

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

FÁBIO GASPAROTTO BOAVENTURA

**MODELO DE SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO  
CONCEITUAL DE NAVIOS DE APOIO À PLATAFORMA,  
INCLUINDO PARÂMETROS DO BULBO**

Joinville

2016

FÁBIO GASPAROTTO BOAVENTURA

**MODELO DE SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO  
CONCEITUAL DE NAVIOS DE APOIO À PLATAFORMA,  
INCLUINDO PARÂMETROS DO BULBO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Naval no Centro de Joinville da Universidade Federal de Santa Catarina, Campus de Joinville.

Orientador: Prof. Dr. Thiago Pontin Tancredi

Joinville

2016

MODELO DE SÍNTESE E OTIMIZAÇÃO PARA O PROJETO  
CONCEITUAL DE NAVIOS DE APOIO À PLATAFORMA, INCLUINDO  
PARÂMETROS DO BULBO

FÁBIO GASPAROTTO BOAVENTURA

Esta Monografia foi julgada e aprovada como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Naval na Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Joinville.

Joinville, 6 de Julho de 2016.

Banca Examinadora:

---

Dr. Eng. Thiago Pontin Tancredi  
Presidente/Orientador

---

Dr. Eng. Lucas Weihmann  
Membro

---

Dr. Eng. Bernardo Luis Rodrigues de Andrade  
Membro

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais Maurílio e Inês, pelo amor, carinho e apoio incondicional que me proporcionaram durante toda a minha vida e principalmente no decorrer do desenvolvimento deste trabalho. Gostaria de agradecê-los ainda por serem essas pessoas maravilhosas que me inspiram a realizar coisas que nem mesmo eu acreditava que conseguiria.

Aos meus irmãos Marcelo e Marina, pelo companheirismo e carinho que me motivaram nos momentos difíceis a continuar seguindo em frente.

À toda minha família pelo suporte, carinho e por estarem sempre ao meu lado e me ajudaram tanto nesse longo caminho até aqui.

À minha namorada Talyta, por estar ao meu lado em todos os momentos, me incentivar, me acolher e aguentar a pressão junto comigo nos momentos difíceis do trabalho. E também gostaria de agradecê-la por ser essa companheira que foi durante o decorrer desses últimos meses e por me fazer rir e me alegrar nos momentos em que precisei.

Ao meu orientador Dr. Thiago Pontin Tancredi, pela paciência, compreensão, por seus conselhos, por sua dedicação incondicional e por compartilhar seus conhecimentos comigo tornado possível o desenvolvimento deste trabalho. Aqui deixo meu sincero agradecimento e também um convite para que futuramente possamos, quem sabe, realizar novos estudos.

Por fim, gostaria de agradecer aos meus amigos Lucas Ribeiro, Gustavo Duran, Vitor Polliseli, Antônio Neto, Lucas Arrigoni, Luis Paulo, Hermann Luis, Ricardo Dolci, Ronan Michels, Elpídio Faleiros, Janaína Ribas, Guilherme Becker por acreditarem em mim e mesmo aqueles que estão longe tenham feito dos meus anos na universidade sem dúvida os melhores anos da minha vida.

## RESUMO

O avanço da tecnologia e dos computadores permite que engenheiros e projetistas repensem a forma como desenvolvem seus projetos. Portanto, neste trabalho é apresentado um modelo de síntese e otimização para o projeto conceitual de navios de apoio à plataforma, incluindo a modelagem preliminar e simplificada do bulbo baseado em otimização multiobjetivo. A vantagem deste procedimento sobre os métodos convencionais de projeto é que ele permite explorar todo o espaço de soluções viáveis, e com isto obter a solução (ou soluções) ótima do ponto de vista dos critérios de projeto estabelecidos. A principal contribuição do presente trabalho, que se distancia dos trabalhos anteriores, é a utilização de dois conjuntos de variáveis de projeto. Uma vez definido os requisitos do armador que são a velocidade do navio e a capacidade de carga mínima a ser transportada, a metodologia considera como o primeiro conjunto de variáveis do projeto: o comprimento (L), boca (B), calado (T) e coeficiente de bloco ( $C_B$ ). O segundo utiliza o comprimento da embarcação (L), o coeficiente de bloco ( $C_B$ ) e os adimensionais L/B e B/T como variáveis de projeto. Além disso, a metodologia considera como variáveis de projeto do bulbo a área da seção transversal ( $A_{BT}$ ) e a altura do centro dessa área ( $h_B$ ). Os objetivos estabelecidos para o modelo de otimização foram a busca pela máxima capacidade de carga e mínima a resistência ao avanço. Desta forma são apresentados e comparados os resultados de ambos os modelos de otimização quanto ao esforço computacional necessário e também do ponto de vista de projeto de navios. Também são apresentados os resultados do processo de otimização hierarquizado (primeiro otimiza-se o casco, para depois otimizar o bulbo) e a otimização global. Por fim, os resultados são comparados com navios PSVs atualmente em operação e são propostas equações empíricas para navios de apoio à plataforma que permitem determinar as dimensões principais e o coeficiente de bloco em função da capacidade de carga requerida.

**Palavras-chave:** *Platform Supply Vessel* (PSV). Otimização. Projeto de navios. Bulbo

## ABSTRACT

The advancement of technology and computers allows engineers and designers to rethink the way they develop their projects. Therefore, this thesis presents a synthesis and optimization model for the conceptual design of platform supply vessels, including a preliminary and simplified bulb modeling based on multi-objective optimization. The advantage of this method over conventional design methods is that it allows to explore all the design space solutions, and thereby obtain the optimum solution (or solutions) based on the established design criteria. The main contribution of this thesis, which differs from previous scientific papers and thesis', is the use of two sets of design variables. Once defined the owner requirements that are the ship's speed and the minimum deadweight, the methodology considers as a first set of design variables: the length (L), breadth (B), draft (T) and block coefficient ( $C_B$ ). The second set of design variables are: the length of the vessel (L), the block coefficient ( $C_B$ ), the ratios L/B and B/T. Further, the methodology considers as the bulb design variables the cross-sectional area ( $A_{BT}$ ), and the height of the center of this area ( $h_B$ ). The objectives set for the optimization model were the search for the maximum deadweight and the minimum total ship resistance. Thus, the results of the two optimization models are presented and compared on the computational effort required and also from the standpoint of ship design. The results for hierarchical optimization process (first the hull is optimized, and then the bulb) and a global optimization process are also presented and compared. Finally, the results are compared with ships currently in operation and it is proposed empirical equations that allows to calculate the principal particulars and the block coefficient of a platform supply vessel based on its required deadweight.

**Keywords:** Platform Supply Vessel (PSV). Optimization. Ship design. Bulbous bow.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1- Arranjo típico de um navio do tipo PSV.....   | 23 |
| Figura 2 – Espiral de projeto. ....   | 24 |
| Figura 3 – Funcionamento dos algoritmos genéticos na forma de fluxograma.....   | 28 |
| Figura 4 – Principais tipos de bulbo. ....  | 29 |
| Figura 5 – Parâmetros geométricos do bulbo. ....  | 30 |
| Figura 6 – Gráfico que mostra a relação do volume ótimo do bulbo esférico em relação ao $C_p$ do navio. ....  | 32 |
| Figura 7 – Relação entre o volume e a profundidade do bulbo ótimo esférico. ....  | 33 |
| Figura 8 – Comprimento em função da boca dos navios semelhantes.....  | 36 |
| Figura 9 – Comprimento em relação ao pontal. ....   | 37 |
| Figura 10 – Boca em relação ao pontal. ....   | 38 |
| Figura 11- Boca em relação ao calado dos PSVs semelhantes.....  | 38 |
| Figura 12 – Calado em relação ao pontal. ....   | 39 |
| Figura 13 – Volume deslocado em função de $L \times B \times T$ .....   | 40 |
| Figura 14 – $C_b$ em função da capacidade de carga dos PSVs semelhantes. ....   | 40 |
| Figura 15 – Coeficiente de <i>outfit</i> em relação ao comprimento entre perpendiculares do navio. ....   | 44 |
| Figura 16 – Modelo de variáveis convencionais no modeFRONTIER®.....   | 59 |
| Figura 17 – Modelo de variáveis não convencionais no modeFRONTIER®.....   | 60 |
| Figura 18 – Distribuição da população inicial através da sequência de Sobol.....  | 65 |
| Figura 19 – Distribuição da população inicial através de uma sequência aleatória. ....  | 65 |
| Figura 20 – Etapas do trabalho na forma de fluxograma. ....   | 66 |
| Figura 21 – Convergência da fronteira de Pareto para o modelo de otimização com as variáveis convencionais. ....                                    | 70 |
| Figura 22 – Convergência da fronteira de Pareto para o modelo de otimização com as variáveis não convencionais.....                                 | 71 |
| Figura 23 – Comparativo entre as fronteiras de Pareto das variáveis convencionais e não convencionais com 30 gerações de indivíduos.....            | 72 |
| Figura 24 – Comparativo do comprimento (L) em função da boca (B) entre as soluções encontradas pelos modelos de otimização e navios existentes..... | 73 |
| Figura 25 – Sobreposição das soluções obtidas por otimização e navios existentes do comprimento em função do pontal. ....                           | 74 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 26 – Adimensional B/D de navios existentes e das soluções otimizadas. ....  | 75 |
| Figura 27 –Adimensional T/D das soluções otimizadas e dos navios semelhantes. ....   | 76 |
| Figura 28 – Comparativo entre as fronteiras de Pareto de ambos os modelos com navios existentes. ....  | 77 |
| Figura 29 – Efetividade das restrições no modelo de variáveis convencionais.....   | 78 |
| Figura 30 –Efetividade das restrições no modelo de variáveis não convencionais. ....   | 79 |
| Figura 31 – Efeitos das variáveis de projeto do modelo de variáveis convencionais no atributo capacidade de carga da embarcação. ....            | 80 |
| Figura 32 - Efeitos das variáveis de projeto do modelo de variáveis convencionais no atributo resistência total ao avanço da embarcação. ....    | 80 |
| Figura 33 - Efeitos das variáveis de projeto do modelo de variáveis não convencionais no atributo capacidade de carga da embarcação.....         | 81 |
| Figura 34 - Efeitos das variáveis de projeto do modelo de variáveis não convencionais no atributo resistência total ao avanço da embarcação..... | 82 |
| Figura 35 – Comparativo entre a otimização global e hierárquica.....   | 84 |
| Figura 36 – Variação da fronteira de Pareto com a variação do valor da restrição $\hat{\Omega}_n$ ....   | 86 |
| Figura 37 –Coeficiente de bloco em função de DWT para PSVs até 8.000 toneladas. ....   | 87 |
| Figura 38 – Comprimento em função de DWT para PSVs até 8.000 toneladas. ....   | 88 |
| Figura 39 – Boca em função do DWT para PSVs de até 8.000 toneladas. ....   | 89 |
| Figura 40 - Calado em função do DWT para PSVs de até 8.000 toneladas.....  | 90 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Carteira de encomendas de navios de apoio marítimo no Brasil.....  | 18 |
| Tabela 2 – Carteira de encomendas de navios de apoio marítimo mundial. ....   | 18 |
| Tabela 3- Parâmetros geométricos do navio e bulbo.....  | 30 |
| Tabela 4 – Parâmetros adimensionais para representação do bulbo. ....   | 31 |
| Tabela 5 – Limites de utilização do método de Holtrop e Mennen (1982). ....   | 48 |
| Tabela 6 – Relação entre as entidades do modelo de otimização e os nós utilizados pelo modeFRONTIER® para representa-las..... | 57 |
| Tabela 7 – Hiperespaço das dimensões principais do navio e parâmetros do bulbo.....   | 62 |
| Tabela 8 – Hiperespaço dos coeficientes de forma do navio. ....   | 62 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| PSV  | Platform Supply Vessel              |
| OSV  | Offshore Support Vessel             |
| MPSV | Multi-Purpose Support Vessel        |
| PLSV | Pipe Lay Support Vessel             |
| AHTS | Anchor Handling Tug Supply          |
| RSV  | Remote Operated Support Vessel      |
| DWT  | Deadweight                          |
| VCG  | Vertical Center of Gravity          |
| LCG  | Longitudinal Center of Gravity      |
| DoE  | Design of Experiments               |
| LCB  | Longitudinal Center of Buoyancy     |
| IMO  | International Maritime Organization |
| ABS  | American Bureau of Shipping         |
| MCP  | Motor de combustão principal        |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|              |  |                   |
|--------------|--|-------------------|
| L            | Comprimento entre perpendiculares              | [m]               |
| B            | Boca   | [m]               |
| T            | Calado   | [m]               |
| D            | Pontal   | [m]               |
| $C_B$        | Coeficiente de bloco                           |                   |
| $C_{WP}$     | Coeficiente do plano de linha d'água do navio  |                   |
| $C_P$        | Coeficiente prismático do navio                |                   |
| $C_M$        | Coeficiente da área de seção mestra do navio   |                   |
| $\Delta$     | Deslocamento                                   | [t]               |
| $\nabla$     | Volume deslocado                               | [m <sup>3</sup> ] |
| lwt          | Peso leve do navio                             | [t]               |
| dwt          | Capacidade de carga do navio                   | [t]               |
| $W_S$        | Peso de aço estrutural                         | [t]               |
| $W_M$        | Peso total de máquinas                         | [t]               |
| $W_O$        | Peso de <i>outfit</i>                          | [t]               |
| $W_{margin}$ | Peso de margens                                | [t]               |
| $W_{Hull}$   | Peso do casco do navio                         | [t]               |
| $W_{SS}$     | Peso da superestrutura                         | [t]               |
| $k$          | Coeficiente                                    |                   |
| E            | Numeral E de Watson e Gilfillian (1976)        |                   |
| $C'_B$       | Coeficiente de bloco corrigido                 |                   |
| $l_1$        | Comprimento da superestrutura                  | [m]               |
| $h_1$        | Altura da superestrutura                       | [m]               |
| $P_B$        | Potência total instalada                       | [kW]              |
| $C_O$        | Coeficiente de <i>outfit</i>                   |                   |
| $h_{DB}$     | Altura do teto do duplo fundo                  | [m]               |
| $VCG_O$      | Centro de gravidade vertical de <i>outfit</i>  | [m]               |
| $VCG_{SS}$   | Centro de gravidade vertical da superestrutura | [m]               |
| $VCG_M$      | Centro de gravidade vertical de máquinas       | [m]               |
| $VCG_{Hull}$ | Centro de gravidade vertical do casco do navio | [m]               |
| $VCG$        | Centro de gravidade vertical                   | [m]               |

