

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CENTRO TECNOLÓGICO DE JOINVILLE  
CURSO DE ENGENHARIA NAVAL

**AMANDA CAROLINE ROSSI**

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO NO PROJETO DE UM NAVIO  
ROLL-ON/ROLL-OFF**

Joinville

2018

**AMANDA CAROLINE ROSSI**

**ANÁLISE DOS PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO NO PROJETO DE UM NAVIO  
ROLL-ON/ROLL-OFF**

Trabalho apresentado como requisito para obtenção do título de bacharel no Curso de Graduação em Engenharia Naval do Centro Tecnológico de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina.

Orientador: Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2018

# ANÁLISE DOS PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO NO PROJETO DE UM NAVIO ROLL-ON/ROLL-OFF

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval, na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico de Joinville.

Joinville, 04 de julho de 2018.

---

Prof. Dr. Eng. Luiz Fernando Peres Calil  
Coordenador do Curso

## **Banca Examinadora:**

---

Prof. Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Eng. Luiz Eduardo Bueno Minioli  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Dr. Eng. Ricardo Aurélio Quinhões Pinto  
Membro  
Universidade Federal de Santa Catarina

## AGRADECIMENTOS

A Deus por me dar forças durante esses difíceis anos de graduação, sempre me protegendo e abençoando.

Agradeço aos meus pais, Adolir e Sissa, por sempre terem me dado todo o apoio para estudar. Vocês são meus maiores incentivadores e exemplos.

Ao meu namorado, Caio, pela paciência e ajuda durante esses meses estagiando no Rio de Janeiro e elaborando o TCC à distância.

Aos meus amigos de faculdade, e em especial ao pessoal do Billy Thomas, Thais, Jéssica, Bruna, Abigail, Camila, Euclides, pelo companheirismo durante esses longos anos estudando engenharia naval.

Ao meu orientador, professor Thiago Pontin Tancredi e ao professor Luiz Eduardo Bueno Minioli. Foram as aulas dos senhores que inspiraram essa monografia. Obrigada pela paciência, diretrizes e conselhos durante esses dois anos entre as disciplinas de Projeto de Navio I, Projeto de Navio II, Planejamento de Trabalho de Conclusão de Curso e Trabalho Conclusão de Curso.

Ao pessoal da LOC Brasil (*London Offshore Consultants* Brasil) por me proporcionarem o estágio em uma área da Engenharia Naval, completamente diferente de tudo aquilo que já tinha visto. Em especial, aos meus supervisores Wagner e Maceiras, por sempre compartilharem comigo suas experiências nesse setor.

Ao CNPq por me possibilitar realizar o sonho de estudar em uma universidade no Reino Unido. Foi durante esse período que me apaixonei por projetos de navio.

E por fim, à UFSC, por criar o curso de Engenharia Naval e proporcionar o contato com os mais qualificados professores dessa área.

## RESUMO

A busca por projetos 'adequados' de engenharia tornou-se um dos grandes paradigmas do mundo moderno. No campo da engenharia naval, cada embarcação pode ser considerada um elemento único, projetada para função específica e necessitando atender às necessidades e desejos do armador. Trata-se de um conjunto amplo e difuso de atributos, cuja relação custo de construção versus capacidade de carga tem grande importância. Um dos maiores problemas dentro da engenharia naval é como trabalhar com os diversos requisitos de projeto simultaneamente aos objetivos do armador, uma vez que quanto maior a capacidade de carga, maior o custo de construção do navio, o que torna vital a utilização de uma metodologia estruturada e eficiente para o projeto de navios. Uma possível solução consiste na aplicação de técnicas de otimização ao problema de projetos navais visando o aperfeiçoamento dos mesmos em busca dos melhores resultados. O presente Trabalho de Conclusão de Curso apresenta os resultados de análise comparativa entre abordagens mono e multiobjetivo, associadas à aplicação de técnicas de otimização com algoritmo NSGA2, a um projeto de um navio do tipo RoRo, para transporte de 1000 a 2000 carros, entre Brasil, México, Peru e Chile. Comparam-se os resultados otimizados com aqueles provenientes de um projeto conceitual não-otimizado (abordagem clássica). A partir de pesquisa experimental, com população de 20 elementos, a otimização considera dois objetivos: maximizar o retorno financeiro anual e maximizar a segurança (minimizar o fator de risco). Os projetos otimizados apresentaram resultados melhores que o projeto pela abordagem clássica, como ganho de 20% em relação ao retorno financeiro anual, de forma a concluir que vale a pena aplicar a otimização na fase conceitual de projeto.

**Palavras-chaves:** Projeto de Navio RoRo. Abordagem Clássica, Otimização. Análise de Segurança. Retorno Financeiro.

## ABSTRACT

The search for 'adequate' engineering solutions has become one of the biggest paradigms of the modern world. In the naval architecture/engineering field, each vessel can be considered a unique element, designed for a specific function and meeting the shipowner's requirements and desires. It is a joint of diverse attributes, in which the relation between shipbuilding cost versus cargo capacity has a huge importance. One of the biggest issues in naval architecture/engineering is how to work the shipowner's diverse requirements simultaneously, since that the higher the cargo capacity, the higher the construction cost, which makes it vital to apply a structured and efficient methodology for ship design. A possible solution is by applying optimization techniques in the design process, looking to improve its results. This graduation project presents mono and multiobjective optimizations, using the genetic algorithm NSGA2, and compares the results to a classical ship design approach. The ship design is for a RoRo type vessel, with a cargo capacity of 1000 to 2000 cars, sailing between Brazil, Mexico, Peru and Chile. Using an experimental research technique, with an initial population of 20 elements, the optimization process considers two objectives: maximize the annual revenue, and maximize the security (minimize risk factor). The optimized designs present better results than the one done by the classical methodology, for example an increase of 20% in the financial revenue, therefore, it is worth using optimization techniques in the initial phases of ship design.

**Keywords:** Ship Design, RoRo. Classical methodology. Optimization. Safety analysis. Financial revenue.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 - Custo de Construção (milhões de USD) x Capacidade de Carga (TEUs) | 15 |
| Figura 2 - Construção de Embarcação <i>Viking</i> .                          | 16 |
| Figura 3 - Rota K-Line América.  | 18 |
| Figura 4 - Cargas Diversas Transportadas por RoRo.                           | 22 |
| Figura 5 – Classes Navios RoRo.  | 23 |
| Figura 6 - Tipos de Rampas para RoRo.  | 24 |
| Figura 7 - MV Estônia.   | 25 |
| Figura 8 - Espiral de Evans.   | 27 |
| Figura 9 - Fases do Projeto de Navio.  | 28 |
| Figura 10 – Exemplo de Fronteira de Pareto.                                  | 33 |
| Figura 11 - Diagrama de Funcionamento Algoritmo Genético.                    | 34 |
| Figura 12 - Diagrama NSGA2.  | 40 |
| Figura 13 - Rota da Embarcação.  | 42 |
| Figura 14 - Diagrama Modelo de Síntese Otimização.                           | 45 |
| Figura 15 - Regressão DWT (ton) x Carros.                                    | 46 |
| Figura 16 - Regressão Deslocamento (ton) x DWT (ton).                        | 47 |
| Figura 17 - Regressões para as Características Geométricas.                  | 48 |
| Figura 18 - Exemplo de Composição de Pesos Embarcação Qualquer.              | 50 |
| Figura 19 - KT (Hélice e Casco), 10 KQ, Eficiência.                          | 56 |
| Figura 20 - Potências Sistema Propulsivo.                                    | 60 |
| Figura 21- Fórmula de Regressão para Estimar Tripulação.                     | 65 |
| Figura 22 - Exportação de Veículos pelo Brasil.                              | 67 |
| Figura 23- Exemplo de uma Análise Financeira um Ano Operacional.             | 68 |
| Figura 24 - Embarcação PCTC Adernada.  | 69 |
| Figura 25 - Esquema Otimização Mono-objetiva Maximizar Retorno.              | 79 |
| Figura 26 – Parâmetros que Influenciam no Retorno Financeiro da Embarcação   | 80 |
| Figura 27 - Esquema Otimização Mono-objetiva Maximizar GM.                   | 82 |
| Figura 28 – Parâmetros que Influenciam na Segurança da Embarcação.           | 83 |
| Figura 29 - Esquema Otimização Multiobjetivo.                                | 84 |
| Figura 30 - Retorno (USD) x Número de Carros                                 | 86 |
| Figura 31 - Retorno (USD) x Eficiência Propulsor.                            | 87 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 32 - Retorno (USD) x Gasto (USD). .....                       | 88  |
| Figura 33- Análises Financeiras dos Resultados da Otimização.....    | 89  |
| Figura 34 - Retorno x Segurança Otimização do Retorno.....           | 90  |
| Figura 35 - Efeito da Velocidade na Eficiência do Propulsor.....     | 92  |
| Figura 36 - Consumo por Velocidade do Projeto Otimizado. ....        | 92  |
| Figura 37 - GMt (m) x Retorno (USD). ....                            | 93  |
| Figura 38 - Segurança pelo Número de Carros.....                     | 94  |
| Figura 39 - O GM pela Segurança. ....                                | 95  |
| Figura 40 - Retorno pela Segurança. ....                             | 96  |
| Figura 41 - A Variação da Distribuição de Carga pela Segurança. .... | 97  |
| Figura 42 - GM em Função do KG do Projeto Otimizado.....             | 98  |
| Figura 43 – $T_{ROLL}$ em Função do GM do Projeto Otimizado.....     | 99  |
| Figura 44 - O $T_{ROLL}$ em Função da Segurança.....                 | 99  |
| Figura 45 - Convergência Fronteira de Pareto. ....                   | 100 |
| Figura 46 - Otimização Multiobjetiva. ....                           | 101 |
| Figura 47 - A Fronteira de Pareto da Solução Multiobjetivo. ....     | 102 |



## LISTA DE TABELAS

|  |     |
|--|-----|
| Tabela 1 - Restrições de Dimensões. ....   | 42  |
| Tabela 2 - Banco de Dados Embarcações Semelhantes. ....  | 43  |
| Tabela 3 - Coeficientes Típicos Navios de Carga e Verificação em Embarcações Semelhantes. .... | 50  |
| Tabela 4 - Distribuição de Pesos de Embarcações RoRo.....                                      | 51  |
| Tabela 5 - Distribuição dos Centroides de Embarcações RoRo.....                                | 51  |
| Tabela 6 - Limites Método de Holtrop e Mennen.....   | 53  |
| Tabela 7- Verificação da Aplicação do Método de Cálculo de $R_T$ . ....                        | 53  |
| Tabela 8 - Limites <i>Wageningen B Series</i> . ....   | 54  |
| Tabela 9 - Coeficientes $K_T$ .....  | 57  |
| Tabela 10 - Coeficientes $K_T$ continuação. ....   | 58  |
| Tabela 11 - Distância entre Portos. ....   | 60  |
| Tabela 12 - Potência de Diferentes Motores da Empresa Wärtsilä. ....                           | 61  |
| Tabela 13 - Preço Médio do Combustível. ....   | 62  |
| Tabela 14 - Dimensões Carros Exportados pelo Brasil.....                                       | 62  |
| Tabela 15 - Descrição dos Gastos Operacionais da Embarcação. ....                              | 64  |
| Tabela 16 - Tripulantes Embarcações Semelhantes.....   | 64  |
| Tabela 17 - Salário Anual médio Tripulação.....  | 65  |
| Tabela 18 - Taxas de Movimentação de Carga.....  | 66  |
| Tabela 19 - Exportação de Automóveis Países em Análise.....                                    | 67  |
| Tabela 20 - Taxas de Movimentação de Carga por Porto para 2000 Veículos. ....                  | 68  |
| Tabela 21 - Valores Típicos de $T_R$ RoPax. ....   | 71  |
| Tabela 22 - Restrições Processo de Otimização.....   | 75  |
| Tabela 23- População Inicial SOBOL.....  | 76  |
| Tabela 24 - Resultado que Maximiza o Retorno Anual do Projeto.....                             | 91  |
| Tabela 25 - Alteração dos Pesos e Centroides Projeto Otimizado - Retorno.....                  | 93  |
| Tabela 26 – Resultado de Projeto Otimizado para Fator de Segurança. ....                       | 96  |
| Tabela 27 - Resultados Multiobjetivo. ....   | 102 |
| Tabela 28 – Resultados dos Processos de Otimização. ....                                       | 103 |
| Tabela 29 - Comparação entre Projetos Otimizados e Não-otimizado.....                          | 106 |
| Tabela 30 - Análise entre as Distribuições de Pesos dos Projetos. ....                         | 108 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                                    |  |
|------------------------------------|--|
| <b>A<sub>E</sub></b>               | Área Expandida                         |
| <b>A<sub>E</sub>/A<sub>O</sub></b> | Área Expandida/Área do Disco           |
| <b>AG</b>                          | Algoritmo Genético                     |
| <b>A<sub>M</sub></b>               | Área a Meia-Nau                        |
| <b>A<sub>P</sub></b>               | Área Projetada                         |
| <b>AUD</b>                         | Dólares Australianos                   |
| <b>B</b>                           | Boca (M)                               |
| <b>B/T</b>                         | Adimensional Boca/Calado               |
| <b>BM</b>                          | Raio Metacêntrico                      |
| <b>C<sub>B</sub></b>               | Coeficiente de Bloco                   |
| <b>C<sub>D</sub></b>               | Coeficiente de DWT                     |
| <b>C<sub>M</sub></b>               | Coeficiente de Seção Mestra            |
| <b>ConRo</b>                       | <i>Container e RoRo</i>                |
| <b>C<sub>P</sub></b>               | Coeficiente Prismático                 |
| <b>C<sub>WP</sub></b>              | Coeficiente de Área de Linha D'água    |
| <b>D</b>                           | Pontal                                 |
| <b>DWT</b>                         | Deadweight                             |
| <b>Δ</b>                           | Deslocamento                           |
| <b>η</b>                           | Eficiência                             |
| <b>η<sub>T</sub></b>               | Eficiência Total                       |
| <b>η<sub>O</sub></b>               | Eficiência em Águas Aberta             |
| <b>η<sub>RR</sub></b>              | Eficiência Rotativa Relativa           |
| <b>η<sub>H</sub></b>               | Eficiência do Casco                    |
| <b>η<sub>S</sub></b>               | Rendimento Perdas de Transmissão       |
| <b>F<sub>N</sub></b>               | Número de Froude                       |
| <b>g</b>                           | Gravidade                              |
| <b>GM</b>                          | Altura Metacêntrica                    |
| <b>IMO</b>                         | International Maritime Organization    |
| <b>J</b>                           | Coeficiente de Avanço                  |
| <b>(1 + K<sub>1</sub>)</b>         | Fator de Forma                         |
| <b>KB</b>                          | Altura Centro de Carena                |
| <b>KG</b>                          | Centro de Gravidade                    |
| <b>K<sub>Q</sub></b>               | Coeficiente Torque                     |
| <b>K<sub>T</sub></b>               | Coeficiente Força Propulsiva           |
| <b>kn</b>                          | Nós                                    |
| <b>L<sub>OA</sub></b>              | Comprimento Total da Embarcação        |
| <b>L<sub>BP</sub></b>              | Comprimento entre Perpendiculares      |
| <b>LWT</b>                         | Peso Leve                              |
| <b>L/B</b>                         | Adimensional Comprimento/Boca          |
| <b>MV</b>                          | Marine Vessel                          |
| <b>n</b>                           | Rotação                                |
| <b>NSGA</b>                        | Nondominated Sorting Genetic Algorithm |

|                          |  |
|--------------------------|--|
| <b>NSGA2</b>             | Nondominated Sorting Genetic Algorithm 2 |
| <b>PCC</b>               | Pure Car Carrie                          |
| <b>PCTC</b>              | Pure Car And Truck Carrier               |
| <b>P/D</b>               | Passo do Hélice / Diâmetro do Hélice     |
| <b>P<sub>O</sub></b>     | Pressão no Propulsor                     |
| <b>P<sub>ATM</sub></b>   | Pressão Atmosférica                      |
| <b>ρ</b>                 | Densidade Água do Mar                    |
| <b>P<sub>S</sub></b>     | Potência Motor                           |
| <b>P<sub>E</sub></b>     | Potência Efetiva                         |
| <b>RoRo</b>              | Roll-On/Roll-Off                         |
| <b>R<sub>TOTAL</sub></b> | Resistência Total                        |
| <b>R<sub>F</sub></b>     | Resistência de Fricção                   |
| <b>R<sub>APP</sub></b>   | Resistência de Apêndices                 |
| <b>R<sub>W</sub></b>     | Resistência de Onda                      |
| <b>R<sub>B</sub></b>     | Resistência do Bulbo                     |
| <b>R<sub>TR</sub></b>    | Resistência do Transom                   |
| <b>RoPAX</b>             | RoRo Passageiro                          |
| <b>σ</b>                 | Número de Cavitação                      |
| <b>T<sub>C</sub></b>     | Coefficiente de Carregamento             |
| <b>TEV</b>               | Terminal de Exportação De Veículos       |
| <b>T<sub>ROLL</sub></b>  | Período de Roll                          |
| <b>T</b>                 | Calado                                   |
| <b>TEU</b>               | Twenty Foot Equivalent Unit              |
| <b>t</b>                 | Coefficiente De Força Propulsiva         |
| <b>USD</b>               | Dólares Americanos                       |
| <b>V<sub>S</sub></b>     | Velocidade de Serviço                    |
| <b>V<sub>A</sub></b>     | Velocidade de Avanço                     |
| <b>V<sub>R</sub></b>     | Velocidade Rotativa                      |
| <b>w</b>                 | Coefficiente de Dedução de Esteira       |
| <b>W<sub>ST</sub></b>    | Peso de Aço                              |
| <b>W<sub>OT</sub></b>    | Peso de Outfitng                         |
| <b>W<sub>M</sub></b>     | Peso de Maquinário                       |
| <b>Y<sub>C</sub></b>     | Centróide Vertical                       |
| <b>Z</b>                 | Número de Pás                            |

## SUMÁRIO

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>14</b> |
| 1.1      | OBJETIVOS .....   | 19        |
| 1.1.1    | <b>Objetivo Geral</b> .....   | <b>20</b> |
| 1.1.2    | <b>Objetivos Específicos</b> .....  | <b>20</b> |
| 1.2      | ESTRUTURA DO TRABALHO .....   | 21        |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....  | <b>21</b> |
| 2.1      | NAVIOS ROLL-ON/ROLL-OFF.....  | 21        |
| 2.2      | PROJETOS DE NAVIOS.....   | 25        |
| 2.3      | OTIMIZAÇÃO APLICADA A PROJETOS DE ENGENHARIA .....                          | 29        |
| 2.4      | O ALGORITMO GENÉTICO.....   | 33        |
| <b>3</b> | <b>METODOLOGIA</b> .....  | <b>37</b> |
| 3.1      | METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....  | 37        |
| 3.2      | A FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO .....  | 38        |
| 3.3      | O ALGORITMO GENÉTICO NSGA2.....   | 39        |
| 3.4      | DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DE PROJETO .....                                    | 41        |
| 3.5      | DETERMINAÇÃO DOS NAVIOS SEMELHANTES .....                                   | 42        |
| 3.6      | MODELO DE SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE NAVIOS RORO.....           | 44        |
| 3.6.1    | <b>Regressão para as características geométricas</b> .....                  | <b>46</b> |
| 3.6.2    | <b>Fórmulas empíricas para os coeficientes de forma.</b> .....              | <b>49</b> |
| 3.6.3    | <b>Determinação de pesos e centros da embarcação</b> .....                  | <b>50</b> |
| 3.6.4    | <b>Determinação da resistência ao avanço</b> .....                          | <b>52</b> |
| 3.6.5    | <b>Integração casco-hélice-motor</b> .....                                  | <b>53</b> |
| 3.6.6    | <b>Determinação da eficiência do propulsor e consumo de combustível.</b> .. | <b>57</b> |
| 3.6.7    | <b>Preço do frete dos automóveis.</b> .....                                 | <b>62</b> |
| 3.6.8    | <b>Análise do retorno financeiro anual</b> .....                            | <b>63</b> |
| 3.6.9    | <b>Análise da segurança da embarcação</b> .....                             | <b>69</b> |
| <b>4</b> | <b>PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO</b> .....   | <b>74</b> |
| 4.1      | AS RESTRIÇÕES.....  | 74        |
| 4.2      | A POPULAÇÃO DE INDIVÍDUOS INICIAIS .....                                    | 75        |

|       |  |            |
|-------|--|------------|
| 4.3   | ABORDAGENS MONO-OBJETIVO .....   | 77         |
| 4.3.1 | <b>Maximizar retorno financeiro anual .....</b>  | <b>77</b>  |
| 4.3.2 | <b>Maximizar Segurança .....</b>   | <b>81</b>  |
| 4.4   | ABORDAGEM MULTI-OBJETIVO.....  | 83         |
| 5     | <b>ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>   | <b>85</b>  |
| 5.1   | OTIMIZAÇÃO MONO-OBJETIVA VISANDO MAXIMIZAR RETORNO ANUAL .....                                   | 85         |
| 5.2   | OTIMIZAÇÃO VISANDO MAXIMIZAR SEGURANÇA.....  | 94         |
| 5.3   | OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO VISANDO MAXIMIZAR O RETORNO ANUAL E MINIMIZAR O FATOR DE SEGURANÇA..... | 100        |
| 5.4   | ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS OTIMIZAÇÕES.....  | 103        |
| 5.5   | COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS OTIMIZADOS E NÃO OTIMIZADOS.....                                       | 104        |
| 6     | <b>CONCLUSÃO.....</b>  | <b>109</b> |
|       | <b>REFERÊNCIAS.....</b>  | <b>114</b> |
|       | <b>APÊNDICE A – A ABORDAGEM POR METODOLOGIA CLÁSSICA.....</b>                                    | <b>120</b> |
|       | <b>APÊNDICE B – COEFICIENTES <math>K_T</math> E <math>K_Q</math>.....</b>                        | <b>122</b> |
|       | <b>APÊNDICE C – CURVA CAVITAÇÃO .....</b>  | <b>126</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Uma embarcação é um sistema extremamente complexo, com inúmeros subsistemas interligados. O projetista naval precisa conhecer diversas áreas distintas para realizar o projeto de um navio. São inúmeros os conhecimentos necessários para essa atividade, e apenas a experiência não é garantia de um bom projeto (PAPANIKOLAOU, 2009). Atualmente, a busca por projetos de engenharia adequados tornou-se um dos grandes paradigmas do mundo moderno (TANCREDI, 2008).

Definir um ‘projeto adequado’ (ou ‘projeto eficiente’), porém, pode ser tarefa complicada, uma vez que a “adequação” depende do ponto de vista (e interesse) de cada uma das partes envolvidas. Por exemplo, para um ecologista o motor mais adequado é aquele que polui menos, enquanto que para um jovem aventureiro, o motor mais adequado é aquele que gera maior potência. Por fim, poder-se-ia desejar um motor mais durável, mais econômico, mais barato, entre muitas outras possibilidades.

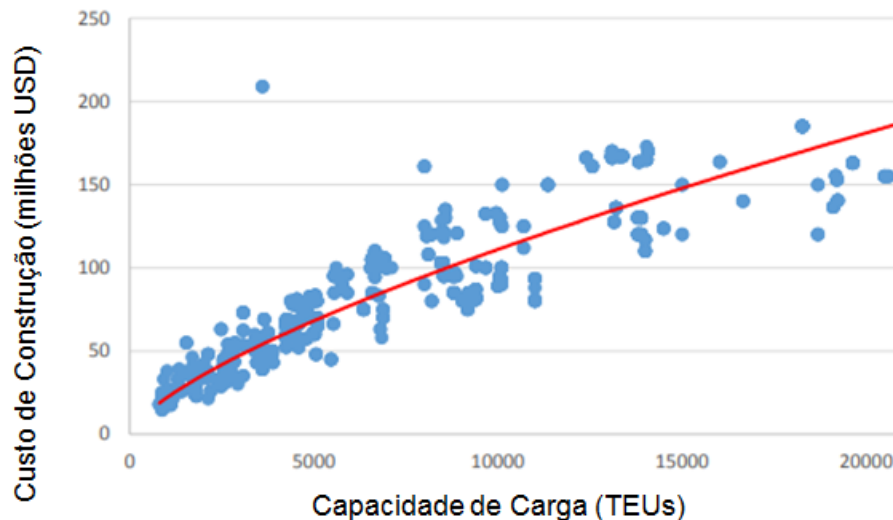
Aplicando-se esse conceito à engenharia naval, a definição do objetivo de um projeto é estabelecida pelo armador. Cada navio pode ser considerado um elemento único, e normalmente, é projetado para uma função específica. Os armadores decidem qual tipo de embarcação desejam, e com isso definem os resultados finais esperados. As “necessidades e desejos do armador”, muitas vezes, consistem em um conjunto amplo e difuso de atributos, nem sempre coerente e coeso com requisitos de projeto.

Dessa forma, um dos maiores problemas dentro da engenharia naval é como trabalhar com os diversos requisitos do armador simultaneamente. Pois, em geral, tratam-se de atributos conflitantes cujas características de projeto não são facilmente isoladas. Esse cenário pode ser facilmente visualizado quando se considera um projeto com apenas dois “desejos” do armador: custo e capacidade de

carga. Um armador deseja o navio mais barato e com a maior capacidade de carga possível.

Por outro lado, quanto maior a capacidade de carga, maior o custo de construção do navio, relação que pode ser observada na Figura 1. Além disso, existem diversas combinações geométricas que resultam em uma mesma capacidade de carga e/ou custo de construção.

Figura 1 - Custo de Construção (milhões de USD) x Capacidade de Carga (TEUs)



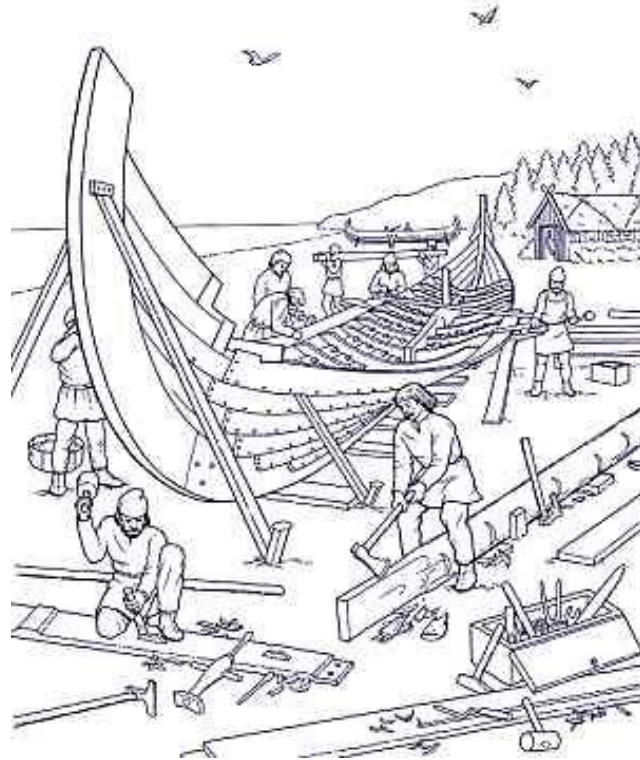
Fonte: Murray (2018), adaptado pela Autora (2018).

Como assegurar, então, que todas as possíveis soluções foram analisadas? Ou mesmo que a solução escolhida seja a mais “adequada” aos objetivos do armador? Uma possível solução para mitigar essas dúvidas consiste na aplicação de técnicas de otimização ao problema de projeto naval, visando o aperfeiçoamento do projeto em busca dos melhores resultados (PAPANIKOLAOU, 2009).

A construção de embarcações antecede aos conceitos modernos de engenharia, sendo uma das atividades humanas mais antigas registradas. Os *vikings* foram um povo popularmente conhecido por dominar a técnica de construir barcos. A construção era tida como arte, passada de geração em geração, oralmente, sem a elaboração de qualquer ilustração como guia. Cada madeira que compunha o barco era cuidadosamente escolhida, para então ser esculpida, iniciando-se a construção pela roda de proa. Esse povo construiu desde embarcações de guerra até embarcações destinadas ao transporte de carga,

possibilitando a viagem da Escandinávia à Islândia (CORVO, 2016). A Figura 2 a seguir apresenta o processo de construção *viking*.

Figura 2 - Construção de Embarcação *Viking*.



Fonte: Hurstwick (2015).

Pode-se considerar a experiência como uma técnica de aperfeiçoamento primitiva, onde o conhecimento do arquiteto (ou construtor) naval era fundamental nas decisões de projeto. Porém, com o advento tecnológico, novas técnicas e ferramentas foram desenvolvidas a fim de tornar esse processo mais fácil e rápido, permitindo a análise de um conjunto maior de atributos, além de viabilizar um processo racional de tomada de decisão. O uso de técnicas de otimização no projeto de embarcações, por exemplo, é foco de diversos estudos, abordando os mais diferentes tipos de navios, como:

- a) Development of Pareto strategy multi-objective function method for the optimum design of ship structures – (NA; KARR, 2016);
- b) Holistic Ship Design Optimization: Merchant and Naval Ships – (PAPANIKOLAOU, 2011);



c) Multi-objective optimization of a floating LNG terminal – (BOULOUGOURIS; PAPANIKOLAOU, 2018).

Entre as diferentes categorias de navios, este trabalho se dedica ao estudo das embarcações do tipo *Roll-on/Roll-off* (RoRo). As cargas transportadas por esses navios são bem específicas, podendo entrar e sair “rolando” dos mesmos. Como vantagem destaca-se que essa modalidade de embarcação elimina equipamentos que auxiliem nos processos de carga/descarga, como guindastes, o que facilita a operação tornando o processo mais eficiente, rápido e com menos riscos (LAMB, 2003).

A globalização da produção, a internacionalização dos mercados e o aumento da produção de produtos, permanentemente, motivam o desenvolvimento de maneiras eficientes para o escoamento da produção, e uma dessas maneiras é pelos mares. Navios podem transportar uma quantidade muito maior de carga, oferecendo taxas menores, se comparados ao transporte aéreo por exemplo (FREIGHTOS, 2016). Pode-se citar o caso de veículos automotivos, cargas relativamente leves, porém extremamente volumosas, o que inviabilizaria o modal aéreo em razão da limitada capacidade de transporte e o alto valor das taxas.

Em geral, as rotas de transporte marítimo são estabelecidas de acordo com a demanda mundial. Países que exportam automóveis para outros possuem alguma rota de RoRo. Existem diversas empresas responsáveis por essas rotas, entre elas, a “*K-Line America*”. A Figura 3 apresenta uma das rotas da empresa para as Américas. Países como Brasil, México e Uruguai são conhecidos por exportarem automóveis (WORKMAN, 2018). A rota apresentada inclui portos estratégicos, como Santos e Veracruz, o que possibilita o transbordo para outros países, além da possibilidade de ligar as Américas com outros continentes (K-LINE AMÉRICA, 2017).

Figura 3 - Rota K-Line América.



Fonte: K-Line América (2017).

Nos últimos anos, a produção de automóveis cresceu, assim como as características dos mesmos. Existem diversos tipos de veículos, com diferentes características físicas, e ainda veículos extremamente pesados. Como resultado, observa-se um aumento na complexidade, especificidade e porte das embarcações destinadas ao transporte dos mesmos (LAMB, 2003). A utilização de uma metodologia estruturada e eficiente, no desenvolvimento de embarcações para esta modalidade de carga, torna-se vital para o alcance do projeto 'adequado'. É nesse contexto, que justifica-se a temática deste trabalho, apresentando resultados a partir de análise comparativa, entre abordagens mono e multiobjetivo, associadas à aplicação de técnicas de otimização versus aqueles obtidos a partir da abordagem tradicional baseada em um processo sequencial e iterativo, com o intuito de verificar se vale a pena aplicar a otimização na fase conceitual de projeto.

Observa-se na literatura a existência de inúmeras metodologias disponíveis para a realização de projetos navais, destacando-se em especial o processo sequencial e iterativa tradicionalmente representado pela Espiral de Evans (EVANS, 1956). Entretanto, Gale (2003) alerta para o fato de que o projeto de um navio, em

geral, não é feito por uma única pessoa (ou grupo), e portanto, a racionalização (sequenciamento) da espiral nem sempre pode ser obtida, sob pena de reduzir a capacidade de cooperação de atividades potencialmente simultâneas, e assim retardar a convergência da solução. Como alternativa para mitigar esses problemas, diversos autores propõem que o problema de projeto naval seja resolvido por meio da resolução de um modelo de síntese utilizando-se técnicas de otimização.

Segundo Papanikolaou (2003), o processo de otimização consiste na seleção da melhor alternativa dentro de uma gama de opções. Dessa forma, o emprego de técnicas de otimização consiste em uma interessante abordagem para a determinação de um projeto viável (que atenda aos requisitos do armador e às normas pertinentes). Ao mesmo tempo, que busque maximizar (ou minimizar) atributos que representem desejos funcionais; oferecendo um potencial diferencial competitivo em relação a outros projetos existentes.

Assim, apresenta-se neste trabalho um estudo sobre técnicas de otimização aplicadas especificamente ao projeto de navios RoRo, verificando-se os efeitos dessas técnicas na eficiência do processo de projeto. Realiza-se ainda uma comparação entre diferentes combinações de requisitos e atributos, a fim de verificar a influência dessa decisão no resultado obtido.

A metodologia adotada para este estudo é a pesquisa experimental, utilizando um modelo de síntese e otimização construído com base em modelos empíricos disponíveis na literatura e implementado em planilha eletrônica do tipo Excel. Para o presente estudo, a população inicial é de 20 indivíduos e as taxas utilizadas referentes à mutação e cruzamento são 1,0 e 0,9 respectivamente. Os diferentes processos de otimização são conduzidos com a aplicação do algoritmo NSGA2 por meio da utilização do programa ModeFRONTIER.

## 1.1 OBJETIVOS

A seção a seguir apresenta o objetivo geral e os objetivos específicos tratados neste trabalho.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Realizar análise comparativa entre abordagens mono e multiobjetivo, associadas à aplicação de técnicas de otimização com algoritmo NSGA2 ao projeto de um navio do tipo RoRo, para transporte de 1000 a 2000 carros, entre Brasil, México, Peru e Chile, comparando os resultados com aqueles provenientes de um projeto preliminar não-otimizado (abordagem clássica).

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Para alcançar o objetivo proposto foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos, que norteiam o desenvolvimento deste estudo:

- a) Realizar levantamento de dados acerca do projeto de navios do tipo RoRo;
- b) Realizar levantamento de embarcações semelhantes visando identificar as características geométricas tipicamente associadas a essa classe de navios;
- c) Identificar as potenciais variáveis de decisão associadas ao projeto de um navio RoRo;
- d) Identificar os parâmetros que devem ser utilizados como critério de escolha visando a qualificação da solução;
- e) Realizar uma análise de retorno financeiro anual das embarcações, determinando um modelo para a estimativa desse parâmetro;
- f) Determinar um modelo para a estimativa da segurança de embarcações RoRo;
- g) Desenvolver um modelo de síntese com equações empíricas destinado ao projeto conceitual/preliminar de uma embarcação do tipo RoRo;
- h) Desenvolver um procedimento que permita a aplicação de técnicas de otimização ao modelo de síntese desenvolvido;
- i) Conceber diferentes abordagens de otimização, considerando diferentes conjuntos de restrições e/ou funções objetivo;

- j) Realizar o processo de otimização considerando cada uma das abordagens consideradas anteriormente;
- k) Comparar os resultados obtidos nos diferentes processos de otimização realizados;
- l) Comparar os resultados dos projetos otimizados com aqueles obtidos em um projeto preliminar não-otimizado, realizado a partir dos mesmos requisitos de projeto.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A monografia em questão está estruturada em seis capítulos, descritos a seguir:

- a) Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: esse capítulo apresenta os principais conceitos utilizados na elaboração desta monografia. Descrevem-se as características de embarcações do tipo RoRo, o processo de projeto de navios e as técnicas de otimização;
- b) Capítulo 3 – Metodologia: esse capítulo aborda os tópicos relacionados à metodologia aplicada na elaboração desse trabalho. Apresentam-se as equações de regressões geradas por embarcações semelhantes, as fórmulas empíricas utilizadas em projetos de navio, o processo de análise de retorno financeiro anual, e o estudo da segurança da embarcação;
- c) Capítulo 4 – Processo de Otimização: essa seção, trata dos processos de otimização, apresentando e justificando a escolha do algoritmo genético NSGA2, e identificando as restrições de otimização;
- d) Capítulo 5 – Análise dos Resultados: esse tópico trata da análise dos resultados da otimização e posteriormente, realiza um estudo comparativo entre projetos otimizados e um projeto não-otimizado;
- e) Capítulo 6 – Conclusão: esse capítulo apresenta as considerações conclusivas do trabalho e possíveis ações futuras que podem ser criadas a partir desta monografia.

O capítulo a seguir apresenta os levantamentos a respeito da fundamentação teórica que norteiam a temática escolhida para este Trabalho de Conclusão de Curso.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta o levantamento teórico utilizado para dar embasamento à monografia e encontra-se estruturado em quatro subseções. A primeira é destinada ao estudo da embarcação em questão, navios *Roll-on/Roll-off*. Já o conteúdo da segunda subseção versa sobre o projeto de navios, apresentando um resumo dos principais processos de projetos navais. A terceira apresenta uma extensa análise dos processos de otimização aplicados a projetos de engenharia. Por fim, na última subseção apresentam-se os conceitos sobre algoritmos genéticos e define-se qual deles é utilizado na monografia.

