

Nó 51 -1049,74

Nó 82 -659,19

Nó 105 -753,84

Nó 115 1107,82

Rotações Iniciais [Rad]

Nó 5 0,000374

Esforço Cortante Inicial

[N]

Nó 115 -1825,6

Deslocamentos nos mancais devido à Dilatação Térmica [mm]

Mancal 1	0,057
Mancal 2	0,057
Mancal 3	0
Mancal 4	0
Mancal 5	0
Mancal 6	0

MATRIZES DE INFLUÊNCIA:

Matriz de Influência das Reações [N/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4	Mancal 5	Mancal 6
Mancal 1	7779,52	-8820,24	1370,41	-400,95	85,72	-14,46
Mancal 2	-8820,24	10033,23	-1633,8	511,77	-109,42	18,46
Mancal 3	1370,41	-1633,8	484,44	-306,29	102,54	-17,3
Mancal 4	-400,95	511,77	-306,29	335,78	-186,34	46,03
Mancal 5	85,72	-109,42	102,54	-186,34	163,32	-55,83
Mancal 6	-14,46	18,46	-17,3	46,03	-55,83	23,1

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [N.m/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4	Mancal 5	Mancal 6
Nó 5	0	0	0	0	0	0
Nó 17	63,58	-81,16	76,06	-202,35	245,43	-101,56
Nó 51	-154,62	197,35	-184,96	134,6	95,89	-88,27
Nó 82	626,32	-799,43	153,54	156,1	-164,24	27,71
Nó 105	-2123,34	2276,29	-56,39	-117,43	25,11	-4,24
Nó 115	-5413,89	6111,52	-889,18	232,95	-49,81	8,4

Matriz de Influência da Rotação [Rad/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4	Mancal 5	Mancal 6
Nó 5	0,000019	-2,5E-05	0,000023	-6,1E-05	0,000178	-0,00013

Matriz de Influência do Esforço Cortante [N/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4	Mancal 5	Mancal 6
Nó 115	1040,72	-1212,99	263,39	-110,82	23,69	-4

Limites e Restrições

Corveta Inhauma

01-May-2022

Limite de Cargas nos Mancais [kN]

	Máximo	Mínimo
Mancal 1	5383	2000
Mancal 2	5383	2000
Mancal 3	12664	2000
Mancal 4	12664	2000
Mancal 5	21310	2000
Mancal 6	36539	2000

Limite do Momento Fletor [kN.m]

	Máximo
Nó 5	233066,9
Nó 17	134296,6
Nó 51	134296,6
Nó 82	112818
Nó 105	112818
Nó 115	189496,2

Limite da Inclinação [Rad]

	Máximo
Nó 5	0,003

Limite do Esforço Cortante [kN]

	Máximo
Nó 115	5000

Diferença máxima entre os Mancais da Engrenagem Redutora [%]

0,25

Limites de Deslocamentos dos Mancais [mm]

-20 20

Condições dos Mancais

Fixo

Mancal 1	nao
Mancal 2	nao
Mancal 3	nao
Mancal 4	nao
Mancal 5	sim
Mancal 6	sim

Resultados Finais

Corveta Inhauma

01-May-2022

Deslocamentos a serem aplicados nos Mancais [mm]

Mancal 1	-19,057	-18,2544	-6,84026	-3,257	1,943	2,943	11,343	14,43772
Mancal 2	-18,057	-16,5416	-7,14421	-3,457	1,343	2,943	10,543	12,943
Mancal 3	-4,6	0,407857	-3,50414	-0,4	1	5	6,6	5,118695
Mancal 4	0	0	0	0	0	0	0	0
Mancal 5	0	0	0	0	0	0	0	0
Mancal 6	0	0	0	0	0	0	0	0

Reações nos Mancais [N]

Mancal 1	3993,814	3734,32	4282,574	3890,448	3925,374	3074,15	3580,95	4457,794
Mancal 2	3981,84	3925,192	3927,336	4245,246	4252,182	4949,91	4498,362	3702,121
Mancal 3	3806,096	4856,14	3249,608	3639,742	3601,85	4295,94	4165,608	3767,916
Mancal 4	3794,784	2714,659	4145,668	3645,198	3587,948	2780,67	2812,078	3253,208
Mancal 5	3926,276	4342,766	3891,787	4113,788	4177,872	4498,68	4551,2	4401,978
Mancal 6	7761,56	7691,293	7767,398	7729,948	7719,144	7665,02	7656,172	7681,353