|                              |  |                            |
|------------------------------|--|----------------------------|
| $LCG_{Hull}$                 | Centro de gravidade longitudinal do casco  | [m]                        |
| $LCB$                        | Centro longitudinal de flutuação   | [m]                        |
| $LCG_M$                      | Centro de gravidade longitudinal de máquinas   | [m]                        |
| $LCG_{SS}$                   | Centro de gravidade longitudinal da superestrutura   | [m]                        |
| $LCG_O$                      | Centro de gravidade longitudinal de <i>outfit</i>  | [m]                        |
| $LCG$                        | Centro de gravidade longitudinal   | [m]                        |
| $R_{Total}$                  | Resistência total ao avanço  | [kW]                       |
| $R_F$                        | Resistência de atrito calculada de acordo com o ITTC 1957  | [kW]                       |
| $1 + k$                      | Fator de forma que descreve a resistência viscosa do casco do navio em relação a resistência de atrito |                            |
| $R_{APP}$                    | Resistência de apêndices   | [kW]                       |
| $R_W$                        | Resistência de ondas   | [kW]                       |
| $R_B$                        | Resistência do bulbo   | [kW]                       |
| $R_{TR}$                     | Resistência da popa transom  | [kW]                       |
| $R_A$                        | Resistência de correlação navio-modelo   | [kW]                       |
| $c_3$                        | Coefficiente que determina a influência do bulbo na resistência de ondas                               |                            |
| $A_{BT}$                     | Área da seção transversal do bulbo   | [m <sup>2</sup> ]          |
| $h_B$                        | Altura do centro da área da seção transversal do bulbo   | [m]                        |
| $L_B$                        | Comprimento do bulbo à frente da perpendicular à vante do navio  | [m]                        |
| $F_{ni}$                     | Número de Froude baseado na imersão do bulbo   |                            |
| $P_b$                        | Medida da emersão do bulbo   | [m]                        |
| $\rho$                       | Densidade da água  | [t/m <sup>3</sup> ]        |
| $g$                          | Aceleração gravitacional   | [m/s <sup>2</sup> ]        |
| $\omega_n$                   | Frequência natural   | [rad/s]                    |
| $k$                          | Rigidez  | [(rad/s) <sup>2</sup> ·kg] |
| $m$                          | Massa  | [kg]                       |
| $I_L$                        | Momento de inércia longitudinal do navio   | [m <sup>4</sup> ]          |
| $C_{VPR}$                    | Coefficiente de volume do bulbo  |                            |
| $\omega_{n_{Bulbo}}^{Pitch}$ | Frequência natural do movimento de <i>pitch</i> do navio que inclui a influência do bulbo              | [rad/s]                    |
| $T_n^{Pitch}$                | Período natural do movimento de <i>pitch</i> do navio  | [s]                        |
| $\omega_n^{Pitch}$           | Frequência natural do movimento de <i>pitch</i> do navio   | [rad/s]                    |

|                              |   |                   |
|------------------------------|---|-------------------|
| $A_{WL}$                     | Área na linha d'água do navio   | [m <sup>2</sup> ] |
| $A_M$                        | Área da seção mestra do navio   | [m <sup>2</sup> ] |
| $\omega_{n_{Bulbo}}^{Heave}$ | Frequência natural do movimento de <i>heave</i> do navio que inclui a influência do bulbo | [rad/s]           |
| $\omega_n^{Heave}$           | Frequência natural do movimento de <i>heave</i> do navio                                  | [rad/s]           |
| $T_n^{Heave}$                | Período natural do movimento de <i>heave</i> do navio                                     | [s]               |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO .....  | 17 |
| 1.1 Objetivos .....   | 20 |
| 1.2 Organização do trabalho.....  | 20 |
| 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....  | 22 |
| 2.1 Navios do tipo PSV .....  | 22 |
| 2.2 Processo do projeto de navios .....   | 23 |
| 2.3 Otimização.....   | 25 |
| 2.4 Bulbo .....   | 28 |
| 2.5 Considerações finais.....   | 34 |
| 3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO .....  | 35 |
| 3.1 Análise de navios semelhantes .....   | 35 |
| 3.1.1 Adimensional L/B .....  | 36 |
| 3.1.2 Adimensional L/D.....   | 36 |
| 3.1.3 Adimensionais B/D e B/T .....   | 37 |
| 3.1.4 Adimensional T/D.....   | 39 |
| 3.1.5 Coeficiente de bloco.....   | 39 |
| 3.2 Métodos empíricos para o processo de otimização de navios do tipo PSV ..... | 41 |
| 3.3 Estimativa de pesos .....   | 41 |
| 3.3.1 Deslocamento.....   | 41 |
| 3.3.2 Peso leve.....  | 41 |
| 3.3.3 Peso estrutural de aço.....   | 41 |
| 3.3.4 Peso total de máquinas .....  | 42 |
| 3.3.5 Peso de <i>Outfit</i> .....   | 43 |
| 3.3.6 Peso de margens.....  | 44 |
| 3.4 Estimativa do pontal.....   | 45 |
| 3.5 Método para a estimativa da resistência total ao avanço.....                | 46 |

|   |    |
|---|----|
| 3.6 Estimativa da potência total instalada .....  | 48 |
| 3.7 Estimativa dos principais coeficientes de forma do navio .....                      | 49 |
| 3.8 Estabilidade transversal inicial .....  | 50 |
| 3.9 Centros verticais de gravidade (VCG) .....  | 51 |
| 3.10Centros longitudinais de gravidade (LCG) .....                                      | 52 |
| 3.11Método para a estimativa das frequências naturais de <i>Pitch e Heave</i> .....     | 53 |
| 3.12Considerações para a implementação do bulbo no modelo de otimização .....           | 56 |
| 3.13Modelos de otimização.....  | 56 |
| 3.14Ferramenta matemática .....   | 57 |
| 3.15Ferramenta comercial de otimização.....   | 57 |
| 3.15.1 Funções objetivo dos modelos .....   | 61 |
| 3.15.2 Restrições dos modelos de otimização .....                                       | 62 |
| 3.15.3 Algoritmo Genético .....   | 63 |
| 3.15.4 População de indivíduos iniciais (DoE).....                                      | 64 |
| 3.16Etapas de trabalho .....  | 66 |
| 3.17Considerações finais.....   | 66 |
| 4 RESULTADOS .....  | 68 |
| 4.1 Comparativo entres os modelos de otimização propostos.....                          | 68 |
| 4.2 Efetividade das restrições .....  | 77 |
| 4.3 Análise de sensibilidade .....  | 79 |
| 4.4 Otimização hierárquica versus otimização global .....                               | 82 |
| 4.5 Influência da restrição $\hat{\Omega}_n$ na fronteira de Pareto .....               | 85 |
| 4.6 Características típicas de PSVs com até 8.000 toneladas de capacidade de carga..... | 86 |
| 5 CONCLUSÃO .....   | 92 |
| 5.1 Conclusão do trabalho e considerações finais .....                                  | 92 |
| 5.2 Propostas para trabalhos futuros.....   | 93 |
| REFERÊNCIAS .....   | 94 |

|  |     |
|--|-----|
| APÊNDICE A – DADOS DOS PSVs CONSTRUÍDOS NO VALE DO ITAJAÍ.....   | 97  |
| APÊNDICE B – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA 30 GERAÇÕES COM O<br>MODELO DE VARIÁVEIS CONVENCIONAIS. ....    | 98  |
| APÊNDICE C – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA 30 GERAÇÕES COM O<br>MODELO DE VARIÁVEIS NÃO CONVENCIONAIS..... | 103 |

## 1 INTRODUÇÃO

A exploração de petróleo no Brasil é uma das atividades econômicas mais importantes do país. Após a descoberta da camada do pré-sal, houve grande crescimento da indústria petrolífera no Brasil, o que empregou mais unidades de perfuração e plataformas de exploração e produção, aumentando a demanda por atividades de apoio a essas unidades de exploração e produção de petróleo na costa brasileira.

Para suprir essas atividades de apoio marítimo, os navios do tipo *platform support vessel* (PSV), que segundo White (2003) são um dos principais navios de apoio marítimo, tem se desenvolvido ao longo dos anos.

No Brasil, segundo o Sindicato Nacional da Indústria da Construção e Reparação Naval e Offshore (SINAVAL, 2015a), foi lançado em 2008 o Programa de Renovação da Frota de Apoio Marítimo com intuito de contratar 146 novos navios de apoio *offshore* com a exigência de construção em estaleiros brasileiros.

Ainda segundo o SINAVAL (2015a) existe grande interesse de empresas internacionais em investir no mercado da indústria naval no Brasil pois, apesar da crise, a indústria naval brasileira de construção de navios de apoio marítimo permanece aquecida.

Um relatório, elaborado pelo SINAVAL (2015b) sobre o cenário da construção naval brasileira para o primeiro semestre de 2015, mostra que um total de 32 navios de apoio marítimo foram encomendados e já estão em construção. Desse total, 14 navios são do tipo PSV, o que representa 42,75% do total de encomendas, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Carteira de encomendas de navios de apoio marítimo no Brasil.

| Estaleiro         | Local               | Tipo de Navio                         | Quantidade |
|-------------------|---------------------|---------------------------------------|------------|
| Vard Niterói      | Niterói - RJ        | PLSV - <i>Pipe Lay Support Vessel</i> | 2          |
| Aliança           | Niterói - RJ        | PSV                                   | 2          |
| Eisa              | Rio de Janeiro - RJ | PSV                                   | 4          |
| São Miguel        | São Gonçalo - RJ    | PSV                                   | 4          |
| Wilson Sons       | Santos - SP         | OSV                                   | 4          |
| Oceana            | Navegantes - SC     | AHTS                                  | 4          |
| Keppel Singmarine | Navegantes - SC     | PSV 4500 Fluid Carrier                | 1          |
| Keppel Singmarine | Navegantes - SC     | PSV 4500 General Cargo                | 1          |
| Navship           | Navegantes - SC     | MPSV                                  | 8          |
| Detroit           | Itajaí - SC         | PSV                                   | 2          |
|                   |                     | <b>TOTAL</b>                          | <b>32</b>  |

Fonte: SINAVAL (2015b).

Já a nível mundial, ainda segundo o SINAVAL (2015b), o número de PSVs em construção sobe para 397 navios, de um total de 763 navios de apoio marítimo, o que representa 52% dos navios de apoio marítimo em construção, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2 – Carteira de encomendas de navios de apoio marítimo mundial.

| Tipo de Navio               | Quantidade |
|-----------------------------|------------|
| PSV                         | 397        |
| AHTS                        | 248        |
| PLSV                        | 18         |
| MPSV                        | 75         |
| RSV e apoio a mergulhadores | 25         |
| <b>TOTAL</b>                | <b>763</b> |

Fonte: SINAVAL (2015b).

Os dados apresentados nas Tabela 1 e Tabela 2 evidenciam a grande importância dos navios do tipo PSV, não só no Brasil, mas também a nível mundial. Além disso, grande parte dos estaleiros de construção de navios de apoio marítimo no Brasil estão localizados na região do vale do Itajaí, como é o caso dos estaleiros Navship, Detroit, Oceana e Keppel Sigmarine que representam, juntos, 43,75% da produção de navios de apoio do Brasil.

A performance desses navios pode refletir na produtividade e competitividade da indústria petrolífera brasileira. Portanto, em uma busca por mais competitividade tecnológica e, buscando um diferencial econômico, é de extrema importância o desenvolvimento nacional

de projetos de navios do tipo PSV, possibilitando a aplicação e desenvolvimento da indústria local.

O projeto conceitual é uma das etapas do projeto de navio, o qual tradicionalmente é desenvolvido de forma iterativa utilizando o processo em espiral proposto por Evans (1959). Nesta fase são determinadas as características principais do navio, como por exemplo, comprimento, boca, calado, deslocamento, capacidade de carga e potência instalada (KISS, 1980). Porém, esse processo visa obter, principalmente, uma solução viável dentro de um conjunto de soluções possíveis e, segundo Tancredi e Andrade (2013), em geral, resulta em uma solução que satisfaz os requisitos de projeto, cujo desempenho depende da experiência do engenheiro.

Este trabalho se insere justamente nesse contexto, pois propõe o desenvolvimento de modelos de síntese e otimização para o projeto conceitual de embarcações do tipo PSV que, além de incluir parâmetros clássicos de uma embarcação, também inclui dois parâmetros do bulbo, os quais são definidos ainda na fase preliminar do projeto.

Dentre os trabalhos relacionado que apresentam modelos de otimização para o projeto conceitual de navios destacam-se o trabalho de Tancredi e Andrade (2013), Oliveira et al., (2013), Monteiro e El Didi (2013), Tancredi et al. (2014), Ribeiro et al. (2012) e Xuebin (2009). Além desses, outros trabalhos como Amaral (2016), Weiss et al. (2012), Tancredi (2008) e Augusto (1996) também apresentam temas relacionados a otimização ou projeto de navios.

Existem 2 contribuições que diferem deste trabalho em relação aos trabalhos anteriormente citados. A primeira, refere-se a utilização de dois conjuntos de variáveis. O primeiro modelo utiliza as dimensões principais ( $L$ ,  $B$  e  $T$ ), juntamente com o coeficiente de bloco ( $C_B$ ). O segundo utiliza o comprimento da embarcação ( $L$ ) e os adimensionais  $L/B$ ,  $B/T$  e  $C_B$  como variáveis de projeto. Além disso, são incluídos dois parâmetros que descrevem o bulbo, a área da seção transversal ( $A_{BT}$ ) e a altura do centro dessa área ( $h_B$ ) no conjunto de variáveis de projeto

A segunda contribuição refere-se ao processo de otimização hierárquico. Neste processo compara-se o resultado obtido utilizando um único processo de otimização (que considera todas as variáveis envolvidas); com os resultados obtidos utilizando-se dois processos de otimização, onde primeiro é otimizado o casco da embarcação para, só então, otimizar o bulbo.

## 1.1 Objetivos

O objetivo geral é desenvolver um modelo de otimização para o projeto conceitual de embarcações do tipo PSV com a modelagem preliminar do bulbo que busque minimizar a resistência total ao avanço e maximizar a capacidade de carga (DWT).

Para a realização deste objetivo deve-se:

- Desenvolver uma metodologia para aplicação de técnicas de otimização ao projeto conceitual de navios do tipo PSV.
- Desenvolver um modelo de síntese que utiliza como variáveis de projeto: o comprimento ( $L$ ), a boca ( $B$ ), o calado ( $T$ ) e o coeficiente de bloco ( $C_B$ ) e como variáveis do bulbo: a área da seção transversal ( $A_{BT}$ ) e a altura do centro dessa área ( $h_B$ ).
- Desenvolver um segundo modelo de síntese que utiliza como variáveis de projeto: o comprimento ( $L$ ), o adimensional ( $L/B$ ), o adimensional ( $B/T$ ) e o coeficiente de bloco ( $C_B$ ) e como variáveis do bulbo: a área da seção transversal ( $A_{BT}$ ) e a altura do centro dessa área ( $h_B$ ).
- Fazer uma análise de embarcações semelhantes para definir o hiperespaço das características da embarcação e do bulbo. E assim, definir as restrições a serem incluídas nos modelos de otimização.
- Fazer uma análise da convergência das fronteiras de Pareto dos diferentes modelos desenvolvidos.
- Comparar os procedimentos de otimização hierárquico e global.
- Comparar os resultados obtidos com embarcações já existentes a fim de verificar a adequação dos modelos construídos.
- Obter equações que representam a geometria típica de um navio do tipo PSV otimizado para maximizar a capacidade de carga e minimizar a resistência ao avanço.

## 1.2 Organização do trabalho

Esta seção faz uma breve descrição dos capítulos subsequentes que compõem essa monografia, conforme segue:

- Capítulo 2 – Fundamentação teórica: Neste capítulo são descritos os principais conceitos para o desenvolvimento deste trabalho. São abordados tópicos acerca de desenvolvimento de projetos de navio, otimização e bulbo.
- Capítulo 3 – Metodologia de desenvolvimento: O objetivo deste capítulo é apresentar a metodologia empregada no desenvolvimento do trabalho, discutindo-se os métodos, as ferramentas, os procedimentos e as normas utilizadas na realização do trabalho.
- Capítulo 4 – Resultados: Os principais resultados obtidos são apresentados neste capítulo. Os dois modelos de otimização propostos são discutidos quanto a convergência da fronteira de Pareto. Faz-se também, neste capítulo, uma comparação entre a otimização hierarquizada e a otimização global.
- Capítulo 5 – Conclusão: São apresentadas as conclusões, contribuições do trabalho e as perspectivas futuras deste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica, bem como os principais conceitos para o desenvolvimento desse trabalho. O capítulo está estruturado em seções que reúnem os assuntos de navios do tipo *Platform Supply Vessel* (PSV), o processo do projeto de navios, otimização e conceitos básicos sobre bulbo. Cada tópico aqui descrito representa um conteúdo vasto e extenso, portanto apresenta-se aqui as informações e trabalhos mais relevantes. O leitor não deve limitar-se aos conceitos aqui abordados.