### 2.1 NAVIOS ROLL-ON/ROLL-OFF

Navios *Roll-on/Roll-off*, ou popularmente conhecidos como RoRo, são embarcações cargueiras que transportam uma categoria específica de carga. O termo *Roll-on/Roll-off*, é oriundo do inglês, onde o verbo *to roll* significa rolar, e os termos *on* e *off* significam para dentro e para fora, respectivamente. Portanto, em uma embarcação RoRo, a carga deve entrar e sair “rolando” do navio (LAMB, 2003).

Em geral, embarcações RoRo são destinadas ao transporte de veículos e similares. É interessante observar que, no entanto, o transbordo da carga pode ser feito de forma autônoma (como no caso de veículos), ou com auxílio de algum equipamento específico dotado de rodas (LAMB, 2003).

A Figura 4 apresenta quatro tipos de cargas transportadas por esses navios: automóveis, caminhões, tanques de guerra e carga geral. É interessante notar que de fato carga geral pode ser transportada por RoRos, desde que a carga/descarga seja feita com o auxílio de um equipamento sobre rodas.

Figura 4 - Cargas Diversas Transportadas por RoRo.



Fonte: Lamb (2003).

Têm-se registro de que a primeira embarcação do tipo foi construída por volta de 1960 e transportava 300 carros (LAMB, 2003). Ainda segundo o autor, existem diversas classes de RoRo, que variam de acordo com o tipo de carga transportada:

- a) PCC – Pure Car Carrier: embarcação destinada apenas ao transporte de carros;
- b) PCTC – Pure Car and Truck Carrier: embarcação destinada ao transporte de carros e veículos pesados, tais como caminhões e ônibus;
- c) Ferries: embarcação que transporta automóveis e pessoas ao mesmo tempo;
- d) RoRo/Container (ConRo): embarcação que transporta veículos automotores e contêineres.

Entre as quatro classes apresentadas, destaca-se o PCC como foco de estudo desta monografia. Essa escolha deve-se essencialmente ao objetivo de comparar o projeto utilizando técnicas de otimização com aquele realizado pela abordagem tradicional de projeto sequencial e iterativo. Como o projeto original que servirá de *benchmark* para este trabalho corresponde a um navio da classe PCC,

torna-se natural a escolha dessa classe para a realização dos objetivos propostos. A Figura 5 apresenta as quatro classes anteriormente citadas.

Figura 5 - Classes Navios RoRo.



Fonte: Eletric (2015); Grimaldi (2017); Suardiaz (2018); Ferries (2017).

É importante observar que segundo Watson (1998), navios da classe RoRo são considerados ‘navios de volume’. Ou seja, navios cuja preocupação principal trata da alocação de cargas de baixa densidade. Nessa mesma categoria estão os navios de cruzeiro e os navios gaseiro.

Assim, como destaca Lamb (2003), uma das maiores características dos PCC é a otimização do arranjo interno para transportar a maior quantidade possível de automóveis, e também tornar o processo de carga e descarga mais eficiente.

Na imagem referente ao PCC, tal como pôde ser visto na Figura 5, a busca por um maior volume de alocação de cargas resulta em navios de baixo calado, grande borda livre e com superestrutura volumosa e disposta ao longo de todo o convés.

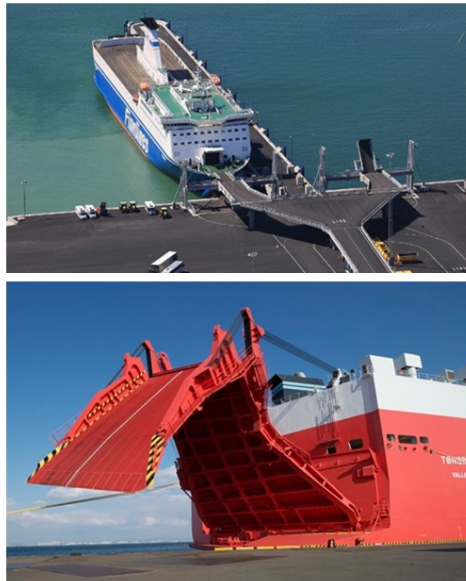
Ainda de acordo com Lamb et al. (2003), navios RoRo possuem algumas características diferentes daquelas encontradas em navios de carga, em especial o sistema de carga e descarga. Em geral, o processo de carga e descarga de um automóvel requer um motorista, que fica responsável por dirigir o veículo até dentro do navio, e também por retirá-lo da embarcação, estacionando-o no pátio do porto.



Esse motorista pode ser contratado da companhia responsável pelo navio, ou ainda o próprio passageiro, no caso de navios da classe *ferries*.

Para a movimentação dos veículos são utilizadas rampas entre o navio e o porto, as quais podem ser fixas ao navio, ou então fixas no porto. A Figura 6 apresenta ambas as configurações.

Figura 6 - Tipos de Rampas para RoRo.



Fonte: ASA (2018).

Assim, um dos grandes desafios do projeto dessa classe de embarcação é o arranjo interno, visto que além da necessidade de muito espaço para carga, as embarcações devem possuir poucas ou nenhuma antepara transversal, sob pena de reduzir a mobilidade dos veículos e assim aumentar o tempo referente ao processo de carga e descarga da embarcação.

Por outro lado, a ausência de grandes porões de carga, poucas anteparas e elevado pontal são características que dificultam a capacidade do navio em oferecer estabilidade transversal, em especial na condição avariada. De fato, a história registra vários naufrágios de navios dessa classe, resultando no alagamento e/ou emborcamento causado pela avaria do casco.

Um dos maiores acidentes envolvendo a classe *ferries* aconteceu com a embarcação MV Estônia em 1994 (HUNT, 2017). O navio transportava 989 pessoas e diversos automóveis. Durante a travessia entre Tallin (Estônia) e Estocolmo (Suécia), a embarcação foi atingida por uma forte tempestade, e ondas muito fortes

atingiram a proa do navio, onde se localizava a rampa de acesso (HUNT, 2017). Essa região foi avariada, possibilitando a entrada de água dentro da embarcação, que inundou os decks destinados aos veículos. A embarcação então começou a adernar, e em poucos minutos os passageiros ficaram presos dentro das cabines (HUNT, 2017). Conseguiram sair da embarcação apenas 310 pessoas, porém, devido às condições climáticas e a temperatura da água, apenas 137 foram resgatadas com vida. Esse foi o maior acidente já registrado no mar Báltico, onde 852 pessoas perderam suas vidas (HUNT, 2017).

Figura 7 - MV Estônia.



Fonte: Group (2001).

Atualmente esse problema pode ser mitigado com o uso de anteparas especiais, que por operação hidráulica ou elétrica, podem abrir e fechar, mantendo a capacidade de carga e respeitando os requisitos de estanqueidade e segurança impostos pela International Maritime Organization (IMO) (MACGREGOR, 2017).

## 2.2 PROJETOS DE NAVIOS

O projeto de um navio requer conhecimentos de diversas áreas, que em geral interagem entre si. Por exemplo, aumentar o comprimento do navio, aumenta o deslocamento que, por conseguinte, aumenta a resistência ao avanço, que requer um motor mais potente, que pode exigir uma praça de máquinas maior e/ou então um maior tanque de combustível.

A fim de iniciar o processo de projeto, o engenheiro deve entender quais os requisitos a serem atendidos. Em geral, os interesses do armador ajudam a definir

esses critérios. A partir da análise desses interesses define-se o tipo de embarcação, a rota, as restrições de dimensão, e principalmente, os atributos de desempenho que terão maior peso nas decisões de projeto.

Entre as razões que tornam o projeto de um navio algo complicado, Gale (2003) destaca a constante mudança que ocorre por meio das novas tecnologias que são apresentadas a cada dia, e as demandas que variam em função da oferta e preço dos produtos. Por exemplo, a escassez da oferta e o elevado preço do petróleo levaram ao desenvolvimento dos megapetroleiros da década de 80. Anos depois, a redução do valor do petróleo e a diversificação dos países exportadores priorizou a produção de petroleiros de menor porte.

Acredita-se, porém, que alguns elementos do processo devem permanecer os mesmos, tais como os objetivos do projeto, e a necessidade de entender e atender os requisitos do armador (GALE, 2003). Por outro lado, as técnicas, modelos e ferramentas utilizadas, podem variar de acordo com a metodologia empregada no projeto.

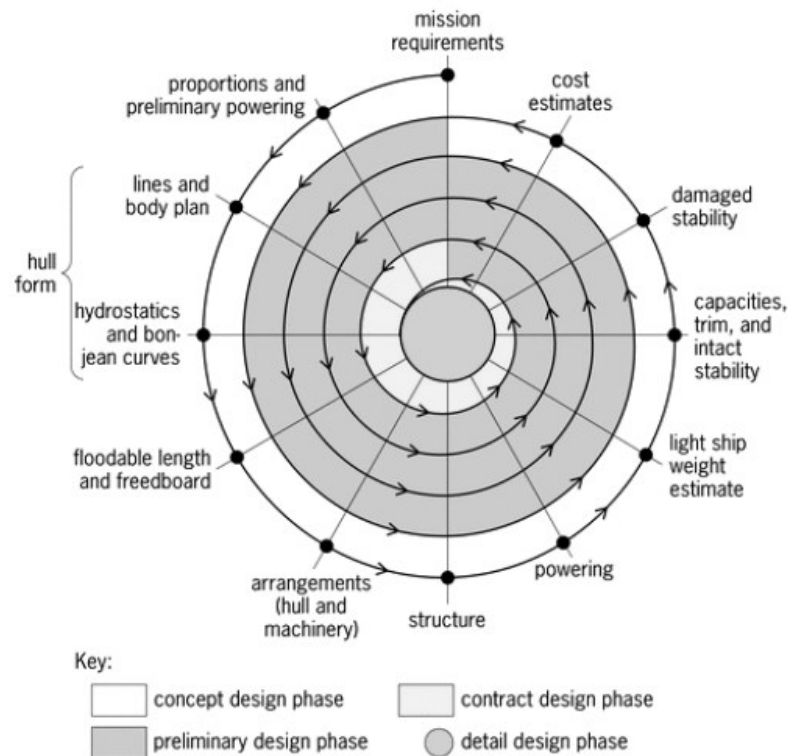
As funções de lucro e custo são aspectos importantes para qualquer tipo de negócio empresarial, e o mesmo acontece com projetos de navio. O projetista deve atender aos requisitos do armador de maneira ótima, resultando em um projeto com o menor custo operacional e/ou de construção, além de atender às exigências das Sociedades Classificadoras (GALE, 2003).

Tradicionalmente, o projeto de navio é um processo iterativo e a análise começa pela definição de dimensões principais, que podem ser obtidas a partir da utilização de modelos empíricos e/ou análise de navios semelhantes.

Na metodologia clássica de projeto, descrita por exemplo por Watson (1998), cada atributo do projeto é avaliado de maneira sequencial e iterativa, modificando o valor das variáveis que descrevem a solução de projeto a cada atributo avaliado. Esse processo prossegue até a obtenção de uma solução viável, ou seja, que atenda aos requisitos estabelecidos.

A Espiral de Evans, como exemplificada na Figura 8, é uma representação do processo de projeto iterativo e com sequenciamento racional (GALE, 2003).

Figura 8 - Espiral de Evans.



Fonte: Evans (1959) apud Vossen, Kleppe e Hjørungnes (2015).

A Espiral de Evans representa uma sequência lógica para realizar o projeto, que em teoria promove uma convergência mais eficiente para uma solução viável, e cuja construção, pode ser feita utilizando-se técnicas de tomada de decisão tais quais: Matriz de Influência, Matriz de Decisão ou AHP.

Nesse processo, o projeto inicia-se na 'primeira volta' da espiral, com base exclusivamente nos requisitos estabelecidos para o mesmo. Ao longo da primeira volta são determinadas as características fundamentais da embarcação definindo o projeto conceitual.

Com a primeira volta completa, o projetista pode retornar aos passos iniciais a fim de aprofundar e detalhar o projeto, além de eventualmente modificar características visando um melhor desempenho da embarcação. Isso ocorre, porque, muitas vezes, as informações necessárias para realizar uma etapa do projeto ainda não são conhecidas nas fases iniciais. São necessárias inúmeras voltas na espiral até encontrar o produto final que atenda aos requisitos necessários (GALE, 2003).

No entanto, a Espiral de Evans pode não representar o processo mais eficiente para o projeto de um navio, especialmente pelo fato de, em geral, o projeto ser realizado por uma equipe de projetistas. Pessoas trabalhando em grupo têm ideias diferentes de racionalização, e portanto, pode ser difícil criar uma única espiral que remeta aos pensamentos de todos os integrantes da equipe. Além disso, ao se limitar a atividade de projeto ao sequenciamento da espiral, parte da equipe ficaria ociosa ao longo da maior parcela do tempo. Então, é interessante pensar no projeto como uma série de objetivos e metas, que trabalham em conjunto, e devem ser constantemente analisados e modificados a fim de encontrar o melhor produto final para o cliente (GALE, 2003).

O projeto de um navio pode ser dividido em quatro fases: projeto conceitual, projeto preliminar, projeto contratual e projeto funcional (GALE, 2003). Os mesmos seguem uma sequência lógica, como apresentado na Figura 9 a seguir.

Figura 9 - Fases do Projeto de Navio.



Fonte: Autora (2018).

De acordo com Gale (2003), o projeto conceitual é a fase inicial, onde os requisitos e as características fundamentais do projeto são definidos. Durante essa fase, o projetista trabalha em sintonia com o armador, entendendo qual a real missão do navio e até onde é possível chegar para atender esses critérios. O produto final dessas análises são as primeiras características do navio (dimensões principais, coeficientes de forma, tipo de sistema propulsivo, material e tipo do casco), que posteriormente são analisadas resultando em um conjunto mais detalhado de características, além de um maior refino no cálculo dos atributos de desempenho analisados.

Por sua vez, a fase preliminar consiste em revisar as hipóteses obtidas na fase conceitual, estudar a forma do casco, definir a localização e tamanho da superestrutura, estabelecer o arranjo interno e a configuração estrutural do navio,

verificar se os requisitos de sociedades classificadoras são atendidos, gerar um plano básico de construção, e analisar o custo da embarcação (GALE, 2003).

O projeto contratual busca definir o custo e capacidade do navio, apresentar alguns desenhos detalhados sobre a configuração de arranjo interno e estrutural, refinamento do casco e do arranjo interno, definição dos sistemas embarcados, e ratificar o plano de construção (GALE, 2003).

No projeto funcional, segundo Gale (2003), todos os cálculos restantes são realizados e as decisões que faltam são tomadas, realizam-se ainda estudos sobre a vibração da embarcação, e definem-se todos os componentes elétricos do navio. Nessa fase, todos os componentes da embarcação são conhecidos e discriminados ao armador, permitindo determinar o planejamento da construção, bem como discriminar o fluxo de caixa necessário para o empreendimento.

É importante observar que a cada fase, ou volta na espiral, permite-se uma menor gama de variação no projeto, limitando-se a capacidade de tal metodologia na exploração de soluções consideravelmente distintas daquelas analisadas nas fases iniciais do projeto (LAMB, 2003).

Os diversos autores que versam sobre metodologias de projeto naval, nem sempre concordam acerca das fases descritas, ou então, apresentam abordagens distintas de projeto. O aprofundamento de outras metodologias foge ao escopo deste trabalho. No entanto, o leitor mais interessado poderá encontrar farto material em: *Metodologia de suporte ao projeto informacional e conceitual de embarcações de recreio a motor de pequeno porte* (MORAES, 2017).

### 2.3 OTIMIZAÇÃO APLICADA A PROJETOS DE ENGENHARIA

O estudo de técnicas de otimização, visa determinar o valor de um conjunto de parâmetros que minimiza (ou maximiza) o valor de uma função desse mesmo conjunto de parâmetros. Embora seja um problema matemático, a aplicação de tal teoria guarda relação estreita com a engenharia. Na verdade, atualmente, a otimização é um contexto muito comum, pois quase todas as atividades humanas buscam redução de custos e/ou aumento de eficiência. Assim, ao apresentarem algum tipo de diferencial, é razoável admitir que praticamente todos os projetos de

engenharia buscam apresentar resultados aprimorados a fim de serem competitivos no mercado (TANCREDI, 2008).

Existem inúmeras formas de se aperfeiçoar um processo, desde as mais fáceis até as mais complexas. Entre as mais fáceis, pode-se citar aquela baseada na experiência do engenheiro; na qual problemas com poucas variáveis podem ser ajustados com razoável previsibilidade sobre o comportamento do projeto, a fim de que este apresente resultados melhores. Entretanto, nem sempre o engenheiro é capaz de resolver problemas “intuitivamente”. Para tal, emprega-se o uso de computadores, com a função de auxiliar o projetista na tomada de decisão. Dessa forma, o engenheiro se torna apto a analisar diversos problemas e soluções ao mesmo tempo, permitindo explorar um conjunto significativamente maior de soluções.

Para otimizar um projeto é necessário definir as variáveis e os critérios de qualificação da solução (TANCREDI, 2008). O objetivo de se utilizar o computador no processo de otimização é buscar a melhor solução a partir de inúmeros critérios definidos pelo engenheiro. Da mesma forma, o computador é capaz de analisar várias combinações de projeto e indicar qual a melhor para determinado objetivo. (PARKINSON; BALLING; HEDENGREN, 2013). Nesse contexto, o trabalho (e a importância) do engenheiro passa a ser o de modelar e analisar o problema, e não mais o de realizar os cálculos associados ao modelo de análise.

Como projetar um navio depende de parâmetros diversos, onde diferentes combinações podem atender a um mesmo requisito e, os subsistemas de navios interagem entre si, nem sempre alterar algum parâmetro gera o melhor resultado global. Por mais experiente que o arquiteto naval seja, aperfeiçoar o projeto sem a ajuda de um procedimento estruturado de projeto é uma tarefa muito complicada. Portanto, problemas de projeto naval são excelentes cenários para a aplicação de técnicas de otimização.

A parte mais difícil do processo de otimização, é obter um modelo de síntese, capaz de mensurar o desempenho de uma solução de projeto descrito por meio de um conjunto limitado de parâmetros (PARKINSON; BALLING; HEDENGREN, 2013). É importante observar que, como destaca Tancredi (2008), os problemas de engenharia muitas vezes utilizam métodos numéricos de elevado custo computacional para a determinação do desempenho de uma solução. Nesse

caso, o modelo de síntese, embora correto, impossibilita a aplicação de técnicas de otimização, em função do inviável custo computacional associado ao grande número de análises a serem realizadas.

Assim, cabe ao engenheiro também avaliar cuidadosamente quais modelos e técnicas devem ser utilizados na construção do modelo de síntese a ser otimizado. É necessário que exista um compromisso entre a acurácia do resultado e o tempo de processamento. Eventualmente, podem-se construir modelos com níveis diferentes de detalhamento a serem usados em fases diferentes do projeto de navio. Tal discussão pode ser vista em maior profundidade em *Application of optimization techniques and synthesis models in hierarchical design of PSV vessels* (UEDA; TANCREDI; ANDRADE, 2013).

A construção do modelo de síntese depende do estabelecimento de alguns conceitos que devem ser conhecidos para que o processo de otimização possa ser iniciado:

- a) **Variáveis de projeto**: são responsáveis por descreverem o projeto em questão. Também, podem ser encontradas como parâmetros ou características de projeto (TANCREDI, 2008). O termo graus de liberdade é utilizado para determinar a quantidade de variáveis de um projeto (PARKINSON; BALLING; HEDENGREN, 2013);
- b) **Função objetivo**: é uma função escalar das variáveis de projeto que representa aquilo que se deseja maximizar ou minimizar (TANCREDI, 2008) (PARKINSON; BALLING; HEDENGREN, 2013);
- c) **Função de restrição**: representam os limites que devem ser respeitados pelo projeto, ou um valor que deve ser satisfeito. Podem ser encontradas com as operações matemáticas de  $\leq$  (*menor ou igual*),  $\geq$  (*maior ou igual*) ou  $=$  (*igual*) (PARKINSON; BALLING; HEDENGREN, 2013).

Segundo Parkinson, Balling e Hedengren (2013), a otimização computacional utiliza algoritmos para ajustar o valor das variáveis e assim determinar uma solução ótima que maximize (ou minimize) as funções objetivo e atenda as restrições previamente estabelecidas. Dependendo do número de variáveis, o número de combinações que resultam em possíveis soluções é



consideravelmente alto, sendo a capacidade do computador é fundamental para viabilizar o grande conjunto de análises necessárias ao processo de otimização (PARKINSON; BALLING; HEDENGREN, 2013).

Para alguns problemas, a solução ótima pode ser definida a partir de uma única função objetivo, enquanto que para outros, a solução ótima deve ser analisada segundo duas ou mais funções objetivo. Dessa forma, pode-se classificar o problema de otimização em problemas mono-objetivo e problemas multiobjetivo. Os problemas mono-objetivos envolvem apenas um objetivo, enquanto os multiobjetivo abrangem dois ou mais. Em geral, não se analisa mais de três objetivos, pois esses se tornam conflitantes e/ou de difícil visualização (PARKINSON; BALLING; HEDENGREN, 2013).

Em engenharia naval, objetivos conflitantes podem ser encontrados, por exemplo, quando os atributos de resistência ao avanço e carga são considerados. Em geral, aumentar a quantidade de carga faz com que o armador receba mais dinheiro relativo ao frete realizado, por outro lado aumentar o tamanho da embarcação, pode acarretar em um maior consumo de combustível.

Alguns cuidados devem ser tomados quando se utiliza a otimização para auxiliar no projeto. É função do engenheiro entender se o processo descreve o problema de forma realista (respeitando as restrições existentes), e ainda, verificar se o conceito utilizado na otimização representa de fato o que o armador entende como melhor projeto. Os algoritmos de otimização não definem qual o melhor conceito, apenas analisam o desempenho de uma solução em determinada situação (PARKINSON; BALLING; HEDENGREN, 2013).

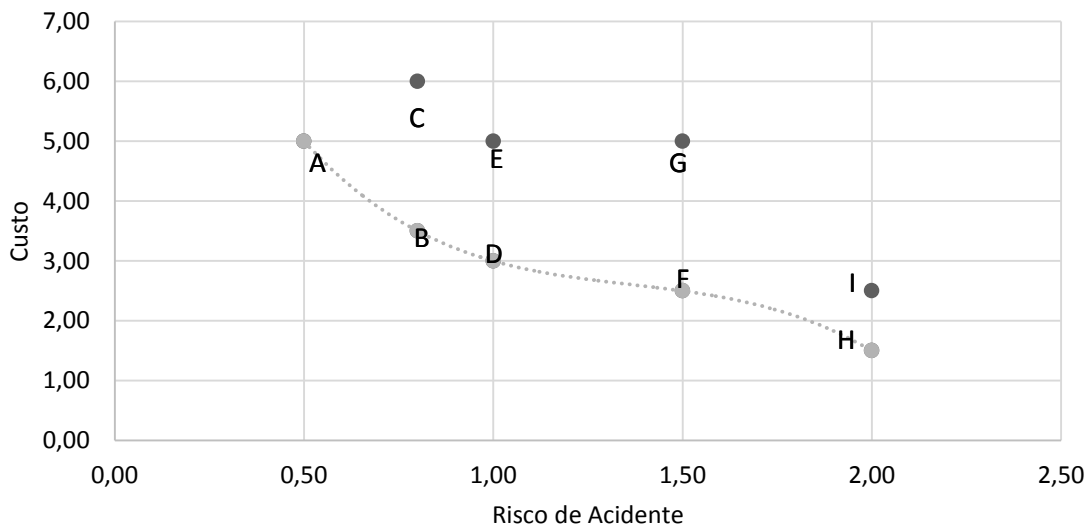
Escolher a melhor solução é um processo complexo, especialmente quando vários resultados são considerados ótimos, e nenhum é melhor do que o outro (TANCREDI, 2008). Para tal, deve-se introduzir o conceito da Fronteira de Pareto.

A análise da Fronteira de Pareto aborda o conceito de dominância, e de acordo com Parkinson, Balling; Hedengren (2013), uma solução domina a outra quando for melhor ou igual em todos os objetivos. As soluções dominantes são chamadas de *Soluções Ótimas de Pareto*.

A Figura 10 representa um diagrama de Pareto para análise de custo e risco de acidente. A solução B domina C, pois possui o mesmo valor de risco de acidente com um custo menor. O mesmo raciocínio pode ser empregado em D e E, F e G e H

e I. Dessa forma, A, B, D, F e H são ditos dominantes. Quando os pontos não dominados estão situados em um mesmo espaço contínuo, a Fronteira de Pareto é construída traçando-se uma curva entre esses pontos, como apresentado na Figura 10. Em problemas multiobjetivo, buscam-se as soluções mais próximas da Fronteira de Pareto, assegurando assim que todos os objetivos foram considerados (TANCREDI, 2008).

Figura 10 - Exemplo de Fronteira de Pareto.



Fonte: Autora (2018).

## 2.4 O ALGORITMO GENÉTICO

Entre as técnicas mais utilizadas em problemas de otimização multiobjetivo destacam-se os Algoritmos Genéticos (AG), que utilizam conceitos de seleção natural (GOLDBERG, 1989). O funcionamento de um AG pode ser descrito pelo fluxograma apresentado na Figura 11. O processo de otimização inicia-se pela geração de uma população inicial de possíveis soluções. A seguir, por meio de operadores genéticos de cruzamento, seleção, mutação e elitismo, o conjunto de soluções evolui buscando e preservando as soluções com melhor desempenho.

Figura 11 - Diagrama de Funcionamento Algoritmo Genético.



Fonte: Tancredi (2008).

Os conceitos de evolução nos quais se baseiam os AGs são detalhados a seguir:

- a) **Seleção para reprodução**: baseia-se no princípio de reprodução Darwinista, onde o elemento com melhores características tem maior chance de sobrevivência. Tratando-se de AG, busca-se copiar as melhores soluções e eliminar as ruins, mantendo assim a população constante. Uma lista é gerada onde os melhores resultados são guardados. Posteriormente, as operações de cruzamento e mutação são

realizadas com esses elementos (TANCREDI, 2008). A seleção pode ser feita de inúmeras maneiras, como por torneio, onde as soluções competem entre si e as que apresentarem melhores resultados são guardadas na lista. Também, segundo o autor, a seleção proporcional é utilizada, onde aquela que obtiver maior valor de aptidão é escolhida e guardada na lista. Outra possibilidade é o sorteio, e para tal, os elementos são divididos em grupos com tamanhos condicionados aos valores de aptidão. Quanto maior o valor de aptidão, maior o tamanho do grupo, e portanto, maior a chance de sorteio. A última opção é a escolha por *ranking*, onde os elementos são classificados de acordo com o valor de aptidão, aqueles com maiores valores são colocados na lista;

- b) **Cruzamento:**, conhecido como *crossover*, segundo Tancredi (2008), é responsável pela geração de novas respostas, com base nos elementos da lista anteriormente gerada em seleção para reprodução. A forma mais básica é o cruzamento em um ponto, que consiste em definir aleatoriamente um elemento da lista e criar novos descendentes.
- c) **Mutação:** esse processo é responsável por produzir uma transformação aleatória em alguns dos indivíduos. É interessante, pois permite ao AG explorar regiões ainda não analisadas do conjunto de soluções (TANCREDI, 2008);
- d) **Elitismo:** a função do elitismo é garantir que os melhores indivíduos da população sejam passados para as gerações seguintes (TANCREDI, 2008).

Existem diferentes variações de algoritmos genéticos, e cujo detalhamento foge ao escopo desse trabalho. No entanto, a comunidade científica vem consolidando o algoritmo NSGA2 como um algoritmo robusto e eficiente para a resolução da maior parte dos problemas multiobjetivo, entre eles, aqueles associados ao projeto de navios (OTOZATO; TANCREDI, 2014).

O *Nondominated Sorting Genetic Algorithm* (NSGA), como o próprio nome estabelece, baseia-se na ideia de não dominância. A seleção ocorre pelo ordenamento e criação de nichos. Esse algoritmo foi criado por Srinivas em 1994 (TANCREDI, 2008).

O algoritmo genético escolhido para realizar as otimizações desta monografia foi o NSGA2 – (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm 2*), que é uma evolução do NSGA e um dos AGs mais utilizados em otimizações multiobjetivo (DERB, 2002).

O capítulo a seguir apresenta toda a metodologia utilizada na elaboração deste estudo. Determina-se o processo de funcionamento do NSGA2 e alguns parâmetros fundamentais na otimização. O modelo de síntese é descrito, e os processos de cálculo nas análises de segurança e retorno financeiro são apresentados.

### 3 METODOLOGIA

Este capítulo trata da metodologia empregada nesta monografia, que consiste na determinação do processo, das técnicas e das ferramentas utilizadas no projeto. Nesse contexto são descritas a ferramenta de otimização, o algoritmo genético, o processo para obtenção das dimensões principais da embarcação RoRo, as equações empíricas para a determinação dos coeficientes de forma, os modelos para a determinação dos pesos e centros do navio, a estabilidade transversal, a resistência ao avanço e o processo de integração casco-hélice-motor. Por fim, são apresentados os modelos utilizados para o cálculo das funções objetivo, em especial, o retorno financeiro da embarcação e o fator de segurança do navio.

#### 3.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

A pesquisa experimental busca encontrar as relações de causa e efeito entre variáveis (MATTAR, 2000). Tal definição se aproxima dos objetivos deste trabalho, cujo intuito é verificar os efeitos dessas técnicas na eficiência do processo de projeto, e comparar entre diferentes combinações de requisitos e atributos, a fim de verificar as influências no resultado obtido.

O processo experimental é realizado por meio do programa Excel em conjunto com o programa ModeFRONTIER. Com a aplicação da técnica de otimização denominada NSGA2, o valor das variáveis de projeto descritas na planilha computacional é alterado diversas vezes até que o resultado ideal seja encontrado.

O uso do NSGA2, justifica-se pelo reconhecimento de que essa técnica é robusta e eficiente para problemas com múltiplos objetivos e eventuais ótimos locais, tais como observados em problemas de projeto de navios e de projetos de engenharia, como:

- a) *Optimal preliminary propeller design based on multi-objective optimization approach*, (XIE, 2011);
- b) *Multiobjective engineering design optimization problems: a sensitivity analysis approach*, (AUGUSTO; BENNIS; CARO, 2012);
- c) *Ship pipe routing design using NSGA2 and coevolutionary algorithm*, (NIU et al., 2016).

Já a integração entre Excel e a ferramenta de otimização se justifica pela facilidade de modelagem, visualização e análise de resultados que ambos oferecem.

É absolutamente importante destacar que, o conjunto de variáveis de decisão estabelecido para este estudo é consideravelmente diferente daquele usado na maior parte dos trabalhos, que propõe a aplicação de técnicas de otimização ao projeto de navios. Tradicionalmente, conforme Boaventura (2016) e Muller (2016), as variáveis de decisão correspondem às dimensões principais e/ou coeficientes de forma, que descrevem o casco do navio. Neste trabalho, utiliza-se uma abordagem diferente, e considera-se como variáveis de projeto apenas o número de carros e a velocidade da embarcação; além de parâmetros que descrevem o arranjo interno e as características do sistema propulsivo. Nessa abordagem, as dimensões principais passam a ser determinadas em função da quantidade de carros e a variabilidade geométrica é gerada por meio da variação dos parâmetros referentes ao arranjo interno.

O modelo de síntese desenvolvido será apresentado e detalhado ao longo desta seção, bem como os resultados observados com a aplicação da metodologia proposta.

### 3.2 A FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO

A ferramenta de otimização escolhida fornece uma plataforma de integração entre diversos programas de engenharia, tais como *Excel*, *SolidWorks* e *Ansys*. Além disso, a plataforma dessa ferramenta conta uma área de trabalho muito intuitiva, com a utilização de ícones para montar a sequência de otimização. Apresenta ainda, uma grande gama de algoritmos e ferramentas de pós processamento sofisticadas, que permitem análises estatísticas e auxiliam no processo de tomada de decisão (ESTECO, 2018).

### 3.3 O ALGORITMO GENÉTICO NSGA2

Os algoritmos genéticos foram criados para resolverem problemas de otimização multiobjetivo, inicialmente com dois ou três objetivos. Hoje em dia já existem diversas pesquisas para que a quantidade de objetivos seja ampliada (GASPAR-CUNHA; ANTUNES; COELLO, 2015). O algoritmo genético escolhido para realizar as otimizações desta monografia foi o NSGA2 – (*Nondominated Sorting Genetic Algorithm 2*).

O NSGA2 usa os mesmos conceitos do processo evolucionário, como seleção, elitismo, mutação e cruzamento, apresentados no item 2.4. O processo inicia-se com a geração da população inicial, a partir da qual ocorre o cruzamento entre indivíduos, a mutação das características, e então, a seleção da solução. Se um critério de convergência for alcançado o processo é interrompido, caso contrário, o mesmo é repetido.

Os critérios de parada mais usuais, em geral, envolvem um número máximo de gerações e/ou um número de gerações, a partir do qual, a variação do valor da função objetivo é menor do que um determinado erro pré-estabelecido. Dessa forma, o processo fica em constante evolução nas diferentes gerações, melhorando o valor da função objetivo a cada nova geração (ANDRADE, 2013).

Na abordagem considerada, a população inicial consiste de indivíduos gerados aleatoriamente representando diferentes combinações de valores das variáveis de projeto (ANDRADE, 2013). O autor explica ainda que é importante que os indivíduos iniciais sejam diferentes uns dos outros, oferecendo assim variabilidade genética, aumentando a probabilidade de que processo determine uma solução ótima para o problema.

A operação de cruzamento gera novos indivíduos mesclando as características dos originais. Não se mantém indivíduos repetidos, independentemente de terem sido gerados na população inicial ou durante o cruzamento. Apenas durante o cruzamento a população é aumentada, visto que, durante a mutação, os indivíduos já existentes têm suas características alteradas (ANDRADE, 2013).

É durante o processo de seleção que se dá a escolha dos indivíduos que passam para a próxima geração. Analisa-se a função objetivo, de modo que apenas

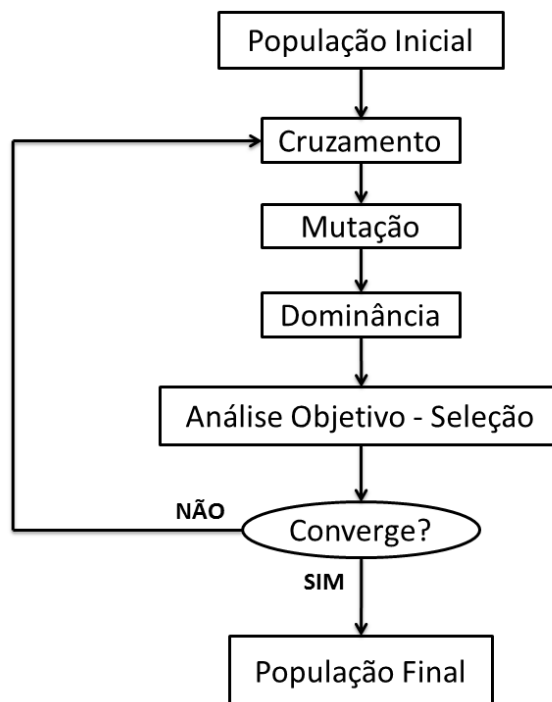


aquelas com as características mais próximas do objetivo são mantidas. Dessa forma, os indivíduos não-adequados são descartados, e as gerações futuras apresentam características mais relevantes ao objetivo desejado (ANDRADE, 2013).

No NSGA2, a população é hierarquizada de acordo com os conceitos de dominância (BROWNLEE, 2011). Os elementos localizados na frente do vetor são não-dominantes, enquanto os localizados na segunda posição são dominados pelos da primeira posição. Os elementos da terceira posição são dominados pelos da segunda, e assim sucessivamente (DERB et al., 2002). Considera-se os elementos na primeira posição os melhores, e os da última posição os piores (ANDRADE, 2013). É nesse quesito que o NSGA2 aplica o conceito de elitismo, pois segrega a população e prioriza a manutenção das melhores soluções encontradas a cada geração.

Segundo Andrade (2013), é preciso aplicar o conceito de distância de aglomeração, que busca classificar dentro de uma mesma gama de análise os indivíduos encontrados. Esse conceito de aglomeração está incluso no NSGA2, tornando-o mais eficiente que o NSGA, visto que agora, as soluções tendem a não ficar concentradas em regiões de características similares. O fluxograma apresentado na Figura 12 esquematiza o funcionamento do algoritmo NSGA2.

Figura 12 - Diagrama NSGA2.



Fonte: Autora (2018).

Apesar de ter sido inicialmente projetado para problemas multiobjetivo, o NSGA2 apresenta uma boa performance em problemas mono-objetivo. Segundo Gaspar-Cunha, Antunes e Coelle (2015), isso deve-se ao fato de o mecanismo relacionado à dominância tornar-se um operador de comparação ordinário em otimizações mono-objetivas, o que é uma operação essencial em análises com um único objetivo. Portanto, o AG NSGA2 pode ser utilizado para otimizações mono e multiobjetivas (GASPAR-CUNHA; ANTUNES; COELLO, 2015). Dessa forma, as três abordagens de otimização previstas nesta monografia foram realizadas com o AG NSGA2.

Este estudo tem como foco, a comparação entre os processos de projeto utilizando otimização com a abordagem tradicional, e não o desempenho do algoritmo genético NSGA2. Dessa forma, o tamanho da população inicial, o número de gerações, a taxa de mutação e cruzamento foram mantidos como valores padrões e observados em trabalhos similares. Para o presente estudo, portanto, a população inicial é de 20 indivíduos e as taxas utilizadas referentes à mutação e cruzamento são 1,0 e 0,9 respectivamente.