Momentos Fletores [N.m]

Nó 5	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63
Nó 17	-581,566	-272,629	-607,156	-442,486	-394,954	-156,99	-118,038	-228,728
Nó 51	-813,444	-1564,73	-751,448	-1151,96	-1267,65	-1846,35	-1941,23	-1672,12
Nó 82	1124,186	1184,324	220,0243	-6,768	-372,212	-410,82	-979,736	-1187,52
Nó 105	-1124,21	338,6883	-2285,63	-1675,98	-1870,1	-576,94	-1203,42	-2227,93
Nó 115	-1945,4	-1482,11	-2366,2	-1991,23	-2053,01	-1245,19	-1697	-2466,67

Inclinação [Rad]

Nó 5	0,000357	0,00045	0,000342	0,000389	0,0004	0,000471	0,000477	0,000442
------	----------	---------	----------	----------	--------	----------	----------	----------

Esforço Cortante [N]

Nó 115	977,054	660,9125	1211,31	1137,094	1178,956	1025,46	1080,712	1161,315
--------	---------	----------	---------	----------	----------	---------	----------	----------

VALORES MÁXIMOS

Momentos Fletores Máximos [N.m]

5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63	5767,63
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Inclinação Máxima [Rad]

0,000357	0,00045	0,000342	0,000389	0,0004	0,000471	0,000477	0,000442
----------	---------	----------	----------	--------	----------	----------	----------

Esforços Cortantes Máximos [N]

977,054	660,9125	1211,31	1137,094	1178,956	1025,46	1080,712	1161,315
---------	----------	---------	----------	----------	---------	----------	----------

C.2 - Corvetas Classe “Imperial Marinheiro”

Corveta Imperial Marinheiro

01-May-2022

Reações Iniciais [kgf]

Mancal 1	95,74
Mancal 2	-530,32
Mancal 3	2001,79
Mancal 4	488,1
Mancal 5	288,89
Mancal 6	771,05
Mancal 7	324,65
Mancal 8	1991,68

Momentos Fletores Iniciais [kgf.m]

Nó 10	-95,84
Nó 17	-13,97
Nó 24	78,16
Nó 29	-167,77
Nó 34	576,38
Nó 35	1036,56

Rotações Iniciais [Rad]

Nó 2	-4E-06
Nó 4	0,000006
Nó 6	-1,9E-05
Nó 10	-3E-06
Nó 13	0,000008
Nó 18	0,000015
Nó 21	0,000007
Nó 25	-0,00004
Nó 30	0,000109
Nó 35	-0,00045

Esforço Cortante Inicial
[kgf]

Nó 10	-77,19
-------	--------

Deslocamentos nos mancais devido à Dilatação Térmica [mm]

Mancal 1	0
Mancal 2	0
Mancal 3	0
Mancal 4	0
Mancal 5	0
Mancal 6	0

Mancal 7 0
Mancal 8 0

MATRIZES DE INFLUÊNCIA:

Matriz de Influência das Reações [kgf/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4	Mancal 5	Mancal 6	Mancal 7	Mancal 8
Mancal 1	11865,35	-34251,7	22835,31	-517,43	94,45	-29,95	4,6	-0,68
Mancal 2	-34251,7	116678,8	-87868,1	6270,02	-1144,48	362,98	-55,72	8,22
Mancal 3	22835,31	-87868,1	71317,3	-7473,81	1641,95	-520,75	79,95	-11,8
Mancal 4	-517,43	6270,02	-7473,81	2560,61	-1325,69	559,52	-85,9	12,68
Mancal 5	94,45	-1144,48	1641,95	-1325,69	1836,32	-1497,78	463,65	-68,42
Mancal 6	-29,95	362,98	-520,75	559,52	-1497,78	1792,86	-854,37	187,5
Mancal 7	4,6	-55,72	79,95	-85,9	463,65	-854,37	662,43	-214,63
Mancal 8	-0,68	8,22	-11,8	12,68	-68,42	187,5	-214,63	87,13