### 2.1 Navios do tipo PSV

Os navios do tipo PSV são navios destinados ao apoio de plataformas de exploração e produção de petróleo, tendo como, objetivo promover o abastecimento com água potável, alimentos, combustíveis, equipamentos, produtos químicos para atividades especializadas, transportar tripulantes, e por fim, retornar a sua base de operações carregado com resíduos, como lixo e esgoto. Além disso, navios do tipo PSV podem ter como funções secundárias missões de combate a incêndio, regaste e salvamento em caso de acidente durante as atividades de exploração e produção do petróleo em alto mar (WHITE, 2003).

O comprimento de um PSV pode variar de 60 m até pouco mais de 100 m (CHAME, 2014) e segundo White (2003) o arranjo geral deste tipo de embarcação é bastante padronizado ao redor do mundo. Usualmente, a superestrutura se localiza a vante e há um grande *deck* de trabalho a ré, como pode ser visto pela Figura 1. O projeto de PSV's pode variar de acordo com as condições de tempo da região a ser servida e distância da base até as plataformas de petróleo (WHITE, 2003). No Brasil verifica-se condições de mar bastante diferentes daquelas encontradas ao redor do mundo, como por exemplo, um intenso *swell* e correntezas que podem atingir até 4 nós (TANCREDI et al., 2012), fazendo com que os projetos de PSV para servirem a costa brasileira devem considerar não só o comportamento no mar desses navios durante seu deslocamento entre a base de operações e a plataforma, mas também seu comportamento no mar durante o período que o navio fica atracado na plataforma de exploração para carga e descarga, por exemplo.

Figura 1- Arranjo típico de um navio do tipo PSV.



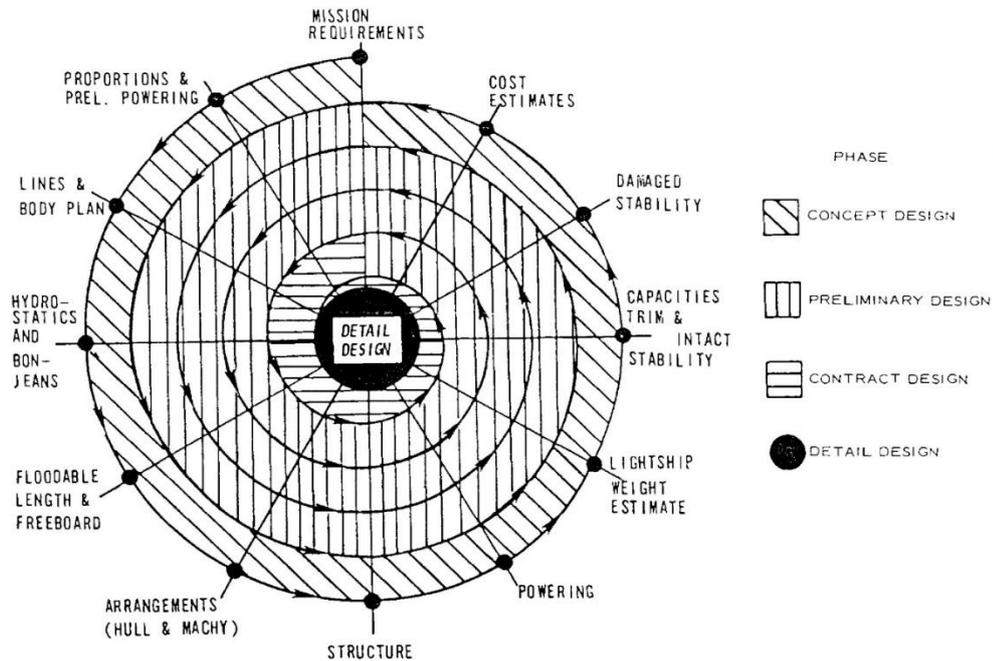
Fonte: White (2003, p. 11).

## 2.2 Processo do projeto de navios

O processo de projeto de navios é o conjunto das atividades que envolvem a criação de desenhos, especificações, determinação das dimensões principais, capacidade de carga e outros dados necessários para a construção (GALE, 2003). O principal objetivo desse processo é satisfazer as exigências do armador.

Tradicionalmente o projeto de navios é feito de forma sequencial e iterativa como sugere Evans (1959). No processo tradicional, o projeto do navio é dividido em etapas (como mostra a Figura 2) de maneira lógica e sequencial, pois acredita-se que dessa forma haja uma rápida convergência para a solução final, refinada e equilibrada representada pelo centro da espiral de projeto (EVANS, 1959). Além disso, Gale (2003) argumenta que a natureza do trabalho a ser feito, a quantidade de pessoas participantes, as habilidades de projeto requeridas, o nível de detalhe do projeto e outras características mudam com o tempo. Portanto, a subdivisão em etapas facilita o desenvolvimento e progresso do projeto.

Figura 2 – Espiral de projeto.



Fonte: Kiss (1980, p. 2).

Segundo Kiss (1980) as etapas de projeto, que vão desde a análise dos requisitos até o projeto detalhado, podem ser divididas em:

- *Projeto conceitual* – É a etapa inicial do projeto do navio, ou seja, a primeira volta na espiral de projeto, a qual traduz os requisitos em características de engenharia naval. Essencialmente, determina-se nessa etapa a viabilidade do projeto e algumas características do navio como suas dimensões principais, coeficientes de forma e potência ou então conjuntos de alternativas que cumprem os requisitos de velocidade, autonomia e capacidade de carga, por exemplo.
- *Projeto preliminar* – Nessa etapa as características principais do navio são refinadas, o que no final resulta em uma definição precisa de um navio que satisfaz os requisitos. Além disso, é nesta etapa que se forma a base para o desenvolvimento dos planos de contrato e especificações.
- *Projeto contratual* – Nesse estágio produz-se um conjunto de planos e especificações que fazem parte integral do documento contratual. Engloba mais algumas voltas na espiral de projeto, o que refina ainda mais o projeto preliminar. Algumas características, como a potência, baseada em experimentos em tanques de prova, e o uso de diferentes tipos de aços são estudados.

- *Projeto detalhado* – É a fase final do projeto, na qual se contempla o desenvolvimento dos planos de construção do navio e instalação de equipamentos. Deste ponto em diante o produto do engenheiro naval, ou seja, as características do navio, não devem mais ser alteradas ou corrigidas.

Como mostrado pela Figura 2, a etapa de projeto conceitual representa a primeira volta na espiral de projeto, as outras etapas são representadas por uma ou mais voltas na espiral. Evans (1959) diz que esse processo deve ocorrer em passos sequenciais cada qual lidando com uma tarefa em particular. Ao final desses passos, os resultados são analisados, caso não sejam balanceados e/ou viáveis, inicia-se uma nova iteração.

No entanto, Gale (2003) argumenta que, na prática, esse não é um processo sequencial, a menos que o projeto seja inteiramente desenvolvido por uma única pessoa. E mesmo assim, os passos não serão feitos em uma ordem pré-estabelecida mas, ao invés disso, o engenheiro naval irá pular de um ponto na espiral a outro conforme problemas são encontrados.

O método tradicional de projeto é uma abordagem de análise, cujo objetivo é satisfazer os requisitos de projeto ou requisitos do armador. Supondo que em um certo projeto existam 10 requisitos e cada requisito possa assumir 10 valores definidos, existiriam  $10^{10}$  diferentes combinações de navios conceitos possíveis. Se cada navio conceito representasse uma volta na espiral de projeto e o engenheiro demorasse 1s para realizar essa volta, o tempo total para completar o projeto seria de  $10^{10}$ s, ou seja, aproximadamente 320 anos (SILVA, 2007 apud TANCREDI, 2008, p. 33).

Portanto, como argumenta Tancredi (2008), essa abordagem só é viável quando se analisa um número bastante restrito de casos; do contrário a abordagem utilizando métodos de otimização torna-se mais interessante e racional, já que esta reduz de maneira substancial o tempo para se encontrar a solução ótima do problema. Assim o autor sugere resolver o problema do projeto conceitual de uma embarcação por meio da solução de um modelo matemático que descreve os atributos desempenho da embarcação como funções das variáveis que descrevem a eventual solução de projeto (TANCREDI, 2008).

### **2.3 Otimização**

Em problemas de engenharia, como no projeto de um navio, um carro ou um avião, existe sempre uma busca que visa melhorar, por exemplo, o desempenho, a eficiência,

minimizar gastos e/ou maximizar lucros. Porém, usualmente é impossível desenvolver um produto no qual todos os parâmetros desejados sejam os melhores possíveis. Na grande maioria das vezes, a melhora de um atributo de desempenho vai implicar no detrimento de outro.

Além disso, quanto maior o número de parâmetros a serem considerados no projeto, mais difícil é para que o engenheiro consiga abordá-los de forma eficiente afim de obter uma solução ótima ou um conjunto de soluções ótimas.

Um problema clássico de otimização dentro da engenharia naval pode ser visto no projeto de navios, onde muitas vezes é necessária uma maior capacidade de carga em conjunto com uma maior velocidade de serviço, o que conseqüentemente requer baixa resistência ao avanço.

Assim, o processo de otimização tem um importante papel dentro dos problemas de engenharia, pois ele é um processo sistemático que busca a melhor solução ou conjunto de soluções, denominado fronteira de Pareto, dentre as soluções viáveis de forma automática e dirigida (TANCREDI, 2008).

Segundo Augusto (1996), os procedimentos de otimização permitem ao engenheiro considerar uma faixa maior de possibilidades para o projeto. Esses procedimentos são métodos numéricos de busca do melhor conjunto de soluções possíveis. No caso de um problema com múltiplos objetivos, obtém-se uma a fronteira ótima do espaço onde não se pode mais melhorar um dos objetivos sem que o outro seja prejudicado.

O conjunto de soluções ótimas é aquele que não é dominado por nenhuma outra solução no espaço de projeto, ou seja, seus valores são melhores (ou iguais) em todos os objetivos. Além disso, se as soluções se encontram em um espaço contínuo e é possível traçar uma curva então, essa curva é denominada fronteira de Pareto. Quando a importância dos objetivos é desconhecida, todas as soluções da fronteira de Pareto têm o mesmo nível de importância (TANCREDI, 2008).

Os métodos para a solução de problemas de otimização variam de acordo com a ferramenta de busca utilizada. Segundo Goldberg (1989), existem três métodos principais de busca: baseado em Cálculo, enumerativo e aleatório.

O método de busca baseado em Cálculo pode ser dividido em dois, o direto e o indireto. O método indireto, dada uma função objetivo sem restrições, inicia-se a busca por pontos de máximo e/ou mínimo se restringindo a pontos onde a derivada das funções são iguais a zero em todas as direções. Já o método direto realiza sua busca se movimentando na função de acordo com o gradiente local, ou seja, se a busca é por um ponto de máximo então a movimentação acontecerá na direção do gradiente crescente. O método de busca baseado em cálculo é também

conhecido como método das derivadas e sua principal desvantagem é a necessidade da existência de derivadas na função objetivo, o que nem sempre se aplica a problemas reais de engenharia, além disso, sua aplicação se limita a problemas mono-objetivo. (GOLDBERG, 1989).

A ideia por trás do método enumerativo é bastante simples, conforme explica Goldberg (1989), dentro de um espaço finito de busca ou de um espaço infinito discretizado, o algoritmo avalia valores da função objetivo em todos os pontos do espaço. No entanto, esse método é extremamente ineficiente quando o espaço de pontos é muito grande, o que acontece na maioria dos problemas de engenharia naval.

Por fim, existem os métodos aleatórios de busca que, segundo Goldberg (1989), a longo prazo se tornarão tão obsoletos quanto os métodos enumerativos. Porém, existem métodos chamados de quasi-aleatórios, como os algoritmos genéticos, que utilizam ferramentas aleatórias em uma busca altamente exploratória. Além disso, Goldberg (1989) argumenta que os algoritmos genéticos se destacam em quatro pontos fundamentais:

- Os algoritmos genéticos trabalham com uma codificação dos parâmetros e não com os próprios parâmetros;
- Busca uma população de pontos e não um único ponto;
- Utiliza informações da função objetivo e não derivadas;
- Utilizam regras probabilísticas e não determinísticas.

Algoritmos genéticos são baseados no conceito da seleção natural Darwinista, ou seja, a partir de uma população inicial de indivíduos, as soluções evoluem através de operadores genéticos até convergirem para uma solução ou população de soluções (TANCREDI, 2008).

Os principais operadores genéticos e suas principais características segundo Tancredi (2008) são:

- **Seleção para reprodução:** é processo de seleção dos indivíduos com a melhor aptidão para sobreviver e, são usados para gerar um ou mais descendentes na próxima geração. Dentre as diversas formas de seleção destacam-se a seleção por torneio, seleção proporcional, seleção por ranking e seleção por sorteio. Mas em última instância baseia-se em selecionar os “melhores” indivíduos com base nos critérios estabelecidos para o projeto.

- **Cruzamento:** esse procedimento consiste basicamente em selecionar duas soluções (pais) para produzir novas soluções (filhas). As soluções pais são escolhidas após o processo de seleção.
- **Mutação:** é uma das maneiras dos algoritmos genéticos explorarem todo o espaço de busca, pois esse operador gera uma mutação aleatória em uma pequena parcela dos indivíduos.
- **Elitismo:** o elitismo consiste basicamente em transferir as melhores soluções para as próximas gerações de forma automática, com o objetivo de não se deteriorar as melhores soluções no decorrer das gerações.

Os algoritmos genéticos utilizam os operadores genéticos e geram iterativamente um conjunto de soluções até que sejam encontradas soluções aceitáveis ou que satisfaçam um critério de parada. O fluxograma apresentado na Figura 3 representa o funcionamento destes algoritmos.

Figura 3 – Funcionamento dos algoritmos genéticos na forma de fluxograma.



Fonte: Tancredi (2008, p. 36).

## 2.4 Bulbo

Os bulbos são saliências projetadas abaixo da linha d'água localizadas na proa do navio. Historicamente, era usada como arma por embarcações militares que visavam danificar

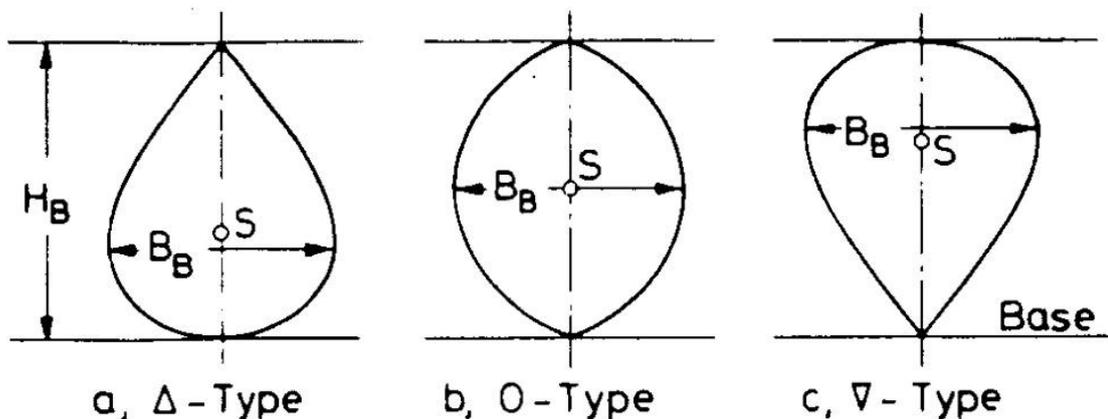
outras embarcações por meio de colisões frontais. No entanto, a marinha dos EUA, constatou por meio de testes com navios de guerra, que os navios que possuíam tal saliência tinham menor resistência ao avanço. Geralmente, os bulbos mais tradicionais têm um formato arredondado (SCHNEEKLUTH; BERTRAM, 1998).

De acordo com Kracht (1978) o bulbo atenua o sistema de geração de ondas na proa do navio, uma vez que ele gera padrões de ondas à frente das ondas geradas pela proa do navio. Isso faz com que os padrões de onda tenham uma diferença de fase, que quando bem dimensionado provoca um sistema de ondas mutuamente destrutivo. Ou seja, o padrão de ondas gerado pelo bulbo pode anular parcialmente ou totalmente, dependendo da amplitude de onda, o padrão de ondas gerado pela proa da embarcação. Isso faz com que haja uma redução na parcela de resistência de ondas, levando a uma redução da resistência total ao avanço do navio.