### 3.4 DEFINIÇÃO DE REQUISITOS DE PROJETO

É importante observar que o modelo de síntese guarda relação estreita com o objetivo do projeto. Assim, determinou-se que este trabalho usaria as mesmas premissas estabelecidas como demandas para o projeto baseado no processo clássico, representado pela Espiral de Evans, desenvolvido por esta Autora em trabalho realizado na disciplina Projeto de Navios 2, da Universidade Federal de Santa Catarina. Mais informações sobre o projeto baseado em metodologia clássica podem ser encontradas no Apêndice A.

Assim, busca-se realizar o projeto de uma embarcação para transportar entre 1000 e 2000 carros, entre Brasil, México, Peru e Chile. A partir da rota proposta na Figura 13, determinaram-se as restrições de projeto referentes as dimensões máximas que as embarcações podem possuir, as quais são apresentadas na Tabela 1.

Figura 13 - Rota da Embarcação.



Fonte: Google Maps (2018) adaptado pela Autora (2018).

Tabela 1 - Restrições de Dimensões.

|                    | Comprimento (m) | Boca (m) | Profundidade (m) | OBS          |
|--------------------|-----------------|----------|------------------|--------------|
| Porto de Santos    | 312             | -        | 13,7             | TEV          |
| Patagônia          | -               | -        | -                | Mar Aberto   |
| Puerto San Antonio | -               | -        | 15               | Terminal PCE |
| Puerto Callao      | 390             | -        | 16               | -            |
| Panama             | 366             | 49       | 15,2             | New PANAMAX  |
| Puerto Veracruz    | 200             | 150      | 12               | Cais 01      |

Fonte: Autora (2018).

### 3.5 DETERMINAÇÃO DOS NAVIOS SEMELHANTES

No presente estudo, a técnica da análise de embarcações foi escolhida para criar um banco de dados, com as características de embarcações similares àquela que se quer projetar. Para tal, é preciso conhecer algumas informações importantes tais como DWT (*deadweight*), dimensões principais, coeficientes de forma, velocidade de serviço, ano de construção e potência instalada. De posse dos dados coletados, buscam-se relações que evidenciem uma tendência de variação entre os parâmetros analisados e o porte da embarcação.

Para criar esse banco de dados, buscaram-se embarcações que apresentassem capacidade de carga semelhante à estabelecida anteriormente (1000 e 2000 carros). A fim de encontrar uma equação, quanto à tendência das características, utilizaram-se algumas embarcações fora da variação estabelecida. Entretanto, a quantidade de carros definidos na otimização não ultrapassa os limites definidos.

A maioria dessas embarcações (1-8) foi retirada da empresa *Grupo Suardiz*, (SUARDIAZ, 2018) que opera em diversas rotas europeias. As demais foram encontradas em sites especializados como *MarineTraffic*. Os valores referentes ao  $C_B$  foram estimados pela fórmula clássica da engenharia naval. Foram encontradas 15 embarcações para a criação do banco de dados, cujas informações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Banco de Dados Embarcações Semelhantes.

| NAVIO                 | $L_{OA}$ (m) | $L_{BP}$ (m) | B (m) | D (m) | T (m) | $V_s$ (kn) | $C_B$ | $\Delta$ (ton) | LWT (ton) | Carros | Ano  |
|-----------------------|--------------|--------------|-------|-------|-------|------------|-------|----------------|-----------|--------|------|
| 1 Galicia             | 149,4        | 139,5        | 21,0  | 17,4  | 5,9   | 15,0       | 0,65  | 11606          | 7403,0    | 1412   | 2003 |
| 2 Suar Vigo           | 149,4        | 139,5        | 21,0  | 17,7  | 5,9   | 18,5       | 0,66  | 11627          | 7227,0    | 1404   | 2003 |
| 3 Bouzas              | 141,3        | 132,0        | 21,0  | 17,2  | 6,0   | 18,5       | 0,65  | 11105          | 6410,0    | 1164   | 2002 |
| 4 Tenerife Car        | 132,8        | 118,0        | 21,2  | 17,2  | 5,5   | 16,0       | 0,65  | 9219           | 6023,0    | 1356   | 2002 |
| 5 Gran Canaria Car    | 132,5        | 118,0        | 21,0  | 15,0  | 5,2   | 15,2       | 0,62  | 8158           | 5005,0    | 1147   | 2001 |
| 6 La surprise         | 141,3        | 132,0        | 21,0  | 16,8  | 6,0   | 18,5       | 0,65  | 11105          | 6410,0    | 1164   | 2000 |
| 7 L'audace            | 141,3        | 132,0        | 21,0  | 16,9  | 6,0   | 18,5       | 0,55  | 9390           | 4695,0    | 1164   | 1999 |
| 8 Ivan                | 102,5        | 94,0         | 18,4  | 16,5  | 6,5   | 13,5       | 0,67  | 7632           | 2900,0    | 853    | 1996 |
| 9 Courageous Ace      | 198,0        | 188,0        | 32,2  | 23,4  | 8,8   | 15,3       | 0,78  | 44804          | 27847,8   | 6400   | 2003 |
| 10 RoPax              | 199,8        | 184,6        | 29,8  | 21,5  | 7,4   | 24,0       | 0,51  | 22843          | 13843,1   | 3500   | 2001 |
| 11 Baltic Ace         | 148,0        | 138,2        | 25,0  | 25,2  | 7,9   | 16,0       | 0,64  | 19066,9        | 11279,9   | 2132   | 2007 |
| 12 Ciudad Cadiz       | 126,0        | 117,7        | 20,0  | 23,5  | 5,5   | 14,1       | 0,68  | 9597,7         | 6097,7    | 853    | 2008 |
| 13 Seatruck Performer | 142,0        | 132,6        | 25,0  | 24,7  | 5,7   | 18,0       | 0,55  | 11391,6        | 5791,6    | 1921   | 2012 |
| 14 Clipper Penant     | 142,0        | 132,6        | 23,0  | 26,2  | 5,2   | 18,3       | 0,55  | 9575,7         | 4475,7    | 1591   | 2009 |

Fonte: Autora (2018).

O estabelecimento de dimensões e coeficientes de forma de um navio, utilizando a técnica dos navios semelhantes, assegura que o modelo de síntese ofereça soluções verossímeis ao problema. Tais restrições, podem ser consideradas 'restrições leves', e devem ser reexaminadas quando se constata que possuem papel ativo e limitador do processo de otimização. Nesses casos, deve-se 'relaxar' os limites da restrição e aprofundar a análise dos atributos de desempenho associados ao parâmetro relaxado.

Por exemplo, uma otimização que resulte em um navio com coeficiente L/B menor do que 1, é obviamente inviável. Os limites inferiores e superiores usualmente empregados para esse coeficiente são definidos pela análise de semelhantes e

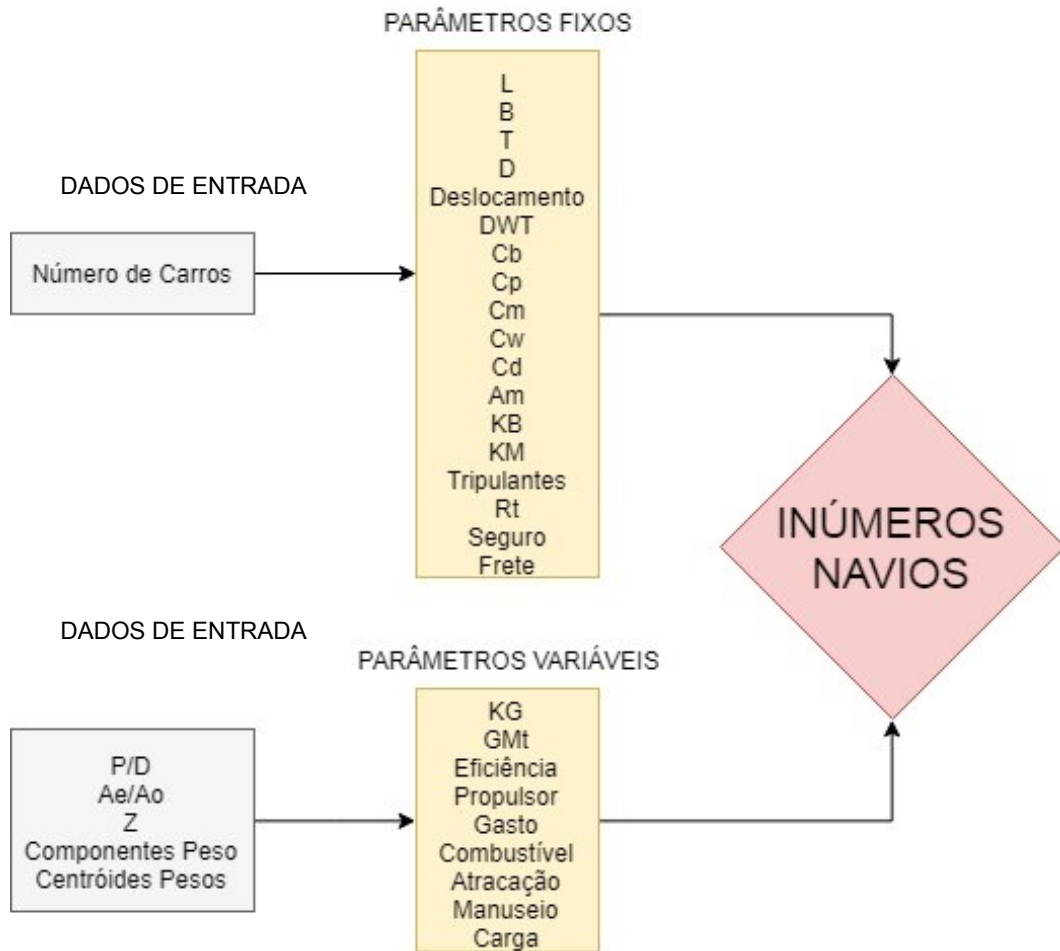
podem ser relaxadas quando limitam o processo de otimização. Em geral, nesses casos, deve-se aprofundar a análise de estabilidade transversal e manobrabilidade, que são atributos de desempenho fortemente associados ao coeficiente L/B de um navio.

### 3.6 MODELO DE SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO DE NAVIOS RORO

Conforme já mencionado, a construção do modelo de síntese é tarefa fundamental para a correta convergência da solução. Assim, visando-se obter um modelo de síntese robusto e eficiente (com baixo custo computacional) utilizou-se formulações empíricas disponíveis na literatura. A pesquisa bibliográfica apresentada no capítulo 2 indica que o projeto de navios RoRo possui uma característica fundamental: uma carga de baixa densidade. Essa característica resulta em dois aspectos de extrema relevância para o projeto: (a) a dificuldade de estabelecer um navio economicamente viável e (b) o alto risco de acidentes fatais. Diante desse cenário, considerou-se que os dois atributos mais relevantes ao projeto de um navio RoRo seriam o retorno financeiro, bem como um coeficiente que mensurasse a segurança do projeto (minimizar o fator de risco). Assim, esses parâmetros foram definidos como funções objetivo a serem otimizadas.

O presente Trabalho de Conclusão de Curso aborda uma forma diferente de tratar a otimização. Em geral, as variáveis de projeto, como as características geométricas da embarcação, são os parâmetros a serem otimizados. Aqui, os parâmetros geométricos são tratados como resultados. O diagrama apresentado na Figura 14 demonstra os dados de entrada, e os parâmetros fixos e variáveis para o projeto.

Figura 14 - Diagrama Modelo de Síntese Otimização.



Fonte: Autora (2018).

A quantidade de carros pode ser variada, mas um único valor, gera um único navio. O processo de cálculo desses parâmetros é apresentado nas subseções a seguir. Pode-se resumir, entretanto, que uma embarcação com 1500 carros gera uma única característica geométrica: um único valor de L, B, T, D,  $\Delta$ , etc. Ou seja, um único valor de carros gera diferentes parâmetros fixos.

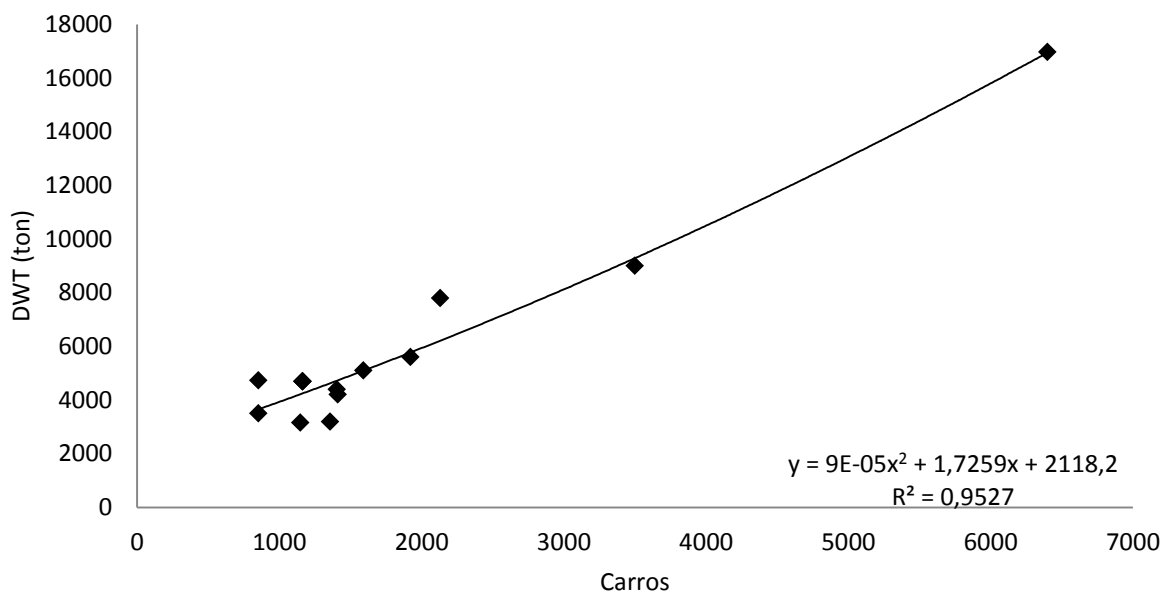
Tratando-se agora dos dados referentes às características do propulsor e os valores que caracterizam a distribuição de peso do navio, eles podem gerar infinitas combinações de KG, GM, Eficiência Propulsiva, etc. Dessa forma, um único navio tem uma única característica geométrica, e diferentes combinações de características propulsivas e distribuição de peso. Portanto, um único navio apresenta diferentes soluções de projeto.

### 3.6.1 Regressão para as características geométricas

Visando a determinação da distribuição dos principais grupos de peso a bordo do navio, o primeiro parâmetro analisado foi o DWT. Determinou-se a variação típica desse parâmetro em função da quantidade de carros. A partir dos dados de navios semelhantes, criou-se um gráfico de dispersão entre esses parâmetros, e então, foi escolhido um polinômio que melhor se ajustasse ao conjunto de pontos observados, como apresentado na Figura 15. Pode-se observar que existe uma relação quase linear entre o DWT e a quantidade de carros transportados em um navio RoRo.

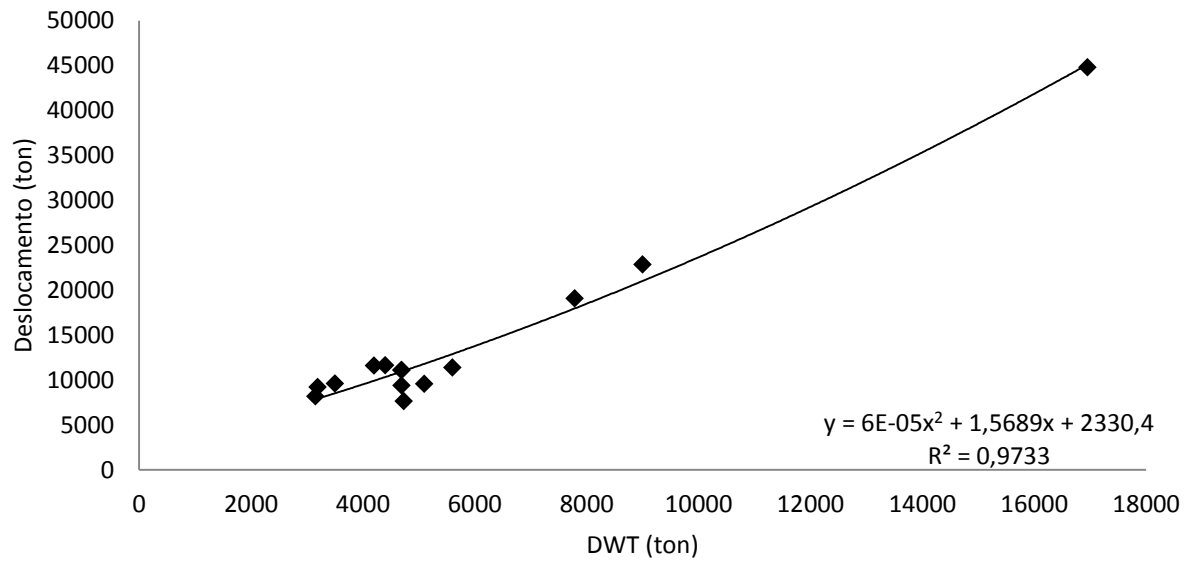
Com os valores de DWT, foi possível calcular o deslocamento,  $L_{OA}$ ,  $B$ ,  $T$ ,  $D$ . Os gráficos são apresentados nas Figuras 15, 16 e 17 a seguir. Apesar de as curvas que melhor representam o comportamento das características apresentarem grau 2, os coeficientes que acompanham esses valores são extremamente baixos, de modo que é realmente possível observar um comportamento quase linear em todas as condições analisadas.

Figura 15 - Regressão DWT (ton) x Carros.



Fonte: Autora (2018).

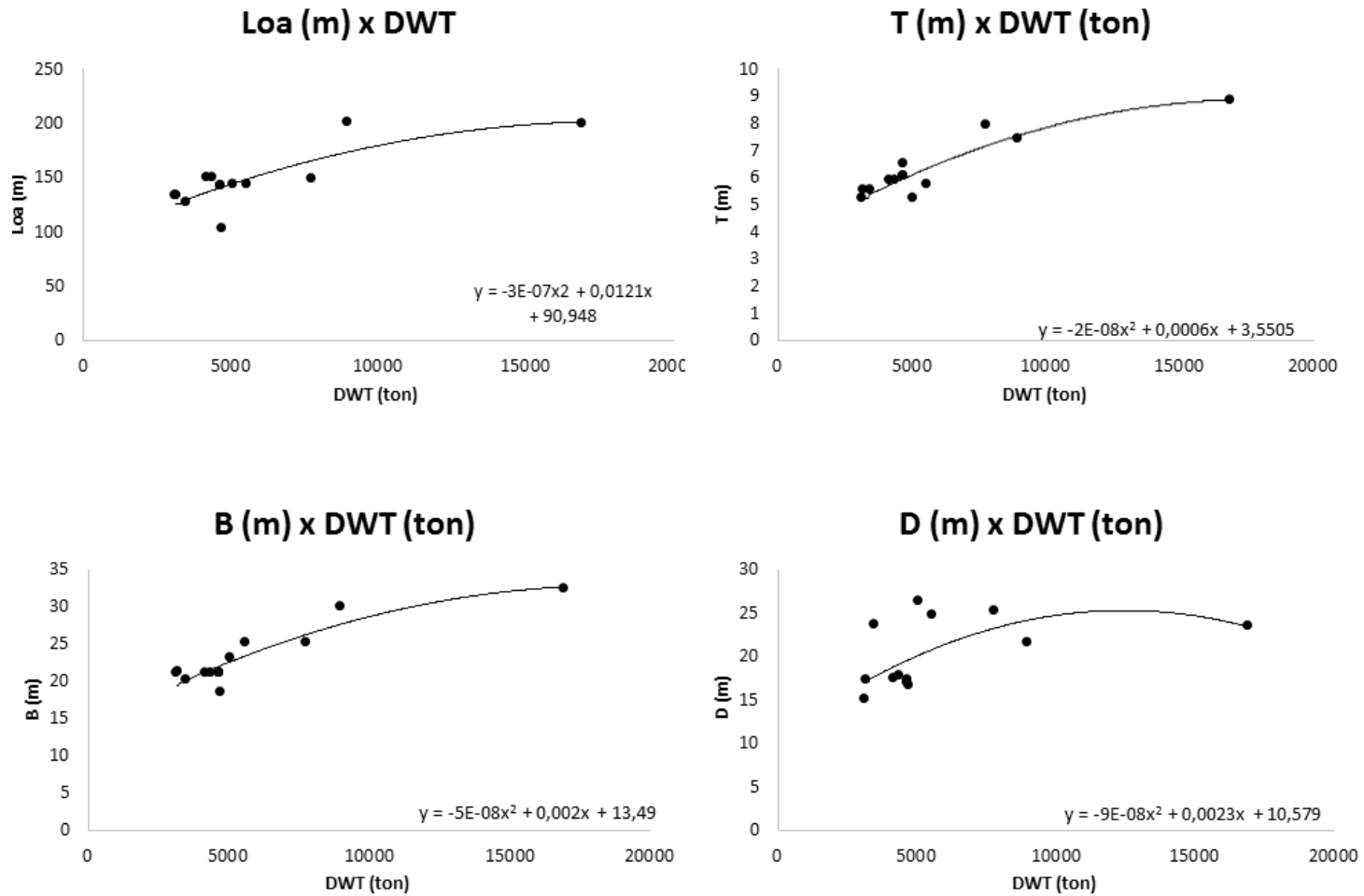
Figura 16 - Regressão Deslocamento (ton) x DWT (ton).



Fonte: Autora (2018).



Figura 17 - Regressões para as Características Geométricas.



Fonte: Autora (2018).

### 3.6.2 Fórmulas empíricas para os coeficientes de forma

Na literatura, para o cálculo das características de uma embarcação na fase conceitual de projeto, identificou-se que existem diversas fórmulas empíricas. Um extenso levantamento já foi feito por diversos autores como Barrass (2004) e Watson (1998) e publicados em seus livros. Infelizmente, não foi possível encontrar valores referentes à classe RoRo, porém, essas fórmulas são aplicadas ao projeto de navios mercantes (BARRASS, 2004). Os navios RoRo são, de qualquer forma, navios de carga, por isso entende-se que é aceitável verificar a validade dessas fórmulas a partir da análise dos resultados com os propostos para navios cargueiros.

Para o cálculo do coeficiente de bloco,  $C_B$ , utilizou-se a própria definição de  $C_B$ :

$$C_B = \frac{\nabla}{LBT} \quad (1)$$

O coeficiente de seção mestra,  $C_M$ , gera uma relação entre a área da seção mestra imersa e o retângulo composto por  $B \cdot T$ . O coeficiente da área da linha d'água,  $C_{WP}$ , por sua vez, gera uma relação entre a área de flutuação e área do retângulo  $L \cdot B$  (FUJARRA, 2006). O coeficiente prismático,  $C_P$ , é uma definição que associa  $C_B$  e  $C_M$ . As fórmulas abaixo são apresentadas por Barrass (2004).

$$C_M = 0,8 + 0,21 * C_B \quad (2)$$

$$C_P = \frac{C_B}{C_M} \quad (3)$$

$$C_{WP} = 0,95 * C_P + \sqrt[3]{0,17 * (1 - C_P)} \quad (4)$$

A fim de verificar a aplicação das mesmas, optou-se por analisar os dados de uma embarcação real e compará-los com dados típicos de embarcações de carga. Escolheram-se quatro embarcações semelhantes, com quantidade de carros similar à variação definida como requisito de projeto, verificando-se que as mesmas apresentaram valores dentro da faixa típica de embarcações de carga. Dessa forma, conclui-se que para este estudo, é possível utilizar as fórmulas anteriormente apresentadas.

Tabela 3 - Coeficientes Típicos Navios de Carga e Verificação em Embarcações Semelhantes.

|                 | $C_B$     | $C_M$     | $C_P$     | NÚMERO DE CARROS |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|------------------|
| VALORES TÍPICOS | 0,60-0,75 | 0,92-0,98 | 0,61-0,76 |                  |
| IVAN            | 0,67      | 0,94      | 0,71      | 853              |
| BOUZAS          | 0,65      | 0,94      | 0,69      | 1164             |
| SUAR VIGO       | 0,66      | 0,94      | 0,70      | 1404             |
| BALTIC ACE      | 0,64      | 0,93      | 0,68      | 2132             |

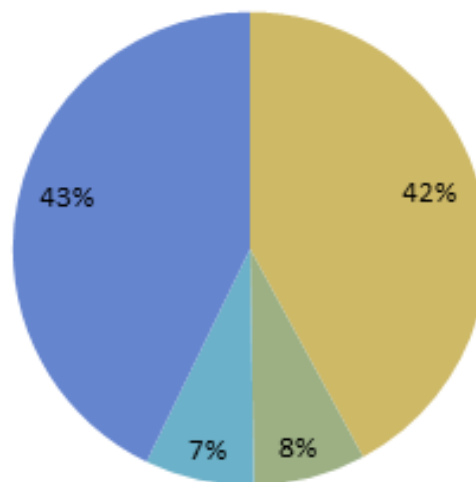
Fonte: Dewan (2015), adaptado pela Autora (2018).

### 3.6.3 Determinação de pesos e centros da embarcação

O deslocamento de uma embarcação pode ser dividido em DWT (*deadweight*) e LWT (peso leve). O DWT é composto por todo o peso variável do navio, como: carga, combustível, consumíveis, etc. Já o peso leve, é composto pelo peso de aço, peso de *outfitting* (dutos, fiação, cabeamento, enfim, equipamentos/acessórios necessários para o desempenho do navio) e peso de maquinário. A Figura 18 apresenta os componentes de peso de uma embarcação RoRo qualquer, retirada da planilha de cálculo desta monografia.

Figura 18 - Exemplo de Composição de Pesos Embarcação Qualquer.

■ Wst (ton) ■ Wot (ton) ■ Wm (ton) ■ DWT



Fonte: Autora (2018).

A estimativa dos principais grupos de pesos da embarcação foi realizada a partir das faixas típicas de porcentagens do peso leve (LWT) demonstradas na Tabela 4, conforme proposto por Papanikolaou (2009). É importante observar que, na ausência de informações específicas, optou-se por tornar a porcentagem de cada grupo uma variável do modelo de síntese, enquanto que os limites superiores e inferiores se tornaram restrições no problema de otimização. Existem ainda as restrições de aplicação dessa tabela. Ela apenas deve ser empregada para navios com mais de 80m de comprimentos e no máximo 16 000 toneladas de DWT (PAPANIKOLAOU, 2009). Essas restrições de aplicação, não são problemas tratados no modelo de síntese deste Trabalho de Conclusão de Curso, visto que nenhuma das embarcações semelhantes encontradas para os cálculos localiza-se fora desses limites.

Tabela 4 - Distribuição de Pesos de Embarcações RoRo.

|                      | DWT /<br>$\Delta$ (%) | $W_{ST}$ /<br>LWT (%) | $W_{OT}$ /<br>LWT (%) | $W_M$ /<br>LWT (%) |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| <b>Ro-Ro (carga)</b> | 50 ~ 60               | 68 ~ 78               | 12 ~ 19               | 10 ~ 20            |

Fonte: Papanikolaou (2009), adaptado pela Autora (2018).

Na Tabela 5,  $\Delta$  corresponde ao deslocamento,  $W_{ST}$  ao peso de aço,  $W_{OT}$  ao peso de *outfitting* e  $W_M$  ao peso de maquinário. Papanikolaou (2009) também sugere uma tabela para a distribuição dos centroides verticais dos componentes de peso para as mesmas restrições anteriores, como expostos na Tabela 5. Esses valores são expressos em função da porcentagem (%) do pontal das embarcações. Por exemplo, o VCG do peso de aço ( $W_{ST}$ ) pode variar de 57% a 63% do pontal da embarcação.

Tabela 5 - Distribuição dos Centroides de Embarcações RoRo.

|                      | %D p/ $W_{ST}$ | %D p/ $W_{OT}$ | %D p/ $W_M$ | %D p/ LWL |
|----------------------|----------------|----------------|-------------|-----------|
| <b>Ro-Ro (carga)</b> | 57 - 62        | 80 - 107       | 33 - 38     | 60 - 65   |

Fonte: Papanikolaou (2009), adaptado pela Autora (2018).

Ressalta-se, porém, que nada foi encontrado na literatura quanto às estimativas de peso e centroide relacionados ao DWT, visto que isso varia de acordo com cada navio e o tipo de carga transportada. Para tal, analisou-se um projeto preliminar de navio RoRo para se utilizar como estimativa inicial. O valor de 27,6%

do pontal da embarcação de projeto foi encontrado como referência para o centroide vertical do DWT, conforme dados mostrados no Apêndice A. Uma pequena variação (25% a 29%) foi estipulada a fim de analisar diferentes combinações.

A consideração de que a porcentagem correspondente a cada grupo de pesos representa uma variável de projeto, pode assustar os projetistas clássicos. Tradicionalmente, na ausência de informações específicas, costuma-se considerar um valor médio para tais variáveis, ou então, adota-se o limite superior, buscando uma abordagem conservadora de projeto. No entanto, a existência de um limite inferior representa o fato de que existem embarcações reais com tais valores, e portanto, potenciais soluções viáveis de projeto. O resultado da otimização nesse caso, indicaria potenciais esforços para a redução do peso de determinados componentes da embarcação. Tal informação poderia então ser usada na fase de detalhamento do projeto. Uma análise precipitada indicaria que a minimização das porcentagens resultaria em uma óbvia maximização do DWT e, portanto, do retorno econômico do projeto. No entanto, eventualmente, a maximização do peso de grupos posicionados próximos ao fundo do navio, pode maximizar a segurança, justificando a abordagem utilizada.

### 3.6.4 Determinação da resistência ao avanço

Uma das formas mais práticas de se estimar a resistência de uma embarcação nas fases iniciais de projeto é pelo método proposto por Holtrop e Mennen (1984). Esse é um método estatístico, gerado a partir de análise de regressão de inúmeras embarcações, para estimar a potência necessária em navios. Conforme os autores, a resistência ao avanço pode ser dividida nas seguintes parcelas:

$$R_{TOTAL} = R_F(1 + k_1) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (5)$$

Onde  $R_{TOTAL}$  refere-se à resistência ao avanço total da embarcação de carga,  $R_F$  a resistência friccional,  $R_{APP}$  a resistência de apêndices,  $R_W$  a resistência de onda,  $R_B$  a resistência do bulbo,  $R_{TR}$  a resistência do transom e  $R_A$  a resistência de correlação entre modelo e navio. O fator  $(1 + k_1)$  refere-se ao fator de forma e é

calculado a partir da relação entres coeficientes propostos pelos autores. Entretanto, é preciso destacar que existem certas limitações na aplicação do método proposto por Holtrop e Mennen (1984), como apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Limites do Método de Holtrop e Mennen.

| PARÂMETRO | LIMITE INFERIOR | LIMITE SUPERIOR |
|-----------|-----------------|-----------------|
| $C_p$     | 0,55            | 0,85            |
| L/B       | 3,9             | 14,9            |
| B/T       | 2,1             | 4,0             |
| $F_N$     | 0,05            | 1,0             |

Fonte: Brinati (2010), apud Mendes (2015).

As embarcações semelhantes próximas aos limites de 1000 e 2000 carros, também foram usadas para verificar se o método escolhido pode ser aplicado. A Tabela 7 apresenta os valores dos parâmetros limitantes, e é possível visualizar que todos encontram-se dentro da faixa determinada. Dessa forma, esse método pode ser implementado no modelo de síntese.

Tabela 7- Verificação da Aplicação do Método de Cálculo de  $R_T$ .

| NAVIO      | NÚMERO DE CARROS | $C_p$ | L/B  | B/T  | $F_N$ |
|------------|------------------|-------|------|------|-------|
| Ivan       | 853              | 0,71  | 5,57 | 2,83 | 0,22  |
| Bouzas     | 1164             | 0,69  | 6,73 | 3,50 | 0,26  |
| Suar Vigo  | 1404             | 0,70  | 7,11 | 3,56 | 0,25  |
| Baltic Ace | 2132             | 0,68  | 5,92 | 3,16 | 0,22  |

Fonte: Autora (2018).

Foge ao escopo deste trabalho o detalhamento do modelo de resistência de avanço de Holtrop e Mennen (1984), visto que já é um modelo detalhado em ampla literatura.

### 3.6.5 Integração casco-hélice-motor

Embora existam diferentes abordagens para a realização do processo de integração casco-hélice-motor, como *Modelo para otimização robusta de propulsores da série B-Troost para comboios fluviais utilizando restrições experimentais*

(TANCREDI, 2017), classicamente esse processo é iniciado com o dimensionamento do diâmetro do propulsor, pois em geral, quanto maior o diâmetro do propulsor, maior a eficiência do sistema, como pode ser visto em: *Aplicação de resultados de escala real no projeto de hélices de embarcações fluviais* (PADOVEZI, 1997).

No modelo desenvolvido, considerou-se como primeira aproximação, que o diâmetro do propulsor corresponde a 70% do calado da embarcação. No que diz respeito a determinação do desempenho de um propulsor, cuja complexidade exige análises com alto custo computacional, recorreu-se às séries sistemáticas de hélices, as quais permitem um processo eficiente de seleção do propulsor. Assim, a Série *Wageningen B* foi utilizada para a escolha do propulsor. Como ainda não há a utilização de softwares de modelagem para verificar o real desempenho dos propulsores, e a série B é a mais popularmente utilizada por projetistas, provando ser suficientemente eficiente para fases preliminares de estimativa, considera-se essa a melhor opção (GAAFARY; EL-KILANI; MOUSTAFA, 2009). Os limites geométricos ensaiados na série foram utilizados como restrições durante o processo de otimização e são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Limites *Wageningen B Series*.

|                             | Limites Série B |     |
|-----------------------------|-----------------|-----|
|                             | MIN             | MÁX |
| <b>P/D</b>                  | 0,5             | 1,4 |
| <b><math>A_E/A_0</math></b> | 0,3             | 1,1 |
| <b>Z</b>                    | 2               | 7   |

Fonte: Carlton (2012).

Com base nos resultados experimentais, é possível escrever equações interpoladoras, que permitem calcular as curvas de desempenho do propulsor em função do Coeficiente de Avanço  $J$ . As curvas  $K_T$ ,  $K_Q$  e  $\eta$  são denominadas de Coeficiente da Força Propulsiva, Coeficiente de Torque e Eficiência, respectivamente (MOLLAND; TURNOCK; A HUDSON, 2011). As equações são apresentadas a seguir e os coeficientes das mesmas podem ser encontrados no Apêndice B.

(6)

$$K_T = \sum C_{s,t,u,v}^T (J)^s \left(\frac{P}{D}\right)^t \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^u (Z)^v$$

$$K_Q = \sum C_{s,t,u,v}^Q (J)^s \left(\frac{P}{D}\right)^t \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^u (Z)^v \quad (7)$$

$$\eta_0 = \frac{J K_T}{2\pi K_Q} \quad (8)$$

O processo de integração casco-hélice é fortemente influenciado pelos coeficientes  $w$  e  $t$ , dedução de esteira e força propulsiva, respectivamente. Tais coeficientes, foram estimados a partir das equações propostas por Taylor (1943), aplicáveis às embarcações de cargas. A seguir a equação para dois propulsores, que é o caso da maior parte das embarcações RoRo.

$$w = 0,4533 * C_B - 0,114 \quad (9)$$

$$t = 0,7 * w + 0,01 \quad (10)$$

Posteriormente, calculou-se  $V_A$ , velocidade ao avanço, e a curva  $K_T$  referente ao casco.  $V_s$  é a velocidade de serviço da embarcação (MOLLAND; TURNOCK; A HUDSON, 2011).

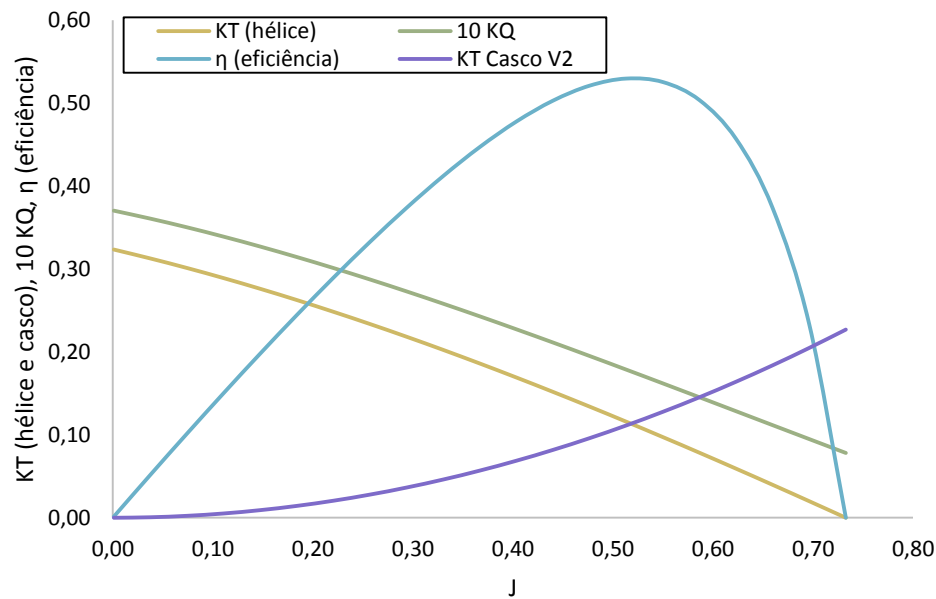
$$V_A = (1 - w) * V_s \quad (11)$$

$$K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (12)$$

$$K_T = \frac{R_i * (1 + MR)}{(1 - t) * \rho * V_s^2 * (1 - w)^2 * D^2} * J^2 \quad (13)$$

Na Figura 19 é demonstrado um exemplo onde são representadas as curvas de desempenho de um propulsor genérico e de um casco genérico.