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [kgf.m/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4	Mancal 5	Mancal 6	Mancal 7	Mancal 8
Nó 10	289,94	-3513,43	3671,19	-376,81	-97,86	31,04	-4,76	0,7
Nó 17	6,24	-75,57	108,42	-305,05	660,86	-454,36	69,75	-10,29
Nó 24	2,59	-31,39	45,04	-48,39	-423,86	815,78	-422,05	62,28
Nó 29	-0,7	8,44	-12,12	13,02	-70,26	-111,3	357,77	-184,85
Nó 34	0,49	-5,92	8,49	-9,13	49,26	-135	154,53	-62,73
Nó 35	0	0	0	0	0	0	0	0

Matriz de Influência da Rotação [Rad/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4	Mancal 5	Mancal 6	Mancal 7	Mancal 8
Nó 2	-0,00264	0,003859	-0,00124	0,000028	-5E-06	0,000002	0	0
Nó 4	-0,00071	-0,00172	0,002479	-5,6E-05	0,00001	-3E-06	0	0
Nó 6	0,000303	-0,00367	0,00323	0,000161	-2,9E-05	0,000009	-1E-06	0
Nó 10	-0,00001	0,000117	-0,00087	0,000833	-9,7E-05	0,000031	-5E-06	0,000001
Nó 13	-9,2E-05	0,00111	-0,00159	0,000342	0,000321	-0,0001	0,000016	-2E-06
Nó 18	0,00002	-0,00025	0,000354	-0,00038	-0,00017	0,000489	-7,5E-05	0,000011
Nó 21	-3E-06	0,000032	-4,6E-05	0,00005	-0,0007	0,000699	-4,3E-05	0,000006
Nó 25	-5E-06	0,000056	-8,1E-05	0,000087	-0,00047	0,000246	0,000195	-2,9E-05
Nó 30	0,000001	-1,7E-05	0,000024	-2,6E-05	0,00014	-0,00038	0,000126	0,000135
Nó 35	-1E-06	0,000008	-1,2E-05	0,000013	-0,00007	0,000192	-0,00053	0,000403

Matriz de Influência do Esforço Cortante [kgf/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4	Mancal 5	Mancal 6	Mancal 7	Mancal 8
Nó 10	449,01	-5441,01	6284,46	-1721,22	591,91	-187,73	28,82	-4,25

Corveta Imperial Marinheiro

01-May-2022

Limite de Cargas nos Mancais
[kgf]

	Máximo	Mínimo
Mancal 1	3365	168
Mancal 2	3365	168
Mancal 3	3365	168
Mancal 4	4307	215
Mancal 5	4307	215
Mancal 6	16305	215
Mancal 7	5217	215
Mancal 8	16305	215

Limite do Momento Fletor [kgf.m]

	Máximo
Nó 10	333489
Nó 17	20254
Nó 24	36000
Nó 29	36000
Nó 34	36000
Nó 35	36000

Limite da Rotação [Rad]

	Máximo
Nó 35	0,0003

Limite do Esforço Cortante [kgf]

	Máximo
Nó 10	500000

Limites de Deslocamentos dos Mancais [mm]

-1 0

Condições dos Mancais

	Fixo
Mancal 1	nao
Mancal 2	nao
Mancal 3	nao
Mancal 4	nao
Mancal 5	nao
Mancal 6	sim
Mancal 7	sim
Mancal 8	sim

Resultados Finais

Corveta Imperial Marinheiro

01-May-2022

Deslocamentos a serem aplicados nos Mancais [mm]

Mancal 1	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	0
Mancal 2	-0,6	-0,6	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,5	-0,40052
Mancal 3	-0,8	-0,8	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,7	-0,6
Mancal 4	-1	-1	-0,9	-0,9	-0,88624	-0,9	-0,9	-0,8
Mancal 5	-0,1	-0,1	0	-0,1	0	-0,1	-0,1	0
Mancal 6	0	0	0	0	0	0	0	0
Mancal 7	0	0	0	0	0	0	0	0
Mancal 8	0	0	0	0	0	0	0	0

Reações nos Mancais [kgf]

Mancal 1	513,397	513,397	516	506,555	508,8804	506,555	506,555	527,0716
Mancal 2	451,688	451,688	420,14	534,588	506,4124	534,588	534,588	442,0214
Mancal 3	411,387	411,387	456,648	292,453	353,8121	292,453	292,453	383,6614
Mancal 4	380,581	380,581	331,951	464,52	367,1837	464,52	464,52	412,6179
Mancal 5	785,186	785,186	895,441	711,809	877,2002	711,809	711,809	822,6525
Mancal 6	566,11	566,11	453,512	603,29	461,2107	603,29	603,29	490,5104
Mancal 7	332,737	332,737	373,395	327,03	372,2131	327,03	327,03	367,7146
Mancal 8	1990,486	1990,486	1984,486	1991,328	1984,66	1991,328	1991,328	1985,324