Além disso, Kracht (1978) diz que a posição do bulbo ocasiona a diferença de fase entre os padrões de onda e que o seu volume está relacionado com a amplitude de onda. Portanto, o efeito benéfico causado pelo bulbo depende do seu tamanho, posição e formato.

Para uma adequada apresentação das propriedades hidrodinâmicas do bulbo é necessário sistematizar, por meios de parâmetros geométricos, os diferentes formatos de bulbos existentes (KRACHT, 1978). Assim, utilizando a área da seção transversal ( $A_{BT}$ ) do bulbo na perpendicular a vante (FP) como o critério principal, o autor classifica três principais tipos de bulbo, o tipo Delta ( $\Delta$ ), o tipo O (0) e o tipo Nabla ( $\nabla$ ) que podem ser vistos na Figura 4a, b e c, respectivamente.

Figura 4 – Principais tipos de bulbo.

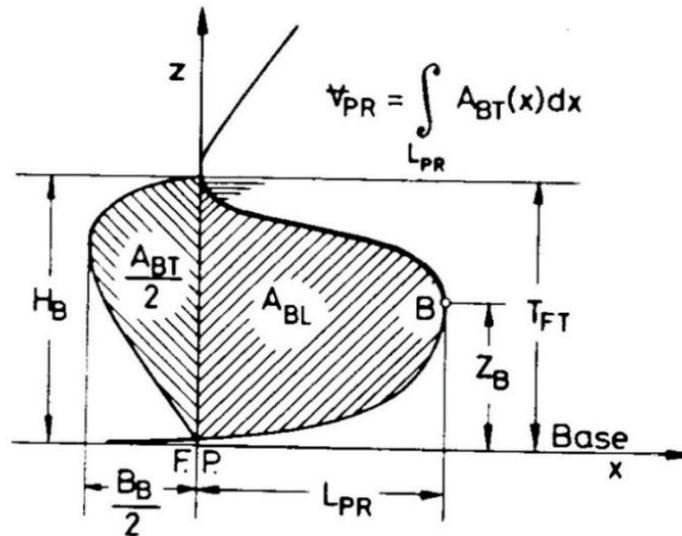


Fonte: Kracht (1978, p. 198).

Além dessas classificações, o autor sugere que seis parâmetros são suficientes para traçar a forma do bulbo para todos os casos práticos (KRACHT, 1978). Estes parâmetros, advêm de

parâmetros quantitativos geométricos do bulbo, que podem ser vistos pela Figura 5, normalizados pelas dimensões principais do navio, no qual ele está inserido. Na Figura 5 os parâmetros geométricos a esquerda do eixo z descrevem a seção transversal do bulbo e os parâmetros a direita descrevem a seção longitudinal.

Figura 5 – Parâmetros geométricos do bulbo.



Fonte: Kracht (1978, p. 199)

Os parâmetros geométricos do bulbo e do navio que são utilizados para derivar os parâmetros de bulbo que são apresentados e descritos na Tabela 3.

Tabela 3- Parâmetros geométricos do navio e bulbo.

| Parâmetro geométrico | Descrição  |
|----------------------|--|
| $A_{BT}$             | Área da seção transversal do bulbo na perpendicular de vante, $m^2$ .                                |
| $A_{BL}$             | Área da seção longitudinal do bulbo na linha de centro e a frente da perpendicular de vante, $m^2$ . |
| $B_B$                | Boca máxima da área do bulbo $A_{BT}$ , m.   |
| $H_B$                | Altura máxima da área da seção transversal do bulbo $A_{BT}$ , m.                                    |
| $L_{PR}$             | Comprimento do bulbo a frente da perpendicular de vante, m.  |
| $Z_B$                | Altura em relação a linha de base do ponto mais à frente do bulbo, m                                 |
| $V_{PR}$             | Volume do bulbo a frente da perpendicular de vante, $m^3$ .  |
| $T_{FP}$             | Calado do navio na perpendicular de vante, m.  |
| $L_{PP}$             | Comprimento entre perpendiculares do navio, m.   |

| Parâmetro geométrico | Descrição                                       |
|----------------------|---|
| $B_{MS}$             | Boca do navio na seção mestra, m.               |
| $A_{MS}$             | Área da seção mestra do navio, m <sup>2</sup> . |
| $V_{WL}$             | Volume deslocado do navio, m <sup>3</sup> .     |

Fonte: O autor (2016).

Por fim, os seis parâmetros necessários para representar a forma do bulbo, segundo Kracht (1978), estão apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros adimensionais para representação do bulbo.

| Parâmetro adimensional            | Descrição  |
|-----------------------------------|--|
| $C_{BB} = \frac{B_B}{B_{MS}}$     | Parâmetro de boca, é a boca máxima $B_B$ da área da seção transversal do bulbo $A_{BT}$ na perpendicular de vante dividida pela boca na seção mestra do navio $B_{MS}$ . |
| $C_{LPR} = \frac{L_{PR}}{L_{PP}}$ | Parâmetro de comprimento, é o comprimento do bulbo à frente da perpendicular de vante $L_{PR}$ dividido pelo comprimento entre perpendiculares do navio $L_{PP}$ .       |
| $C_{ZB} = \frac{Z_B}{T_{FP}}$     | Parâmetro de profundidade, é a profundidade do ponto mais à frente do bulbo em relação a linha de base dividido pelo calado do navio na perpendicular de vante           |
| $C_{ABT} = \frac{A_{BT}}{A_{MS}}$ | Parâmetro de seção transversal, é a área seção transversal do bulbo na perpendicular de vante dividida pela área da seção mestra do navio.                               |
| $C_{ABL} = \frac{A_{BL}}{A_{MS}}$ | Parâmetro lateral, é a área da seção longitudinal do bulbo na linha de centro $A_{BL}$ dividida pela área da seção mestra do navio $A_{MS}$ .                            |
| $C_{VPR} = \frac{V_{PR}}{V_{WL}}$ | Parâmetro volumétrico, é o volume do bulbo a frente da perpendicular de vante $V_{PR}$ dividido pelo volume deslocado do navio $V_{WL}$ .                                |

Fonte: O autor (2016).

Deve-se ressaltar que a boca máxima da área da seção transversal do bulbo  $A_{BT}$ , não é, necessariamente, a boca máxima do corpo do bulbo, esta pode se encontrar antes da perpendicular de vante, por motivos hidrodinâmicos, como explica Kracht (1978). O volume  $V_{PR}$  é um volume nominal, ou seja, é diferente do volume total do bulbo  $V_{Btot}$ . O último é dado pela soma dos volumes  $V_{PR}$  e o volume de *fairing*  $V_F$ , que resulta do encaixe do bulbo com o casco da embarcação.

A partir desses conceitos apresentados, Kracht (1978) distingue os bulbos em aditivo e implícito. O primeiro aumenta o volume deslocado do navio pelo volume total do bulbo  $V_{Btot}$  fazendo com que as curvas de áreas seccionais do navio original permaneçam inalteradas. Já para os bulbos implícitos, seu volume total  $V_{Btot}$  é parte integrante do volume deslocado do

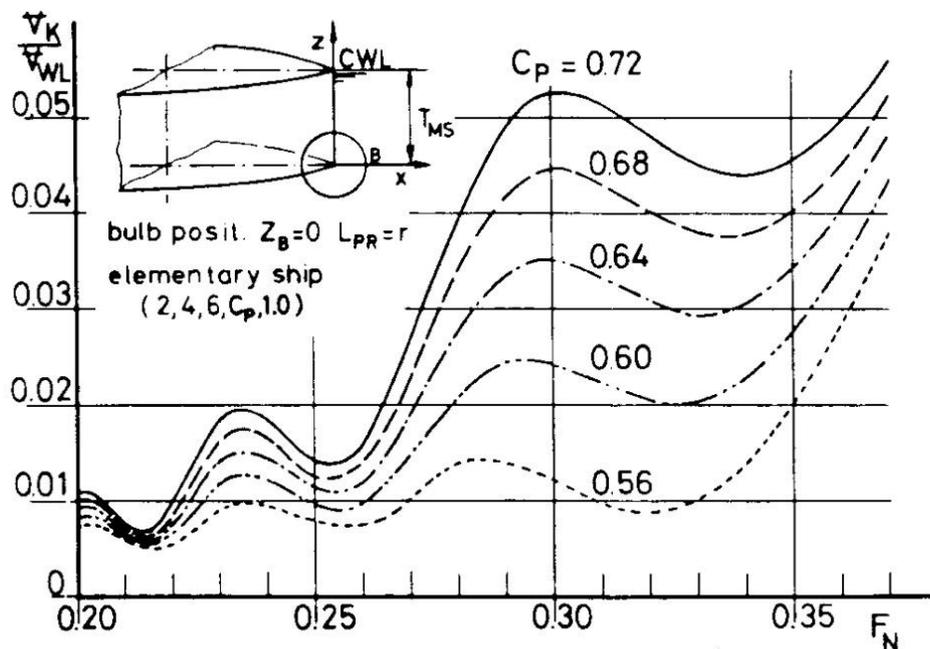
navio, assim, neste caso específico, a curva de áreas seccionais do navio original é alterada pela presença do bulbo.

Outro aspecto importante dos parâmetros adimensionais de bulbo é que três deles, os parâmetros de boca, comprimento e profundidade, são lineares e segundo Kracht (1978) podem ser facilmente variados durante a fase do projeto conceitual.

Apresentados os conceitos que definem o traçado do bulbo, pode-se avaliar a influência dos principais parâmetros do navio no tamanho e no efeito de interferência do bulbo. Baseado na teoria linear, Kracht (1978) mostra que, com o aumento do coeficiente prismático  $C_P$  ou do coeficiente de bloco  $C_B$  do navio, o volume do bulbo esférico ótimo, ou seja, aquele que minimiza os efeitos de resistência de ondas, aumenta como mostra a Figura 6.

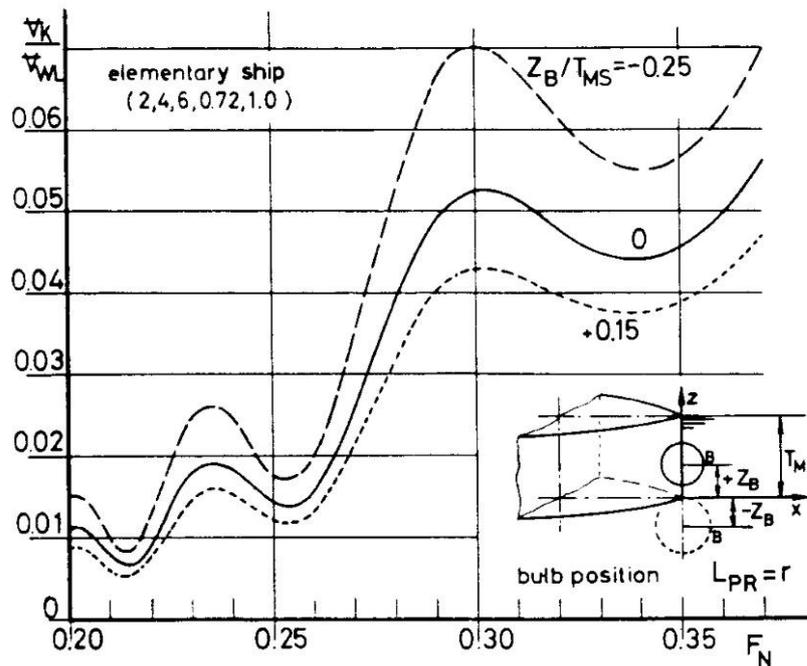
Similarmente, a profundidade do bulbo em relação a linha de base apresenta a mesma tendência, ou seja, quanto mais profundo, maior deve ser volume do bulbo esférico ótimo, mantendo-se um mesmo número de Froude como pode ser visto pela Figura 7.

Figura 6 – Gráfico que mostra a relação do volume ótimo do bulbo esférico em relação ao  $C_P$  do navio.



Fonte: Kracht (1978, p. 202).

Figura 7 – Relação entre o volume e a profundidade do bulbo ótimo esférico.



Fonte: Kracht (1978, p. 202).

Analisando as Figura 6 e Figura 7 nota-se que a velocidade do navio tem uma enorme influência no volume ótimo do bulbo. Essa dependência do volume do bulbo em relação a velocidade do navio, o coeficiente de bloco e a posição do bulbo são, segundo Kracht (1978), bastante úteis na fase de projeto. Além disso, Kracht (1978) afirma que a relação de boca por calado do navio  $\frac{B_{MS}}{T_{MS}}$  tem grande influência no efeito de interferência, no volume do bulbo e no parâmetro de profundidade  $C_{ZB}$ .

Ainda, Kracht (1978) sugere que os parâmetros principais do navio a serem levados em consideração no dimensionamento do bulbo, na fase preliminar de projeto, sejam o coeficiente de bloco ou coeficiente prismático e a relação de boca por calado, uma vez que outros parâmetros, que também exercem influência sob o bulbo, podem ser desconhecidos nesta fase.

De acordo com o que foi estudado, pode-se concluir que o bulbo altera o fluxo de água na proa da embarcação, o que gera padrões de ondas destrutivas em relação as ondas geradas pelo casco do navio e por isso existe uma redução da resistência ao avanço. Além disso, acredita-se que o bulbo também reduza os efeitos da resistência viscosa do navio, visto que ele suaviza o escoamento na proa. Segundo Schneekluth e Bertram (1998) o bulbo também tem influência em várias outras características do navio como o comportamento no mar (*seakeeping*), habilidade de manter seu curso, manobrabilidade e resistência em mares agitados.

Além disso, A influência do bulbo no comportamento no mar de uma embarcação é algo pouco estudado, como pode ser visto em Zimmermann (2015), motivando a inclusão desta análise neste trabalho.

## **2.5 Considerações finais**

Neste capítulo, foi abordado a conceitos e a importância do projeto de navios do tipo PSV, especialmente os projetos que levam em conta as condições de mar da costa brasileira. Abordou-se também o processo tradicional do projeto de navios, comparando-o com técnicas de otimização, mostrando a viabilidade destas quando se trata de um projeto que busca otimizar um conjunto grande parâmetros. Dentre as técnicas de otimização existentes, foi destacado os algoritmos genéticos, que se mostram adequados para uma busca exploratória de soluções ótimas para problemas de engenharia naval. E finalmente, discutiu-se neste capítulo a parametrização dos bulbos, que são incluídos no modelo de síntese e otimização para projeto conceitual de PSV, proposto por este trabalho.

O próximo capítulo apresenta a metodologia empregada para o desenvolvimento do trabalho.

### 3 METODOLOGIA DE DESENVOLVIMENTO

Apresenta-se neste capítulo a metodologia utilizada no desenvolvimento do trabalho, discutindo-se os métodos, as ferramentas, os procedimentos e as normas utilizadas para a realização do trabalho. O processo inicia-se com uma análise dos navios semelhantes, visando estabelecer o hiperespaço das variáveis de projeto. Em seguida é feita uma breve introdução aos modelos empíricos, que são modelos matemáticos construídos através da interpolação de resultados experimentais, as normas utilizadas para estimar parâmetros do navio, a escolha da ferramenta matemática utilizada, ao programa de otimização *ModeFrontier*, descrevendo-se as restrições estabelecidas para os modelos de otimização. Por fim, justifica-se a escolha do algoritmo genético NSGA – II e da técnica Sobol usada na geração da população inicial.