Figura 19 -  $K_T$  (Hélice e Casco), 10 KQ, Eficiência.

Fonte: Autora (2018).

O ponto de operação do sistema corresponde ao coeficiente de avanço  $J$ , no qual ocorre a intersecção entre as curvas  $K_T$  do propulsor e  $K_T$  do casco. Nesse ponto, o empuxo fornecido pelo propulsor é o mesmo que o empuxo requerido para o navio se mover a velocidade  $V_s$ . A determinação do ponto de operação pode ser feita graficamente ou por meio da resolução da igualdade entre a equação  $K_T$  do casco e a equação  $K_T$  do propulsor (tal processo será descrito em detalhes na próxima seção deste capítulo). Analisa-se então, a eficiência em águas abertas do propulsor e a velocidade de rotação do propulsor,  $n$ .

Além da eficiência, também é necessário avaliar o índice de cavitação no propulsor, cuja determinação pode ser realizada utilizando o método gráfico proposto por Burril (1943). Essa análise requer a determinação da velocidade rotativa  $V_R$ , da área projetada  $A_P$  e da pressão no propulsor  $P_0$  (MOLLAND; TURNOCK; A HUDSON, 2011).

$$V_R = V_A^2 + (0.7 * n * \rho * D)^2 \quad (14)$$

$$A_P = A_E * (1.067 - 0.229 * \left(\frac{P}{D}\right)) \quad (15)$$

$$P_0 = P_{ATM} + \rho * g * \left(T - \frac{D}{2}\right) \quad (16)$$

A fim de automatizar o processo, utilizou-se o artigo *Optimum design of propeller using series data*, de Dunbar e Pal (1983), que apresentam um método para determinar a curva referente a um dado limite de cavitação. Os coeficientes dessa equação podem ser encontrados no Apêndice C.

$$\tau_c = c\sigma^d \quad (17)$$

Neste trabalho, considerou-se adequado um limite de 5% de cavitação, que é o valor mais utilizado em navios mercantes. Se os parâmetros definidos nas equações 18 e 19 estiverem abaixo da curva gerada pela equação 17 então o índice de cavitação ficará abaixo do limite de 5% estabelecido para o projeto.

$$\tau_c = \frac{T/A_P}{0.5 * \rho * V_R} \quad (18)$$

$$\sigma_{0.7R} = \frac{P_{ATM} - P_v + \rho * g * \rho * g * (T - \frac{D}{2})}{0.5 * \rho * V_R} \quad (19)$$

### 3.6.6 Determinação da eficiência do propulsor e consumo de combustível

Conforme discutido anteriormente, é possível expressar a equação que descreve a curva  $K_T$  do hélice por meio do polinômio interpolador descrito na equação 6 e cujos coeficientes são mostrados no Apêndice B. A fim de facilitar o entendimento do leitor, os valores referentes a  $K_T$  são também apresentados nas tabelas 9 e 10 a seguir.

Tabela 9 - Coeficientes  $K_T$ .

| COEF $K_T$ |          |      |         |           |       |
|------------|----------|------|---------|-----------|-------|
| n          | Cs,t,u,v | s(J) | t (P/D) | u (Ae/Ao) | u (Z) |
| 1          | 0,008805 | 0    | 0       | 0         | 0     |
| 2          | -0,20455 | 1    | 0       | 0         | 0     |
| 3          | 0,166351 | 0    | 1       | 0         | 0     |
| 4          | 0,158114 | 0    | 2       | 0         | 0     |
| 5          | -0,14758 | 2    | 0       | 1         | 0     |
| 6          | -0,4815  | 1    | 1       | 1         | 0     |
| 7          | 0,415437 | 0    | 2       | 1         | 0     |
| 8          | 0,014404 | 0    | 0       | 0         | 1     |
| 9          | -0,05301 | 2    | 0       | 0         | 1     |
| 10         | 0,014348 | 0    | 1       | 0         | 1     |

Fonte: Carlton (2012), adaptado pela Autora (2018).

Tabela 10 - Coeficientes  $K_T$  continuação.

|    |          |   |   |   |   |
|----|----------|---|---|---|---|
| 11 | 0,060683 | 1 | 1 | 0 | 1 |
| 12 | -0,01259 | 0 | 0 | 1 | 1 |
| 13 | 0,010969 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 14 | -0,1337  | 0 | 3 | 0 | 0 |
| 15 | 0,006384 | 0 | 6 | 0 | 0 |
| 16 | -0,00133 | 2 | 6 | 0 | 0 |
| 17 | 0,168496 | 3 | 0 | 1 | 0 |
| 18 | -0,05072 | 0 | 0 | 2 | 0 |
| 19 | 0,085456 | 2 | 0 | 2 | 0 |
| 20 | -0,05045 | 3 | 0 | 2 | 0 |
| 21 | 0,010465 | 1 | 6 | 2 | 0 |
| 22 | -0,00648 | 2 | 6 | 2 | 0 |
| 23 | -0,00842 | 0 | 3 | 0 | 1 |
| 24 | 0,016842 | 1 | 3 | 0 | 1 |
| 25 | -0,00102 | 3 | 3 | 0 | 1 |
| 26 | -0,03178 | 0 | 3 | 1 | 1 |
| 27 | 0,018604 | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 28 | -0,00411 | 0 | 2 | 2 | 1 |
| 29 | -0,00061 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 30 | -0,00498 | 1 | 0 | 0 | 2 |
| 31 | 0,002598 | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 32 | -0,00056 | 3 | 0 | 0 | 2 |
| 33 | -0,00164 | 1 | 2 | 0 | 2 |
| 34 | -0,00033 | 1 | 6 | 0 | 2 |
| 35 | 0,000117 | 2 | 6 | 0 | 2 |
| 36 | 0,000691 | 0 | 0 | 1 | 2 |
| 37 | 0,004217 | 0 | 3 | 1 | 2 |
| 38 | 5,65E-05 | 3 | 6 | 1 | 2 |
| 39 | -0,00147 | 0 | 3 | 2 | 2 |

Fonte: Carlton (2012), adaptado pela Autora (2018).

Como as características do propulsor são conhecidas, a única incógnita do problema agora é  $J$ . Tratando-se de uma somatória, é possível desmembrar essa equação, uma vez que  $\left(\frac{P}{D}\right)^t \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^u (Z)^v$  e  $\sum C_{s,t,u,v}^T$  são valores constantes. Verifica-se então que a incógnita  $J$  varia de grau 0 a grau 3, com as devidas constantes referentes aos outros elementos. Um exemplo de aplicação pode ser encontrado no Apêndice B.

$$KT_{propulsor}(J) = \alpha J^3 + \beta J^2 + \gamma J + \delta \quad (20)$$

Sabe-se ainda que  $KT_{propulsor}$  deve ser igual ao  $KT_{casco}$ , cuja formulação foi apresentada na equação 12. Porém, para facilitar o processo de cálculo, ela foi reescrita em função de J:

$$T = \frac{Rt}{1-t} \quad (21)$$

$$KT = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad (22)$$

$$J = \frac{V_a}{nD} \quad (23)$$

$$KT_{casco}(J) = \frac{TJ^2}{\rho V_a^2 D^2} \quad (24)$$

Igualando então as equações 20 e 24, obtém-se a equação:

$$KT_{propulsor}(J) = KT_{casco}(J) \quad (25)$$

$$\alpha J^3 + \beta J^2 + \gamma J + \delta = \frac{TJ^2}{\rho V_a^2 D^2} \quad (26)$$

$$\alpha J^3 + \left(\beta - \frac{T}{\rho V_a^2 D^2}\right) J^2 + \gamma J + \delta = 0 \quad (27)$$

A equação 27 foi aplicada para diferentes velocidades, baseadas em embarcações semelhantes, buscando-se o valor de J que satisfizesse a igualdade. Uma *macro* foi criada para “zerar” o resultado de forma automática, a partir da alteração de qualquer característica do propulsor, automatizando o cálculo e viabilizando o processo de otimização.

De posse dos valores de J,  $K_T$  e  $K_Q$ , determinaram-se as eficiências em águas abertas em cada velocidade analisada por meio da equação 8. Para cada velocidade, encontra-se um valor de J, que determina valores de  $K_T$ ,  $K_Q$  e  $\eta_o$ . Portanto, o modelo de otimização desenvolvido busca as características do propulsor que maximiza o retorno financeiro, restritos pelos limites da série B e pelo índice cavitação de 5%.

Para que o gasto com combustível da embarcação possa ser estimado, é necessário conhecer a distância a ser percorrida, a velocidade de operação, o tempo de viagem e o consumo do motor. A distância percorrida é calculada a partir da rota estabelecida pelo armador, a qual foi descrita no item 3.4. A Tabela 11 apresenta as distâncias entre portos em milhas náuticas.

Tabela 11 - Distância entre Portos.

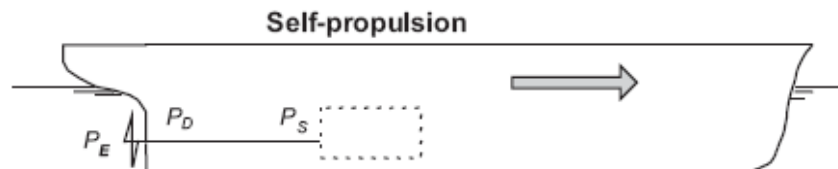
| Porto                | Distância (milhas náuticas) |
|----------------------|-----------------------------|
| Santos - San Antonio | 3515                        |
| San Antonio - Callao | 1328                        |
| Callao - Veracruz    | 2789                        |
| Veracruz - Santos    | 5442                        |
| <b>Total Milhas</b>  | <b>13074</b>                |

Fonte: Autora (2018).

Conhecendo a distância total e a velocidade de operação, estima-se o tempo de viagem e quantas vezes o armador pode realizar esse percurso por ano.

A potência necessária no motor é maior do que aquela encontrada durante os cálculos relativos à Resistência ao Avanço da embarcação, e isso ocorre, pois, o motor não consegue converter toda a potência gerada em potência efetivamente capaz de impulsionar a embarcação. Como demonstrado na Figura 20, a Potência do Motor,  $P_S$  é sempre maior do que a Potência Efetiva,  $P_E$ . A  $P_E$  refere-se à potência necessária para que a embarcação navegue em determinada velocidade (MOLLAND; TURNOCK; A HUDSON, 2011).

Figura 20 - Potências Sistema Propulsivo.



Fonte: Molland, Turnock e A. Hudson (2011).

Uma das formas de determinar a  $P_S$  é calculando um rendimento total, que relaciona as perdas de potência que ocorrem no sistema propulsivo, como apresentado na equação 28:

$$\eta_T = \eta_o \eta_{rr} \eta_H \eta_s \quad (28)$$

O cálculo de  $\eta_o$  (Eficiência em Águas Aberta) foi discutido no item 3.6.5. Já os parâmetros  $\eta_{rr}$  (Eficiência Rotativa Relativa) e  $\eta_s$  (Rendimento Perdas de Transmissão) são considerados constantes, sendo 1,005 e 0,99 respectivamente. O parâmetro  $\eta_H$ , (Eficiência do Casco) é calculado pela equação 29 (MOLLAND; TURNOCK; A. HUDSON, 2011).

$$\eta_H = \frac{1 - t}{1 - w} \quad (29)$$

Com todas as eficiências calculadas, é possível conhecer a potência requerida no motor, por meio da aplicação da equação 30:

$$P_s = \frac{P_E}{\eta_T} \quad (30)$$

Cada velocidade de serviço da embarcação necessita de um valor específico de  $P_s$ . Portanto, é necessário analisar diversos motores que entreguem essa variação de potência. Além disso, cada um desses motores apresenta um determinado consumo de combustível. Buscou-se então em catálogos da empresa *Wärtsilä*, motores que atendam uma alta variação de potência para que a maior parte das velocidades de operação possa ser analisada. Dessa forma, o consumo de combustível varia de acordo com a velocidade de operação e a potência requerida.

Tabela 12 - Potência de Diferentes Motores da Empresa Wärtsilä.

| Modelo      | Consumo Específico (g/kWh) | $P_{MIN}$ (kW) | $P_{MAX}$ (kW) |
|-------------|----------------------------|----------------|----------------|
| Wärtsilä 20 | 190,0                      | 800            | 1800           |
| Wärtsilä 26 | 188,7                      | 2040           | 5440           |
| Wärtsilä 31 | 170,6                      | 4880           | 9760           |
| Wärtsilä 46 | 170,0                      | 9761           | 19200          |

Fonte: Autora (2018).

A formulação para estimar o consumo do combustível em gramas, é apresentada na equação 31, e advém da própria definição de consumo específico de combustível. A partir do consumo em gramas é possível estabelecer o consumo em litro por meio da massa específica do Diesel, estimado em 0,852 kg/L (INVESTIDOR PETROBRÁS, 2018).

$$\text{Consumo Combustível (g)} = \frac{\text{Consumo Motor Específico } \left(\frac{g}{kWh}\right)}{P_s \text{ (kW)} * \text{Tempo Viagem(h)}} \quad (31)$$

A embarcação passa por diversos portos e em diversos países, e em cada país existe um preço para o combustível (PRICES, 2018). Portanto, foi estimado um preço médio como o preço base para o cálculo do mesmo (Tabela 12), e assim encontra-se o valor gasto por viagem em cada uma das velocidades analisadas.

Tabela 13 - Preço Médio do Combustível.

| Pais   | Média (USD/litro) |
|--------|-------------------|
| México | 0,98              |
| Peru   | 1,08              |
| Chile  | 1,33              |
| Brasil | 1,29              |
| Médio  | 1,17              |

Fonte: Autora (2018).

### 3.6.7 Preço do frete dos automóveis

Uma estimativa preliminar do ganho com cada um dos veículos transportados pelo armador deve ser determinada para que a análise de retorno anual possa ser realizada.

Em embarcações do tipo *RoRo*, o valor do transporte de automóveis é determinado pelo comprimento ocupado pelo veículo. Cada metro disponível dentro da embarcação tem um preço específico (IVSS, 2017). É preciso considerar, além do comprimento do automóvel, os espaços ociosos entre as vagas, as áreas ocupadas por equipamentos de segurança, e até mesmo espaço para circulação dos marinheiros. Como requisito de projeto, foi definido que os veículos são exportados do Brasil para os outros países, um estudo sobre as dimensões dos veículos exportadas foi realizado (ICARROS, 2018) e os dados são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 - Dimensões Carros Exportados pelo Brasil.

|                        | Comprimento (m) | Largura (m) | Altura (m) |
|------------------------|-----------------|-------------|------------|
| <b>Volkswagen Gol</b>  | 3,90            | 1,89        | 1,46       |
| <b>Renault Sandero</b> | 4,07            | 1,76        | 1,56       |
| <b>Chevrolet Onix</b>  | 3,93            | 1,71        | 1,48       |
| <b>Média</b>           | 3,96            | 1,79        | 1,50       |

Fonte: Autora (2018).

Determinou-se que a frota analisada trata de veículos populares, que apresentam na média, de 3,96m de comprimento. A fim de tornar a análise conservadora, definiu-se como 4,20m o valor ocupado por cada um dos veículos. O preço utilizado para cálculo foi o sugerido em USD 420,00 por metro, sendo esse o valor final cobrado para o cliente. (IVSS, 2017).

### 3.6.8 Análise do retorno financeiro anual

A receita do armador refere-se apenas ao recurso recebido pelo transporte de automóveis, o qual é determinado considerando-se uma taxa fixa de USD 420,00 por cada metro de comprimento disponível no navio. No entanto, muitos dos gastos que abrangem a operação de uma embarcação não são possíveis de serem obtidos para a realização de um trabalho de conclusão de curso. Muitos deles, são segredos de empresas de transporte marítimo e não estão disponíveis para consulta pública, visto que são esses valores que criam a competição do mercado.

A análise do retorno financeiro da embarcação em um ano de operação foi realizada considerando os gastos fixos e variáveis. O preço do combustível e o valor do frete podem sofrer alterações durante o ano, e esses parâmetros são muito difíceis de serem estimados/previstos. A fim de tornar a análise um pouco mais realística, buscou-se na literatura diversos autores que sugerissem formas de estimar outros gastos referentes à operação da embarcação. Este estudo não trata do preço de aquisição do navio, e também não considera a taxa de depreciação da embarcação. Para este fim, foram utilizados dois artigos com o intuito de estimar os custos associados a operação de navios RoRo.

O primeiro artigo, *An estimate for operating costs for bulk, ro-ro, and container ship* (GENTLE; PERKINS, 1982), trata da análise de custos operacionais para a Austrália em 1978. Para tornar esses dados mais similares aos dias de hoje, os valores foram corrigidos de acordo com a inflação australiana de 1978-2018: AUD 100,00 em 1978 e correspondem a AUD 509,00 hoje (OECD, 2018). Além disso, o dólar australiano foi convertido para dólares americanos: 1,00 AUD equivale a 0,754 USD (cotação em maio de 2018).

O segundo artigo, *The practical application of economics to merchant ship design* (BENFORD, 1969) analisa os parâmetros econômicos de navios mercantes nos Estados Unidos em 1969. Da mesma forma, o valor foi corrigido para os dias atuais considerando que USD 100,00 em 1969, atualmente, equivalem a USD 567,00 (OECD, 2018).

O foco do estudo em questão é o retorno financeiro que pode ser obtido no período de um ano, considerando o quanto o armador recebe com os fretes e o quanto gasta com despesas operacionais/viagem. A análise foi realizada para um



ano com 350 dias operacionais, conforme encontrado em outros projetos com análises econômicas similares.

Os principais itens que compõem as despesas são apresentados na Tabela 15 a seguir. Algumas delas são consideradas fixas no período de um ano, e outros sofrem variação conforme a quantidade de viagens feitas no mesmo período. A referida tabela descreve os gastos considerados para o estudo.

Tabela 15 - Descrição dos Gastos Operacionais da Embarcação.

| <b>Gastos Fixos</b>                       | <b>Gastos Variáveis</b>                 |
|---|---|
| Gasto Anual Salário Tripulação (USD)      | Taxas Atracação Anual (USD)             |
| Custo Anual Subsistência Tripulação (USD) | Gasto Movimentação de Carga Anual (USD) |
| Custo Anual Seguro (USD)                  | Gasto Consumo Combustível Anual (USD)   |
| Gasto Administrativo Anual (USD)          |   |

Fonte: Autora (2018).

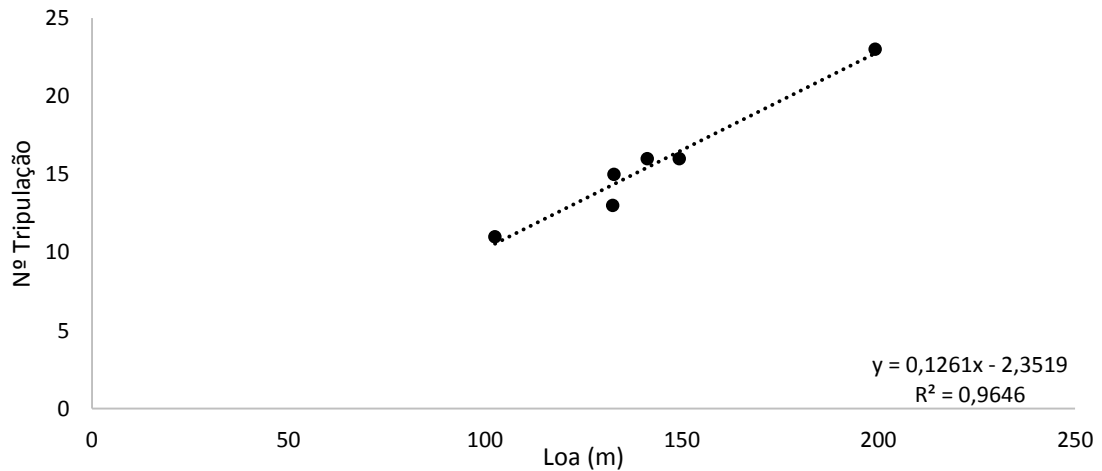
Para determinar o salário anual da tripulação, primeiro deve-se estimar a quantidade de tripulantes. Toma-se como base embarcações semelhantes já apresentadas no item 3.5, e cujos dados, podem ser vistos na Tabela 16. De forma a automatizar o processo para a otimização, criou-se um gráfico relacionando o comprimento do navio ( $L_{OA}$  (m)) pelo número de tripulantes. Verifica-se que o comportamento dessa regressão é linear, como apresentado na Figura 21.

Tabela 16 - Tripulantes Embarcações Semelhantes.

| <b>Nome</b>         | <b>Loa (m)</b> | <b>Número Tripulantes</b> |
|---------------------|----------------|---------------------------|
| <b>Ivan</b>         | 102,50         | 11                        |
| <b>Gran Canaria</b> | 132,45         | 13                        |
| <b>Tenerife Car</b> | 132,80         | 15                        |
| <b>Bouzas</b>       | 141,25         | 16                        |
| <b>Galicia</b>      | 149,38         | 16                        |
| <b>Cougar Ace</b>   | 199,20         | 23                        |

Fonte: Autora (2018).

Figura 21- Fórmula de Regressão para Estimar Tripulação.



Fonte: Autora (2018).

Na Tabela 17 são apresentados os valores médios do salário de diferentes tripulantes de navios mercantes nos Estados Unidos em 2011. Corrigindo esses valores para os dias atuais utilizando a inflação, é possível obter um salário médio geral para os tripulantes. A correção é feita considerando que USD 100,00 em 2011 equivalem a USD 112,00 hoje. Com a quantidade de pessoas na tripulação, estima-se o gasto médio anual com os salários destinados aos tripulantes.

Tabela 17 - Salário Anual médio Tripulação.

| Salário Médio Tripulação por Ano | 2011 (USD) | Atual (USD) |
|----------------------------------|------------|-------------|
| Captain, Mates                   | 73590,00   | 82715,16    |
| Ship Engineer                    | 82630,00   | 92876,12    |
| Sailors and Mariners             | 37550,00   | 42206,20    |
| Médio                            |            | 72599,16    |

Fonte: Locsin (2011) adaptado pela Autora (2018).

O custo de subsistência, que é aquele gasto com elementos fundamentais à vida humana, como alimentação, higiene, hospedagem, etc, foi estimado em USD 7,5 por dia por tripulante (TIU, 2017). Já o custo diário do seguro da embarcação, foi estimado de acordo com a regressão proposta por Gentle e Perkins (1982). O custo anual é estimado a partir da multiplicação desse valor por 350 dias (VIANA, 2007).

$$\text{Custo Seguro Diário (USD)} = 85,99 * \left(\frac{DWT}{100}\right)^{0,6942} \quad (32)$$

O custo administrativo também foi determinado usando o trabalho de Gentle e Perkins (1982), que sugerem uma estimativa diária de AUD 300,00 em 1978, valor que foi corrigido para os dias atuais da mesma forma que as outras correções.

Os custos variáveis, ou seja, aqueles que variam com a quantidade de viagens a serem feitas no período operacional, foram divididos em taxas de atracação, consumo de combustível e movimentação de carga (*Cargo Handling*). O consumo de combustível já foi discutido no item 3.6.6.

As taxas de atracação foram estimadas conforme proposto por Benford (1969) (equação 33), e corrigidas para os dias atuais por meio da inflação no período. Lembrando que o trajeto trata de quatro portos: Santos, San Antonio, Callao, Veracruz, portanto o valor referente às taxas de atracação<sup>1</sup> devem ser multiplicadas por quatro.

$$\text{Taxas de Atracação} = \$233 + \$680 * \frac{CN}{1000} \quad (33)$$

Por fim, buscaram-se as taxas para manuseio de carga (*Cargo Handling*) nos portos definidos anteriormente. No entanto, só foi possível encontrar os valores referentes ao TEV (Terminal de Exportação de Veículos) do porto de Santos. Considera-se nessa análise que os carros serão exportados pelo Brasil, de forma que as taxas tratadas são as taxas de exportação. O porto de Santos, cobra uma taxa de exportação por veículo e mais uma taxa de movimentação extra. Os valores foram multiplicados pela quantidade veículos a serem transportadas e esse valor foi convertido para USD.

Tabela 18 - Taxas de Movimentação de Carga.

|  |            |               |
|--|------------|---------------|
| <b>Taxa Exportação por veículo (R\$)</b> | <b>R\$</b> | <b>988,89</b> |
| <b>Taxa Movimentação extra (R\$)</b>     | R\$        | 98,89         |
| <b>Cargo Handling por carro R\$</b>      | R\$        | 1.087,78      |
| <b>Cargo Handling por carro USD</b>      | \$         | 301,75        |

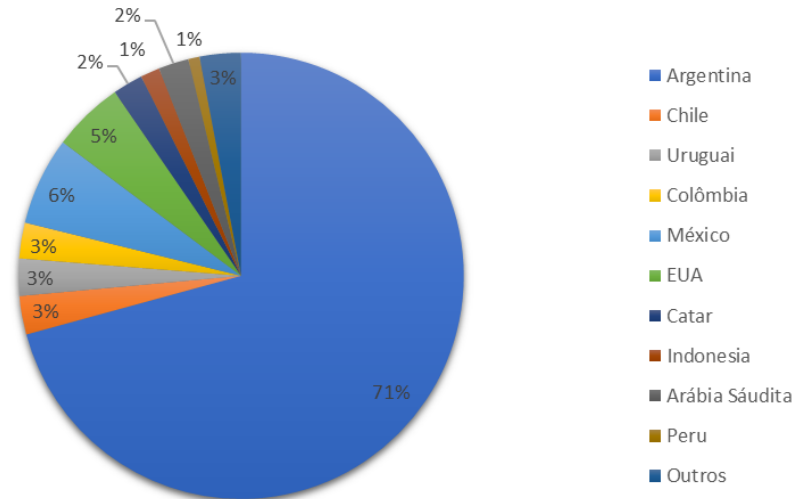
Fonte: Autora (2018).

A Figura 22 apresenta a porcentagem de automóveis exportados pelo Brasil para diferentes países. Realizou-se análise de quantos carros o Brasil exporta para os países e definidos no item 3.4. Verificou-se separadamente a quantidade em dólares exportada para Chile, Peru e México. A soma total corresponde a 100% da carga a ser exportada, e a contribuição de cada país resultou na determinação do

<sup>1</sup> O CN refere-se ao número cúbico:  $\frac{LBT}{100}$

percentual de carga será exportado para cada local, como apresentado na Tabela 19.

Figura 22 - Exportação de Veículos pelo Brasil.



Fonte: OEC (2018), adaptado pela Autora.

Tabela 19 - Exportação de Automóveis Países em Análise.

|               | USD   | %      |
|---------------|-------|--------|
| <b>México</b> | 301   | 63,40% |
| <b>Chile</b>  | 133   | 28,01% |
| <b>Peru</b>   | 40,8  | 8,59%  |
| <b>TOTAL</b>  | 474,8 |        |

Fonte: Autora (2018).

A taxa de movimentação de carga deve ser calculada para cada um dos quatro portos definidos, e a devida contribuição da taxa de exportação deve ser considerada. Como não foi possível estimar os valores de taxa de movimentação de carga para todos os portos, utilizou-se o valor praticado no porto de Santos como sendo aquele também praticado nos demais destinos.

Portanto, a taxa final de movimentação de carga para cada viagem deve ser considerada quatro vezes, apresentado abaixo. Ressalta-se aqui que essa é uma taxa variável. A fim de facilitar o entendimento do leitor, apresenta-se a Tabela 20 que se refere ao cálculo anterior para uma única viagem considerando 2000 carros. Como a quantidade de veículos é variável do problema, essa taxa é alterada a cada solução analisada.

Tabela 20 - Taxas de Movimentação de Carga por Porto para 2000 Veículos.

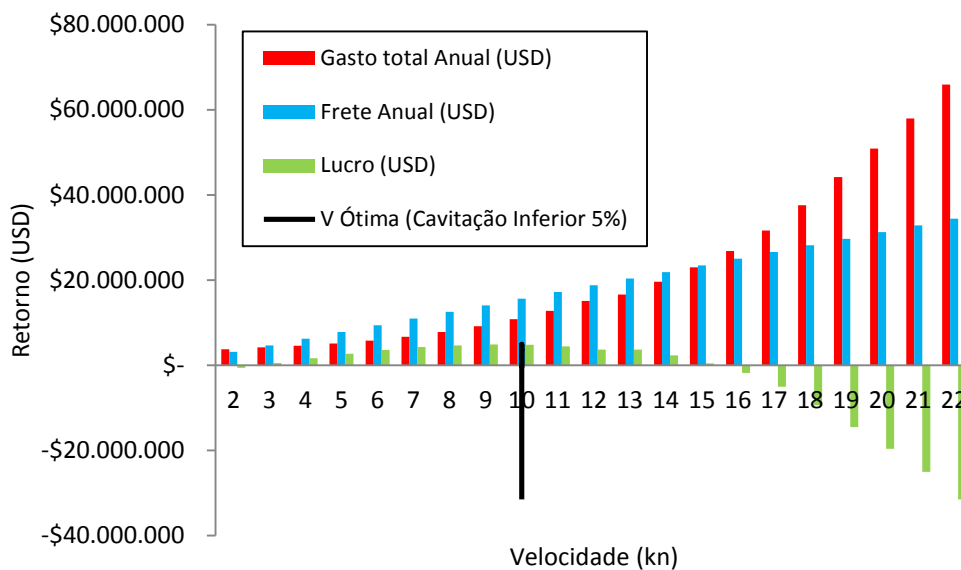
|   |                        |                        |
|---|------------------------|------------------------|
| Santos  | \$ 603,500.00          | (100% * Cargo Hand)    |
| México  | \$ 382,619.00          | (63,40 % * Cargo Hand) |
| Chile   | \$ 169,040.35          | (28,01% * Cargo Hand)  |
| Peru  | \$ 51,840.65           | (08,59% * Cargo Hand)  |
| <b>Taxa Carga Exportadas por viagem (USD)</b> | <b>\$ 1,207,000.00</b> |                        |

Fonte: Autora (2018).

A análise do retorno financeiro anual, é caracterizada pelo estudo dos gastos anuais (fixos e variáveis) e a receita monetária referente aos fretes. A embarcação tem um retorno positivo quando a entrada é maior do que os gastos, o que torna a operação lucrativa. A Figura 23 apresenta as entradas, gastos e o lucro de uma embarcação genérica analisada no modelo de síntese em estudo. Em vermelho apresentam-se os gastos, em azul o frete anual, e em verde o lucro. O modelo retorna ainda o valor da velocidade ótima, onde encontra-se o maior lucro sem que ocorra cavitação no propulsor, que para o exemplo em questão é de 10kn.

Verifica-se que, apesar de o valor da receita referente ao frete aumentar com o aumento da velocidade, o lucro volta a cair significativamente na parte final do gráfico. Isso leva a concluir que aumentar a velocidade não acarreta num lucro maior, visto que o consumo de combustível cresce mais do que o aumento de receita proveniente da maior velocidade.

Figura 23 - Exemplo de uma Análise Financeira um Ano Operacional.



Fonte: Autora (2018).

### 3.6.9 Análise da segurança da embarcação

Navios são estruturas extremamente grandes, caras, com quantidades elevadas de combustível e um bom número de tripulantes. É imprescindível, garantir que a operação da embarcação seja segura para que não ocorram avarias à estrutura e/ou cargas, danos ao meio ambiente, e/ou perdas de vidas humanas. Apesar de embarcações do tipo RoRo terem crescido em popularidade, por poderem ser adaptadas para o transporte de carga e passageiros, ainda há muita preocupação quanto à segurança desse tipo de navio (CHOPRA, 2016).

A distribuição da carga em navios RoRo é um fator crucial para o comportamento da embarcação. Se a carga não for devidamente posicionada e presa, qualquer movimentação, por menor que seja, pode deslocar a carga e gerar ângulo de banda na embarcação, conforme apresentado na Figura 24. Uma vez que a rampa de acesso dos veículos fica logo acima da linha d'água, a inclinação do navio pode permitir que a água invada o casco (CHOPRA, 2016).

Figura 24 - Embarcação PCTC Adernada.



Fonte: Captain (2016).

Esse fator, porém, não é plausível de automatização nas fases preliminares de projeto. Em cada viagem acontecem processos de carga e descarga, de forma que os veículos precisam ser redistribuídos a bordo, criando então uma configuração variável. Existem programas que auxiliam no posicionamento das cargas, porém são utilizados durante a operação da embarcação, ou seja, depois que o projeto já está concluído.

Como simplificação de projeto nas fases preliminares, costumam-se utilizar navios semelhantes para analisar as características referentes ao posicionamento das cargas e, assim, determinar parâmetros como centros de gravidade das massas. Sendo um dos objetivos desta monografia comparar o projeto otimizado com um projeto não otimizado para os mesmos requisitos, optou-se por analisar o centro de gravidade de carga da embarcação do projeto não-otimizado (Apêndice A).

Outra característica dessa classe de embarcações é a necessidade de um pontal alto e a falta de anteparas no casco. Os conveses precisam estar livres para que possam acomodar uma maior quantidade de carros. Se houver uma inundação ou incêndio, há grandes chances de a embarcação ficar inoperável e afundar, visto que não há subdivisão para conter tais ocorrências (CHOPRA, 2016).

Existem três condições de equilíbrio para uma embarcação: estável, instável e indiferente. Na condição estável, após a aplicação de uma força que gere momento, o navio retorna à posição inicial. Na condição instável, a força gera o emborcamento da embarcação. Já na condição indiferente, o navio permanece na posição gerada pela força (MARTINS, 2010). Se a embarcação adernar, os binários de peso e empuxo criam um momento que pode restaurar a embarcação a posição original ou então emborcá-la. Segundo o autor, para que um navio apresente condição de estabilidade positiva, o momento de restauração também deve ser positivo.

A determinação da estabilidade inicial de uma embarcação, pode ser analisada a partir do cálculo do parâmetro GM, o qual é função de KB (altura centro de carena), BM (raio metacêntrico) e KG (altura vertical do CG). Busca-se sempre uma embarcação com estabilidade positiva, ou seja, GM maior do que zero (MARTINS, 2010). No entanto, segundo a IMO (2018), o valor de GM inicial deve ser superior a 0,15m para que a embarcação seja considerada estável. Ainda segundo a IMO (2018), a condição inicial do projeto é aquela quando considera-se a embarcação na condição de carga total.

Para estimar o valor de GM, foram utilizadas diversas formulações empíricas propostas por Schneekluth (1998) e apresentadas no livro *Ship design for efficiency and economy*. Essas equações são aplicáveis a embarcações mercantes nas fases preliminares do processo de projeto de navios.

$$GM = KM - KG \quad (34)$$

$$KM = BM + KB \quad (35)$$

$$KB = T (0,9 - 0,3 * C_M - 0,1 * C_B) \quad (36)$$

$$KM = B * (13,61 - 45,4 \frac{C_B}{C_{WP}} + 52,17 \left(\frac{C_B}{C_{WP}}\right)^2 - 19,88 \left(\frac{C_B}{C_{WP}}\right)^3 \text{ para } 0,73 < \left(\frac{C_B}{C_{WP}}\right) < 0,95 \quad (37)$$

Como apresentado anteriormente, alterar GM altera o momento restaurador da embarcação, e alterar o momento restaurador, afeta diretamente o período de *roll* do navio (BARRASS, 2001). Ainda segundo o autor, o período natural do navio,  $T_{ROLL}$ , é o tempo em segundos que a embarcação leva para rolar de bombordo-boreste-bombordo, o qual pode ser calculado usando a equação:

$$T_{ROLL} = 2\pi \sqrt{\frac{k^2}{GM * g}} \text{ (s)} \quad (38)$$

$$\frac{\pi}{\sqrt{g}} \cong 1 \rightarrow T_R = 2 \sqrt{\frac{k^2}{GM}} \quad (39)$$

$$T_{ROLL} \cong \frac{1}{\sqrt{GM}} \quad (40)$$

Sendo k uma função de B ( $k=0,035*B$ ), logo, aumentar GM implica na diminuição do  $T_{ROLL}$ , e viceversa. Portanto, é preciso encontrar um valor ótimo para GM a fim de manter o período de *roll* adequado. Essa definição, é feita tendo como base embarcações semelhantes, ou seja, que já foram projetadas e estão em serviço.

Tipicamente, espera-se que um navio em operação seja considerado seguro. No entanto, não foi encontrada na literatura nenhuma recomendação para a faixa de período natural de *roll* recomendada para embarcações RoRo, contudo, encontrou-se uma recomendação para navios *RoPax*, a qual é apresentada na Tabela 21 a seguir.

Tabela 21 - Valores Típicos de  $T_R$  RoPax.

| RoPax | $T_R = 10 \text{ a } 14 \text{ s}$ |
|-------|------------------------------------|
|-------|------------------------------------|

Fonte: Papanikolaou (2009).

É importante ressaltar que a segurança da embarcação não é um parâmetro mensurável, como o retorno anual do navio. Portanto, não é possível maximizar algum valor de modo a encontrar uma embarcação mais segura, visto que a



segurança depende de diversos fatores que vão muito além de estabilidade e período de *roll*.