Momentos Fletores [kgf.m]

Nó 10	-596,126	-596,126	-598,823	-589,037	-604,008	-589,037	-589,037	-589,896
Nó 17	182,352	182,352	221,842	155,756	217,6447	155,756	155,756	195,2819
Nó 24	151,22	151,22	105,619	148,005	104,9532	148,005	148,005	102,4227
Nó 29	-168,992	-168,992	-175,154	-168,128	-174,975	-168,128	-168,128	-174,294
Nó 34	577,246	577,246	581,565	576,639	581,4394	576,639	576,639	580,9608
Nó 35	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56

Rotações [Rad]

Nó 35	-0,00045	-0,00045	-0,00046	-0,00045	-0,00046	-0,00045	-0,00045	-0,00046
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Esforço Cortante [kgf]

Nó 10	267,925	267,925	251,61	310,801	275,2931	310,801	310,801	291,6435
-------	---------	---------	--------	---------	----------	---------	---------	----------

VALORES MÁXIMOS

Momentos Fletores Máximos [kgf.m]

1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56	1036,56
---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Rotações Máximas [Rad]

0,000826	0,000826	0,000826	0,000826	0,000826	0,000826	0,000826	0,000826	0,000828
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Esforços Cortantes Máximos [kgf]

267,925	267,925	251,61	310,801	275,2931	310,801	310,801	291,6435
---------	---------	--------	---------	----------	---------	---------	----------

C.3 – Navio Tanque

Dados Iniciais

Navio Tanque a Turbina

01-May-2022

Reações Iniciais [kN]

Mancal 1 981,4098

Mancal 2 101,7737

Mancal 3 663,7956

Mancal 4 20,4779

Momentos Fletores Iniciais [kN.m]

Nó 5 1206,497

Nó 7 654,3251

Nó 13 173,8037

Nó 19 -151,05

Nó 22 -197,375

Nó 32 198,8688

Rotações Iniciais [Rad]

Nó 5 0,000357

Nó 12 -9,3E-05

Nó 16 -0,00019

Nó 23 0,000076

Nó 28 0,000135

Nó 32 0,000109

Nó 35 0,000041

Nó 39 -7E-06

Esforço Cortante Inicial

[kN]

Nó 32 -204,865

Deslocamentos nos mancais devido à Dilatação Térmica [mm]

Mancal 1 0

Mancal 2 2,1

Mancal 3 1,18

Mancal 4 0,89

MATRIZES DE INFLUÊNCIA:

Matriz de Influência das Reações [kN/mm]

Mancal 1 Mancal 2 Mancal 3 Mancal 4

Mancal 1	11,61345	-25,4683	35,74602	-21,8912
Mancal 2	-25,4683	67,99826	-148,702	106,1718
Mancal 3	35,74602	-148,702	517,0337	-404,078
Mancal 4	-21,8912	106,1718	-404,078	319,7973

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [kN.m/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4
Nó 5	0	0	0	0
Nó 7	-23,2269	50,93665	-71,4921	43,78231
Nó 13	-55,6285	121,9933	-171,223	104,8586
Nó 19	-52,0685	87,34334	-4,87953	-30,3953
Nó 22	-16,5031	-21,831	285,0778	-246,744
Nó 32	29,91074	-164,306	663,4796	-529,084

Matriz de Influência da Rotação [Rad/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4
Nó 5	-0,00016	0,000189	-6,8E-05	0,000042

Matriz de Influência do Esforço Cortante [kN/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4
Nó 32	-13,8549	42,52993	-112,956	84,28068

Limites e Restrições

Navio Tanque a Turbina

01-May-2022

Limite de Cargas nos Mancais [kN]

	Máximo	Mínimo
Mancal 1	1000	417
Mancal 2	600	100
Mancal 3	400	100
Mancal 4	400	200

Limite do Momento Fletor [kN.m]

	Máximo
Nó 5	32206
Nó 7	32206
Nó 13	118647
Nó 19	15153
Nó 22	15153
Nó 32	118647

Limite da Rotação [Rad]