#### 3.1 Análise de navios semelhantes

O processo de projeto de navios, em geral, inicia-se por uma análise de navios semelhantes com o objetivo de se obter informações gerais do tipo de navio de interesse, que nesse caso, trata-se de navios do tipo PSV. Assim, com o auxílio de um banco de dados pôde-se estudar a classe de navios de interesse, a fim de se estabelecer estimativas para suas dimensões e características principais. Além disso, uma análise de navios semelhantes é crucial na hora de determinar o que pode ser generalizado e aprendido a partir de projetos anteriormente desenvolvidos (PARSONS, 2003).

A análise de navios semelhantes auxilia na delimitação das restrições e requisitos do modelo de otimização. Além disso, segundo Tancredi (2014) o processo de projeto de navios é susceptível a erros, e portanto, a análise de embarcações semelhantes ajuda a mitigá-los, balizando os resultados através da comparação direta com navios já existentes.

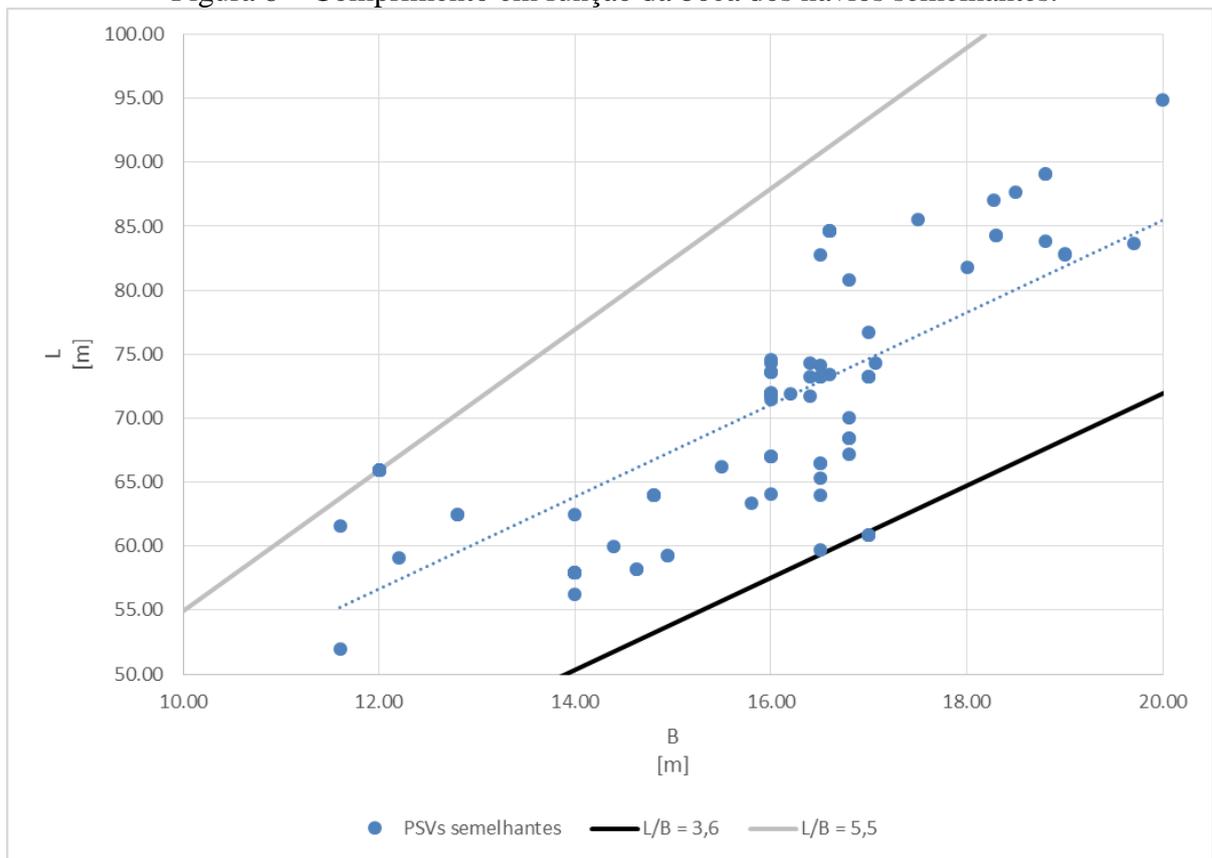
Com a ajuda de um banco de dados, foi possível derivar valores típicos dos principais adimensionais e coeficientes de forma, que caracterizam navios do tipo PSV, cuja análise será apresentada a seguir.

### 3.1.1 Adimensional L/B

A Figura 8 mostra a dispersão dos valores de comprimento em relação a boca dos navios presentes no banco de dados obtidos a partir do trabalho de Chame (2014) e, que apenas navios construídos nos últimos 20 anos foram considerados para a análise. O adimensional L/B tem influência em diversas características da embarcação.

Navios que possuem maiores valores de L/B apresentam melhor estabilidade direcional e uma menor resistência ao avanço, o que resulta em uma menor potência instalada e uma redução com custos de combustível, segundo Molland, Turnock e Hudson (2011). Em contrapartida, tem sua estabilidade transversal e manobrabilidade comprometida. Já navios com um baixo valor de L/B apresentam uma melhor manobrabilidade e estabilidade transversal em detrimento da resistência ao avanço e da estabilidade direcional (TANCREDI et al., 2014).

Figura 8 – Comprimento em função da boca dos navios semelhantes.



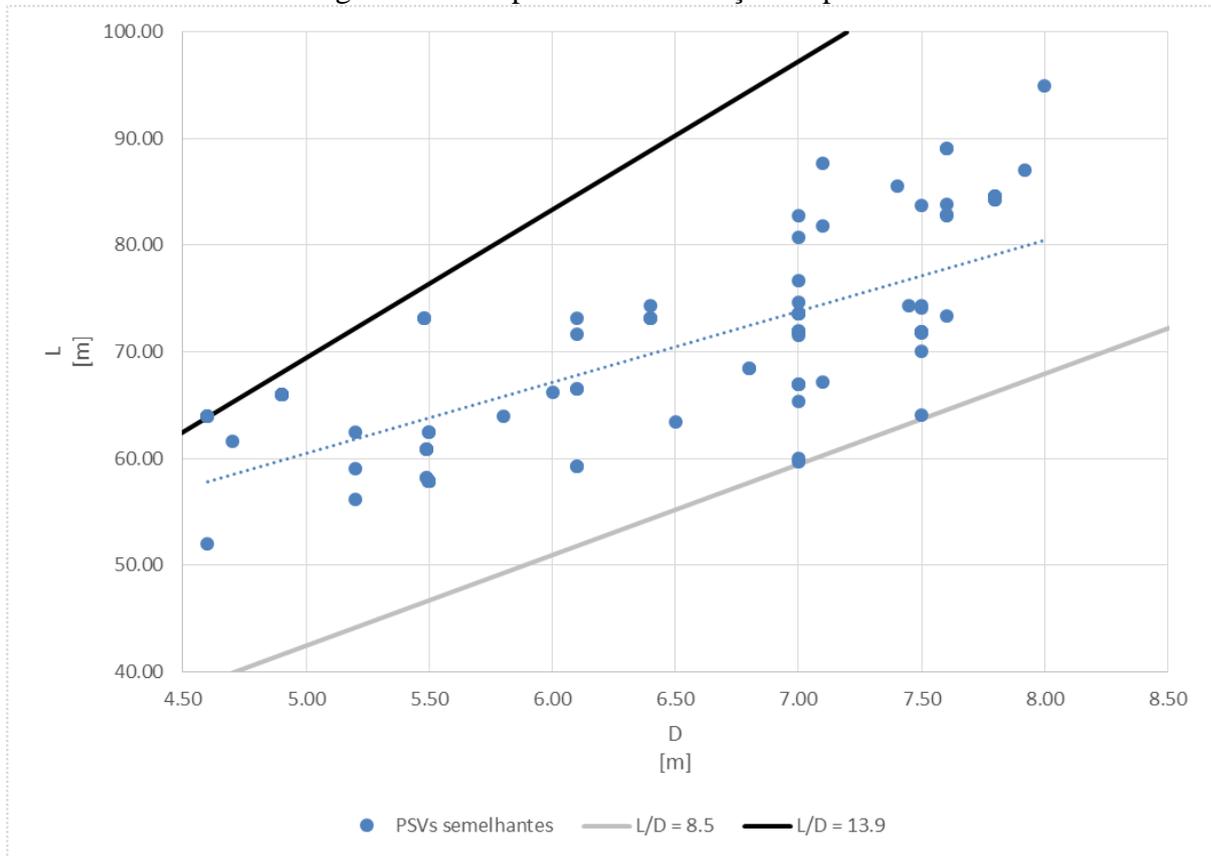
Fonte: O autor (2016).

### 3.1.2 Adimensional L/D

O adimensional L/D, segundo Tancredi et al. (2014), tem influência na resistência estrutural das embarcações. A Figura 9 mostra a dispersão do comprimento entre

perpendiculares em relação ao pontal dos PSVs presentes no banco de dados de navios semelhantes.

Figura 9 – Comprimento em relação ao pontal.



Fonte: O autor (2016).

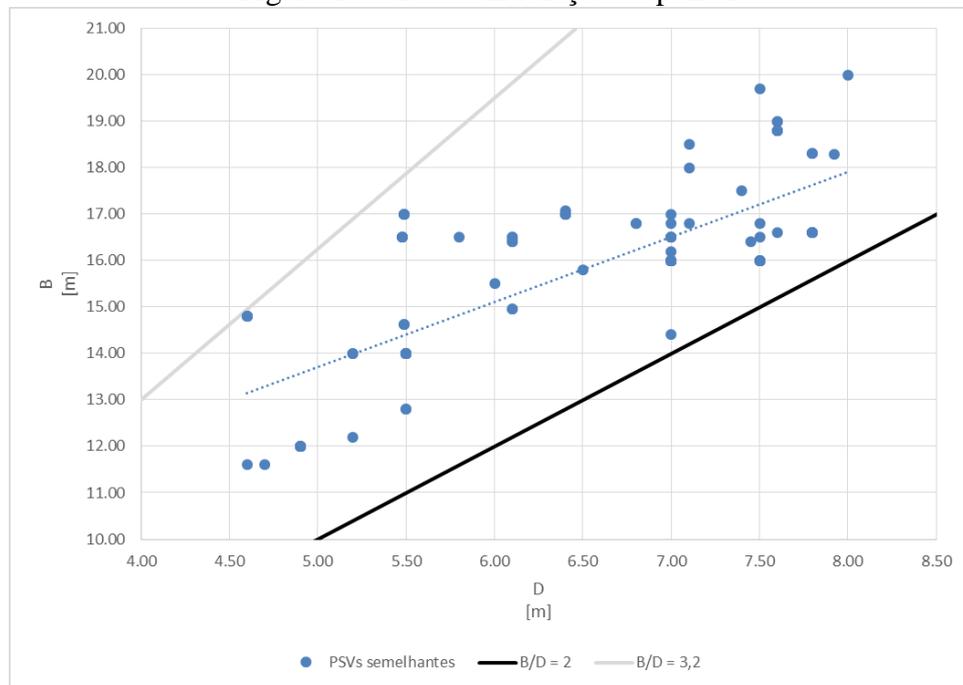
### 3.1.3 Adimensionais B/D e B/T

O adimensional B/D está diretamente ligado a estabilidade transversal da embarcação, pois sabe-se que os valores de boca afetam diretamente o momento de inércia transversal da área da linha d'água e os valores de pontal estão associados a altura do centro de gravidade da embarcação. A Figura 10 mostra a dispersão dos valores de boca em relação ao pontal para os navios semelhantes da base de dados.

Segundo Molland, Turnock e Hudson (2011), o adimensional B/T tem influência na resistência de ondas do navio, uma vez que esse adimensional traz o deslocamento do navio mais próximo da superfície na linha d'água. Além disso, resultados feitos com séries padronizadas apresentados pela associação britânica de pesquisa com navios (BRSA) indicaram um aumento da resistência total ao avanço com o aumento do adimensional B/T, conforme

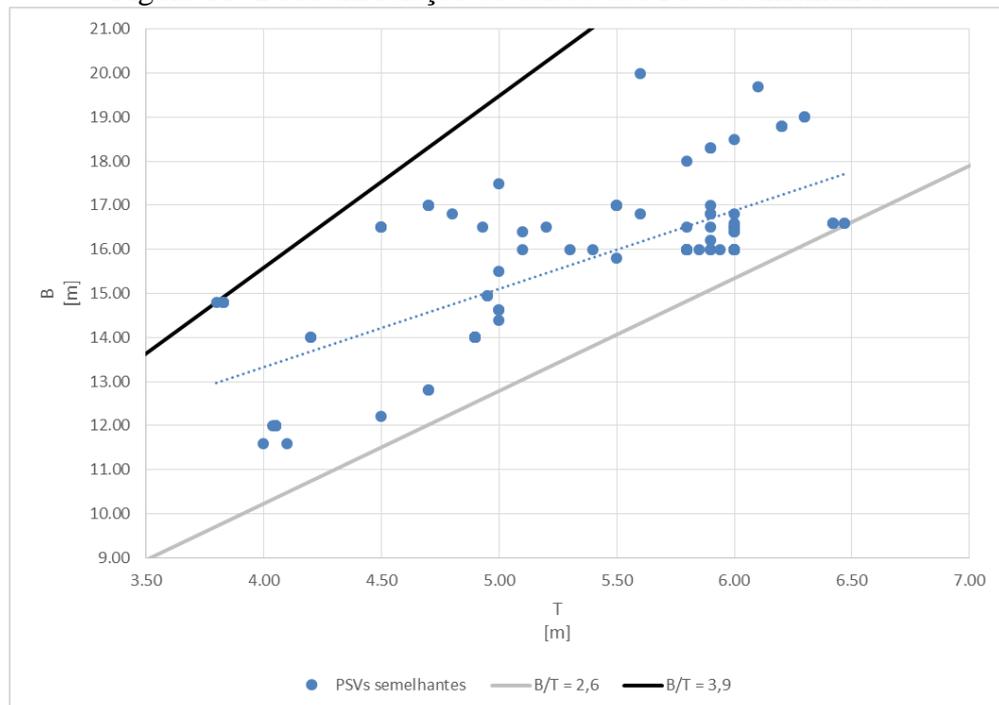
exemplifica Molland, Turnock e Hudson (2011). A Figura 11 mostra a dispersão da boca em relação ao calado para os PSVs semelhantes.

Figura 10 – Boca em relação ao pontal.



Fonte: O autor (2016).

Figura 11- Boca em relação ao calado dos PSVs semelhantes.