O objetivo de utilizar o período de *roll* como análise da segurança do navio, decorre da possibilidade de que uma eventual ressonância poderia provocar o enjôo da tripulação, e principalmente, movimentar as cargas durante as oscilações. Um período muito curto significa que o navio “rola” muito rapidamente, já um período muito longo, que a embarcação “rola” muito devagar. Nos dois casos, as cargas da embarcação ficam sujeitas a grandes esforços e podem sofrer avarias. Os equipamentos utilizados para manter as cargas nos lugares sofrem grande tensão e podem acabar rompendo-se, acarretando em uma movimentação indesejada da carga. Se todas as cargas forem subitamente deslocadas para um dos bordos do navio, o mesmo pode emborcar devido ao acúmulo de massa. A mesma análise pode ser feita para os tanques de lastro e combustível.

Dessa forma, é considerada uma embarcação segura aquela que encontre-se próxima ao centro da faixa de  $T_{ROLL}$ , apresentada na Tabela 21. Assim, o modelo de otimização busca soluções cujo período natural se localize o mais perto possível do centro da faixa recomendada, reduzindo então o fator de risco de ficar próximos dos valores limitantes.

É evidente que as frequências naturais em *heave* e *pitch*, também são extremamente importantes quando se trata da segurança da embarcação, visto que também estão sujeitas ao efeito de ressonância. Entretanto, estabelecer mais objetivos estudando essas oscilações tornaria a otimização extremamente complexa. Isso acarreta em um elevado custo computacional e torna o processo de análise de dados ainda mais complexo.

O objetivo desta monografia é comparar os resultados entre projetos pela abordagem clássica e pela otimização, e o projeto por meio do método tradicional não fez a análise desses movimentos, portanto, também não são objetos de estudo desta monografia.

Justifica-se analisar apenas a estabilidade transversal e o movimento em *roll* como fatores de segurança, pois são os maiores causadores de acidentes/problemas em embarcações RoRo, como é o caso de MV Hoegh Osaka em 2015 e MV Modern Express em 2016 (MAREX, 2016).

A massa adicional do navio é a quantidade de água acelerada junto à massa da embarcação (HARO, 2012). Ela é utilizada para estudar as vibrações do navio (BRAGA, 2013). De acordo com o apresentado no manual do programa *Maxsurf Motions*, a oscilação em *roll* desloca uma massa muito pequena. Essa afirmação é derivada de uma análise considerando um cilindro em movimento de *roll*, isto é, oscilando em torno de seu próprio eixo. O cilindro oscilando em *roll* ocupa o mesmo espaço de quando não está oscilando. Portanto, em uma primeira análise, esse parâmetro foi desconsiderado.

O capítulo a seguir descreve todos os processos de otimização realizados. Definem-se as restrições a serem empregadas na otimização e o processo de geração da população inicial, os diagramas referentes a cada abordagem de otimização, e também as equações que governam as otimizações.

## 4 PROCESSO DE OTIMIZAÇÃO

O presente capítulo descreve o processo utilizado nas otimizações propostas neste trabalho. Inicia-se com a definição das restrições aplicadas na otimização, e em seguida apresenta-se a população de indivíduos iniciais. Posteriormente, as abordagens de otimização mono-objetiva de maximizar retorno anual e maximizar segurança (minimizar fator de risco) são apresentadas, assim como os fluxogramas descrevendo os respectivos processos. Por fim, descreve-se a otimização multiobjetivo.

### 4.1 AS RESTRIÇÕES

Ao comparar diferentes projetos de navio RoRo, busca-se verificar os efeitos que processos de otimização têm no resultado final. Assim, para que se tenha uma comparação justa, os projetos otimizados devem possuir os mesmos requisitos. Para tanto, uma única planilha Excel foi criada, contendo o modelo de síntese discutido no capítulo 0.

Algumas restrições foram definidas pelo armador, como a quantidade mínima e máxima de carros a serem transportados. Outras restrições foram retiradas da bibliografia utilizada na construção do modelo de síntese desenvolvido, tais como as variações de pesos e centros para cada um dos projetos, o máximo número de Froude e o mínimo valor de GM estabelecido pela IMO (2018).

É importante ressaltar que, em se tratando de um projeto conceitual, onde não há, por exemplo, um modelo 3D referente ao casco da embarcação, o conjunto de restrições deve, nessa fase do projeto, se limitar aos aspectos associados às variáveis e atributos de projeto analisados. Nas fases mais avançadas de projeto, a distribuição de pesos e centros pode ser refeita de modo a se adequar ao formato do casco da embarcação. Por questões computacionais, parte das restrições foi

implementada diretamente no modelo de síntese desenvolvido, como o limite de cavitação.

Destaca-se que os parâmetros  $W_M$ ,  $W_O$ , e  $W_{ST}$  compõem o LWT, então, somados devem resultar no valor do peso leve (LWT) menos a margem fixa sugerida pela literatura, a qual foi fixada em 3% (WATSON, 1998). Para tal, foi incorporada ao modelo uma restrição que assegura que a soma desses parâmetros não ultrapasse 97% do valor associado ao peso leve da embarcação.

A Tabela 22 sintetiza as restrições aplicadas aos processos de otimização realizados.

Tabela 22 - Restrições Processo de Otimização.

| Parâmetro            | Limite Inferior |   | Símbolo ferramenta de otimização |   | Limite Superior |
|----------------------|-----------------|---|----------------------------------|---|-----------------|
| Quantidade de Carros | 1000            | < | Num_Carros                       | < | 2000            |
| % Wst/LWT            | 0,68            | < | pWst_LWT                         | < | 0,78            |
| % Wot/LWT            | 0,12            | < | pWo_LWT                          | < | 0,19            |
| Yc LWL               | 0,60            | < | Clwt                             | < | 0,65            |
| Yc Wst               | 0,57            | < | cWot                             | < | 0,62            |
| Yc Wm                | 0,80            | < | cWm                              | < | 1,07            |
| Yc DWT               | 0,40            | < | cDWT                             | < | 0,45            |
| Vmáx                 | 15              | < | Vmáx                             | < | 30              |
| P/D                  | 0,50            | < | P_D                              | < | 1,4             |
| Ae/Ao                | 0,30            | < | Ae_Ao                            | < | 1,1             |
| Z                    | 2               | < | Z                                | < | 7               |
| Número de Froude     | 0.5             | < | Fr                               | < | 1               |
|                      |                 |   | Cavitação                        | < | 5%              |
|                      |                 |   | GM                               | > | 0,15            |

LEGENDA:  
p-% (porcentual)  
C- Centróide

Fonte: Autora (2018).

## 4.2 A POPULAÇÃO DE INDIVÍDUOS INICIAIS

Como apresentado no item 3.3, para que o NSGA2 possa iniciar o processo da otimização, necessita-se criar uma população inicial de indivíduos. Existem diferentes maneiras de gerar os indivíduos iniciais em um processo de otimização, tais como:

- Específico: o próprio usuário define quantos e quais são as características da população inicial. Essa abordagem é aplicada somente quando se dispõe de indivíduos promissores obtidos anteriormente ao processo de otimização;
- Aleatória: que cria combinações aleatórias entre os valores viáveis das variáveis de projeto;

c) SOBOL: gera uma sequência pseudoaleatória, pois os elementos são distribuídos uniformemente ao longo do espaço, evitando a concentração de determinadas características.

Neste trabalho, optou-se pela utilização do método SOBOL, e com uma quantidade de indivíduos iniciais em 20 (BOAVENTURA, 2016). Ressalta-se aqui que, quanto maior a quantidade de indivíduos, maior a diversidade e potencialmente, maior a probabilidade de obtenção do ótimo global do problema. No entanto, quanto mais indivíduos, maior a complexidade e gasto computacional da otimização. A fim de evitar comparações estatísticas injustas, a mesma população individual foi utilizada nas três abordagens de otimização realizadas. Os indivíduos foram criados com base nas restrições apresentadas em 4.1, e são listados na Tabela 23.

Tabela 23 - População Inicial SOBOL.

| Category | Num_Carros | Vmáx  | Z | P_D | Ae_Ao | cDWT | cLWT | cWm  | cWot | cWst | pWot_LWT | pWst_LWT |
|----------|------------|-------|---|-----|-------|------|------|------|------|------|----------|----------|
| SOBOL    | 1000       | 15,00 | 2 | 0,5 | 0,30  | 0,40 | 0,60 | 0,33 | 0,80 | 0,57 | 0,12     | 0,68     |
| SOBOL    | 1750       | 22,50 | 3 | 1,2 | 0,50  | 0,41 | 0,64 | 0,34 | 0,87 | 0,58 | 0,14     | 0,71     |
| SOBOL    | 1250       | 17,50 | 6 | 0,7 | 0,90  | 0,44 | 0,61 | 0,37 | 1,00 | 0,61 | 0,17     | 0,76     |
| SOBOL    | 1875       | 18,75 | 7 | 0,6 | 1,00  | 0,43 | 0,64 | 0,35 | 0,90 | 0,58 | 0,15     | 0,77     |
| SOBOL    | 1375       | 23,75 | 4 | 1,1 | 0,60  | 0,41 | 0,62 | 0,37 | 1,04 | 0,60 | 0,18     | 0,72     |
| SOBOL    | 1625       | 16,25 | 2 | 0,8 | 0,40  | 0,42 | 0,63 | 0,36 | 0,97 | 0,61 | 0,16     | 0,69     |
| SOBOL    | 1125       | 21,25 | 5 | 1,3 | 0,80  | 0,44 | 0,61 | 0,34 | 0,83 | 0,59 | 0,13     | 0,74     |
| SOBOL    | 1813       | 24,38 | 2 | 0,9 | 0,85  | 0,44 | 0,65 | 0,35 | 0,92 | 0,61 | 0,13     | 0,74     |
| SOBOL    | 1312       | 19,38 | 5 | 1,4 | 0,45  | 0,42 | 0,62 | 0,38 | 1,05 | 0,59 | 0,17     | 0,69     |
| SOBOL    | 1563       | 21,88 | 6 | 0,6 | 0,65  | 0,40 | 0,63 | 0,36 | 0,99 | 0,57 | 0,19     | 0,71     |
| SOBOL    | 1062       | 16,88 | 3 | 1,1 | 1,05  | 0,43 | 0,61 | 0,34 | 0,85 | 0,60 | 0,15     | 0,76     |
| SOBOL    | 1688       | 15,63 | 4 | 1,3 | 0,95  | 0,45 | 0,63 | 0,36 | 0,95 | 0,59 | 0,18     | 0,77     |
| SOBOL    | 1187       | 20,63 | 7 | 0,8 | 0,55  | 0,42 | 0,60 | 0,33 | 0,82 | 0,62 | 0,14     | 0,72     |
| SOBOL    | 1938       | 18,13 | 6 | 1,0 | 0,35  | 0,41 | 0,64 | 0,35 | 0,88 | 0,60 | 0,12     | 0,70     |
| SOBOL    | 1437       | 23,13 | 3 | 0,5 | 0,75  | 0,43 | 0,62 | 0,37 | 1,02 | 0,58 | 0,16     | 0,75     |
| SOBOL    | 1969       | 16,56 | 6 | 1,4 | 0,78  | 0,42 | 0,60 | 0,35 | 1,06 | 0,60 | 0,16     | 0,77     |
| SOBOL    | 1469       | 21,56 | 3 | 0,9 | 0,38  | 0,45 | 0,63 | 0,37 | 0,93 | 0,58 | 0,13     | 0,72     |
| SOBOL    | 1719       | 19,06 | 2 | 1,2 | 0,58  | 0,44 | 0,61 | 0,36 | 0,86 | 0,59 | 0,14     | 0,70     |
| SOBOL    | 1218       | 24,06 | 5 | 0,7 | 0,98  | 0,41 | 0,64 | 0,33 | 0,99 | 0,62 | 0,18     | 0,75     |
| SOBOL    | 1594       | 22,81 | 5 | 0,8 | 1,08  | 0,42 | 0,62 | 0,37 | 0,83 | 0,57 | 0,15     | 0,73     |

Fonte: Autora (2018).

É importante observar que as restrições de cavitação e GM são verificadas ao longo do processo de otimização. Como já mencionado, mas com o intuito de não confundir o leitor, se reitera aqui que o número de Froude ( $F_N$ ) foi verificado nos dois casos limites, o menor navio (1000 carros) e o maior navio (2000). Em ambas as situações, ele encontra-se muito distante dos limites para aplicação do método de

Holtrop e Mennen (1978), entre 0,5 e 1. Dessa forma, não há necessidade de verificar o valor de  $F_N$  em todas as otimizações, visto que os dois piores cenários já foram estudados.

### 4.3 ABORDAGENS MONO-OBJETIVO

Por otimização mono-objetiva entende-se que só há um objetivo no processo, maximizar ou minimizar alguma característica do projeto. Vale lembrar que o foco deste trabalho é analisar duas possibilidades de otimização mono-objetivo:

- a) Maximizar retorno financeiro anual;
- b) Maximizar segurança.

#### 4.3.1 Maximizar retorno financeiro anual

O processo de cálculo simplificado para o retorno financeiro do armador foi apresentado no item 3.6.8. Busca-se aqui uma embarcação que transporte a maior quantidade de automóveis, na melhor velocidade de serviço para o armador alcançar o maior retorno anual.

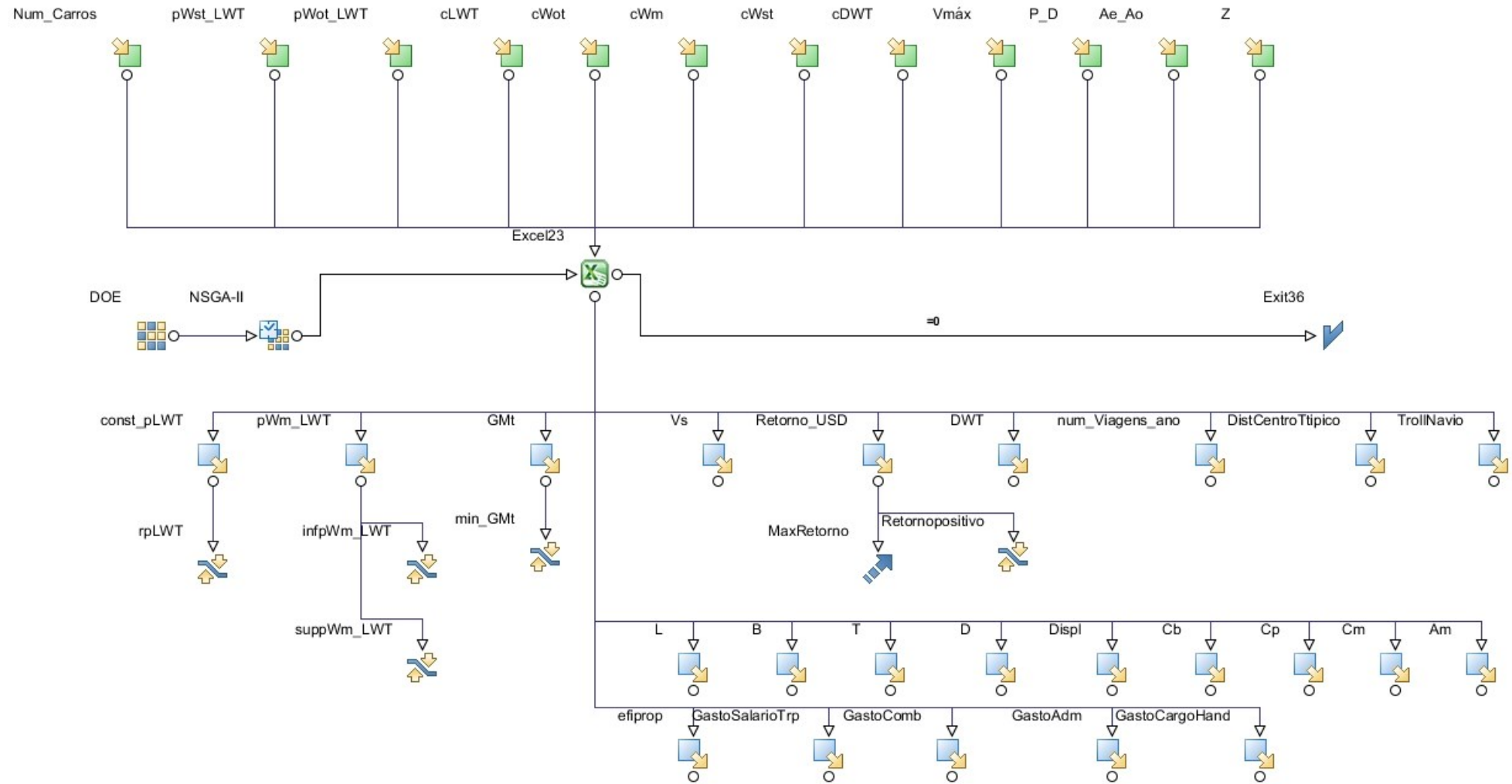
$$\text{maximizar}(\text{Retorno Anual (USD)}) = \text{maximizar}(\text{Frete Anual (USD)} - \text{Gasto Anual (USD)}) \quad (41)$$

A Figura 25 apresenta o processo de otimização mono-objetivo para maximizar retorno financeiro anual. Os indicadores em verde representam as entradas no programa, e os em azul os resultados. DOE representa a população de indivíduos iniciais e NSGA2 o algoritmo genético escolhido. O ícone referente ao programa Excel trata do modelo de síntese criado para os cálculos. Algumas restrições foram programadas diretamente na variação dos dados de entrada, e outras, foram adicionadas no diagrama como o valor mínimo de GM e restrições relacionadas ao peso leve. Utilizou-se ainda uma restrição de retorno positivo, de forma facilitar a visualização dos dados. Já o ícone representado por uma seta, refere-se ao objetivo da otimização: maximizar o retorno financeiro.

O diagrama apresentado na Figura 26 apresenta os parâmetros que influenciam no retorno financeiro da embarcação. Verifica-se que os dois maiores responsáveis pela alteração desse parâmetro são: número de carros e velocidade. O número de carros afeta diretamente o frete, o salário da tripulação, o custo de

subsistência, o valor do seguro, os gastos com atracação, manuseio de carga e combustível, ou seja, afeta todos os valores envolvidos no cálculo. Já a velocidade, afeta na atracação (número de viagens), no manuseio de carga (número de viagens) e no consumo de combustível. A forma como são calculadas cada um dos componentes da análise de retorno financeiro foi amplamente apresentada em 3.6.8.

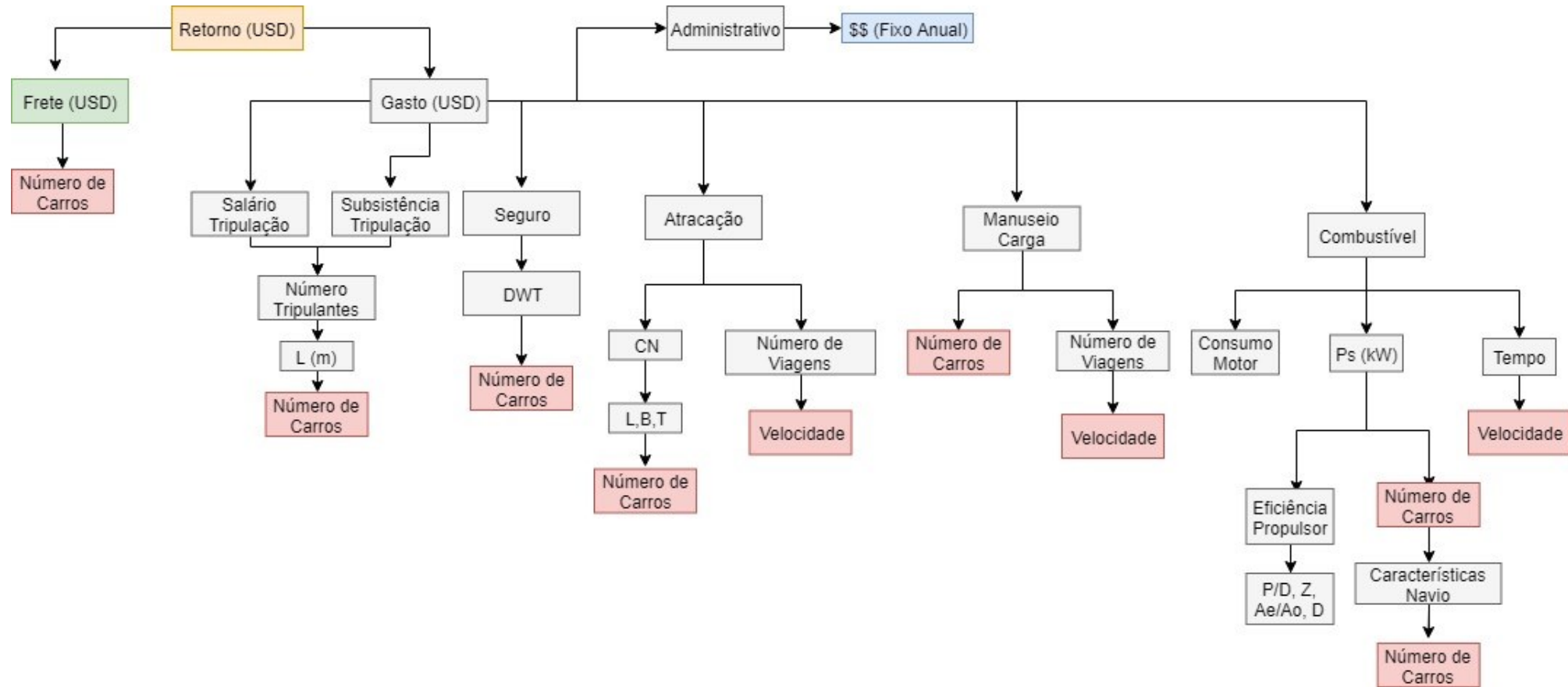
Figura 25 - Esquema Otimização Mono-objetiva Maximizar Retorno.



Fonte: Autora (2018).



Figura 26 - Parâmetros que Influenciam no Retorno Financeiro da Embarcação



Fonte: Autora (2018).

### 4.3.2 Maximizar Segurança

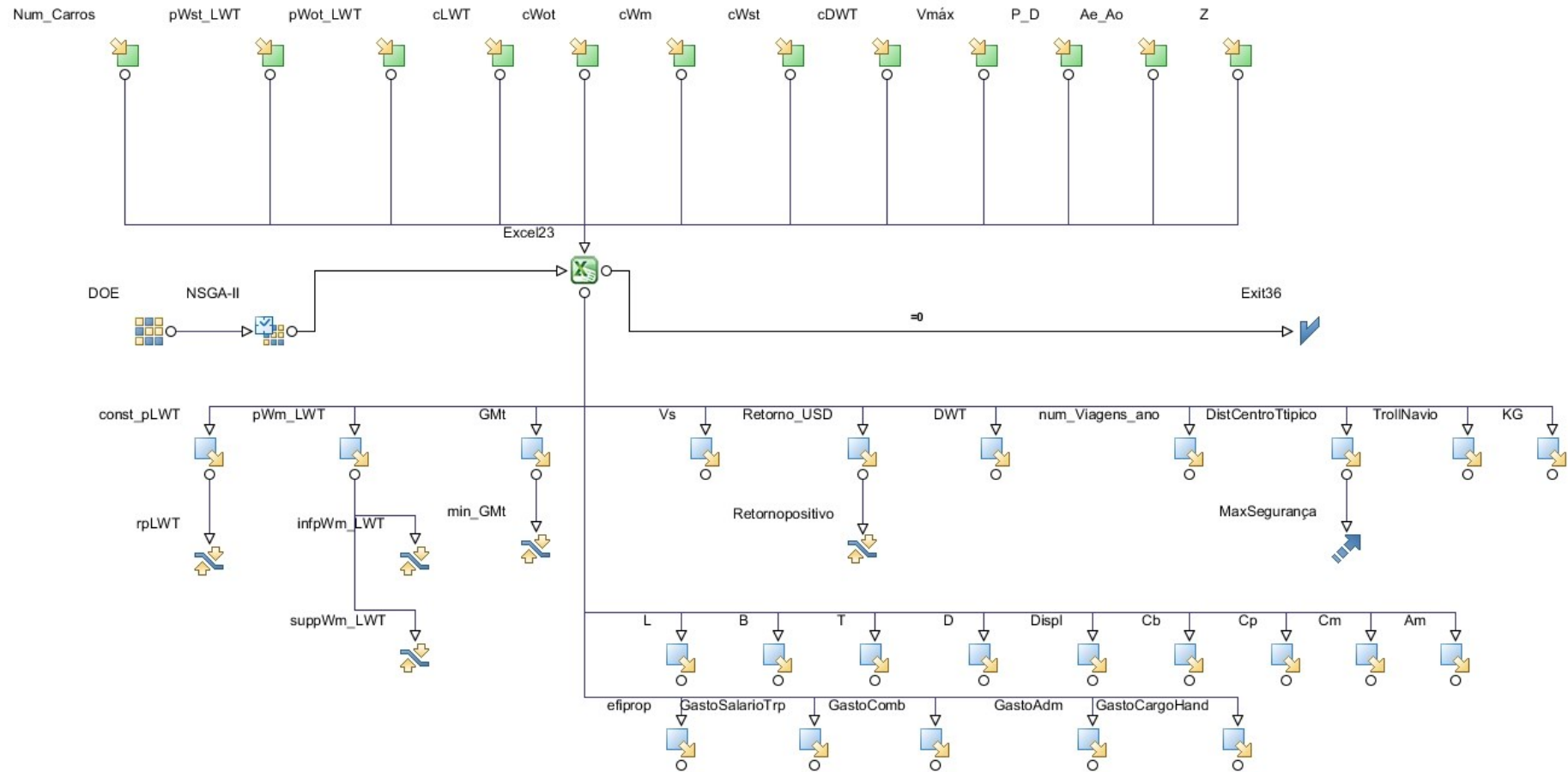
O procedimento aplicado para o cálculo da estabilidade inicial foi apresentado no item 3.6.9, e a otimização busca encontrar o projeto que apresente a menor distância entre o valor do período natural de *roll* ( $T_{ROLL}$ ) e o centro da faixa recomendada, maximizando assim a segurança. Outra forma de nomear esse processo é minimizar o fator de risco do projeto, ou seja, minimizar as chances de o  $T_{ROLL}$  ficar longe do centro da faixa recomendada.

$$\text{maximizar (Segurança)} = \text{minimizar (Fator de Risco)} = \text{maximizar } (-|T_{ROLL\text{Navio}} - T_{ROLL\text{Típico}}|) \quad (42)$$

O esquema que mostra a aplicação do problema dessa abordagem na ferramenta de otimização é apresentado na Figura 27. A mesma descrição dos elementos apresentados na seção anterior pode ser aplicada aqui. O objetivo da otimização, entretanto, agora é maximizar a segurança (minimizar o fator de risco).

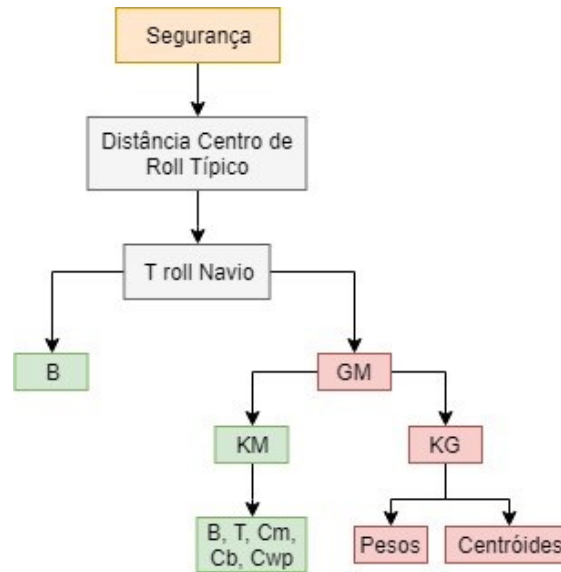
Por outro lado, no diagrama apresentado na Figura 28 apresentam-se os parâmetros que influenciam na análise de segurança. Em verde encontram-se KM e B, que são valores fixos para cada embarcação. Já em vermelho encontram os valores variáveis. KG é variável, de forma a tornar GM também variável, uma vez que variam com os parâmetros de massa.

Figura 27 - Esquema Otimização Mono-objetiva Maximizar GM.



Fonte: Autora (2018).

Figura 28 - Parâmetros que Influenciam na Segurança da Embarcação.



Fonte: Autora (2018).

#### 4.4 ABORDAGEM MULTI-OBJETIVO

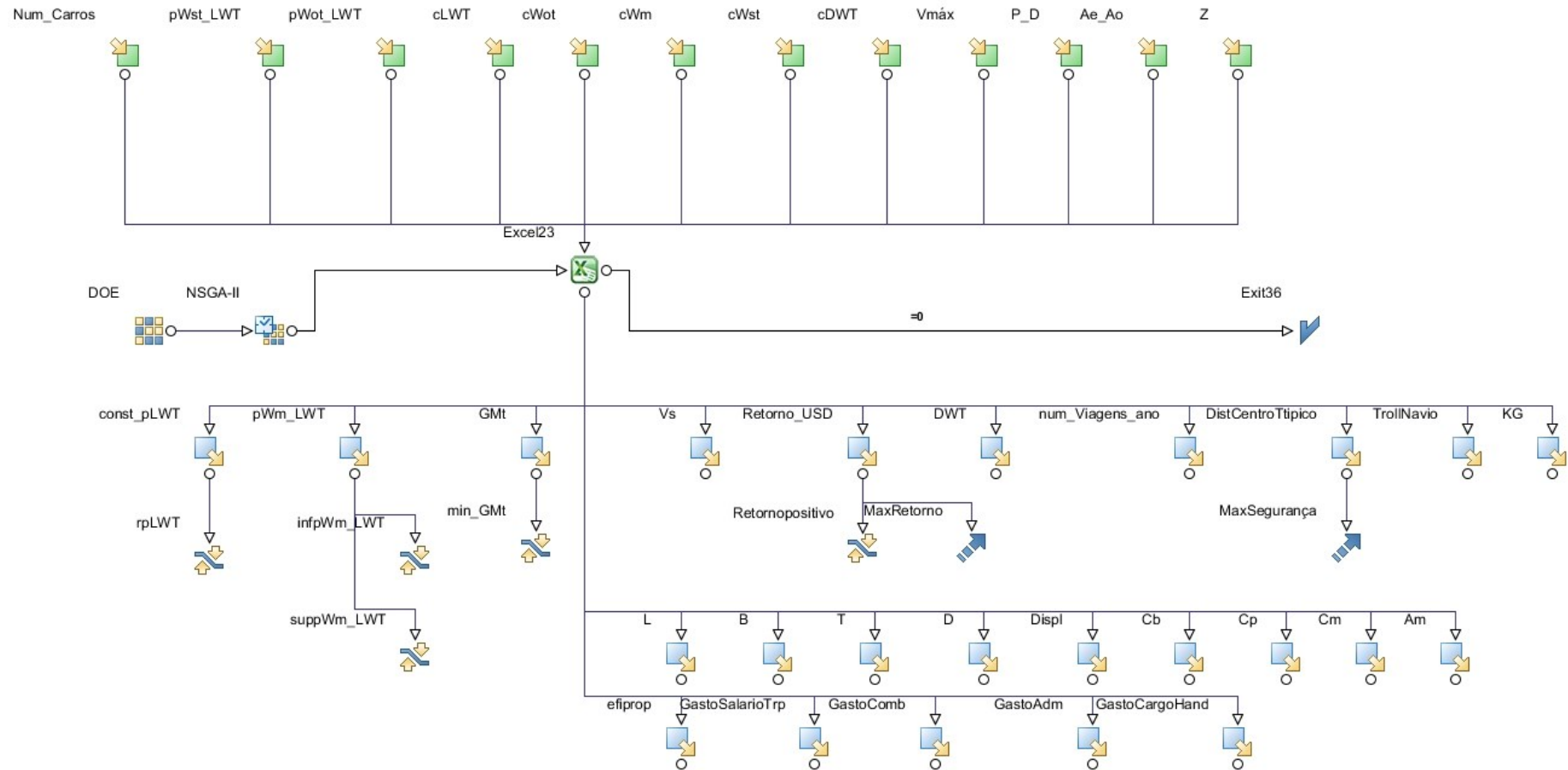
A otimização multiobjetivo, por sua vez, trata de dois objetivos considerados ao mesmo tempo. Os objetivos dessa otimização são os mesmos apresentados anteriormente.

- a) Maximizar retorno financeiro anual;
- b) Maximizar segurança.

O fluxograma referente ao esquema da otimização multiobjetiva é apresentado na Figura 29, e segue o mesmo padrão de representação já descrito anteriormente, apresentando agora dois objetivos simultâneos. Os parâmetros que afetam os resultados das otimizações são os mesmos apresentadas nos itens 4.3.1 e 4.3.2, entretanto, nesta seção, são tratados simultaneamente.

O capítulo a seguir descreve detalhadamente a análise dos resultados. Apresentam-se os projetos encontrados na abordagem mono-objetiva de maximizar retorno, e estudam-se quais os parâmetros que afetam esse objetivo. O mesmo processo é feito para a abordagem mono-objetiva de análise de segurança e para a multiobjetivo. Por fim, realiza-se um estudo entre o projeto de navios por abordagem clássica e por otimização.

Figura 29 - Esquema Otimização Multiobjetivo.



Fonte: Autora (2018).

## 5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O presente capítulo trata da apresentação dos resultados e suas respectivas análises. Inicia-se com a apresentação da otimização mono-objetiva visando maximizar o retorno, onde os parâmetros de maior relevância são estudados. O mesmo processo de análise é aplicado para a otimização mono-objetiva visando maximizar a segurança. O projeto mais seguro é identificado e as variáveis de maior influência analisadas. Em seguida, os resultados da otimização multiobjetiva são apresentados e os projetos que compõem a Fronteira de Pareto são avaliados. Por fim, realizam-se duas análises, uma referente aos efeitos das otimizações mono e multiobjetivas em projetos de navio, e outra, comparando projetos otimizados com o projeto de referência realizado com base em metodologia clássica de projeto sequencial e iterativo.

### 5.1 OTIMIZAÇÃO MONO-OBJETIVA VISANDO MAXIMIZAR RETORNO ANUAL

O processo de otimização visando maximizar apenas o retorno anual foi apresentado no item 4.3.1. Verificou-se que após 30 gerações, o resultado pouco varia, convergindo para o máximo valor de retorno anual viável.

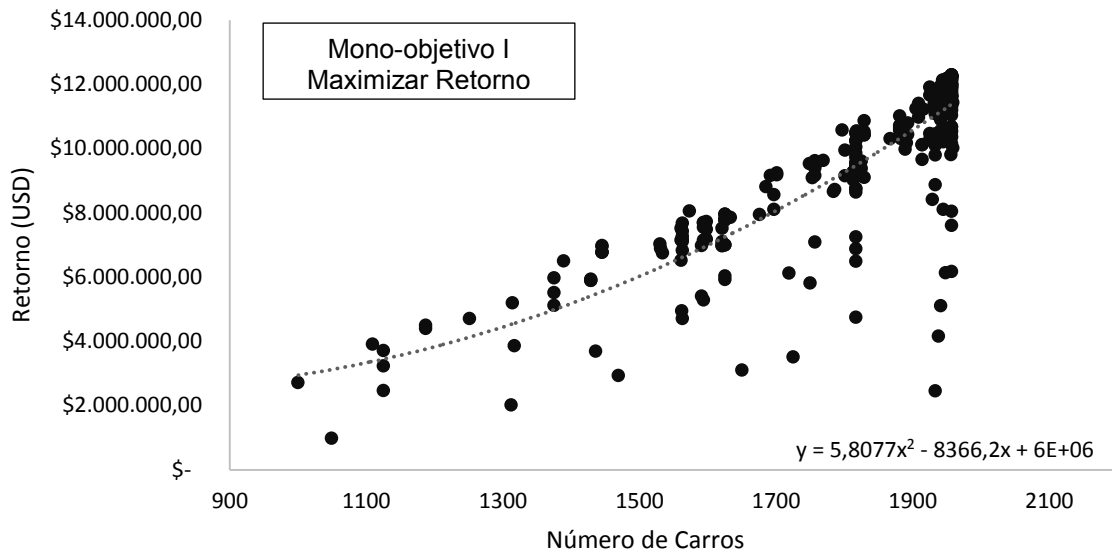
Apesar das características geométricas da embarcação não serem otimizadas, como há dados variáveis, um mesmo navio pode apresentar diferentes valores de retorno, GM e eficiência propulsiva.

A Figura 30 apresenta um gráfico com os resultados da otimização demonstrando como o retorno anual varia em função do número de carros transportados.

Pode-se observar que a tendência dos projetos é encontrar maiores retornos com maior número de carros. Os pontos abaixo dos limites superiores podem ser classificados como soluções dominadas, visto que para uma mesma quantidade

de carros apresentam- se diferentes retornos. Os navios com a mesma quantidade de automóveis e maiores retornos dominam os com retornos menores.