Máximo

Nó 5	0,003
Nó 12	0,003
Nó 16	0,003
Nó 23	0,003
Nó 28	0,003
Nó 32	0,003
Nó 35	0,003
Nó 39	0,003

Limite do Esforço Cortante [kN]

Máximo

Nó 32	1000
-------	------

Diferença máxima entre os Mancais da Engrenagem Redutora [kN]

100

Limites de Deslocamentos dos Mancais [mm]

-2 2

Condições dos Mancais

Fixo

Mancal 1	sim
Mancal 2	nao
Mancal 3	nao
Mancal 4	nao

Resultados Finais

Navio Tanque a Turbina

01-May-2022

Deslocamentos a serem aplicados nos Mancais [mm]

Mancal 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Mancal 2	-4,1	-3,4	-3,4	-3,3	-2,7	-2,6	-2,4	-2,4
Mancal 3	-2,28	-2,38	-2,98	-0,98	-2,98	-2,18	-2,28	-0,38
Mancal 4	-0,79	-0,99	-1,89	0,61	-1,99	-1,19	-1,39	1,11

Reações nos Mancais [kN]

Mancal 1	990,8367	973,8125	972,067	986,2843	956,4282	964,9653	960,6753	973,8648
Mancal 2	139,9663	181,2009	174,8673	149,6932	211,8489	184,6248	191,8602	174,7565
Mancal 3	352,0542	277,0752	330,5252	339,5275	266,8418	342,3362	341,708	313,8771
Mancal 4	284,5997	335,3684	289,9976	291,952	332,3381	275,5308	273,2135	304,9586

Dif Eng									
Red	67,45451	58,29312	40,52761	47,57544	65,49638	66,80539	68,49456	8,918583	

Momentos Fletores	[kN.m]								
Nó 5	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497
Nó 7	635,4713	669,5197	673,0109	644,5762	704,2883	687,2142	695,7942	669,4151	
Nó 13	128,6488	210,1947	218,5561	150,455	293,4655	252,573	273,1222	209,9442	
Nó 19	-323,408	-255,701	-225,417	-302,43	-161,238	-180,723	-156,687	-241,947	
Nó 22	-491,973	-486,413	-435,391	-484,277	-425,998	-397,514	-381,039	-456,25	
Nó 32	-255,255	-330,8	-252,712	-264,894	-314,818	-223,732	-217,125	-279,224	

Rotações	[Rad]								
Nó 5	5,8E-05	0,000189	0,000192	0,00018	0,00032	0,000318	0,000354	0,00033	

Esforço Cortante	[kN]								
Nó 32	157,2457	133,0353	141,1145	152,0712	119,7716	138,4586	135,5132	139,4274	

VALORES MÁXIMOS

Momentos Fletores Máximos	[kN.m]								
	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497	1206,497

Rotações Máximas	[Rad]								
	0,000668	0,000621	0,000454	0,000723	0,00041	0,000399	0,000354	0,000671	

Esforços Cortantes Máximos	[kN]								
	157,2457	133,0353	141,1145	152,0712	119,7716	138,4586	135,5132	139,4274	

C.4 – Navio Mercante – Casco Verolme - B72

Dados Iniciais

B72 - 4 mancais

01-May-2022

Reações Iniciais [kgf]

Mancal 1 27837,95

Mancal 2 6216,49

Mancal 3 32539,66

Mancal 4 -7313,43

Momentos Fletores Iniciais [kgf.m]

Nó 6 24949,69

Nó 10 11933,06

Nó 17 509,59

Nó 23 593,83

Nó 30 -6243,16

Nó 35 3738,5

Rotações Iniciais [Rad]

Nó 6 0,000629

Nó 14 -0,00013

Nó 21 -0,00015

Nó 23 -0,00015

Nó 30 0,000053

Nó 35 0,000073

Nó 37 0,000037

Nó 39 -1,7E-05

Esforço Cortante Inicial
[kgf]

Nó 35 -16087

Deslocamentos nos mancais devido à Dilatação Térmica [mm]

Mancal 1 0

Mancal 2 0

Mancal 3 0

Mancal 4 0

MATRIZES DE INFLUÊNCIA:

Matriz de Influência das Reações [kgf/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4
Mancal 1	252,47	-884,59	1796,18	-1164,06
Mancal 2	-884,59	5449,86	-18998,7	14433,44
Mancal 3	1796,18	-18998,7	81456,56	-64254
Mancal 4	-1164,06	14433,44	-64254	50984,65