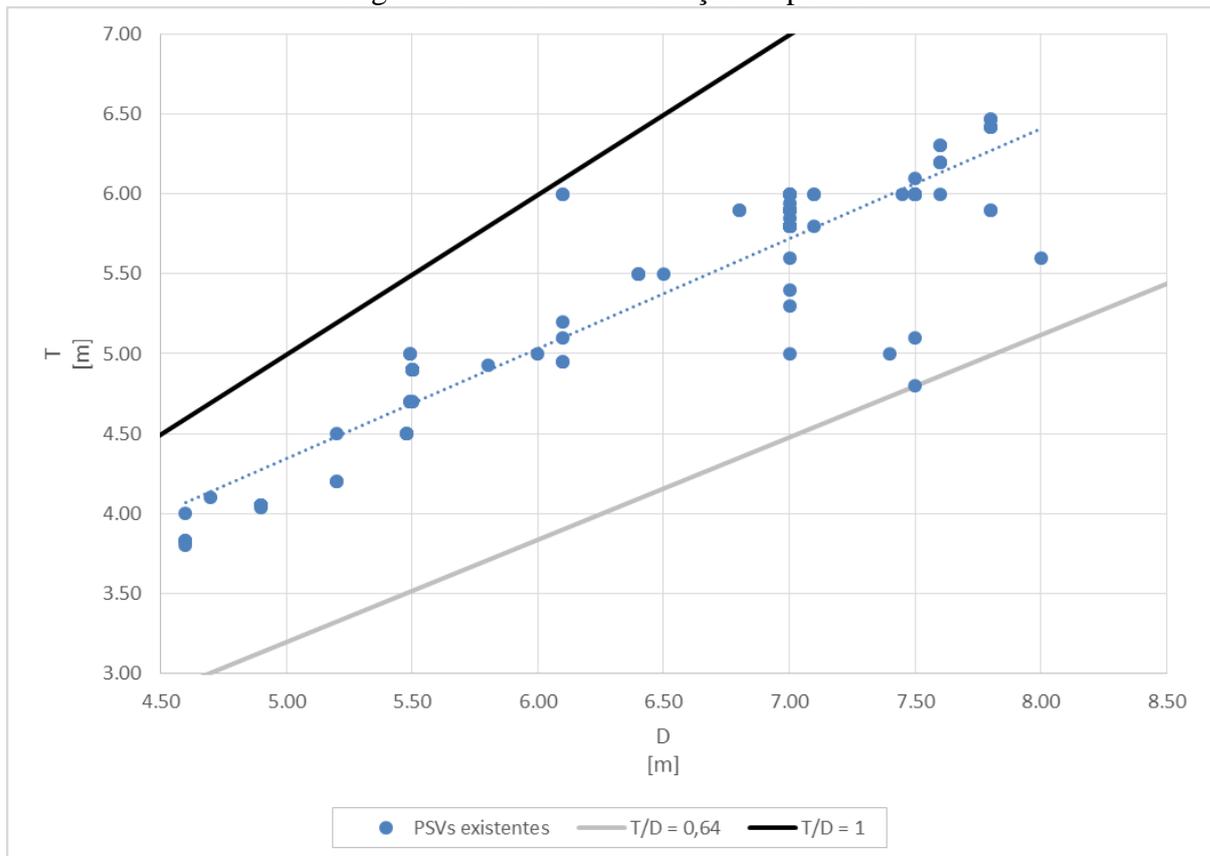


Fonte: O autor (2016).

### 3.1.4 Adimensional T/D

Esse adimensional está associado às normas de borda livre estipuladas pela *International Maritime Organization* (IMO) portanto, é um importante parâmetro de análise ao cumprimento de normas e adequação da embarcação aos padrões hoje existentes. A Figura 12 mostra os valores de calado em relação ao pontal das embarcações do banco de dados dos navios semelhantes.

Figura 12 – Calado em relação ao pontal.

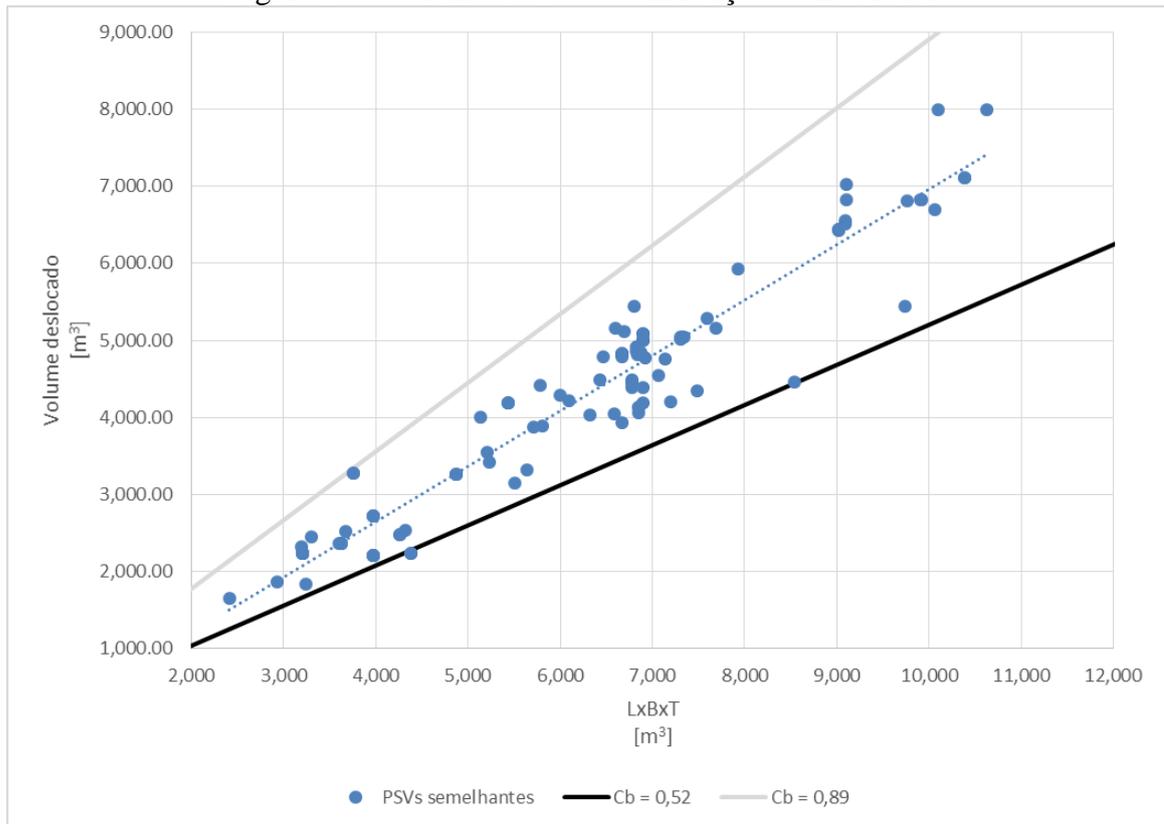


Fonte: O autor (2016).

### 3.1.5 Coeficiente de bloco

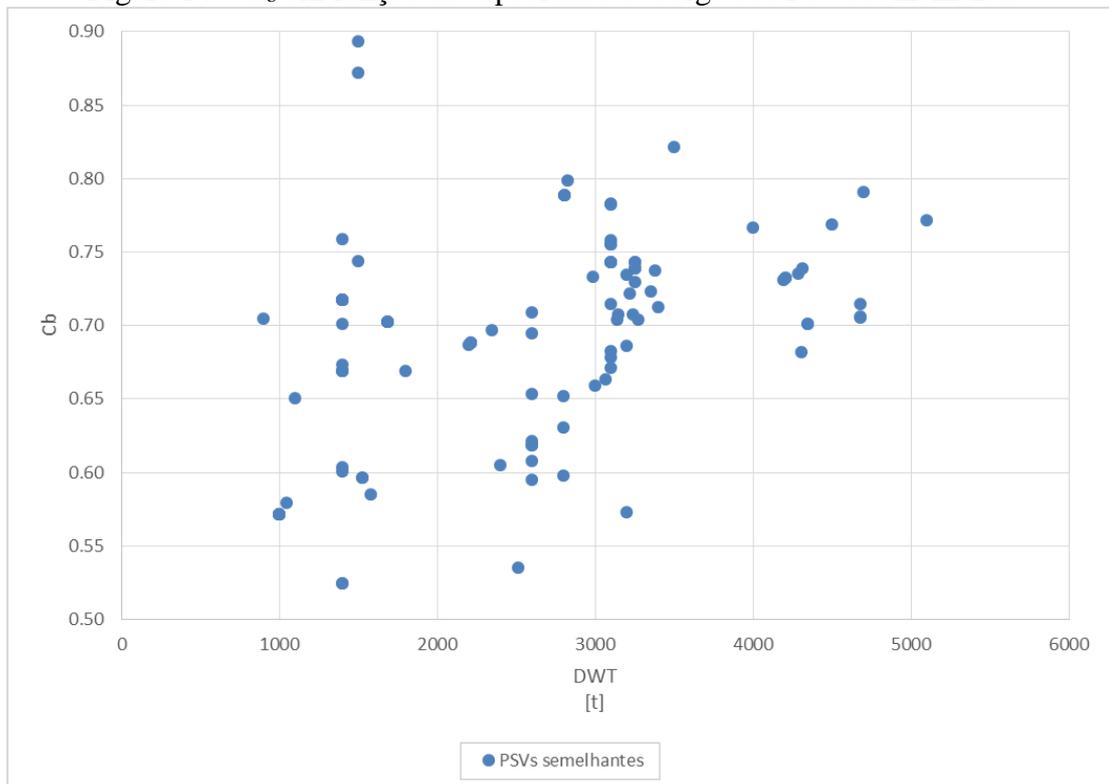
O coeficiente de bloco faz uma ligação direta entre o volume deslocado do navio e suas dimensões principais e, segundo Tancredi et al. (2014), tem influência na capacidade de carga, estabilidade e resistência ao avanço da embarcação. Assim, a dispersão do volume deslocado em função do comprimento multiplicado pela boca e calado ( $L \times B \times T$ ) e a dispersão do  $C_B$  em função da capacidade de carga, para os navios semelhantes, podem ser vistos pelas Figura 13 e Figura 14, respectivamente.

Figura 13 – Volume deslocado em função de L x B x T.



Fonte: O autor (2016).

Figura 14 –  $C_b$  em função da capacidade de carga dos PSVs semelhantes.



Fonte: O autor (2016).

### 3.2 Métodos empíricos para o processo de otimização de navios do tipo PSV

Durante a fase do projeto conceitual é necessário fazer estimativas de alguns parâmetros ainda não conhecidos nessa etapa. Estimativas de pesos, centros, resistência ao avanço e períodos naturais de frequência de *pitch* e *heave* são estimados com base em métodos tradicionais.

### 3.3 Estimativa de pesos

O deslocamento de um PSV pode ser basicamente dividido em duas partes, o peso leve (LWT) da embarcação e a capacidade de carga ou *deadweight* (DWT), como descrito na Equação 1 (Parsons, 2003).

$$\Delta = LWT + DWT \quad (1)$$

#### 3.3.1 Deslocamento

O deslocamento do navio, nas etapas iniciais de projeto, pode ser obtido através da Equação 2.

$$\Delta = L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho \quad (2)$$

Onde,

$\rho = 1,025 \text{ t/m}^3$  (massa específica d'água).

#### 3.3.2 Peso leve

O peso leve de um navio mercante, como proposto por Parsons (2003) através da Equação 3, pode ser dividido em peso estrutural de aço ( $W_s$ ), peso total de máquinas ( $W_M$ ), peso de outfit ( $W_O$ ) e margens ( $W_{margin}$ ).

$$LWT = W_s + W_M + W_O + W_{margin} \quad (3)$$

#### 3.3.3 Peso estrutural de aço

A estimativa de peso estrutural do aço foi feita com base no método do numeral  $E$  proposto por Watson e Gilfillian (1976) mais uma correção para o coeficiente de bloco ( $C_B'$ ) do navio com um calado igual a 80% do pontal, conforme mostra a Equação 4. Uma vez que

navios do tipo PSV tem uma única superestrutura a parcela relativa as casarias<sup>1</sup> foi desconsiderada, como apresentado na Equação 5.

$$W_S = kE^{1.36}[1 + 0,5(C'_B - 0.70)] \quad (4)$$

$$E = L(B + T) + 0.85L(D - T) + \sum l_1 h_1 \quad (5)$$

onde,

$k = 0,45$ , para navios do tipo *Platform Supply Vessel*.

$l_1$  = comprimento da superestrutura.

$h_1$  = altura da superestrutura.

No estágio inicial de projeto, o coeficiente de bloco com um calado igual a 80% do pontal, em geral, é uma variável não conhecida. Portanto, Parsons (2003) propõe que esse coeficiente seja estimado pela Equação 6.

$$C'_B = C_B + (1 - C_B) \left( \frac{0.8D - T}{3T} \right) \quad (6)$$

Os valores de  $l_1$  e  $h_1$ , foram estimados como sendo 16,5% e 11,5% do comprimento na linha d'água, respectivamente. Esses valores foram obtidos a partir de dados de um PSV base construído no vale do Itajaí, e para fins deste trabalho, assume-se que todos os navios PSV terão superestruturas similares.

### 3.3.4 Peso total de máquinas

O peso de máquinas em um navio mercante inicialmente pode ser dividido em dois grupos. O primeiro grupo representa o peso dos motores principais, caixas redutoras, linha de eixo e propulsores. Já segundo grupo são equipamentos secundários para o funcionamento da embarcação, como por exemplo, bombas do sistema de transferência de lastro, óleo

---

<sup>1</sup> A Casaria é similar a superestrutura, porém a primeira tem sua largura menor do que a boca do navio e a segunda a largura é igual a boca da embarcação.

combustível, água potável, dentre outros sistemas que podem ser encontrados em um navio mercante (Parsons, 2003).

No entanto, navios do tipo PSV atuais utilizam plantas diesel elétricas, ou seja, os motores a combustão principal (MCP's) são utilizados para gerar toda a potência elétrica necessária para o funcionamento da embarcação e não apenas a potência para move-lo. Assim, Watson e Grifillian (1976) sugerem que o peso total de máquinas<sup>2</sup> pode ser estimado através da Equação 7.

$$W_M = 0,72(P_B)^{0,78} \quad (7)$$

Onde,

$P_B$  = Potência total instalada.

### 3.3.5 Peso de *Outfit*

O peso de *outfit*, como proposto por Watson e Gilfillian (1976) abrange o peso de móveis, eletrodomésticos, cabeamento elétrico, pintura, guindastes, equipamentos de salvaguarda, dentre outros equipamentos encontrados a bordo de um navio, podendo ser estimado através da Equação 8.

$$W_O = C_O L B \quad (8)$$

Onde,

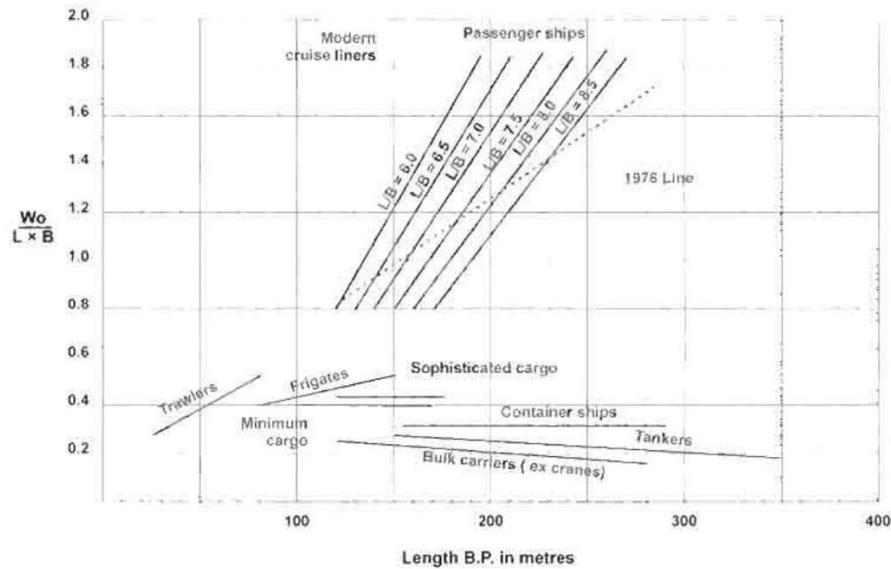
$C_O$  = coeficiente de *outfit*.

O gráfico da Figura 15 mostra os valores de  $C_O$  em função do comprimento entre perpendiculares (LBP) para diferentes tipos de navios. No entanto, não existe uma curva para navios do tipo PSV, como pôde ser visto.

---

<sup>2</sup> Para a estimativa do peso total de máquinas foi estudado também o método proposto por Vásquez (2014), porém os dados observados em navio similares se aproximavam mais do modelo proposto por Watson e Grifillian (1976).

Figura 15 – Coeficiente de *outfit* em relação ao comprimento entre perpendiculares do navio.



Fonte: Watson (1998, p. 100).

O coeficiente de *outfit* foi estimado pensando-se na função que os navios do tipo PSV exercem, ou seja, são navios destinados a suprir plataformas de petróleo por meio do transporte de carga para as plataformas e das plataformas. Dessa forma, pode-se concluir que os PSVs podem ser classificados como navios de pouca carga, devido ao seu tamanho reduzido se comparado com navios destinados a cargas específicas, mas, podem transportar diversos tipos de carga, das mais sofisticadas às mais simples. Por fim, chegou-se a um valor de 0,42 para o coeficiente de *outfit*, analisando-se o gráfico da Figura 15.