Figura 30 - Retorno (USD) x Número de Carros

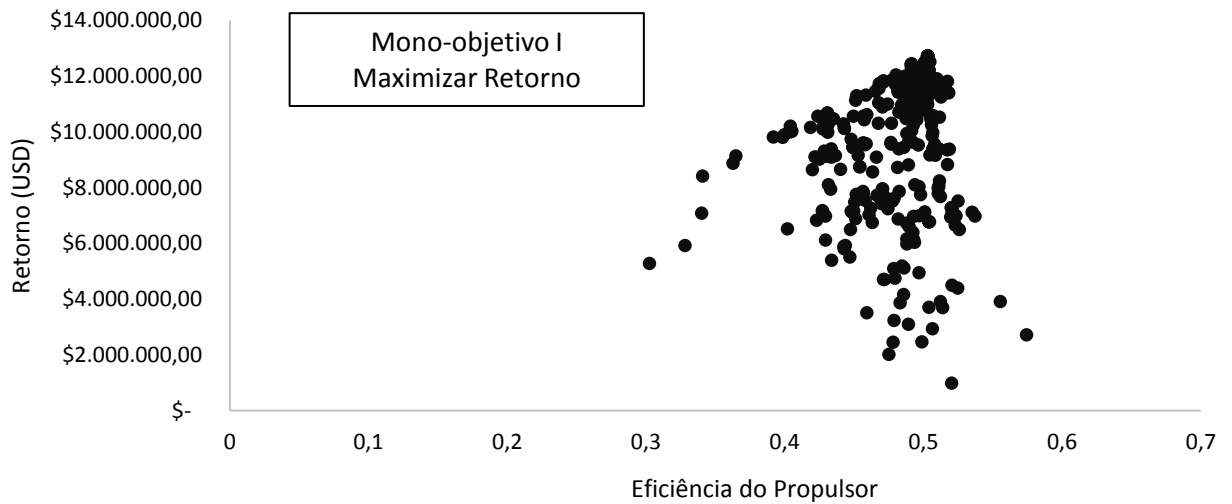


Fonte: Autora (2018).

Ressalta-se aqui que apenas os resultados viáveis são mostrados na Figura 30. Ou seja, embarcações que não atendam às restrições impostas não são analisadas. Uma das restrições, que apresenta resultados interessantes, é aquela relacionada à presença de cavitação no propulsor.

O fenômeno de cavitação consiste na formação de bolhas ao redor das pás do propulsor, gerando danos, vibrações excessivas, redução da eficiência e ruídos. Assim, o algoritmo de otimização deve encontrar uma combinação ótima das características do propulsor, de modo a retornar o maior valor de eficiência e que possua o índice de cavitação aceitável. A Figura 31 apresenta os resultados da otimização em função da eficiência do propulsor.

Figura 31 - Retorno (USD) x Eficiência Propulsor.



Fonte: Autora (2018).

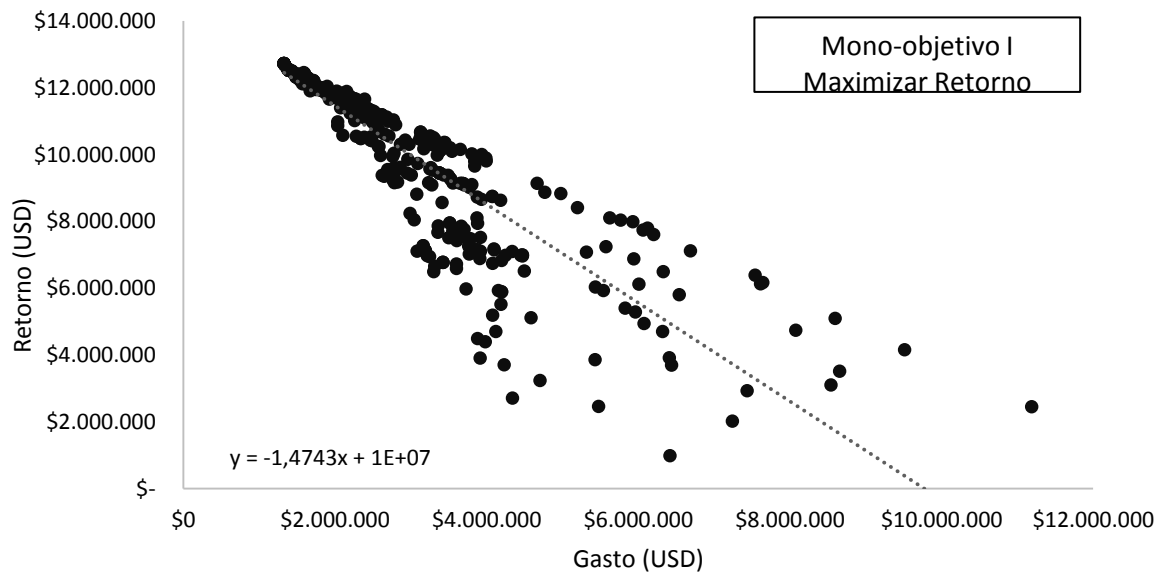
Os projetos tendem a convergir para um propulsor com eficiência de 50%. Apesar de existirem projetos com valores superiores de eficiência, eles não são os mais rentáveis. Um dos possíveis motivos é o fato desses valores de eficiência só serem alcançados no projeto de embarcações “pequenas”, referentes aos menores valores viáveis de quantidade de carros transportados. Conseqüentemente, o retorno é menor do que em uma embarcação maior.

Algumas análises não podem ser feitas considerando-se todos resultados, como por exemplo, o consumo de combustível em função da eficiência do propulsor. Isso é interessante quando se trata de um único navio, em que é possível alterar os parâmetros para encontrar o melhor propulsor. Mas verificar esses parâmetros de diversas embarcações ao mesmo tempo, apenas gera uma grande quantidade de dados que nada ajuda no projeto.

Ao se otimizar o retorno anual, entende-se que o programa busque a solução que resulta na maior receita e que tenha os menores custos. A Figura 32 apresenta o comportamento dos projetos em relação ao gasto e retorno. É possível notar, que nessa situação, os projetos possuem comportamento linear, demonstrando que quanto menor o gasto, maior o retorno financeiro.



Figura 32 - Retorno (USD) x Gasto (USD).

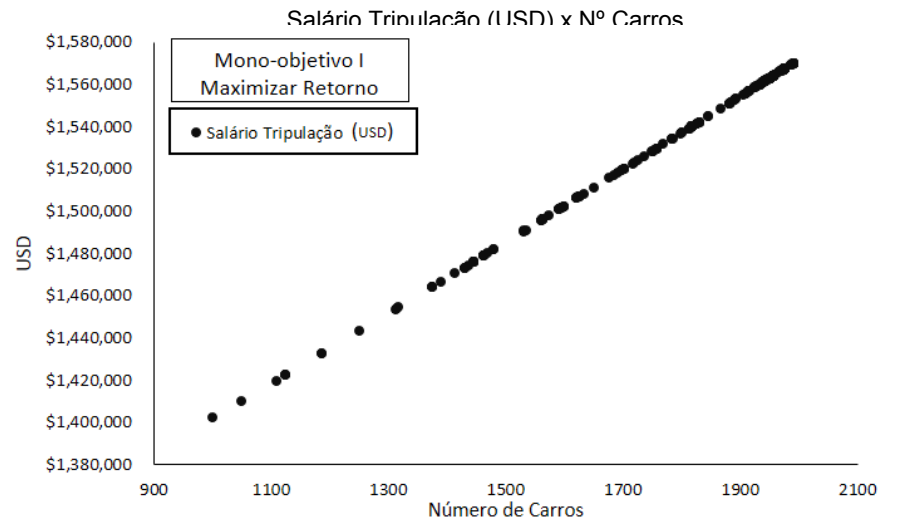
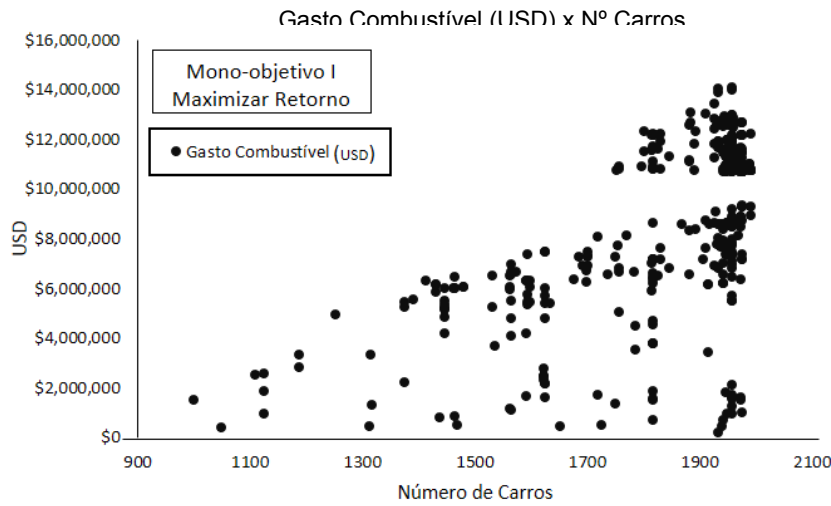
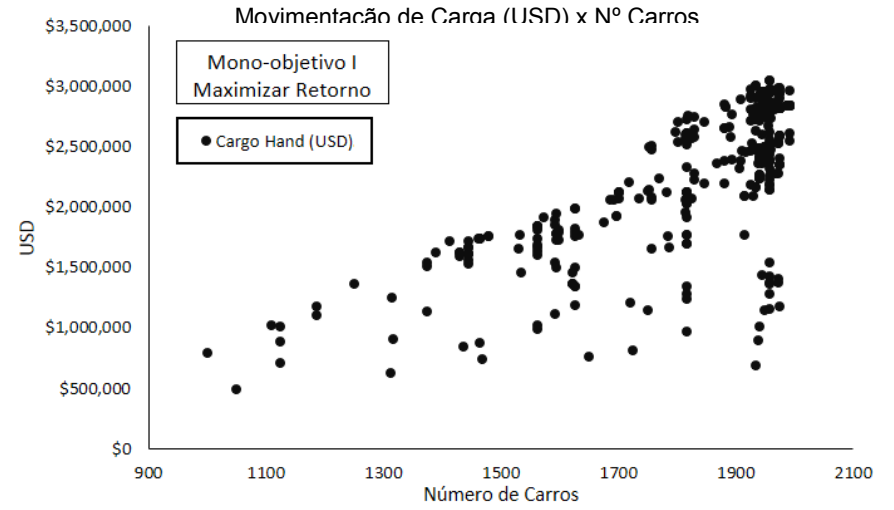
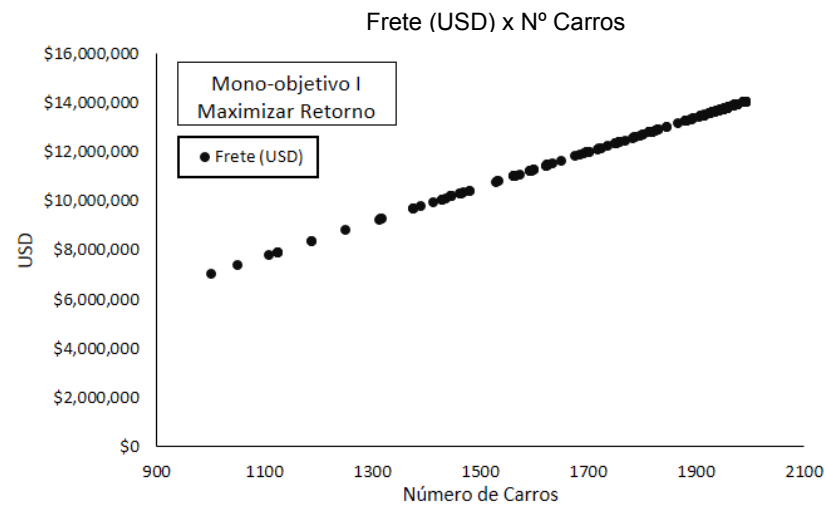


Fonte: Autora (2018).

Aumentar a quantidade de carros transportados aumenta o retorno financeiro da embarcação. Porém, da mesma maneira que o armador recebe mais por frete, ele também passa a gastar mais.

A Figura 33 apresenta diferentes resultados da otimização. Pode-se verificar que aumentar o número de carros acarreta em um navio maior, e como a quantidade de tripulantes é em função do tamanho do navio (L), quanto maior o navio mais tripulantes são necessários, gerando maior o gasto. Outro aspecto relaciona-se ao gasto de combustível, que também aumenta com a quantidade de carros, visto que embarcações maiores consomem mais combustível. As despesas relativas à movimentação das cargas (*Cargo Handling*), ou seja, aquelas relativas à movimentação dos automóveis do navio ao pátio e vice-versa, também aumenta linearmente com a quantidade de carros.

Figura 33 - Análises Financeiras dos Resultados da Otimização.

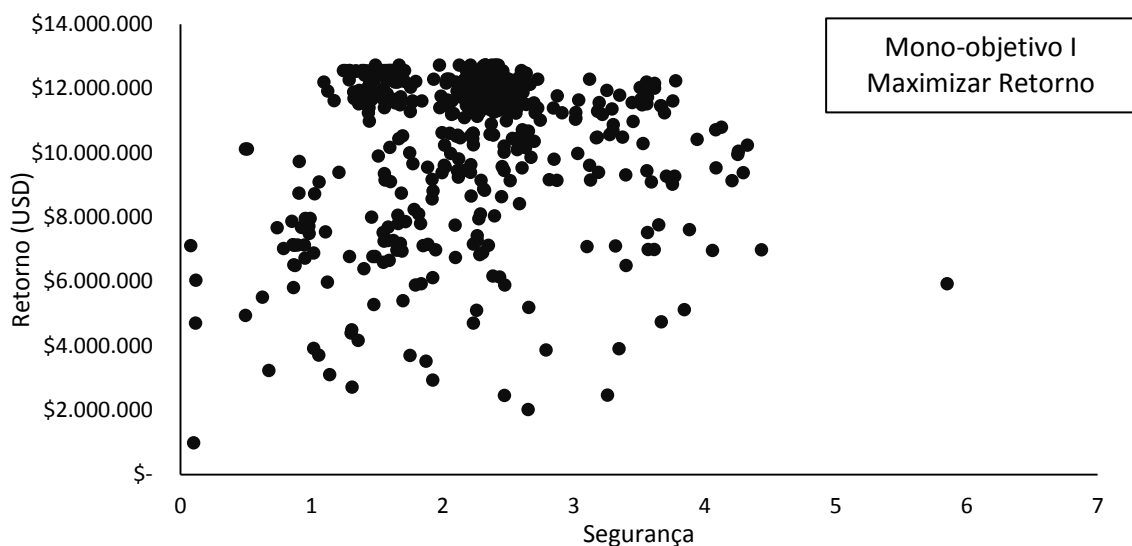


Fonte: Autora (2018).

Outra análise interessante consiste em se verificar o retorno anual em relação ao fator de segurança da embarcação. É importante observar que, conforme descrito no capítulo 4, quanto mais próximo de zero o fator de segurança, menor o risco da embarcação, visto que o período de *roll* permanece próximo ao centro da faixa recomendada.

Verifica-se que com o objetivo de retorno financeiro, os valores de segurança passam a ser aleatórios, uma vez que são independentes do objetivo da otimização. Ou seja, o programa não varia os parâmetros de forma a encontrar a maior segurança, mas sim aleatoriamente, já que essa alteração não influencia no retorno financeiro. Isso acarreta em diferentes valores de segurança para projetos com o mesmo valor de retorno financeiro anual.

Figura 34 - Retorno x Segurança Otimização do Retorno.



Fonte: Autora (2018).

A fim de verificar as análises e os resultados da otimização, toma-se como base o navio otimizado para maior retorno financeiro. Entre os valores relativos à segurança do navio, optou-se por analisar o mais seguro entre as opções apresentadas. Os dados dessa embarcação são apresentados na Tabela 24 seguir.

Tabela 24 - Resultado que Maximiza o Retorno Anual do Projeto.

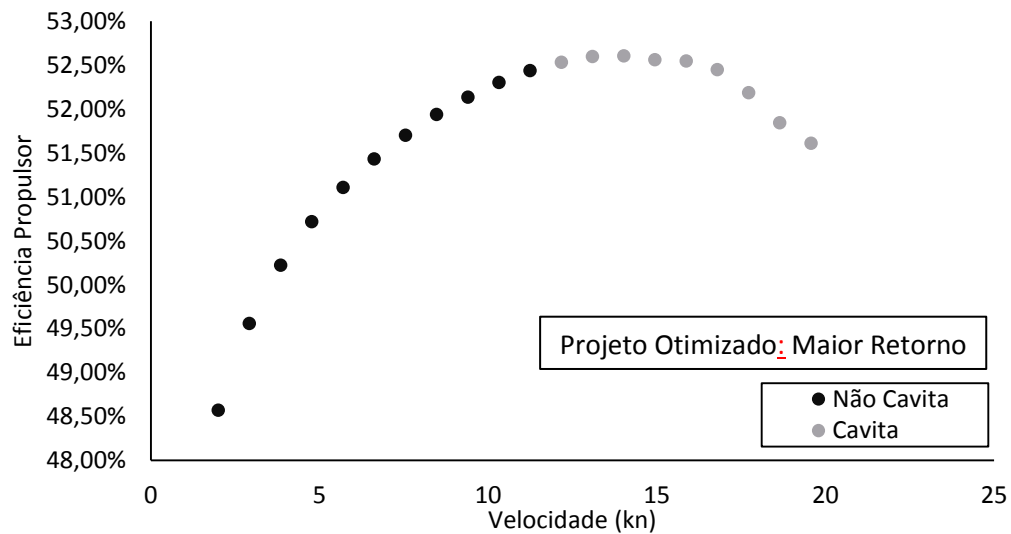
|                                    | <b>MONO RETORNO</b> |
|------------------------------------|---------------------|
| <b>NÚMERO DE CARROS</b>            | 1991                |
| <b>L (M)</b>                       | 152,87              |
| <b>B (M)</b>                       | 24,02               |
| <b>T (M)</b>                       | 6,55                |
| <b>D (M)</b>                       | 22,26               |
| <b>C<sub>B</sub></b>               | 0,61                |
| <b>RETORNO</b>                     | \$ 12.721.236,70    |
| <b>V<sub>S</sub> (KN)</b>          | 11,75               |
| <b>P/D</b>                         | 0,9                 |
| <b>A<sub>E</sub>/A<sub>O</sub></b> | 0,8                 |
| <b>Z</b>                           | 5                   |
| <b>η<sub>o</sub></b>               | 50,3%               |
| <b>GM (M)</b>                      | 1,99                |
| <b>T<sub>ROLL</sub> NAVIO (S)</b>  | 13,49               |
| <b>SEGURANÇA</b>                   | 1,49                |

Fonte: Autora (2018).

Para estudar o efeito da velocidade da embarcação na eficiência do propulsor, na Figura 35 apresenta-se as características da embarcação otimizada (Maior Retorno). É possível verificar que, de fato, alterar a velocidade da embarcação altera os parâmetros relacionados à eficiência do propulsor. A maior eficiência do propulsor é encontrada em 14kn, porém a mesma sofre cavitação.

A velocidade de operação da embarcação é aquela em que o retorno financeiro é o máximo para um propulsor que não sofra cavitação. Neste projeto, a velocidade de serviço é de 11,75kn. Os dados para velocidade acima de 20kn não são calculados, pois no modelo de síntese criado para esta monografia se estabelece uma velocidade máxima de análise.

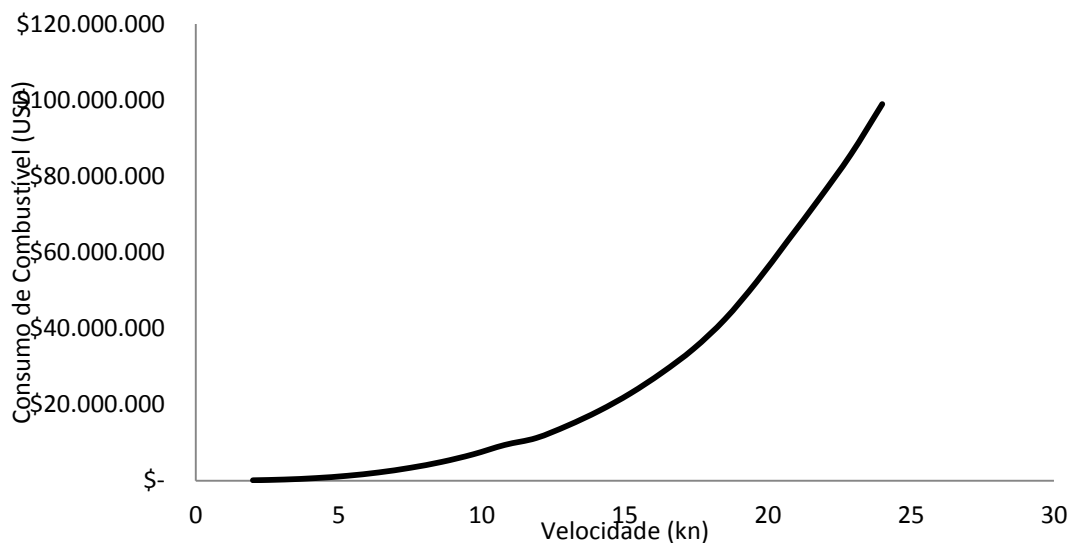
Figura 35 - Efeito da Velocidade na Eficiência do Propulsor.



Fonte: Autora (2018).

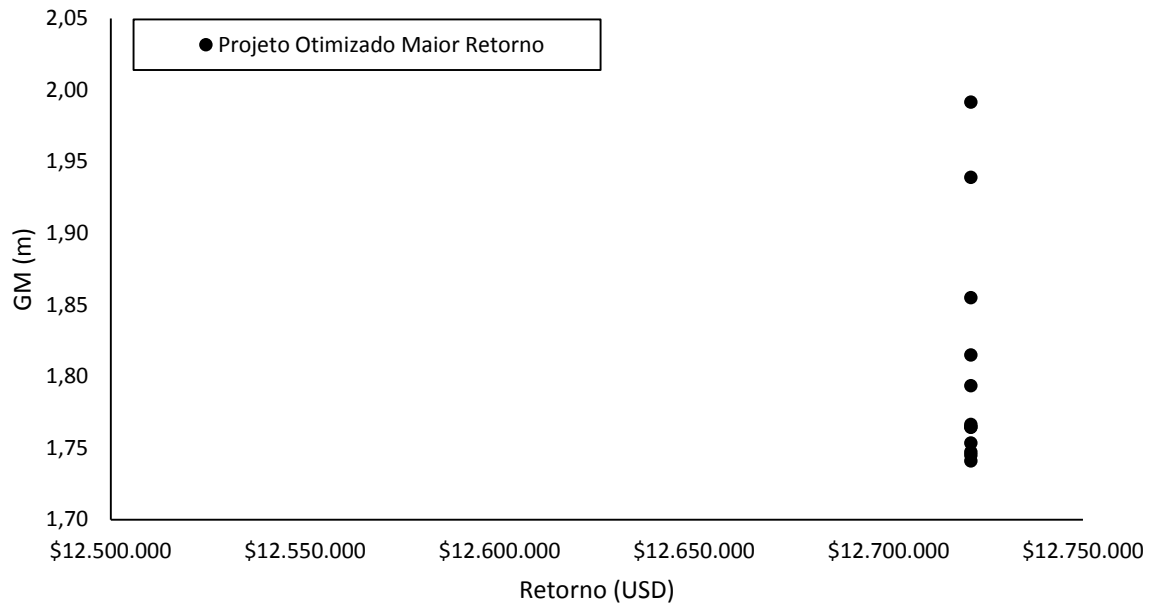
A Figura 36 apresenta o comportamento do consumo de combustível pela velocidade do navio. O comportamento esperado é observado, quanto maior a velocidade, maior o consumo de combustível. Já a Figura 37, remete ao comportamento de GM do projeto otimizado. É possível visualizar o comportamento da variação da distribuição de carga do navio (Tabela 25), e como trata-se de um parâmetro que não interfere no retorno financeiro, existem diferentes valores para o mesmo projeto.

Figura 36 - Consumo por Velocidade do Projeto Otimizado.



Fonte: Autora (2018).

Figura 37 - GM (m) x Retorno (USD).



Fonte: Autora (2018).

Tabela 25 - Alteração dos Pesos e Centroides Projeto Otimizado - Retorno.

| CDWT          | CLWT   | CWM    | CWOT   | CWST   | PWOT_LWT | PWST_LWT | MAXRETORNO       |
|---------------|--------|--------|--------|--------|----------|----------|------------------|
| <b>0,2694</b> | 0,6094 | 0,3531 | 0,9037 | 0,5987 | 0,1282   | 0,7407   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2712</b> | 0,6115 | 0,3538 | 0,9037 | 0,5781 | 0,1283   | 0,7406   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2694</b> | 0,6094 | 0,3531 | 0,9037 | 0,5987 | 0,1282   | 0,7401   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2694</b> | 0,6085 | 0,3531 | 0,9035 | 0,5987 | 0,1300   | 0,7401   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2694</b> | 0,6094 | 0,3531 | 0,9037 | 0,5987 | 0,1282   | 0,7483   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2694</b> | 0,6094 | 0,3531 | 0,9037 | 0,5958 | 0,1282   | 0,7401   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2694</b> | 0,6094 | 0,3531 | 0,9037 | 0,5937 | 0,1277   | 0,7407   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2694</b> | 0,6094 | 0,3532 | 0,9037 | 0,5987 | 0,1282   | 0,7407   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2712</b> | 0,6127 | 0,3532 | 0,9036 | 0,5987 | 0,1282   | 0,7407   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2694</b> | 0,6094 | 0,3531 | 0,9037 | 0,5895 | 0,1277   | 0,7407   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2727</b> | 0,6094 | 0,3492 | 0,9037 | 0,5987 | 0,1274   | 0,7407   | \$ 12.721.236,70 |
| <b>0,2694</b> | 0,6093 | 0,3538 | 0,8910 | 0,5765 | 0,1283   | 0,7406   | \$ 12.721.236,70 |

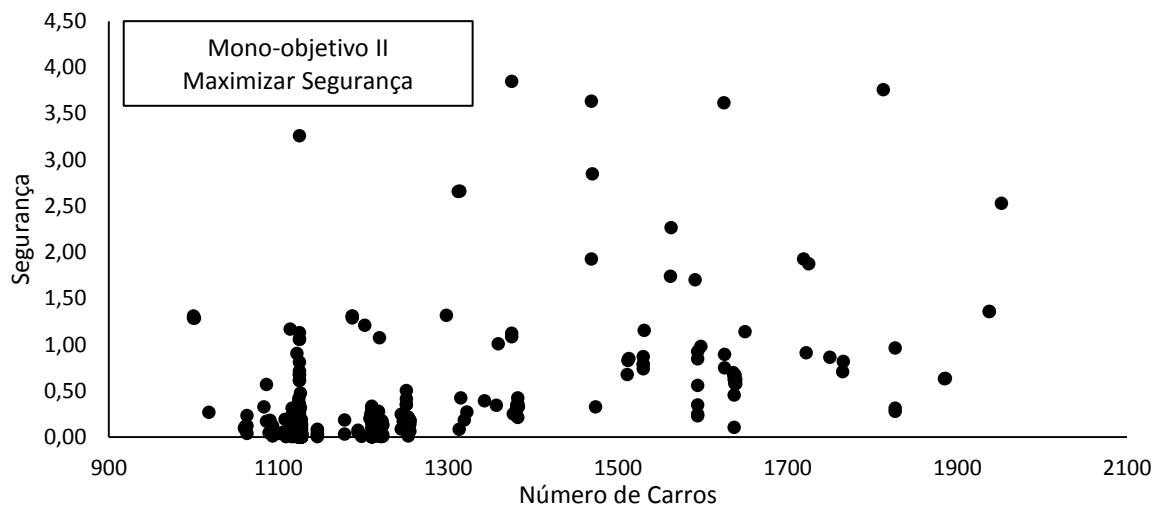
Fonte: Autora (2018).

## 5.2 OTIMIZAÇÃO VISANDO MAXIMIZAR SEGURANÇA.

O processo de otimização visando maximizar a Segurança foi apresentado no item 4.3.2. Verificou-se que também após 30 gerações, o resultado pouco varia, convergindo para o melhor valor de Segurança.<sup>2</sup>

Verifica-se que a tendência dessa otimização é convergir para menores quantidades de automóveis. Isso pode ter acontecido, devido à população de indivíduos iniciais ter sido gerada aleatoriamente, e as embarcações menores, terem resultado em projetos considerados mais seguros que as embarcações maiores. Como o AG hierarquiza as soluções de acordo com o objetivo, acaba reproduzindo e cruzando as soluções com menores quantidades de carro nas etapas seguintes da otimização, conforme apresentado na Figura 38.

Figura 38 - Segurança pelo Número de Carros.



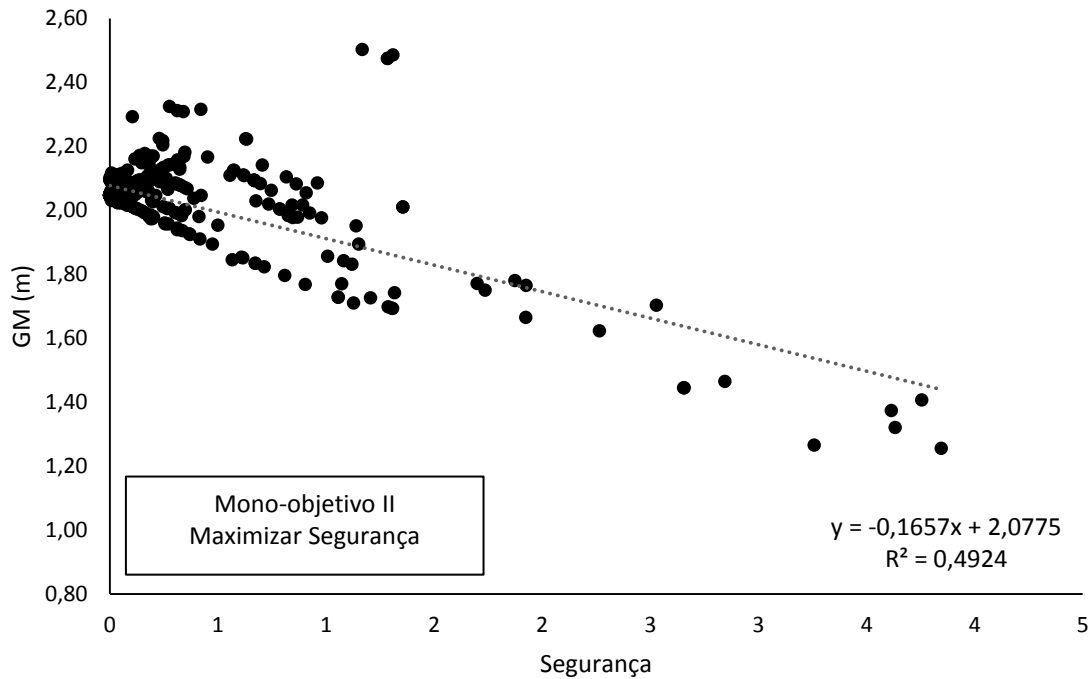
Fonte: Autora (2018).

A Figura 39, apresenta o comportamento dos resultados em função de GM e Segurança. Verifica-se que as embarcações mais seguras têm GM próximos de 2m,

<sup>2</sup> É importante lembrar o leitor que a função objetivo busca maximizar uma função negativa, de forma que o maior valor possível é de fato aquele próximo de zero. Para facilitar a visualização e colocar os resultados no quadrante positivo dos gráficos, os resultados da função objetivo foram, depois de realizada a otimização, multiplicados por -1. Portanto, os valores mais seguros são os próximos à origem do eixo denominado "Segurança".

pois é o valor para qual  $T_{ROLL}$  converge para 12s, que é o valor mais próximo do centro da faixa sugerida.

Figura 39 - O GM pela Segurança.



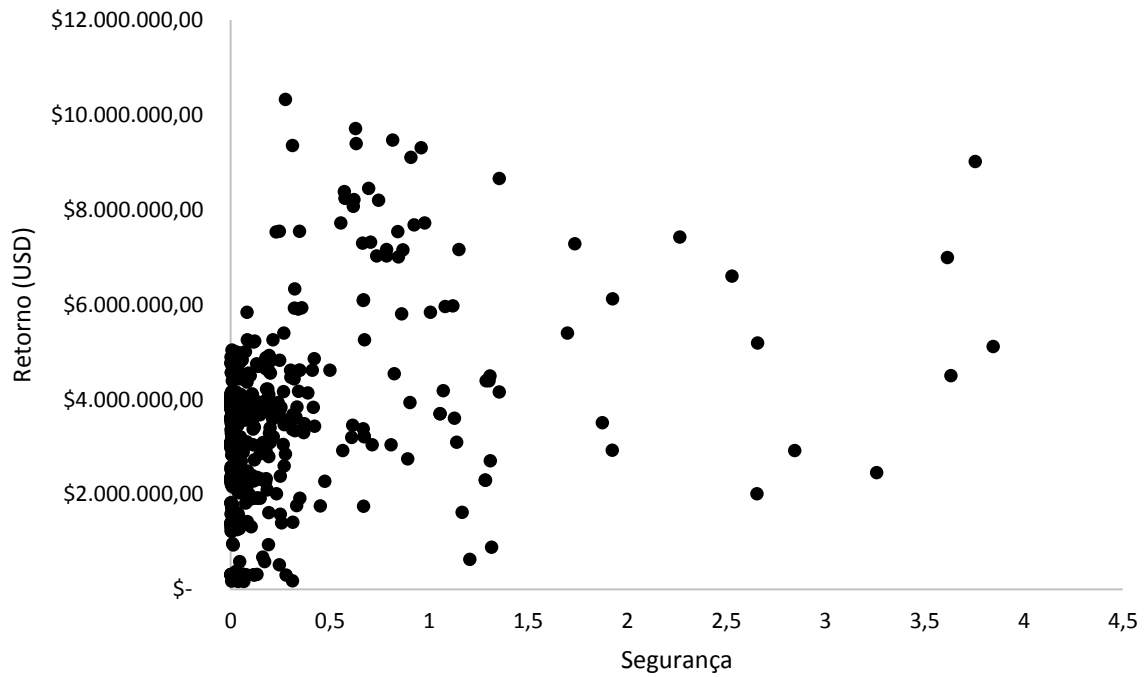
Fonte: Autora (2018).

O retorno financeiro tende a diminuir conforme a segurança aumenta (Figura 40), pois a tendência dessa otimização são embarcações menores. No modelo de síntese desenvolvido para esta monografia, quanto menor a capacidade de carga, menor o retorno financeiro.

Como solução para a otimização mono-objetivo visando maximizar a segurança, optou-se pela solução com maior retorno anual entre aquelas que apresentam o melhor fator de segurança, cujas características são descritas na Tabela 26.



Figura 40 - Retorno pela Segurança.



Fonte: Autora (2018).

Tabela 26 - Resultado de Projeto Otimizado para Fator de Segurança.

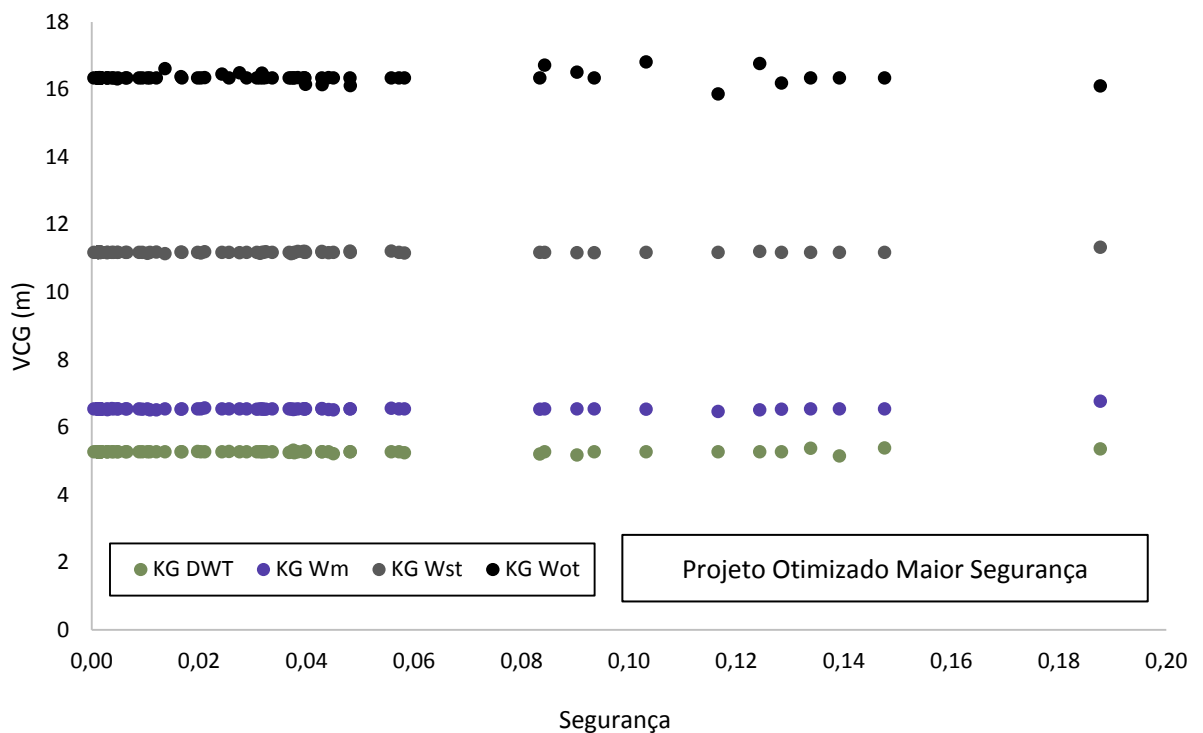
| MONO SEGURANÇA       |                 |
|----------------------|-----------------|
| NÚMERO DE CARROS     | 1127            |
| L (M)                | 141,30          |
| B (M)                | 21,28           |
| T (M)                | 6,41            |
| D (M)                | 19,98           |
| $C_B$                | 0,614           |
| RETORNO              | \$ 4.028.412,66 |
| $V_s$ (KN)           | 9,175           |
| P/D                  | 1,40            |
| $A_E/A_O$            | 1,05            |
| Z                    | 5               |
| $\eta_o$             | 49,84%          |
| GM (M)               | 1,27            |
| $T_{ROLL}$ NAVIO (S) | 14,66           |
| SEGURANÇA            | 0,000172798     |

Fonte: Autora (2018).