Matriz de Influência dos Momentos Fletores [kgf.m/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4
Nó 6	0	0	0	0
Nó 10	-440,55	1543,6	-3134,34	2031,29
Nó 17	-1143,67	4007,17	-8136,7	5273,2
Nó 23	-1730,91	6064,72	-12314,6	7980,8
Nó 30	-108,25	-5654,35	31844,29	-26081,7
Nó 35	922,1	-13095,8	59884,42	-47710,8

Matriz de Influência da Rotação [Rad/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4
Nó 6	-0,00018	0,000268	-0,00025	0,000161

Matriz de Influência do Esforço Cortante [kgf/mm]

	Mancal 1	Mancal 2	Mancal 3	Mancal 4
Nó 35	-632,12	4565,28	-17202,5	13269,38

Limites e Restrições

B72 - 4 mancais

01-May-2022

Limite de Cargas nos Mancais [kgf]

	Máximo	Mínimo
Mancal 1	38787	10000
Mancal 2	19338	4000
Mancal 3	19990	4000
Mancal 4	40815	4000

Limite do Momento Fletor [kgf.m]

	Máximo
Nó 6	546199
Nó 10	529806

Nó 17 529806
 Nó 23 299180
 Nó 30 2375632
 Nó 35 5065770

Limite da Rotação [Rad]
 Máximo

Nó 6 0,003
 Nó 14 0,003
 Nó 21 0,003
 Nó 23 0,003
 Nó 30 0,003
 Nó 35 0,003
 Nó 37 0,003
 Nó 39 0,003

Limite do Esforço Cortante [kgf]
 Máximo

Nó 35 30000

Limites de Deslocamentos dos Mancais [mm]
 -2 2

Condições dos Mancais

 Fixo

Mancal 1 sim
 Mancal 2 nao
 Mancal 3 não
 Mancal 4 não

Resultados Finais

B72 - 4 mancais

01-May-2022

Deslocamentos a serem aplicados nos Mancais [mm]

Mancal 1	0	0	0	0	0	0	0	0
Mancal 2	-0,2	-0,2	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1
Mancal 3	-1,5	-1,2	1	0,1	-0,7	-0,3	0,9	0,9
Mancal 4	-1,4	-1,2	1,7	0,5	-0,6	-0,1	1,6	1,6

Reações nos Mancais
 [kgf]

Mancal 1	26950,28	27256,32	27743,69	27524	27367,52	27503,96	27680,47	27680,48
----------	----------	----------	----------	-------	----------	----------	----------	----------

Mancal 2	13417,77	10604,84	11209,64	10988,35	10310,54	9927,773	11666,17	11666,17
Mancal 3	4110,204	15696,37	6664,24	10458,17	15972,36	16427,97	4943,987	4943,987
Mancal 4	14802,42	5723,138	13663,1	10310,15	5630,257	5420,97	14990,04	14990,04

Momentos Fletores
[kgf.m]

Nó 6	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69
Nó 10	13482,04	12948	12097,55	12480,91	12753,96	12515,87	12207,86	12207,86
Nó 17	4530,726	3144,356	936,613	1931,803	2640,643	2022,563	1222,963	1222,963
Nó 23	6679,696	4581,47	1240,098	2746,296	3819,112	2883,664	1673,48	1673,48
Nó 30	-16364,4	-12027,4	-18172,3	-15534,1	-12319,7	-12622,8	-18748,6	-18748,6
Nó 35	-16673,9	-8250,73	-16175,8	-12818,9	-8244,56	-8146,17	-17393,2	-17393,2

Rotações [Rad]

Nó 6	0,000724	0,000681	0,000627	0,000658	0,00068	0,000661	0,000636	0,000636
------	----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------

Esforço Cortante [kgf]

Nó 35	9773,423	12280,31	11188,14	11629,12	12463,42	12709,74	10794,83	10794,83
-------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

VALORES MÁXIMOS

Momentos Fletores Máximos [kgf.m]

24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69	24949,69
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------

Rotações Máximas [Rad]

0,000724	0,000681	0,000627	0,000658	0,00068	0,000661	0,000636	0,000636
----------	----------	----------	----------	---------	----------	----------	----------

Esforços Cortantes Máximos [kgf]

9773,423	12280,31	11188,14	11629,12	12463,42	12709,74	10794,83	10794,83
----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------	----------