### 3.3.6 Peso de margens

Segundo Watson (1998) o peso de margens deve refletir as incertezas presentes na estimativa do peso leve do navio. Assim, Watson (1998) recomenda que o cálculo de margens seja proporcional à incerteza presente.

Os PSVs são navios bastante flexíveis quanto a sua operação, ou seja, diversos tipos de equipamentos podem ir a bordo para que as atividades e tarefas requeridas pelo armador sejam realizadas. Assim, existe uma grande incerteza associada ao peso leve de um navio PSV durante as fases iniciais do projeto. Então, o autor considera razoável utilizar 5% de margem em relação ao peso leve. Por fim, a estimativa de peso leve final para o modelo deste trabalho foi feita conforme a Equação 9.

$$LWT = 1,05 \times (W_S + W_M + W_O) \quad (9)$$

### 3.4 Estimativa do pontal

Nos métodos para a estimativa de pesos é necessário que o engenheiro conheça o pontal da embarcação. No entanto, o pontal da embarcação é na verdade um parâmetro de projeto e não uma variável pois, segundo convenções internacionais, este valor é dependente do comprimento e do calado do navio. O cálculo do pontal é feito pela soma do calado com a borda livre da embarcação. A borda livre, por sua vez, depende de diversos fatores, mas o principal deles é o comprimento. Portanto, foi feito uma estimativa da borda livre das embarcações para que os valores de pontal fossem coerentes, evitando a geração de soluções com valores de calado e pontal anômalos.

O cálculo de borda livre consiste em se fazer correções à uma borda livre básica. Essa borda livre básica, por sua vez, é obtida a partir das tabelas de bordas livre da convenção internacional em linhas de carga (IMO, 2005). A Equação 10, faz uma interpolação dos valores de borda livre básica.

$$BL = -0.016944 \times L^2 + 22.803499 \times L - 691.269920 \quad [mm] \quad (10)$$

Para fins de cálculo de borda livre, os navios são divididos em duas categorias, a categoria A e categoria B. Os navios da categoria A, de acordo com a convenção internacional de linhas de carga (IMO, 2005), são navios destinados a carregar apenas carga líquida nos porões e os tanques de carga tem apenas uma pequena abertura de acesso à prova d'água, construída em aço ou material similar. Já os navios do tipo B, como a própria convenção define, são todos aqueles navios que não se encaixam na definição da categoria A. Portanto, os PSVs foram considerados como navios da categoria B e a Equação 10 representa uma interpolação dos valores da tabela de borda livre para esses navios.

Após determinada a borda livre tabular, existem algumas correções que devem ser feitas: correção para  $C_B$ , correção para o adimensional  $L/D$ , correção para o *sheer* do navio e correção para a superestrutura. A correção para o coeficiente de bloco é dada pela multiplicação do maior valor entre 1 e  $(C_B + 0,68)/1,36$  pela borda livre tabular (IMO, 2005).

Para corrigir a borda livre, de acordo com o adimensional  $L/D$ , calcula se o pontal utilizando apenas a borda livre tabular e a correção para o  $C_B$  e, então, checa-se o valor de  $L/D$ . Caso esse valor seja menor do que 15, a borda livre deve ser acrescida do resultado obtido através da Equação 11, caso o valor seja maior do que 15 então, a borda livre é descontada do valor obtido através da Equação 12 (IMO, 2005).

$$\left(D - \frac{L}{15}\right) \cdot R \quad [mm] \quad (11)$$

$$\left(\frac{L}{15} - D\right) \cdot R \quad [mm] \quad (12)$$

onde,

$R = \frac{L}{0,48}$ , para L menor ou igual a 120 m.

Neste trabalho foram consideradas apenas as correções para o coeficiente de bloco e o adimensional L/D por motivos práticos, uma vez que, para se obter o *sheer* da embarcação é necessário a forma do casco e, a correção da superestrutura depende de dados obtidos em estágios mais avançados do projeto.

### 3.5 Método para a estimativa da resistência total ao avanço

Estimar a resistência total ao avanço de navios, mesmo nos estágios preliminares de projeto, é de extrema importância, pois é a partir desta estimativa que o engenheiro pode iniciar o processo de seleção de motores e parâmetros do hélice, por exemplo. Além disso, a capacidade de carga do navio depende, também, da resistência total ao avanço, pois é a partir dessa estimativa que pode-se estimar a potência dos motores e consequentemente estimar o peso desses motores.

A velocidade de serviço é um requisito do armador e para este trabalho foi fixada em 13 nós, uma vez que as embarcações construídas no vale do Itajaí, em geral, operam nessa velocidade segundo profissionais dos estaleiros da região.

Assim, para alcançar os objetivos desse trabalho foi necessário escolher um método de estimativa de resistência ao avanço que incluísse parâmetros do bulbo, portanto, o método de Holtrop e Mennen (1984) foi o escolhido. Uma vez que esse é adequado a navios deslocantes, inclui cálculos de resistência do bulbo e, em geral, os navios do tipo PSV estão dentro das restrições exigidas para a aplicação do método.

A resistência total ao avanço é separada em diversas parcelas de resistência, conforme apresentado na Equação 13 (HOLTROP; MENNEN, 1984).

$$R_{Total} = R_F(1 + k) + R_{APP} + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (13)$$

onde,

$R_F$  = resistência de atrito calculada de acordo com o ITTC 1957;

$(1 + k)$  = fator de forma que descreve a resistência viscosa do casco do navio em relação a resistência de atrito;

$R_{APP}$  = resistência de apêndices;

$R_W$  = resistência de ondas;

$R_B$  = resistência do bulbo;

$R_{TR}$  = resistência da popa transom;

$R_A$  = resistência de correlação navio-modelo.

O bulbo tem influência direta na parcela da resistência de ondas, conforme sugerido por Kratch (1978), assim Holtrop e Mennen (1982) propõem que a influência do bulbo na resistência de ondas seja estimada através do coeficiente  $c_3$ , conforme a Equação 14.

$$c_3 = \frac{0,56 \cdot A_{BT}^{1,5}}{B \cdot T \cdot (0,31 \cdot \sqrt{A_{BT}} + T - h_B)} \quad (14)$$

A parcela de resistência adicional devido ao bulbo segundo Holtrop e Mennen (1982) pode ser calculada através da Equação 15.

$$R_B = 0,11 \cdot \exp(-3 \cdot P_b^{-2}) \cdot F_{ni}^3 \cdot A_{BT}^{1,5} \cdot \rho \cdot g / (1 + F_{ni}^2) \quad (15)$$

onde,

$P_b$  é um coeficiente baseado na emersão do bulbo;

$F_{ni}$  é o número de Froude baseado na imersão do bulbo.

Além disso, Holtrop e Mennen (1984) recomendam que a máxima altura do centro da área transversal do bulbo ( $A_{BT}$ ) não seja maior do que 60% do calado avante da embarcação nos cálculos da parcela de resistência do bulbo. Então, tal recomendação foi incluída na forma de restrição no modelo de otimização.

A resistência de apêndices, por representar apenas uma pequena parcela na resistência total ao avanço do navio foi desprezada, pois adicionaria ainda mais variáveis ao modelo aqui proposto.

A área de popa transom foi estimada como sendo uma porcentagem da área da seção mestra do navio, assim, evita-se incluir mais variáveis no modelo, mas não se deixa de considerar essa importante parcela da resistência ao avanço. Assim, a porcentagem da popa transom foi calculada a partir de dados de área de popa submersa de embarcações reais, e fazendo uma simples média aritmética entre essas porcentagens das áreas obtendo-se, um coeficiente médio para a área da popa transom igual à 0,365. Os dados dos navios utilizados para calcular esse coeficiente podem ser encontrados no Apêndice A.

Por fim, o modelo de previsão de resistência ao avanço, proposto por Holtrop e Mennen (1982), apresenta algumas restrições a sua utilização. Essas restrições são baseadas nos coeficientes de forma  $C_p$ , L/B e B/T e também no tipo de navio. Porém, para navios do tipo PSV o método de Holtrop e Mennen (1982) não especifica restrições. Então, assumiu-se como restrição de utilização do método para navios do tipo PSV como sendo os valores apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 – Limites de utilização do método de Holtrop e Mennen (1982).

| Froude | $C_p$  |        | L/B    |        | B/T    |        |
|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| máximo | mínimo | máximo | mínimo | máximo | mínimo | máximo |
| 0,4    | 0,55   | 0,85   | 3,9    | 9,5    | 2,1    | 4,0    |

Fonte: Manen e Oossanen (1988, p. 90).

### 3.6 Estimativa da potência total instalada

A potência total instalada foi estimada a partir da estimativa de resistência total ao avanço obtida pelo método de Holtrop e Mennen (1984) e a velocidade de serviço ( $V_S$ ) do navio. E posteriormente utilizada na estimativa do peso de máquinas na embarcação. Assim, a potência total instada foi estimada conforme a Equação 16.

$$P_B = \frac{R_T \cdot V_S}{\eta} \quad (16)$$

Onde,

$\eta$  = Eficiência que advêm da integração entre o casco do navio, o hélice e o motor.

Uma vez que não é parte do escopo deste trabalho fazer uma estimativa mais aprofundada da integração entre o casco da embarcação, o hélice e o motor, estimou-se essa

eficiência em 50%, ou seja, neste trabalho  $\eta$  é igual a 0,5. E a velocidade de serviço, conforme discutido anteriormente é igual a 13 nós.

### 3.7 Estimativa dos principais coeficientes de forma do navio

Vários métodos de cálculo da resistência ao avanço e de períodos naturais do navio fazem o uso de coeficiente de forma do casco. Os principais coeficientes necessários durante a etapa de projeto conceitual do navio são o coeficiente da seção mestra ( $C_M$ ), o coeficiente da área do plano da linha d'água ( $C_{WP}$ ) e o coeficiente prismático ( $C_P$ ). Porém, esses coeficientes não são triviais e, em muitos casos, só podem ser obtidos a partir de etapas de projeto com maior nível de detalhes. Portanto, foram utilizados métodos empíricos para estimar esses coeficientes.

Schneekluth e Bertram (1998) discutem sobre diversos métodos para a estimativa do coeficiente de seção mestra do navio. E o método escolhido para realizar este trabalho utiliza uma equação empírica, conforme a Equação 17.

$$C_M = 0,9 + 0,1 \cdot C_B \quad (17)$$

Esse método é aconselhado para navios onde, na seção mestra, não existe um ângulo entre o chapeamento de fundo e o plano horizontal e também quando o raio do bojo é considerado muito pequeno. Navios do tipo PSV, em geral, atendem a essas duas condições e por isso considerou-se o método adequado.

O coeficiente de plano de linha d'água do navio tem influência na resistência ao avanço e também na estabilidade da embarcação. Além disso, ele é fundamental para a determinação do período natural de *pitch* do navio. Schneekluth e Bertram (1998) propõem que o coeficiente da área do plano de linha d'água seja calculado conforme a Equação 18.

$$C_{WP} = \frac{1 + 2 \cdot C_B}{3} \quad (18)$$

O coeficiente prismático de um navio pode ser obtido através da simples divisão do coeficiente de bloco pelo coeficiente da seção mestra, conforme a Equação 19.

$$C_P = \frac{C_B}{C_M} \quad (19)$$

### 3.8 Estabilidade transversal inicial

A estabilidade inicial de uma embarcação é de extrema importância dentro do processo do projeto de navios, já que um navio instável torna seu projeto inviável e pode acarretar em diversos prejuízos para o armador. Portanto, a estimativa de centros verticais de gravidade faz-se necessário para que seja possível incluir uma análise preliminar da estabilidade inicial no modelo de otimização.

Idealmente, a estabilidade inicial do navio deve ser obtida através da curva de braço de endireitamento (GZ), no entanto, não pode-se obter essa curva sem a forma do casco. Então, Schneekluth e Bertram (1998) afirmam que a altura metacêntrica ( $GM_t$ ) apresenta bons indícios das características de estabilidade da embarcação. Assim, a altura metacêntrica, em metros, das embarcações foi obtida conforme a Equação 20.

$$GM_t = KB + BM - VCG \quad (20)$$

onde,

KB = a altura do centro de flutuação do navio medido a partir da quilha [m].

BM = a altura metacêntrica acima do centro de flutuação [m].

VCG = o centro vertical de gravidade do navio [m].

Segundo Schneekluth e Bertram (1998) as literaturas, que tratam do assunto de estabilidade das embarcações, produziram diversas equações para a estimativa da altura do centro de flutuação do navio (KB), com precisão acima de 1%. Portanto, a altura do centro de flutuação foi estimada conforme a Equação 21, proposta por Schneekluth e Bertram (1998).

$$KB = T \cdot (0,9 - 0,3 \cdot C_M - 0,1 \cdot C_B) \quad (21)$$

Já altura metacêntrica acima do centro de flutuação (BM) é obtido a partir da divisão do momento de inércia do plano na linha d'água ( $I_T$ ) pelo volume deslocado da embarcação ( $\nabla$ ). Então, Schneekluth e Bertram (1998), propõe que BM pode ser estimado conforme a Equação 22.

$$BM = \frac{(1,5 \cdot C_{WP} - 0,5) \cdot B^2}{12 \cdot T \cdot C_B} \quad (22)$$

O centro vertical do navio pode ser obtido a partir da média ponderada do centro de gravidade vertical do casco, centro de gravidade vertical de máquinas, do centro de gravidade vertical de *outfit* e do centro de gravidade vertical de superestrutura que serão discutidos no próximo item.

### 3.9 Centros verticais de gravidade (VCG)

O centro vertical do peso estrutural de aço foi estimado de acordo com a formulação proposta por Chaves, Tancredi e Andrade (2012), uma vez que este é um trabalho mais atual e apresentou excelentes resultados, assim, encaixa-se dentro do contexto desse trabalho. Então, o modelo proposto por Chaves, Tancredi e Andrade (2012) sugere que o centro vertical do peso estrutural do casco pode ser obtido conforme a Equação 23.

$$VCG_{Hull} = 0,5246 \cdot D - 0,2879 \quad (23)$$

O centro vertical de máquinas foi estimado de acordo com a experiência prática do autor. Os navios do tipo PSV construídos no vale do Itajaí, em geral, têm dois decks entre o convés principal e o teto do duplo fundo e, a praça de máquinas destes navios encontram-se no deck logo acima do duplo fundo. Portanto, é razoável estimar-se o centro vertical do peso de máquinas conforme a Equação 24.

$$VCG_M = h_{DB} + 0,25 \cdot (D - h_{DB}) \quad (24)$$

onde,

$h_{DB}$  = altura do duplo fundo.

A altura do duplo fundo pode ser estimada conforme a Equação 25, retirada da norma do *American Bureau of Shipping* (ABS) para construção e classificação de navios de aço, 2015.

$$h_{DB} = \frac{32 \cdot B + 190 \cdot \sqrt{T}}{1000} \quad (25)$$

O centro vertical do peso de *outfit* está, em geral, localizado logo acima do convés principal da embarcação e foi estimado conforme a Equação 26 (Parsons, 2003).

$$VCG_O = D + 1,25 \quad L \leq 125 \text{ m} \quad (26)$$

A superestrutura de um PSV, em geral, tem sua base mais larga que as partes mais altas. Portanto, é razoável estimar o centro de gravidade da superestrutura de um PSV como sendo o pontal da embarcação mais a metade de sua altura a partir do convés principal, como apresentado pela Equação 27.

$$VCG_{SS} = D + \frac{1}{2} \cdot h_{SS} \quad (27)$$

O centro vertical de gravidade da embarcação foi estimado através de uma média ponderada entre os VCG's considerados e seus respectivos pesos conforme Equação 28.

$$VCG = \frac{VCG_{Hull} \cdot W_{Hull} + VCG_{SS} \cdot W_{SS} + VCG_M \cdot W_M + VCG_O \cdot W_O}{W_{Hull} + W_{SS} + W_M + W_O} \quad (28)$$

### 3.10 Centros longitudinais de gravidade (LCG)

Os centros longitudinais de gravidade da embarcação têm grande influência no trim. Assim, um estudo preliminar na fase de projeto conceitual é desejável já que o trim, por sua vez, influencia na manobrabilidade do navio e imersão do propulsor. Um trim avante pode representar uma imersão insuficiente dos propulsores, por exemplo. O estudo de centros longitudinais é necessário para análise do trim das soluções encontradas pelo modelo de otimização.