O gráfico a seguir indica o comportamento da otimização em relação aos pesos e centroides do projeto otimizado (Figura 41). Os resultados apresentados são os referentes a um navio que transporte os 1127 carros.

O intuito desses gráficos é verificar como os parâmetros dos pesos e centros variam durante a busca de uma embarcação mais segura. É interessante notar que a variação é mínima. Os valores aparentam inclusive serem constantes, porém ocorrem pequenas variações entre eles. Esses dados afetam o valor de KG, que, por conseguinte, afetam os valores de segurança. O AG entende o que precisa ser modificado para encontrar o projeto com maior segurança, alterando a distribuição de pesos da embarcação até que o projeto mais seguro seja encontrado.

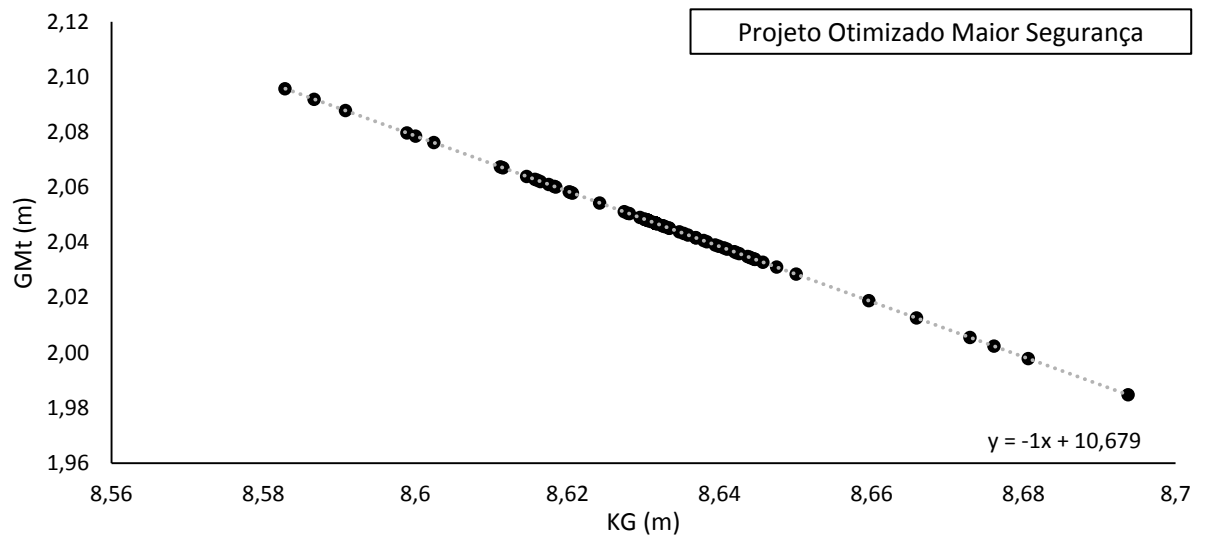
Figura 41 - A Variação da Distribuição de Carga pela Segurança.



Fonte: Autora (2018).

Quanto às características de estabilidade, percebe-se que aumentar o KG implica em reduzir o GM, e diminuir KG implica em aumentar GM, como pode ser observado na Figura 42. Da mesma maneira, o período natural ( $T_{ROLL}$ ) do navio diminui com o aumento do GM, pois o  $T_{ROLL}$  é inversamente proporcional ao GM (Figura 43).

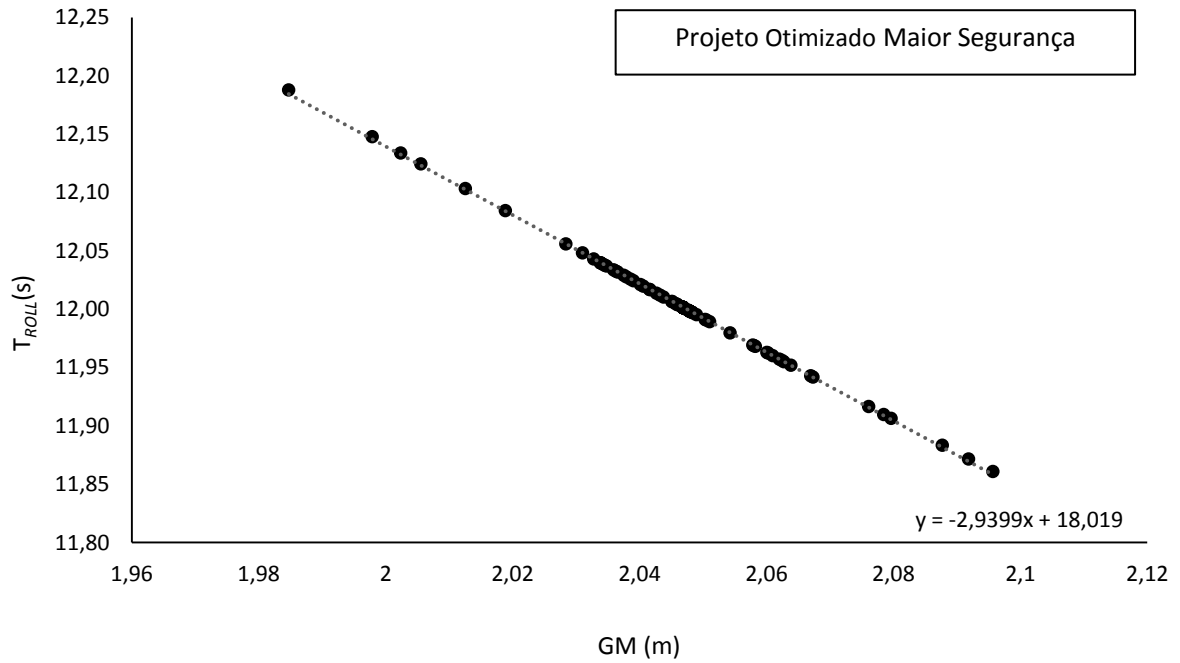
Figura 42 - GM em Função do KG do Projeto Otimizado.



Fonte: Autora (2018).

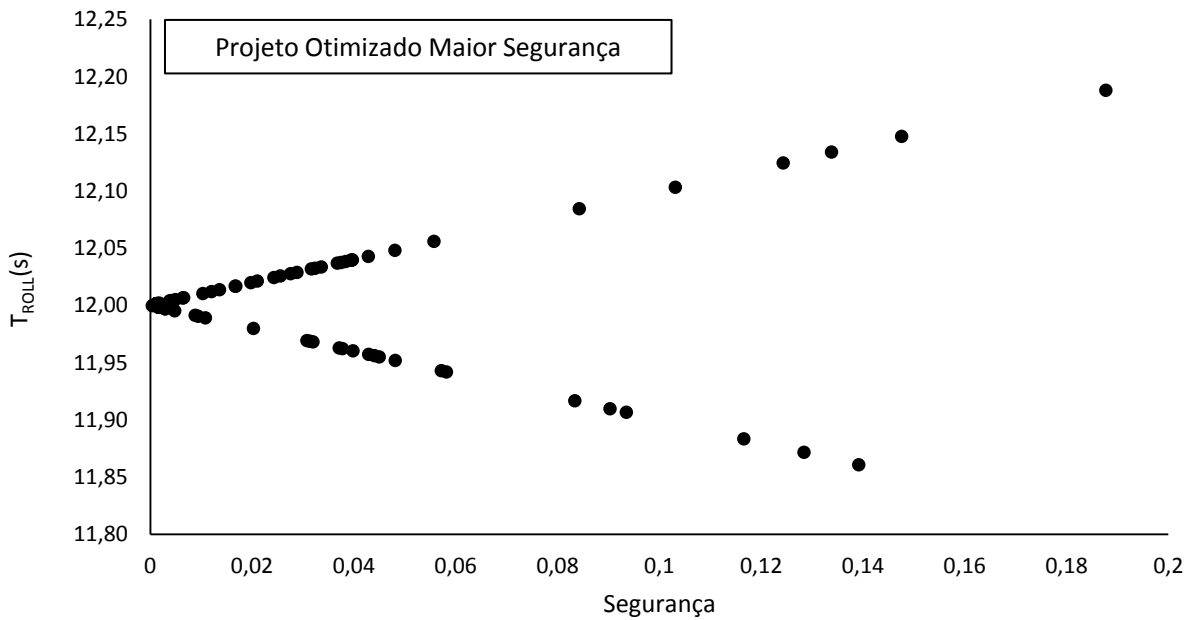
Por fim, verifica-se que diferentes projetos podem apresentar um mesmo fator de segurança e diferentes períodos de *roll* (Figura 44). Isso acontece, pois o fator de segurança é calculado a partir da diferença entre o período natural de *roll* do projeto e o centro da faixa recomendada na literatura. Assim, podem haver valores maiores que o centro, e menores do que o centro, que resultam em um mesmo fator de segurança. Por exemplo, ambos os valores, 12,2s e 11,8s estão distantes 0,2s do centro da faixa recomendada, e assim resultam no mesmo fator de segurança.

Figura 43 -  $T_{ROLL}$  em Função do GM do Projeto Otimizado.



Fonte: Autora (2018).

Figura 44 - O  $T_{ROLL}$  em Função da Segurança.



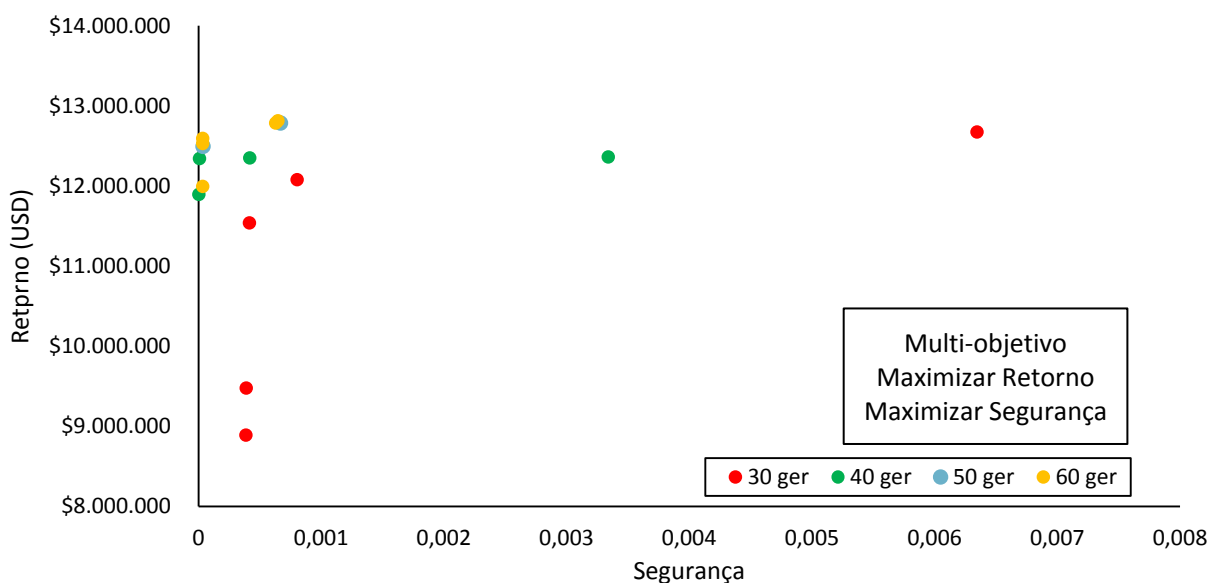
Fonte: Autora (2018).

### 5.3 OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO VISANDO MAXIMIZAR O RETORNO ANUAL E MAXIMIZAR A SEGURANÇA (MINIMIZAR O FATOR DE RISCO)

Para se iniciar o processo de estudo das otimizações multiobjetivo, primeiro se estuda a convergência da fronteira de Pareto. A análise de convergência é feita para assegurar que o processo de otimização alcançou a convergência, e que um maior número de gerações representa apenas um maior custo computacional, sem representar uma melhoria no desempenho da solução.

No problema analisado, considerou-se a otimização limitada a 30, 40, 50 e 60 gerações. Na Figura 45 são mostradas as soluções viáveis que pertencem à Fronteira de Pareto, observando-se, que, no modelo desenvolvido, a otimização tende a convergir a partir de 50 gerações.

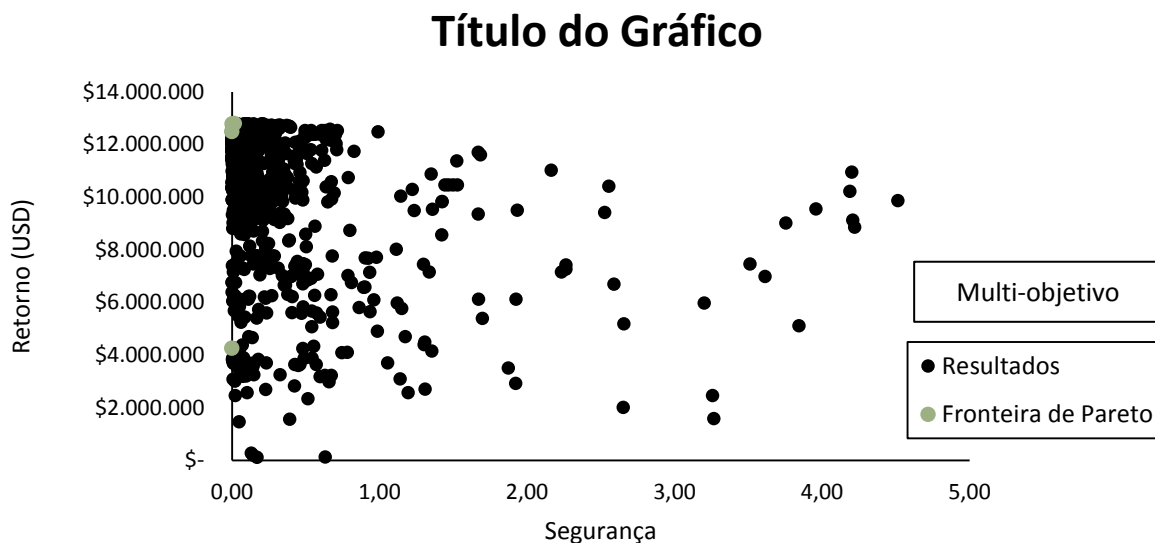
Figura 45 - Convergência Fronteira de Pareto.



Fonte: Autora (2018).

Na Figura 46, são apresentados os resultados da otimização multiobjetivo, visando maximizar o retorno anual e maximizar a segurança (minimizar fator de risco), considerando um limite de 50 gerações.

Figura 46 - Otimização Multiobjetiva.

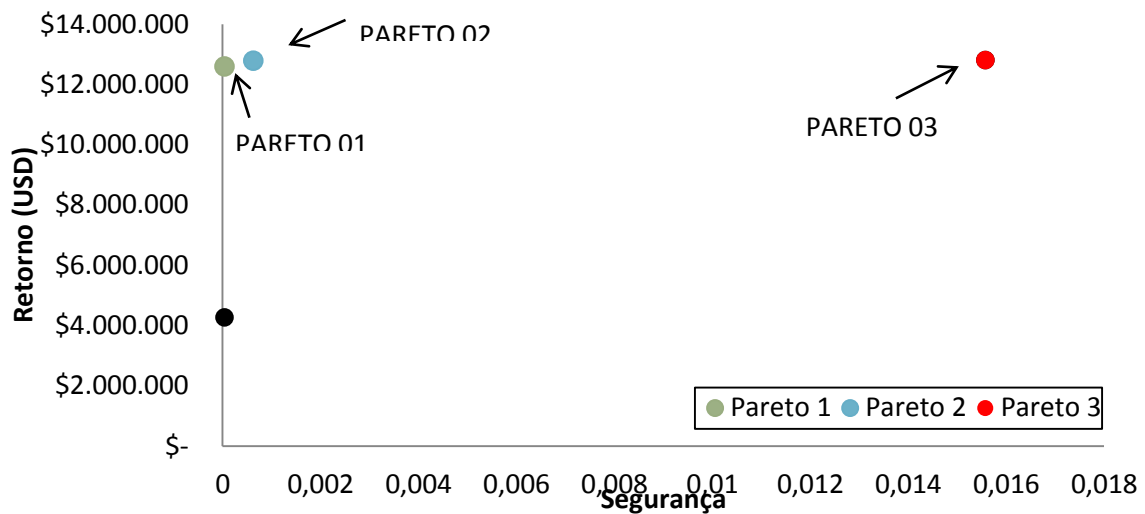


Observando os resultados obtidos, pode-se concluir que os objetivos de maximizar o retorno anual e maximizar a segurança (minimizar fator de risco) representam funções independentes e não-conflitantes. Pois, apesar de ambos os objetivos dependerem da quantidade de carros, alterar as características do propulsor e a velocidade da embarcação não altera a análise de segurança da embarcação. Assim, é possível determinar uma solução que maximiza a segurança (minimiza fator de risco) ao mesmo tempo em que maximiza o retorno financeiro do projeto.

Um mesmo navio pode ter diferentes valores de segurança e retorno, visto que são funções de parâmetros diferentes. Os fluxogramas de análise das funções objetivos, bem como a análise dos parâmetros dependentes foram apresentados na Figura 26 e Figura 28. No entanto, destaca-se que na otimização multiobjetivo, ambos os objetivos são analisados a cada solução avaliada.

Conforme discutido na fundamentação teórica, um problema multiobjetivo apresenta um conjunto de soluções ótimas. Assim, a fim de aprofundar a análise das características das soluções otimizadas, optou-se por analisar os resultados referentes a três regiões da Fronteira de Pareto.

Figura 47 - A Fronteira de Pareto da Solução Multiobjetivo.



Fonte: Autora (2018).

As características das soluções destacadas na Figura 47 são descritas na Tabela 27. É de extrema importância observar que as soluções analisadas representam uma mesma solução de projeto. As diferenças matemáticas observadas, são irrelevantes do ponto de vista de um projeto conceitual de engenharia, e assim, as soluções que compõem a Fronteira de Pareto colapsam em único ponto, reforçando a conclusão de que o problema apresentado possui dois objetivos independentes e não conflitantes.

Tabela 27 - Resultados Multiobjetivo.

|                         | PARETO 01        | PARETO 02        | PARETO 03        |
|-------------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>NÚMERO DE CARROS</b> | 1993             | 1999             | 1998             |
| <b>L (M)</b>            | 152,91           | 153,03           | 153,01           |
| <b>B (M)</b>            | 24,03            | 24,04            | 24,04            |
| <b>T (M)</b>            | 6,55             | 6,56             | 6,56             |
| <b>D (M)</b>            | 22,26            | 22,28            | 22,28            |
| <b>C<sub>B</sub></b>    | 0,61             | 0,61             | 0,61             |
| <b>RETORNO</b>          | \$ 12.591.312,65 | \$ 12.781.840,36 | \$ 12.800.099,30 |
| <b>VS (KN)</b>          | 12,085           | 11,90            | 11,75            |
| <b>P_D</b>              | 0,9              | 0,9              | 0,9              |
| <b>AE_AO</b>            | 0,8              | 0,8              | 0,8              |
| <b>Z</b>                | 5                | 5                | 5                |
| <b>EFIPROP</b>          | 0,502            | 0,504            | 0,503            |
| <b>GMT (M)</b>          | 2,517            | 2,520            | 2,526            |
| <b>TROLL NAVIO (S)</b>  | 12,000           | 12,001           | 11,984           |
| <b>SEGURANÇA</b>        | 0,0000397        | 0,00063          | 0,0156           |

Fonte: Autora (2018).

Conclui-se então que, para o modelo desenvolvido, é possível alterar simultaneamente os parâmetros que definem a segurança e o retorno anual, obtendo-se um projeto que exibe a um só tempo, alto retorno e alta segurança.

#### 5.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS DAS OTIMIZAÇÕES.

Os resultados encontrados para as otimizações são apresentados na Tabela 28. Os objetivos das otimizações foram destacados. Lembra-se aqui que, a quantidade de gerações é diferente para as abordagens mono-objetivo e multiobjetivo, no entanto, considera-se que todas as abordagens alcançaram o critério de convergência estabelecido, conforme discutido anteriormente.

Tabela 28 - Resultados dos Processos de Otimização.

|                         | ABORDAGEM MONO-OBJETIVO | ABORDAGEM MONO-OBJETIVO                        | ABORDAGEM MULTIOBJETIVO |                  |                  |
|-------------------------|-------------------------|--|-------------------------|------------------|------------------|
|                         | Maximizar Retorno       | Maximizar Segurança (Minimizar Fator de Risco) | Pareto 01               | Pareto 02        | Pareto 03        |
| <b>NÚMERO DE CARROS</b> | 1991                    | 1127   | 1993                    | 1999             | 1998             |
| <b>L (M)</b>            | 152,87                  | 141,30   | 152,91                  | 153,03           | 153,01           |
| <b>B (M)</b>            | 24,02                   | 21,28  | 24,03                   | 24,04            | 24,04            |
| <b>T (M)</b>            | 6,55                    | 6,41   | 6,55                    | 6,56             | 6,56             |
| <b>D (M)</b>            | 22,26                   | 19,98  | 22,26                   | 22,28            | 22,28            |
| <b>C<sub>B</sub></b>    | 0,608                   | 0,614  | 0,608                   | 0,608            | 0,608            |
| <b>RETORNO</b>          | \$ 12.721.236,70        | \$ 4.028.412,66                                | \$ 12.591.312,65        | \$ 12.781.840,36 | \$ 12.800.099,30 |
| <b>VS (KN)</b>          | 11,75                   | 9,175  | 12,075                  | 11,900           | 11,750           |
| <b>P_D</b>              | 0,9                     | 1,4  | 0,9                     | 0,9              | 0,9              |
| <b>AE_AO</b>            | 0,8                     | 1,1  | 0,8                     | 0,8              | 0,8              |
| <b>Z</b>                | 5                       | 5  | 5                       | 5                | 5                |
| <b>EFIPROP</b>          | 50,3%                   | 49,84%   | 50,23%                  | 50,44%           | 50,33%           |
| <b>GMT (M)</b>          | 1,99                    | 1,27   | 2,52                    | 2,52             | 2,53             |
| <b>TROLL NAVIO (S)</b>  | 13,49                   | 14,66  | 12,00                   | 12,00            | 11,98            |
| <b>SEGURANÇA</b>        | 1,48851119              | 0,000172798                                    | 0,0000397               | 0,00063022       | 0,015576559      |

Fonte: Autora (2018).

Analisando-se os projetos mono-objetivos, é possível observar que maximizar o retorno acarretou no pior valor de segurança, e priorizar a segurança gerou o menor retorno. Porém, na abordagem multiobjetivo as soluções



apresentaram simultaneamente valores ótimos para ambos os parâmetros. Esse fato é de difícil justificativa e precisaria ser melhor explorado em um trabalho futuro. A abordagem multiobjetivo resultou em valores melhores tanto para a segurança quanto para o retorno anual. No entanto, a leve variação matemática para os parâmetros das soluções ótimas decorrem da aleatoriedade inerente ao algoritmo genético, e conforme visto na fundamentação teórica, que podem influir no critério de parada do algoritmo. Assim, é possível que as abordagens mono-objetivo precisassem ser refinadas.

Além disso, conforme já discutido, os parâmetros que descrevem a segurança do projeto guardam pouca influência no retorno anual da embarcação. Portanto, é possível que existam múltiplas soluções ótimas do ponto de vista de segurança e outras soluções com maior retorno anual dentro de uma margem aceitável de segurança, mas com valor ligeiramente abaixo daquele observado na 'solução final'.

Se for considerada a leve variação entre as soluções pertencentes à Fronteira de Pareto, a solução final de projeto deve ser determinada após o processo de otimização e depende de características não consideradas na construção do modelo de síntese. No presente caso, considera-se que a solução Pareto 02 deveria ser implementada para o projeto, pois possui retorno anual muito similar à solução Pareto 03, apresenta um fator de risco um pouco menor, tornando-o então um projeto mais seguro.

## 5.5 COMPARAÇÃO ENTRE PROJETOS OTIMIZADOS E NÃO OTIMIZADOS.

O projeto não otimizado utilizado como comparativo foi realizado por esta Autora durante o decurso das disciplinas EMB Projetos de Navio I e EMB Projetos de Navio II, do curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina, baseado na clássica abordagem sequencial e iterativa de projeto (Apêndice A). Conforme já descrito, os mesmos requisitos de projeto foram utilizados em ambos os trabalhos.

No projeto original, buscou-se um projeto de navio da classe RoRo, realizado em duas fases: fase inicial voltada para o projeto conceitual, e fase preliminar na qual definiu-se, inclusive, o desenho do casco. Para tornar a análise coerente com a apresentada neste trabalho, manteve-se a quantidade de carros, as

dimensões principais e os coeficientes de forma; cujos valores foram inseridos no modelo de síntese desenvolvido e apresentado neste estudo.

A utilização do modelo de síntese deste estudo, tem o intuito de assegurar que o projeto de referência fosse uma solução viável para o modelo de síntese desenvolvido.

A Tabela 29 apresenta uma síntese dos resultados, comparando as características dos projetos obtidos com as diferentes abordagens de otimização consideradas nesta monografia, com aquelas definidas no projeto não-otimizado baseado na metodologia sequencial e iterativa.

Tabela 29 - Comparação entre Projetos Otimizados e Não-otimizado.

|                                    | Mono Retorno     | Mono Segurança  | Pareto 01        | Pareto 02        | Pareto 03        | Projeto Não-Otimizado |
|------------------------------------|------------------|-----------------|------------------|------------------|------------------|-----------------------|
| <b>Número de Carros</b>            | 1991             | 1127            | 1993             | 1999             | 1998             | 1936                  |
| <b>L (m)</b>                       | 152,87           | 141,3           | 152,91           | 153,03           | 153,01           | 141,50                |
| <b>B (m)</b>                       | 24,04            | 21,28           | 24,03            | 24,04            | 24,04            | 24,90                 |
| <b>T (m)</b>                       | 6,55             | 6,41            | 6,55             | 6,56             | 6,56             | 5,70                  |
| <b>D (m)</b>                       | 22,26            | 19,98           | 22,26            | 22,28            | 22,28            | 18,90                 |
| <b>C<sub>B</sub></b>               | 0,61             | 0,61            | 0,61             | 0,61             | 0,61             | 0,54                  |
| <b>Retorno</b>                     | \$ 12.721.236,70 | \$ 4.028.412,66 | \$ 12.591.312,65 | \$ 12.781.840,36 | \$ 12.800.099,30 | \$ 10.595.416,97      |
| <b>V<sub>s</sub> (kn)</b>          | 11,8             | 9,2             | 12,0             | 11,9             | 11,8             | 9,5                   |
| <b>P/D</b>                         | 0,9              | 1,4             | 0,9              | 0,9              | 0,9              | 0,6                   |
| <b>A<sub>E</sub>/A<sub>O</sub></b> | 0,8              | 1,1             | 0,8              | 0,8              | 0,8              | 1,0                   |
| <b>Z</b>                           | 5                | 5               | 5                | 5                | 5                | 4                     |
| <b>η<sub>O</sub></b>               | 50,3%            | 49,8%           | 50,2%            | 50,4%            | 50,3%            | 40,9%                 |
| <b>Δ (ton)</b>                     | 13937,88         | 10646,63        | 13948,12         | 13978,86         | 13973,73         | 10844,87              |
| <b>DWT (ton)</b>                   | 6014,88          | 4519,52         | 6019,35          | 6032,76          | 6030,53          | 4964,15               |
| <b>LWT (ton)</b>                   | 7922,99          | 6127,11         | 7928,76          | 7946,09          | 7943,20          | 5880,72               |
| <b>W<sub>M</sub> (ton)</b>         | 1043,08          | 833,92          | 1515,98          | 1513,28          | 1518,79          | 266,52                |
| <b>W<sub>OT</sub> (ton)</b>        | 1016,03          | 828,25          | 965,46           | 973,58           | 967,17           | 826,67                |
| <b>W<sub>ST</sub> (ton)</b>        | 5863,88          | 4464,95         | 5447,32          | 5459,23          | 5457,24          | 4417,93               |
| <b>KG DWT (m)</b>                  | 5,99             | 5,45            | 5,77             | 5,77             | 5,77             | 5,23                  |
| <b>KG LWT (m)</b>                  | 13,56            | 12,34           | 13,38            | 13,40            | 13,40            | 11,83                 |
| <b>KG W<sub>M</sub> (m)</b>        | 7,86             | 7,09            | 7,44             | 7,42             | 7,42             | 6,63                  |
| <b>KG W<sub>OT</sub> (m)</b>       | 20,12            | 16,09           | 17,91            | 17,95            | 17,92            | 17,04                 |
| <b>KG W<sub>ST</sub> (m)</b>       | 13,33            | 11,52           | 12,70            | 12,70            | 12,70            | 11,36                 |
| <b>KG (m)</b>                      | 9,06             | 9,88            | 9,45             | 9,51             | 9,49             | 8,78                  |
| <b>GM (m)</b>                      | 1,99             | 1,27            | 2,52             | 2,52             | 2,53             | 3,76                  |
| <b>T<sub>ROLL Navio</sub> (s)</b>  | 13,49            | 12,00           | 12,00            | 12,00            | 11,98            | 14,50                 |
| <b>Segurança</b>                   | 1,48851          | 0,000172798     | 0,0000397        | 0,00063022       | 0,015576559      | 2,504                 |

Fonte: Autora (2018).

Pode-se verificar que de fato, os projetos otimizados apresentam resultados melhores que o não-otimizado. Para facilitar a comparação, será realizada uma análise aprofundada considerando apenas as soluções denominadas **Pareto 02** e **Projeto Preliminar Não-Otimizado**.

Observa-se que a abordagem baseada em técnicas de otimização resultou em um projeto com comprimento, calado e coeficiente de bloco com valores cerca de 10% maiores do que aqueles definidos no projeto tradicional. Como a determinação das dimensões principais e coeficientes de forma, na abordagem tradicional, baseia-se exclusivamente em navios semelhantes, pode-se inferir que o processo de otimização revela que o aumento dessas três características pode otimizar o desempenho do projeto, em relação aos navios da classe RoRo atualmente em operação.

É possível notar que existe diferença de retorno financeiro entre os projetos, sendo o maior valor encontrado para o projeto otimizado. Além do aumento do porte do navio descrito no parágrafo anterior, isso deve-se ao fato de que os parâmetros que descrevem o propulsor ( $A_E/A_O$ ,  $P/D$  e  $Z$ ) não resultam em propulsor suficientemente eficiente. O valor da eficiência do projeto otimizado é quase 10% maior que a do projeto não-otimizado. A eficiência do propulsor afeta o consumo de combustível da embarcação. Encontrar o melhor propulsor pode gerar consumos menores, diminuindo o gasto com combustível e então aumentando o retorno financeiro do navio. Além disso, o projeto não-otimizado não foi projetado para ter a maior capacidade de carga, como pode ser visto pela quantidade de carros transportados. O valor é um pouco menor do que o projeto otimizado.

Tratando-se ainda do retorno financeiro, a velocidade de serviço da embarcação não-otimizada é menor do que a do projeto otimizado. Isso também afeta o retorno, visto que a embarcação não consegue fazer tantas viagens quanto o projeto otimizado. É evidente, entretanto, que essa é a velocidade ótima para ambos os projetos. Acima dessas velocidades o armador passa a ter um retorno menor.

A segurança é função da distribuição de carga do navio, e essa distribuição é variada para cada condição de carga a qual a embarcação está sujeita. A análise realizada para ambos os projetos trata de um navio na condição totalmente carregado. A embarcação pela abordagem clássica tem capacidade de carga menor que a otimizada, e como esperado, também apresenta um menor deslocamento. A

Tabela 30, apresenta a porcentagem ocupada por cada componente de peso da embarcação para que a distribuição de carga possa ser estudada. Essa mesma tabela, também apresenta a porcentagem dos centroides verticais em relação aos pontais das embarcações.

Tabela 30 - Análise entre as Distribuições de Pesos dos Projetos.

| Análise               | Pareto 02 | Projeto Não-Otimizado |
|-----------------------|-----------|-----------------------|
| % DWT/ $\Delta$       | 43,2%     | 45,8%                 |
| % LWT/ $\Delta$       | 56,8%     | 54,2%                 |
| % $W_M$ / $\Delta$    | 10,8%     | 2,5%                  |
| % $W_{OT}$ / $\Delta$ | 7,0%      | 7,6%                  |
| % $W_{ST}$ / $\Delta$ | 39,1%     | 40,7%                 |
| % KG DWT/D            | 25,9%     | 27,7%                 |
| % KG LWT/D            | 60,1%     | 62,6%                 |
| % KG $W_M$ /D         | 33,3%     | 35,1%                 |
| % KG $W_{OT}$ /D      | 80,6%     | 90,2%                 |
| % KG $W_{ST}$ /D      | 57,0%     | 60,1%                 |

Fonte: Autora (2018).

Pode-se verificar que, em geral, os dois projetos apresentam distribuições de massa similares. Analisando-se o deslocamento total da embarcação, a maioria dos parâmetros apresenta variação máxima de aproximadamente 2,5%. A grande diferença entre os projetos encontra-se no peso dos componentes do sistema de máquina. O projeto por abordagem clássica considera que peso desse sistema ocupa cerca de 8% menos que o projeto otimizado.

Quanto ao posicionamento dos centros verticais de gravidade dos parâmetros de massa, também se observa similaridade entre os projetos. Aqui, a diferença de aproximadamente 10% acontece no posicionamento dos *outfittings*. O projeto otimizado considera um posicionamento localizado um pouco mais “para dentro” do casco que o apresentado pela metodologia clássica. Essas discrepâncias acarretaram numa diferença entre os valores de GM. Como GM é um dos parâmetros na análise de segurança, é possível verificar que o navio otimizado para segurança apresenta um valor para o fator de segurança muito próximo de zero, e um  $T_{ROLL}$  igual a 12s. Já a embarcação não otimizada apresenta valor de  $T_{ROLL}$  de 14,5s, estando um pouco acima da faixa recomendada pela literatura (10 a 14s).

O capítulo a seguir apresenta as conclusões obtidas com a realização desta monografia.

## 6 CONCLUSÃO

Conforme demonstrado neste trabalho, projetar um navio é uma atividade extremamente complexa, cujo desempenho depende da experiência do projetista. Assim, entregar um projeto eficiente torna-se um desafio ainda maior. Entretanto, os recentes avanços tecnológicos possibilitaram o desenvolvimento de técnicas e ferramentas para auxiliar os engenheiros.

Um engenheiro naval experiente consegue identificar os parâmetros que afetam o desempenho de uma embarcação. Ainda assim, possivelmente encontrará dificuldade de entender a influência dos diferentes parâmetros de um projeto complexo, bem como a influência desses parâmetros aos diferentes atributos associados ao desempenho de um navio.

Nesse contexto, este trabalho apresentou uma metodologia para o projeto de embarcações da classe RoRo que utiliza técnicas de otimização mono-objetivo e multiobjetivo.

O modelo de síntese desenvolvido considera dois objetivos para o projeto: maximizar o retorno financeiro anual e maximizar a segurança (minimizar o fator de risco). Diante da consideração desses dois objetivos, analisaram-se três abordagens distintas de otimização. A primeira, considera um processo de otimização mono-objetivo que visa maximizar apenas o retorno anual. A segunda abordagem, visa maximizar apenas a segurança do projeto. Por fim, a terceira abordagem trata o problema de maneira multiobjetivo, maximizando ambos os objetivos simultaneamente.

Seguindo os objetivos específicos estabelecidos para o trabalho, um modelo de síntese para o projeto conceitual de um navio da classe RoRo foi desenvolvido, utilizando formulações empíricas disponíveis e implementadas em uma planilha eletrônica do tipo Excel. Técnicas de otimização foram aplicadas ao modelo, permitindo a determinação de um projeto ótimo definido em função dos requisitos de

projeto estabelecidos. Um dos resultados interessantes é que, no modelo desenvolvido, os objetivos definidos mostraram-se independentes e não-conflitantes.

Assim, observou-se que o problema multiobjetivo, apresentou de fato, uma única solução, capaz de maximizar ambos os objetivos simultaneamente. Isso acontece, pois o fator de segurança definido é função essencialmente associado à distribuição de carga, uma vez que, os valores de dimensões principais e coeficientes de forma são fixados a partir do valor da variável de projeto, que define a quantidade de carros a bordo do navio. Por outro lado, o retorno financeiro é fortemente influenciado pela velocidade de projeto e pelas características do propulsor, que pouco afetam o coeficiente de segurança estabelecido.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se o desenvolvimento de um segundo modelo de síntese, no qual as dimensões do navio não são definidas deterministicamente em função do número de carros, mas sim, admitindo uma variação dentro dos limites observados na análise de navios semelhantes. Nessa abordagem, o retorno financeiro e o fator de segurança da embarcação passariam a ser parâmetros conflitantes. Por exemplo, um leve aumento no valor da boca pode fazer com que a embarcação fique mais segura, mas, no entanto, pode acarretar em um navio com maior arrasto, que necessite de um motor mais potente, e que por consequência, consuma mais combustível; reduzindo o retorno financeiro.

Na otimização mono-objetiva, visando maximizar o retorno financeiro, observou-se que o programa também maximizou a capacidade de carga. Isso significa que, possivelmente, ao aumentar a quantidade de carga transportada, o retorno financeiro é sempre maior. Essa constatação matemática pode ser observada no mundo real, visto que ao longo da história observa-se uma tendência mundial para a construção de navios cada vez maiores, objetivando maximizar o retorno financeiro oferecido pela embarcação. Poder-se-ia argumentar que essa constatação é uma falácia, pois o aumento do porte dos navios estaria associado, não à busca pelo aumento do retorno financeiro, mas simplesmente em virtude da maior oferta de carga resultante da globalização da produção e internacionalização do consumo. No entanto, esse cenário poderia resultar apenas em um aumento do tamanho da frota, ao invés de também representar um aumento no porte dos navios. Assim, o aumento observado no porte dos navios guarda relação com a conclusão

observada neste trabalho, de que maximizar o retorno financeiro, potencialmente, significa maximizar a capacidade de carga de um navio.

Outra observação interessante, é a de que o problema de seleção do propulsor pode ser definido como um subproblema de otimização, visto que a maximização da eficiência do propulsor sempre reduz o gasto de combustível; maximizando o retorno financeiro. Observou-se também que a velocidade de serviço está diretamente associada ao retorno financeiro da embarcação, pois essa define a quantidade de viagens que o armador pode fazer em um ano. Entretanto, aumentar a velocidade não gera, necessariamente, navios mais rentáveis, pois o propulsor possui um limite de velocidade, a partir da qual passa a cavitari.

Os cálculos realizados para avaliar o retorno financeiro anual do navio são bastantes resumidos e simplificados. Foram utilizados autores diferentes e uma extensa pesquisa na literatura para tentar dar verossimilhança a esses cálculos, mas ressalta-se aqui, que esses dados nada mais são do que meras estimativas, que poderiam ser refinadas em trabalhos futuros.

Os valores referentes ao consumo de combustível podem ser facilmente calculados, uma vez que o preço do diesel pode ser encontrado em sites especializados. Entretanto, valores referentes a salários, valor do frete, taxas de atracação, taxas de movimentação de carga e seguro, não são facilmente disponibilizados. Esses valores são considerados a chave do sucesso das empresas de transporte marítimo, seguradoras e portos, e portanto, são de difícil estimativa. Uma possibilidade para refinar o modelo deste trabalho seria buscar a parceria com alguma empresa de projeto ou de transporte de carga, a fim de obter acesso a dados ainda mais realistas, que certamente permitirão avanços no modelo desenvolvido.

Outra possibilidade seria analisar a viabilidade econômica do projeto, estimando o custo de construção, os custos e valores referentes ao financiamento e a taxa de depreciação da embarcação. Nesse contexto, poderia ser estudado quanto tempo essa embarcação leva para tornar-se economicamente viável; otimizando o lucro ao longo do ciclo de vida do navio ou então minimizando o tempo necessário para se obter o retorno financeiro do empreendimento. Tais análises não foram realizadas devido às complexidades na obtenção dos dados e modelos econômicos, e também, em virtude da limitação de tempo para a elaboração desta pesquisa.



Os resultados da otimização referentes à segurança são surpreendentes. Quando analisado apenas esse objetivo, o programa buscou embarcações menores, mas ao fazer a otimização multiobjetivo, foi capaz de encontrar embarcações seguras com grandes quantidades de carro.

É importante observar que na fase do projeto conceitual, nem sempre é possível distribuir os carros da forma como planejado. Com um modelo 3D em mãos, é possível simular o posicionamento da casa de máquinas, dos tanques de combustível, dos tanques de lastro e também da carga. Em geral, a quantidade de carga, que de fato cabe na embarcação, é menor que aquela previamente estabelecida. Outro parâmetro que afeta a segurança é a distribuição de massa da embarcação. Na fase conceitual de projeto, essa distribuição é baseada em embarcações semelhantes, e talvez, não reflita a real distribuição de carga. Dessa forma, sugere-se que os valores encontrados na otimização sejam tratados como valores de referência. Sabe-se que a embarcação tem seu melhor desempenho para os valores encontrados na otimização, então, em estudos futuros, é interessante tentar manter os valores reais próximos aos valores otimizados. A estratégia de utilizar as porcentagens referentes aos grandes grupos de peso, mostrou que as soluções ótimas tendem a maximizar ou minimizar esses valores dentro da faixa permitida. Isso mostra a importância de em ciclos futuros refinar o projeto (distribuição de carga: peso de aço, de maquinário, *outfitting*, carga) visando (aumentar ou reduzir) o peso desses elementos.

Por fim, observou-se que os projetos otimizados apresentaram resultados melhores que o projeto pela abordagem clássica, de forma a concluir que vale a pena aplicar a otimização na fase conceitual de projeto. Cabe ainda destacar que, a obtenção de um melhor projeto conceitual, tem grande influência na taxa de convergência, e na qualidade da resposta produzida na fase do projeto preliminar da embarcação. Se na fase preliminar a embarcação é 'refinada', então, é melhor "refinar" o melhor projeto conceitual possível, garantindo assim que se trabalha com a melhor solução de projeto desde as fases preliminares. Conclui-se então que, a aplicação de técnicas de otimização, tem potencial de melhorar o desempenho das embarcações projetadas, motivando o desenvolvimento de novos trabalhos nessa área.

Sugere-se ainda, que mais análises de otimização sejam realizadas, principalmente em fases mais avançadas de projeto. Infelizmente, o homem, por mais experiente que seja, não é capaz de considerar a influência simultânea de todos os parâmetros que afetam o desempenho de um projeto de engenharia. Portanto, utilizar ferramentas computacionais (tais como as técnicas de otimização) pode trazer inúmeros benefícios para os engenheiros, permitindo que esses explorem um maior número de alternativas de projeto. Entretanto, o computador não toma nenhuma decisão. Quem decide qual o melhor projeto é o engenheiro. Essa interação homem-máquina tende a ser cada vez mais benéfica, à medida que as tecnologias evoluem. Espera-se que no futuro, mais e mais ferramentas possam auxiliar os engenheiros navais na realização de projetos de navios.

## REFERÊNCIAS

ANDRADE, Gilberto de. **Parametrização adequada do algoritmo genético NSGA2 para problemas de detecção e inferência em clusters espaciais**. 2013. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Estatística, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2013.

ASA, Tts Group. RoRo, Cruise, Navy. 2018. Disponível em: <<http://www.ttsgroup.com/Market-Segments/RCN/>>. Acesso em: 06 jun. 2018. (il.)

AUGUSTO, Oscar Brito; BENNIS, Fouad; CARO, Stephane. **Multiobjective engineering design optimization problems: a sensitivity analysis approach**. 2012. [Http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382012000300006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382012000300006). Disponível em: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-74382012000300006](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-74382012000300006)>. Acesso em: 16 jun. 2018.

BARRASS, Dr C.B.. **Ship design and performance for masters and mates**. Oxford: Elsevier Limited, 2004.

BENFORD, Harry. **The practical application of economics to merchant ship design**. 1969. Disponível em: <<https://deepblue.lib.umich.edu/handle/2027.42/91656>>. Acesso em: 04 abr. 2018.

BOAVENTURA, Fabia Gasparotto. **Modelo de síntese e otimização para o projeto conceitual de navios de apoio à plataforma, incluindo parâmetros do bulbo**. 2016. 108 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016. Cap. 89205600.

BRAGA, Fernanda Roale. **Cálculo de massa adicional por meio de fórmulas simplificadas baseadas em medições de vibração em petroleiros**. 2013. 55 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007543.pdf>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

BROWNLEE, Jason. **Clever algorithms: Nature-Inspired Programming Recipes**. Melbourne: Lulu, 2011.

CAPTAIN, G. **Cargo loading errors led to Hoegh Osaka grounding on bramble bank – incident report**. 2016. Disponível em: <<http://gcaptain.com/hoegh-osaka-incident-report-cargo-loading-and-stability-errors/>>. Acesso em: 26 mar. 2018.

CARLTON, John. **Marine propellers and propulsion**. 3. ed. Oxford: Butterworth-heinemann, 2012.

CHOPRA, Karan. **8 reasons that make ro-ro ship unsafe to work on.** 2016. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/marine-safety/8-reasons-that-make-ro-ro-ship-unsafe-to-work-on/>>. Acesso em: 25 mar. 2018.

CORVO, Lucas. **Embarcações vikings.** 2016. Disponível em: <<http://vestanspjour.blogspot.com/2016/11/embarcacoes-vikings.html>>. Acesso em: 13 jun. 2018. (il.)

DERB, Kalyanmoy et al. **A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: nsga2.** *Transactions on evolutionary computation.* Hong Kong, p. 182-197. abr. 2002.

DEWAN, Mohd. Hanif. **Ship form coefficients.** Disponível em: <<https://marinestudy.net/wp-content/uploads/2015/01/Ship-Form-Coefficient.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2018.

DUNBAR, Robert E. S.; PAL, P. K.. **Optimum design of propeller using series data.** 1983. 57 f. Tese (Doutorado) - Curso de Naval Architecture, Royal Institution Of Naval Architects, Sydney.

ELETRIC, Oil. Höegh Osaka: Removed from the Cricket Pitch! 2015. Disponível em: <<http://www.oil-electric.com/2015/01/hoegh-osaka-pctc.html>>. Acesso em: 25 jun. 2018. (il.)

ESTECO. **Webinar | Optimization basics: How to set up and run a project in modeFRONTIER.** Disponível em: <<http://academy.esteco.com/academy/webinar-optimization-basics-how-set-and-run-project-modefrontier>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

EVANS, J. H. **Basic design concepts.** *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 1959.

FERRIES, Brittany. **Our Fleet.** 2017. Disponível em: <<http://www.brittanyferries.com/>>. Acesso em: 05 jun. 2018. (il.)

FREIGHTOS. **Shipping air or ocean freight:** Guidelines for selecting Air vs Ocean Freight. 2016. Disponível em: <<https://www.freightos.com/freight-resources/air-freight-vs-ocean-freight-making-the-decision/>>. Acesso em: 13 jun. 2018.

GAAFARY, M., EL-KILANI, H. & MOUSTAFA, M. **Optimum design of B-series marine propellers.** *Alexandria Engineering Journal*. 2011

GALE, P. A. **The Ship Design Process.** Em: LAMB, Thomas. *The Society of Naval Architects and Marine Engineers (Ed.). Ship Design and Construction.* New Jersey, 2003.

GASPAR-CUNHA, António; ANTUNES, Carlos Henggeler; COELLO, Carlos Coello. **Evolutionary multi-criterion optimization:** 8th International Conference.

EMO 2015. Guimarães, Portugal, March 29 – April 1, 2015 Proceedings, Part II. Guimarães: Springer, 2015.

GENTLE, N F; PERKINS, R J. **an estimate of operating costs for bulk, ro-ro and container ships**. 1982. Disponível em: <[https://bitre.gov.au/publications/1982/files/ip\\_004.pdf](https://bitre.gov.au/publications/1982/files/ip_004.pdf)>. Acesso em: 03 mar. 2018.

GOLDBERG, David E. **Genetic algorithms in search, optimization and machine learning**. Alabama: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1989.

GOOGLE MAPS. Maps. Disponível em: < <https://www.google.com.br/maps/place> >. Acesso em 03. Mar. 2018. (il.)

GRIMALDI, Group. **Grande Brasile**. 2017. Disponível em: <<https://www.hafen-hamburg.de/en/vessel/grande-brasile-imo-9198123---4081>>. Acesso em: 25 jun. 2018.

GROUP, The Independent Fact. The M/V Estonia deformation riddle - christmas 2001. 2001. Disponível em: <<http://privat.bahnhof.se/wb576311/factgroup/est/suriddle.html>>. Acesso em: 16 jun. 2018. (il.)

HARO, Bilmer li Gamarra. **Influência da massa adicional hidrodinâmica na análise vibracional global vertical de um navio graneleiro**. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: <<http://ledav.oceanica.ufRJ.br/storage/teses/influencia-da-massa-adicional-hidrodinamica-na-analise-vibracionalnavio-graneleir-858.pdf>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

HOLTROP, J.; MENNEN, G. G. **An approximate power prediction method**. 1982.

HOLTROP, Jan. **A statistical re-analysis of resistance and propulsion data**. International Shipbuilding Progress, v. 31, n. 363, p. 272-276, 1984.

HUNT, David. **The sinking of the MS Estonia**. 2017. Disponível em: <<https://owlcation.com/humanities/The-Sinking-of-the-MS-Estonia>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

HURSTWICK. Viking ship. 2015. Disponível em: <[http://www.hurstwic.org/history/articles/manufacturing/text/norse\\_ships.htm](http://www.hurstwic.org/history/articles/manufacturing/text/norse_ships.htm)>. Acesso em: 25 jun. 2018. (il.)

ICARROS. iCarros. Disponível em: <<http://www.icarros.com.br/principal/index.jsp>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

IMO - International Maritime Organization. Code on Intact Stability.. Disponível em: < <http://www.imo.org/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/Maritime-Safety-Committee-%28MSC%29/Documents/MSC.267%2885%29.pdf> >. Acesso em: 20 fev. 2018.

INVESTIDOR PETROBRAS, Investidor. Fórmulas de conversão. Disponível em: <<http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/destaques-operacionais/formulas-de-conversao>>. Acesso em: 21 jun. 2018.

IVSS. Roll on/Roll Off (RORO) **shipping rates**. 1993. Disponível em: <<https://ivssuk.com/roll-roll-off-ro-ro-shipping-rates/>>. Acesso em: 22 mar. 2018.

K-LINE AMERICA, INC. America Routes. Disponível em: <<http://kline.com/CarCarrier-ServiceMaps/Car-Carrier-RoRo-NAX-NAmerica-Asia-Australia-Service-Route-Map.html>>. Acesso em: 25 ago. 2017. (il.)

LAMB, Thomas. **Ship design and construction**. United States of America: The Society of Naval Architects And Marine Engineers, Society of Naval Architecture and Marine Engineering, 2003.

LOCSIN, Aurelio. **The average salary of workers on deep draft vessels**. 2011. Disponível em: <<http://work.chron.com/average-salary-workers-deep-draft-vessels-7101.html>>. Acesso em: 13 maio 2018

MACGREGOR. **Designed to perform with the sea**. Disponível em: <<http://www.macgregor.com/en-global/macgregor/Pages/default.aspx>>. Acesso em: 05 jun. 2017.

MATTAR, Fauze N. **Pesquisa de marketing**. São Paulo: Atlas, 2000.

MARTINS, Prof. Dr. Marcelo Ramons. **Hidrostática e estabilidade**. 2010. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - Departamento de Engenharia Naval. Disponível em: <[http://www.ndf.poli.usp.br/~gassi/disciplinas/pnv2341/Martins\\_2010\\_Hidrostática\\_e\\_Estabilidade\\_PNV2341.pdf](http://www.ndf.poli.usp.br/~gassi/disciplinas/pnv2341/Martins_2010_Hidrostática_e_Estabilidade_PNV2341.pdf)>. Acesso em: 26 mar. 2018.

MENDES, Elisa Rego. **Procedimento para seleção otimizada de um propulsor da série b**. 2015. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/157168/Procedimento%20para%20sele%C3%A7%C3%A3o%20otimizada%20de%20um%20propulsor%20da%20s%C3%A9rie%20B.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 26 jun. 2018.

MOLLAND, Anthony F.; TURNOCK, Stephan; A HUDSON, Dominic. **Ship resistance and propulsion**. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

MORAES, André Amâncio de. **Metodologia de suporte ao projeto informacional e conceitual de embarcações de recreio a motor de pequeno porte**. 2017. 149 f. TCC (Graduação) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2017.

MÜLLER, Vitor Hugo Benevenuto. **Otimização paramétrica multiobjetivo do painel estrutural de uma embarcação mercante**. 2016. 89 f. Tese (Doutorado) -

Curso de Engenharia Naval, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2016.

MURRAY, William. **Economies of scale in container ship costs**: United States Merchant Marine Academy. Disponível em: <[https://www.usmma.edu/sites/usmma.edu/files/docs/CMA Paper Murray 1 \(2\).pdf](https://www.usmma.edu/sites/usmma.edu/files/docs/CMA_Paper_Murray_1_(2).pdf)>. Acesso em: 13 jun. 2018.

NIU, Wentie et al. **Ship pipe routing design using NSGA-II and coevolutionary algorithm**. 2016. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/mpe/2016/7912863/>>. Acesso em: 16 jun. 2018.

OECD. Brazil exports, imports and trade partners. 2018. Disponível em: <<https://atlas.media.mit.edu/en/profile/country/bra/>>. Acesso em: 19 jun. 2018.

OECD. Inflation. Disponível em: <<https://data.oecd.org/price/inflation-cpi.htm>>. Acesso em: 05 abr. 2018.

OTOZATO, V. G. ; TANCREDI, T. P. . **Influência de restrições ambientais no projeto de embarcações porta contêineres utilizando a abordagem de otimização**. 2014. São Paulo: USP

PAPANIKOLAOU, Apostolos. **Holistic ship design optimization**. Aten.as: Elsevier Butterworth-heinemann, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0010448509001973>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

\_\_\_\_\_. **Ship Design: Methodologies of Preliminary Design**. Glasgow: Springer, 2009.

PARKINSON, Alan R.; BALLING, Richard J.; HEDENGREN, John D.. **Optimization book**. 2013. Disponível em: <[http://apmonitor.com/me575/uploads/Main/optimization\\_book.pdf](http://apmonitor.com/me575/uploads/Main/optimization_book.pdf)>. Acesso em: 08 ago. 2017.

PRICES, Global Petrol. Global Petrol Prices. Disponível em: <<https://pt.globalpetrolprices.com/>>. Acesso em: 06 jun. 2018.

TIU, Eigh Chuahu. **Who Should Take the Responsibility of the Food Provision Supply On Merchant Ships – the Master or the Company?** 2017. Disponível em: <<https://www.marineinsight.com/careers-2/who-should-take-the-responsibility-of-the-food-provision-supply-on-merchant-ships-the-master-or-the-company/>>. Acesso em: 13 maio 2018.

SUARDIAZ, Grupo. Nuestra Flota. 2018. Disponível em: <<https://www.suardiaz.com/>>. Acesso em: 05 jun. 2018. (il.)

SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V.. **Ship design for efficiency and economy**. Oxford: Butterworth-heinemann, 1998.

TANCREDI, Thiago Pontin. **Otimização multidisciplinar distribuída aplicada a projetos de engenharia**. 2008. 190 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

TAYLOR, D. W. **The Speed and Power of Ships**. Third edition. Washington, 1943.

UEDA, R. J. ; TANCREDI, T. P. ; ANDRADE, B. L. R. . **Application of optimization techniques and synthesis models in hierarchical design of PSV vessels**. In: 12th International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures, 2013.

VIANA, Raphael. **Relatório projeto de navio**. 2007. Disponível em: <[http://www.deno.oceanica.ufrj.br/deno/prod\\_academic/relatorios/atuais/RaphaelViana/relat1/f\\_custo.htm](http://www.deno.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/atuais/RaphaelViana/relat1/f_custo.htm)>. Acesso em: 19 jun. 2018.

VOSSSEN, Christina; KLEPPE, Robert; HJØRUNGNES, Siv Randi. **Ship design and system integration**. 2015. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/273026917\\_Ship\\_Design\\_and\\_System\\_Integration](https://www.researchgate.net/publication/273026917_Ship_Design_and_System_Integration)>. Acesso em: 13 set. 2017.

XIE, Guanmo. **Optimal preliminary propeller design based on multi-objective optimization approach**. 2011. International Workshop on Automobile, Power and Energy Engineering. Disponível em: <[https://ac.els-cdn.com/S1877705811025859/1-s2.0-S1877705811025859-main.pdf?\\_tid=2d4de6e8-f8a7-4e3b-9ce1-9abd798172f9&acdnat=1529164549\\_32d672d8c3e50309a57be00e753e127c](https://ac.els-cdn.com/S1877705811025859/1-s2.0-S1877705811025859-main.pdf?_tid=2d4de6e8-f8a7-4e3b-9ce1-9abd798172f9&acdnat=1529164549_32d672d8c3e50309a57be00e753e127c)>. Acesso em: 16 jun. 2018.

WATSON, D. G. M.. **Practical ship design**. Helensburgh: Elsevier Science, 1998.

WORKMAN, Daniel. **Top South American export countries**. 2018. Disponível em: <<http://www.worldstopexports.com/top-south-american-export-countries/>>. Acesso em: 13 jun. 2018.



## APÊNDICE A – A ABORDAGEM POR METODOLOGIA CLÁSSICA

A abordagem por metodologia clássica foi realizada nas disciplinas Projeto de Navio I e Projeto de Navio II, no curso de Engenharia Naval da Universidade Federal de Santa Catarina.

Os mesmos requisitos de projeto foram utilizados, ou seja, uma embarcação entre 1000 e 2000 carros, navegando entre os portos do Brasil, Peru, Chile e México.

As dimensões principais, os componentes de pesos, a distribuição de carga, e as características do propulsor da embarcação obtida na metodologia clássica foram inseridas no modelo de síntese criado para essa monografia. Dessa forma, torna a comparação entre os resultados justa, pois o cálculo de segurança e retorno financeiro é o mesmo, tanto para o projeto por abordagem clássica, quanto para os projetos otimizados. A Tabela 21 a seguir resume as características interessantes para que a comparação dos resultados possa ser realizada:

Tabela A.1 – Características Projeto Abordagem Clássica.

| Projeto Abordagem Clássica |                 |
|----------------------------|-----------------|
| Número de Carros           | 1936            |
| L (m)                      | 141,50          |
| B (m)                      | 24,90           |
| T (m)                      | 5,70            |
| D (m)                      | 18,90           |
| $C_B$                      | 0,54            |
| Retorno                    | \$10.595.416,97 |
| $V_s$ (kn)                 | 9,5             |
| P/D                        | 0,6             |
| $A_E/A_O$                  | 1,0             |
| Z                          | 4               |
| $\eta_o$                   | 40,9%           |
| $\Delta$ (ton)             | 10844,87        |
| DWT (ton)                  | 4964,15         |
| LWT (ton)                  | 5880,72         |
| $W_M$ (ton)                | 266,52          |
| $W_{OT}$ (ton)             | 826,67          |
| $W_{ST}$ (ton)             | 4417,93         |

|                             |       |
|-----------------------------|-------|
| KG DWT (m)                  | 5,23  |
| KG LWT (m)                  | 11,83 |
| KG W <sub>M</sub> (m)       | 6,63  |
| KG W <sub>OT</sub> (m)      | 17,04 |
| KG W <sub>ST</sub> (m)      | 11,36 |
| KG (m)                      | 8,78  |
| GM (m)                      | 3,76  |
| T <sub>ROLL Navio</sub> (s) | 14,50 |
| Segurança                   | 2,504 |

Fonte: Autora (2018).

Tabela A.2 – Cálculo Centroide Vertical DWT Projeto Abordagem Clássica.

| <b>Análise Centroide DWT Projeto Abordagem Clássica</b> |                   |                          |                                    |
|---|-------------------|--------------------------|------------------------------------|
| <b>Componente DWT</b>                                   | <b>Peso (ton)</b> | <b>Y<sub>c</sub> (m)</b> | <b>Peso * Y<sub>c</sub>(ton*m)</b> |
| Lastro DF   | 2806,90           | 0,77                     | 2175,16                            |
| Consumíveis   | 311,88            | 5,39                     | 1680,85                            |
| Deck 1  | 298,75            | 2,77                     | 827,50                             |
| Deck 2  | 298,75            | 5,21                     | 1556,45                            |
| Deck 3  | 387,50            | 7,65                     | 2964,32                            |
| Deck 4  | 358,75            | 10,09                    | 3619,74                            |
| Deck 5  | 358,75            | 12,53                    | 4495,09                            |
| Deck 6  | 358,75            | 14,97                    | 5370,44                            |
| Deck 7  | 358,75            | 17,41                    | 6245,79                            |
| SOMA  | 5538,78           |                          | 28935,32                           |
|   |                   | KG DWT (m)               | 5,22                               |
|   |                   | % Pontal                 | 27,6%                              |

Fonte: Autora (2018).

Tabela A.3 – Distribuição de Peso Projeto Abordagem Clássica

|     | <b>Massa (ton)</b> | <b>KG (m)</b> | <b>% KG/D</b> |
|-----|--------------------|---------------|---------------|
| DWT | 4964,15            | 5,23          | 27,7%         |
| LWT | 5880,72            | 11,83         | 62,6%         |
| WM  | 266,52             | 6,63          | 35,1%         |
| WOT | 826,67             | 17,04         | 90,2%         |
| WST | 4417,93            | 11,36         | 60,1%         |

Fonte: Autora (2018).

## APÊNDICE B – COEFICIENTES $K_T$ E $K_Q$

Os coeficientes  $K_T$  e  $K_Q$  são os propostos pela série B. As tabelas a seguir foram retiradas do livro *Marine propellers and propulsion* (Carlton, 2012) e foram empregadas na obtenção das curvas  $K_T$  e  $K_Q$  apresentadas anteriormente. Essas curvas foram traçadas a partir das equações abaixo:

$$K_T = \sum C_{s,t,u,v}^T (J)^s \left(\frac{P}{D}\right)^t \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^u (Z)^v$$

$$K_Q = \sum C_{s,t,u,v}^Q (J)^s \left(\frac{P}{D}\right)^t \left(\frac{A_E}{A_O}\right)^u (Z)^v$$

Tabela B.1 – Coeficientes  $K_T$  e  $K_Q$ .

| COEF $K_T$ |               |      |         |           |       |
|------------|---------------|------|---------|-----------|-------|
| n          | $C_{s,t,u,v}$ | s(J) | t (P/D) | u (Ae/Ao) | u (Z) |
| 1          | 0.00880496    | 0    | 0       | 0         | 0     |
| 2          | -0.204554     | 1    | 0       | 0         | 0     |
| 3          | 0.166351      | 0    | 1       | 0         | 0     |
| 4          | 0.158114      | 0    | 2       | 0         | 0     |
| 5          | -0.147581     | 2    | 0       | 1         | 0     |
| 6          | -0.481497     | 1    | 1       | 1         | 0     |
| 7          | 0.415437      | 0    | 2       | 1         | 0     |
| 8          | 0.0144043     | 0    | 0       | 0         | 1     |
| 9          | -0.0530054    | 2    | 0       | 0         | 1     |
| 10         | 0.0143481     | 0    | 1       | 0         | 1     |
| 11         | 0.0606826     | 1    | 1       | 0         | 1     |
| 12         | -0.0125894    | 0    | 0       | 1         | 1     |
| 13         | 0.0109689     | 1    | 0       | 1         | 1     |
| 14         | -0.133698     | 0    | 3       | 0         | 0     |
| 15         | 0.00638407    | 0    | 6       | 0         | 0     |
| 16         | -0.00132718   | 2    | 6       | 0         | 0     |
| 17         | 0.168496      | 3    | 0       | 1         | 0     |
| 18         | -0.0507214    | 0    | 0       | 2         | 0     |
| 19         | 0.0854559     | 2    | 0       | 2         | 0     |
| 20         | -0.0504475    | 3    | 0       | 2         | 0     |
| 21         | 0.010465      | 1    | 6       | 2         | 0     |
| 22         | -0.00648272   | 2    | 6       | 2         | 0     |
| 23         | -0.00841728   | 0    | 3       | 0         | 1     |

|    |              |   |   |   |   |
|----|--------------|---|---|---|---|
| 24 | 0.0168424    | 1 | 3 | 0 | 1 |
| 25 | -0.00102296  | 3 | 3 | 0 | 1 |
| 26 | -0.0317791   | 0 | 3 | 1 | 1 |
| 27 | 0.018604     | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 28 | -0.00410798  | 0 | 2 | 2 | 1 |
| 29 | -0.000606848 | 0 | 0 | 0 | 2 |
| 30 | -0.0049819   | 1 | 0 | 0 | 2 |
| 31 | 0.0025983    | 2 | 0 | 0 | 2 |
| 32 | -0.000560528 | 3 | 0 | 0 | 2 |
| 33 | -0.00163652  | 1 | 2 | 0 | 2 |
| 34 | -0.000328787 | 1 | 6 | 0 | 2 |
| 35 | 0.000116502  | 2 | 6 | 0 | 2 |
| 36 | 0.000690904  | 0 | 0 | 1 | 2 |
| 37 | 0.00421749   | 0 | 3 | 1 | 2 |
| 38 | 5.65229E-05  | 3 | 6 | 1 | 2 |
| 39 | -0.00146564  | 0 | 3 | 2 | 2 |

Fonte: Carlton (2012)

Tabela B.2 – Coeficientes  $K_Q$ .

| OEF $K_Q$ |          |      |         |           |       |
|-----------|----------|------|---------|-----------|-------|
| n         | Cs,t,u,v | s(J) | t (P/D) | u (Ae/Ao) | u (Z) |
| 1         | 0.003794 | 0    | 0       | 0         | 0     |
| 2         | 0.008865 | 2    | 0       | 0         | 0     |
| 3         | -0.03224 | 1    | 1       | 0         | 0     |
| 4         | 0.003448 | 0    | 2       | 0         | 0     |
| 5         | -0.04088 | 0    | 1       | 1         | 0     |
| 6         | -0.10801 | 1    | 1       | 1         | 0     |
| 7         | -0.08854 | 2    | 1       | 1         | 0     |
| 8         | 0.188561 | 0    | 2       | 1         | 0     |
| 9         | -0.00371 | 1    | 0       | 0         | 1     |
| 10        | 0.005137 | 0    | 1       | 0         | 1     |
| 11        | 0.020945 | 1    | 1       | 0         | 1     |
| 12        | 0.004743 | 2    | 1       | 0         | 1     |
| 13        | -0.00723 | 2    | 0       | 1         | 1     |
| 14        | 0.004384 | 1    | 1       | 1         | 1     |
| 15        | -0.02694 | 0    | 2       | 1         | 1     |
| 16        | 0.055808 | 3    | 0       | 1         | 0     |
| 17        | 0.016189 | 0    | 3       | 1         | 0     |
| 18        | 0.003181 | 1    | 3       | 1         | 0     |
| 19        | 0.015896 | 0    | 0       | 2         | 0     |
| 20        | 0.047173 | 1    | 0       | 2         | 0     |
| 21        | 0.019628 | 3    | 0       | 2         | 0     |

|    |           |   |   |   |   |
|----|-----------|---|---|---|---|
| 22 | -0.05028  | 0 | 1 | 2 | 0 |
| 23 | -0.03006  | 3 | 1 | 2 | 0 |
| 24 | 0.041712  | 2 | 2 | 2 | 0 |
| 25 | -0.03977  | 0 | 3 | 2 | 0 |
| 26 | -0.0035   | 0 | 6 | 2 | 0 |
| 27 | -0.01069  | 3 | 0 | 0 | 1 |
| 28 | 0.001109  | 3 | 3 | 0 | 1 |
| 29 | -0.00031  | 0 | 6 | 0 | 1 |
| 30 | 0.003599  | 3 | 0 | 1 | 1 |
| 31 | -0.00142  | 0 | 6 | 1 | 1 |
| 32 | -0.00384  | 1 | 0 | 2 | 1 |
| 33 | 0.01268   | 0 | 2 | 2 | 1 |
| 34 | -0.00318  | 2 | 3 | 2 | 1 |
| 35 | 0.003343  | 0 | 6 | 2 | 1 |
| 36 | -0.00183  | 1 | 1 | 0 | 2 |
| 37 | 0.000112  | 3 | 2 | 0 | 2 |
| 38 | -2.97E-05 | 3 | 6 | 0 | 2 |
| 39 | 0.00027   | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 40 | 0.000833  | 2 | 0 | 1 | 2 |
| 41 | 0.001553  | 0 | 2 | 1 | 2 |
| 42 | 0.000303  | 0 | 6 | 1 | 2 |
| 43 | -0.00018  | 0 | 0 | 2 | 2 |
| 44 | -0.00043  | 0 | 3 | 2 | 2 |
| 45 | 8.69E-05  | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 46 | -0.00047  | 0 | 6 | 2 | 2 |
| 47 | 5.54E-05  | 1 | 6 | 2 | 2 |

Fonte: Carlton (2012).

Tabela B. 3 - Eficiências em diferentes velocidades.

| V (kn) | V (m/s) | Va (m/s) | Rt (kN) | T (kN)  | alfa  | beta - const | ga,ma  | del   | J     | KT    | KQ    | No     |
|--------|---------|----------|---------|---------|-------|--------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 2      | 1,029   | 0,862    | 9,313   | 10,628  | 0,094 | -0,857       | -0,293 | 0,434 | 0,575 | 0,195 | 0,031 | 58,40% |
| 3      | 1,543   | 1,293    | 19,254  | 21,971  | 0,094 | -0,809       | -0,293 | 0,434 | 0,589 | 0,188 | 0,030 | 59,33% |
| 4      | 2,058   | 1,724    | 32,366  | 36,934  | 0,094 | -0,780       | -0,293 | 0,434 | 0,598 | 0,184 | 0,029 | 59,91% |
| 5      | 2,572   | 2,154    | 48,442  | 55,279  | 0,094 | -0,758       | -0,293 | 0,434 | 0,605 | 0,180 | 0,029 | 60,33% |
| 6      | 3,087   | 2,585    | 67,308  | 76,808  | 0,094 | -0,741       | -0,293 | 0,434 | 0,611 | 0,177 | 0,028 | 60,67% |
| 7      | 3,601   | 3,016    | 88,805  | 101,340 | 0,094 | -0,726       | -0,293 | 0,434 | 0,616 | 0,175 | 0,028 | 60,96% |
| 8      | 4,115   | 3,447    | 112,796 | 128,717 | 0,094 | -0,713       | -0,293 | 0,434 | 0,620 | 0,172 | 0,028 | 61,21% |
| 9      | 4,630   | 3,878    | 139,183 | 158,828 | 0,094 | -0,702       | -0,293 | 0,434 | 0,624 | 0,170 | 0,028 | 61,43% |
| 10     | 5,144   | 4,309    | 167,947 | 191,652 | 0,094 | -0,692       | -0,293 | 0,434 | 0,628 | 0,168 | 0,027 | 61,62% |
| 11     | 5,659   | 4,740    | 199,187 | 227,303 | 0,094 | -0,684       | -0,293 | 0,434 | 0,631 | 0,167 | 0,027 | 61,78% |
| 12     | 6,173   | 5,171    | 233,123 | 266,028 | 0,094 | -0,677       | -0,293 | 0,434 | 0,634 | 0,165 | 0,027 | 61,91% |
| 13     | 6,688   | 5,601    | 270,319 | 308,474 | 0,094 | -0,672       | -0,293 | 0,434 | 0,636 | 0,164 | 0,027 | 62,01% |
| 14     | 7,202   | 6,032    | 310,810 | 354,681 | 0,094 | -0,669       | -0,293 | 0,434 | 0,637 | 0,164 | 0,027 | 62,07% |
| 15     | 7,716   | 6,463    | 357,248 | 407,674 | 0,094 | -0,669       | -0,293 | 0,434 | 0,637 | 0,164 | 0,027 | 62,06% |
| 16     | 8,231   | 6,894    | 406,266 | 463,610 | 0,094 | -0,669       | -0,293 | 0,434 | 0,637 | 0,164 | 0,027 | 62,07% |
| 17     | 8,745   | 7,325    | 459,447 | 524,298 | 0,094 | -0,670       | -0,293 | 0,434 | 0,637 | 0,164 | 0,027 | 62,05% |
| 18     | 9,260   | 7,756    | 527,068 | 601,463 | 0,094 | -0,679       | -0,293 | 0,434 | 0,633 | 0,166 | 0,027 | 61,88% |
| 19     | 9,774   | 8,187    | 611,333 | 697,623 | 0,094 | -0,696       | -0,293 | 0,434 | 0,627 | 0,169 | 0,027 | 61,55% |
| 20     | 10,289  | 8,618    | 698,318 | 796,885 | 0,094 | -0,709       | -0,293 | 0,434 | 0,622 | 0,171 | 0,028 | 61,29% |
| 21     | 10,803  | 9,048    | 774,544 | 883,871 | 0,094 | -0,712       | -0,293 | 0,434 | 0,621 | 0,172 | 0,028 | 61,24% |
| 22     | 11,317  | 9,479    | 843,918 | 963,037 | 0,094 | -0,709       | -0,293 | 0,434 | 0,622 | 0,171 | 0,028 | 61,30% |

Fonte: Autora (2018).

## APÊNDICE C – CURVA CAVITAÇÃO

O artigo *Optimum design of propeller using series data*, de Dunbar e Pal (1983), fornece um método para traçar a curva referente a um limite determinado de cavitação:

$$\tau_c = c\sigma^d$$

Tabela C.1 – Critério de Cavitação

| Critério Cavitação     | $\sigma$                   | c    | d     |
|------------------------|----------------------------|------|-------|
| 2 - Propulsor Navio    | $\leq 0,217$               | 0,32 | 0,728 |
| Mercante (Seção Comum) | $0,217 < \sigma \leq 0,65$ | 0,27 | 0,559 |
|                        | $\geq 0,65$                | 0,28 | 0,624 |

Fonte: Dunbar; Pal (1983), adaptado pela autora (2018).