Segundo Watson (1998) o centro longitudinal de gravidade (LCG) do peso estrutural de aço, em geral, está localizado a ré do centro longitudinal de flutuação (LCB). Portanto, a estimativa do LCG do peso estrutural de aço é dado pela Equação 29.

$$LCG_{Hull} = (-0.15 + LCB) \cdot \frac{L}{2} \quad (29)$$

Vale ressaltar que LCB é dado em porcentagem em relação ao comprimento da embarcação L assim, um valor positivo indica que o centro longitudinal de gravidade está avante da seção mestra e, um valor negativo indica que o centro longitudinal encontra-se a ré da seção meia-nau.

Os centros longitudinais do peso total de máquinas e da superestrutura foram estimados com base em navios semelhantes, em especial aqueles construídos no Vale do Itajaí. Então, estimou-se o centro longitudinal do peso total de máquinas conforme a Equação 30 e o centro longitudinal do peso da superestrutura conforme a Equação 31.

$$LCG_M = 0,6 \cdot \frac{L}{2} \quad (30)$$

$$LCG_{SS} = 0,7 \cdot \frac{L}{2} \quad (31)$$

O centro longitudinal do peso de *outfit* foi estimado como sugerido por Parsons (2003). Assim, a Equação 32 foi utilizada para calcular o centro longitudinal do peso de *outfit*.

$$LCG_O = \frac{0,25 \cdot W_O \cdot LCG_M + 0,375 \cdot W_O \cdot LCG_{SS}}{W_O} \quad (32)$$

Finalmente, o centro longitudinal global da embarcação foi obtido a partir de uma média ponderada dos pesos e seus respectivos centros longitudinais de gravidade, conforme apresentado na Equação 33.

$$LCG = \frac{W_{SS} \cdot LCG_{SS} + W_{Hull} \cdot LCG_{Hull} + W_O \cdot LCG_O + W_M \cdot LCG_M}{W_{SS} + W_{Hull} + W_O + W_M} \quad (33)$$

### 3.11 Método para a estimativa das frequências naturais de *Pitch* e *Heave*

Para o cálculo das frequências naturais de *pitch* e *heave* que incluíssem a influência do bulbo, partiu-se do princípio de que a frequência natural é dada pela raiz quadrada da rigidez ( $k$ ) sobre a inércia ( $m$ ) do corpo, como pode ser visto na Equação 34. Por hipótese, assume-se que o bulbo está totalmente submerso e o navio navega em condição de plena carga, portanto o bulbo é tido apenas como massa adicional e não tem influência sobre a rigidez do corpo.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (34)$$

Assumiui-se que a rigidez do navio em movimentos de *pitch* é aproximadamente igual ao momento de inércia do navio na longitudinal ( $I_L$ ) multiplicado pela massa específica da água ( $\rho$ ) e aceleração gravitacional ( $g$ ). A inércia da embarcação para os movimentos de *pitch* foi considerada como sendo a massa do navio multiplicado ao raio de giração, estimado em  $0,24L$  conforme sugerido Parsons (2003), elevado ao quadrado somado à massa do bulbo multiplicado pelo seu raio de giração ao quadrado, assim, foi possível derivar a Equação 35 (LAMB, 1969).

$$\omega_{n_{Bulbo}}^{Pitch} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot I_L}{\nabla \cdot \rho \cdot (0,24L)^2 + C_{VPR} \cdot \nabla \cdot \rho \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^2}} \quad (35)$$

Onde,

$C_{VPR}$  é o coeficiente de volume do bulbo conforme definido por Kratch (1978).

Logo,

$$\omega_{n_{Bulbo}}^{Pitch} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot I_L}{\nabla \cdot \rho \cdot (0,24L)^2 \cdot (1 + C_{VPR} \cdot 0,5^2/0,24^2)}} \quad (36)$$

Então,

$$\omega_{n_{Bulbo}}^{Pitch} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot I_L}{\nabla \cdot \rho \cdot (0,24 \cdot L)^2}} \cdot \sqrt{\frac{1}{(1 + C_{VPR} \cdot 4,34)}} \quad (37)$$

Por fim, obtém-se a Equação 38, a qual inclui a influência do bulbo na frequência natural nos movimentos de *pitch* em radianos por segundo.

$$\omega_{n_{Bulbo}}^{Pitch} = \omega_n^{Pitch} \cdot \sqrt{\frac{1}{(1 + C_{VPR} \cdot 4,34)}} \quad (38)$$

Como a frequência natural de *pitch* ainda depende de uma parâmetro de difícil determinação nas fases iniciais de projeto ( $I_L$ ) essa frequência foi estimada a partir da formulação empírica proposta por Parsons (2003) para o cálculo do período natural de *pitch*, como mostra as Equações 39 e 40.

$$T_n^{Pitch} = 1,776 \cdot C_{WP}^{-1} \cdot \sqrt{T \cdot C_B \cdot \left(0,6 + \frac{0,36 \cdot B}{T}\right)} \quad (39)$$

Assim,

$$\omega_n^{Pitch} = \frac{1}{T_n^{Pitch}} \cdot 2\pi \quad (40)$$

Para derivar a frequência natural de *heave* que incluisse a influência do bulbo, assumiu-se que a rigidez do navio era aproximadamente igual área na linha d'água ( $A_{WL}$ ) multiplicada pela densidade da água ( $\rho$ ) e aceleração gravitacional ( $g$ ). A inércia do corpo para esse caso foi a massa do navio somada a massa adicional do bulbo, conforme mostra a Equação 41 (LAMB, 1969).

$$\omega_{n_{Bulbo}}^{Heave} = \sqrt{\frac{\rho \cdot g \cdot A_{WL}}{\nabla \cdot \rho + C_{VPR} \cdot \nabla \cdot \rho}} \quad (41)$$

Assim, pôde-se obter a Equação 42, a qual inclui a influência do bulbo na frequência natural de *heave*.

$$\omega_{n_{Bulbo}}^{Heave} = \omega_n^{Heave} \sqrt{\frac{1}{1 + C_{VPR}}} \quad (42)$$

Tomando-se como base a formulação empírica proposta por Parsons (2003) para o cálculo do período natural em *heave* das embarcações, apresentada pela Equação 43, pôde-se calcular a frequência natural em *heave* conforme a Equação 44.

$$T_n^{Heave} = 2.007 \cdot \sqrt{\frac{T \cdot C_B \cdot \left(\frac{B}{3T} + 1.2\right)}{C_{WP}}} \quad (43)$$

$$\omega_n^{Heave} = \frac{1}{T_n^{Heave}} \cdot 2\pi \quad (44)$$

A frequência natural dos navios em movimentos de *roll* não foram consideradas neste trabalho, pois assumiu-se que o bulbo não tem influência sobre os movimentos de *roll*.

Por fim, é importante observar que tanto a massa adicional do navio para o movimento de *heave* e para o movimento de *pitch* foram incorporadas pelo uso das formulações empíricas descritas nas Equações 43 e 39.

### 3.12 Considerações para a implementação do bulbo no modelo de otimização

As informações sobre o bulbo em navios semelhantes são raras e de difícil obtenção. Porém, foi possível obter informações sobre o bulbo de um PSV construído recentemente em um estaleiro na região do vale do Itajaí e, essas informações foram usada como base para se estimar os parâmetros de bulbo das soluções otimizadas.

O bulbo base utilizado tem uma área de seção transversal igual à 13,964 m. O comprimento ( $L_B$ ) do bulbo foi estimado em 3,5% do comprimento do navio, conforme sugestão dos profissionais do estaleiro. Por fim, foi considerado um formato cilíndrico para os bulbos então, o volume ( $V_{PR}$ ) do bulbo foi estimado como sendo a multiplicação da área da seção transversal ( $A_{BT}$ ) pelo seu comprimento ( $L_B$ ). Esses valores fornecem a base para a determinação do hiperespaço associado as variáveis que descrevem a geometria do bulbo no modelo de síntese e otimização proposto.

### 3.13 Modelos de otimização

A partir das formulações empíricas e semi-empíricas propostas pelas referências e adaptações aqui derivadas, dois modelos diferentes de otimização foram desenvolvidos para realizar o estudo proposto no trabalho. O primeiro modelo utiliza como variáveis as dimensões  $L$ ,  $B$ ,  $T$  e  $C_B$  para o casco e  $h_B$  e  $A_{BT}$  para o bulbo, esse modelo chamado de modelo de variáveis convencionais. O segundo modelo utiliza  $L$ ,  $L/B$ ,  $B/T$  e  $C_B$  para o casco e  $h_B$  e  $A_{BT}$  para o bulbo sendo chamado de modelo com variáveis não convencionais. Utilizar coeficientes de forma como variáveis de projeto tem por objetivo manter as soluções, em teoria, dentro apenas do conjuntos de soluções viáveis evitando-se, assim, obtenção de navios cujo comprimento seja menor do que a boca, por exemplo.

### 3.14 Ferramenta matemática

A ferramenta de cálculo escolhida foi o Microsoft Excel<sup>®</sup>. Tal escolha se justifica pela facilidade de se implementar os métodos empíricos e semi-empíricos, e também por ser uma ferramenta bastante visual, o que facilita a detecção de possíveis erros na otimização originados na ferramenta de cálculo além disso pela facilidade de integração com o programa comercial modeFRONTIER<sup>®</sup>, cujo detalhamento será feito a seguir.

Os métodos empíricos, descritos anteriormente, foram implementados na ferramenta matemática pelo autor, com a exceção do método de Holtrop e Mennen (1982) que foi implementado por profissionais do Laboratório de Otimização e Projeto Integrado (Loopin) da Universidade de São Paulo (USP) e adaptado pelo autor a fim de se obter uma única planilha de cálculos, cujo objetivo foi acelerar o tempo de processamento no modeFRONTIER<sup>®</sup>

Além da planilha de cálculos, o Microsoft Excel<sup>®</sup> também foi utilizado para o processamento dos resultados obtidos no trabalho. Então, gráficos e tabelas foram desenvolvidos com o auxílio desta ferramenta.

### 3.15 Ferramenta comercial de otimização

Para a construção dos modelos de otimização propostos nesse trabalho foi escolhido um programa comercial devido à grande complexidade de se implementar as otimizações aqui propostas em uma ferramenta de programação de uso livre.

Portanto, o programa modeFRONTIER<sup>®</sup> foi o escolhido por ser uma ferramenta robusta e confiável, ser aplicável ao problema de otimização em estudo e, também devido a existência de uma licença na Universidade Federal de Santa Catarina, para que fosse possível a realização desse estudo.

O modeFRONTIER<sup>®</sup> utiliza ‘nós’ para fazer a interação entre as variáveis de entrada, variáveis de saída, restrições, população inicial de indivíduos, algoritmo de otimização, ferramenta matemática e objetivos. A relação entre as entidades do modelo de otimização e os nós utilizados pelo modeFRONTIER<sup>®</sup> para representa-las podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 – Relação entre as entidades do modelo de otimização e os nós utilizados pelo modeFRONTIER<sup>®</sup> para representa-las.

| Entidades do modelo de otimização                          | Nós do modeFRONTIER <sup>®</sup> |
|--|----------------------------------|
| Variáveis de entradas e saída                              | Nó de dados                      |
| Restrições e objetivos                                     | Nó de meta                       |
| População de indivíduos iniciais e algoritmo de otimização | Nó lógico                        |
| Ferramenta matemática                                      | Nó de aplicação                  |

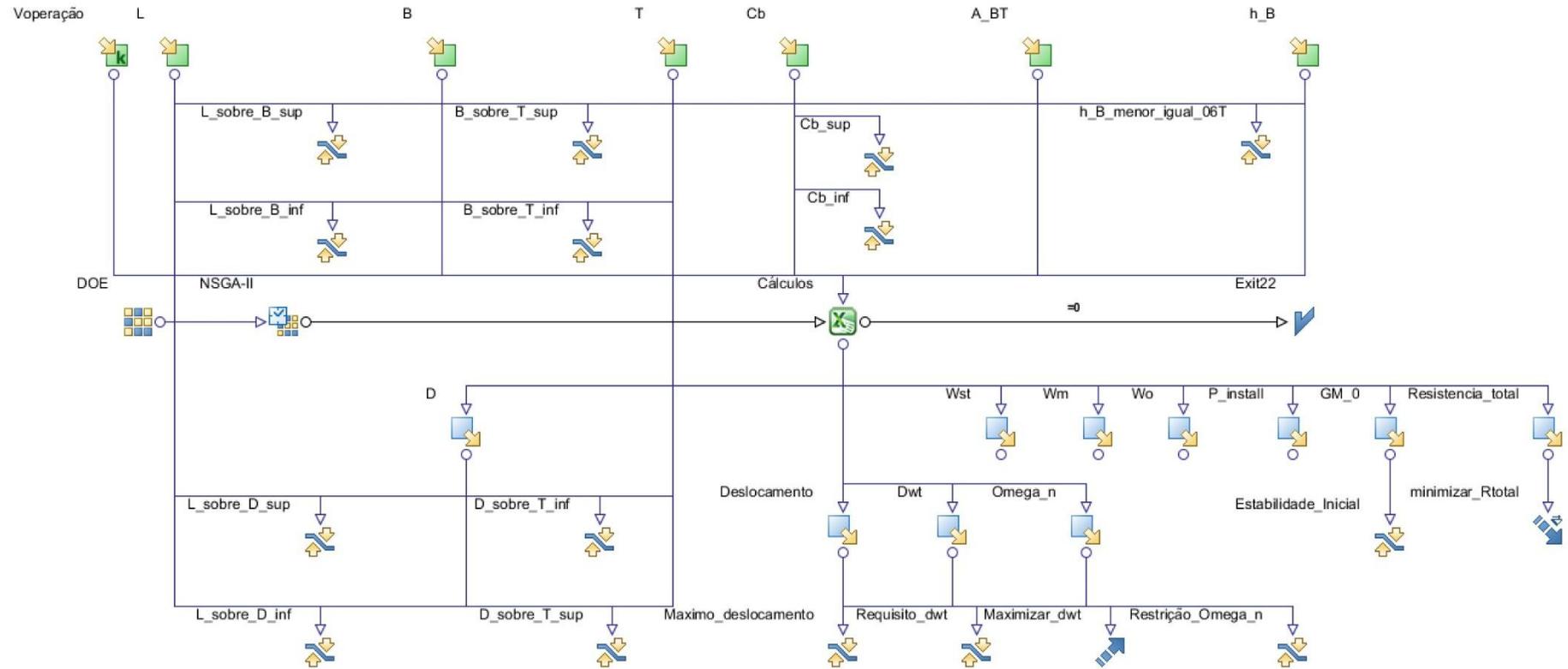
Fonte: O autor (2016).

Os nós devem ser ligados de acordo com a lógica desenvolvida pelo usuário, com o objetivo de “ensina-lo” como a otimização deve acontecer. Assim, quase todos os nós são conectados à ferramenta matemática, uma vez que é através dela que está determinado a relação entre as variáveis de entrada e saída.

Os nós de restrição e objetivo são conectados diretamente às variáveis, uma vez que as restrições para os modelos de otimização advêm de requisitos de projeto, critérios de estabilidade, critérios de coerência, dentre outras coisas que podem afetar a viabilidade do projeto. Os objetivos, por sua vez, advêm do desejo de minimização do valor de determinadas variáveis de saída.

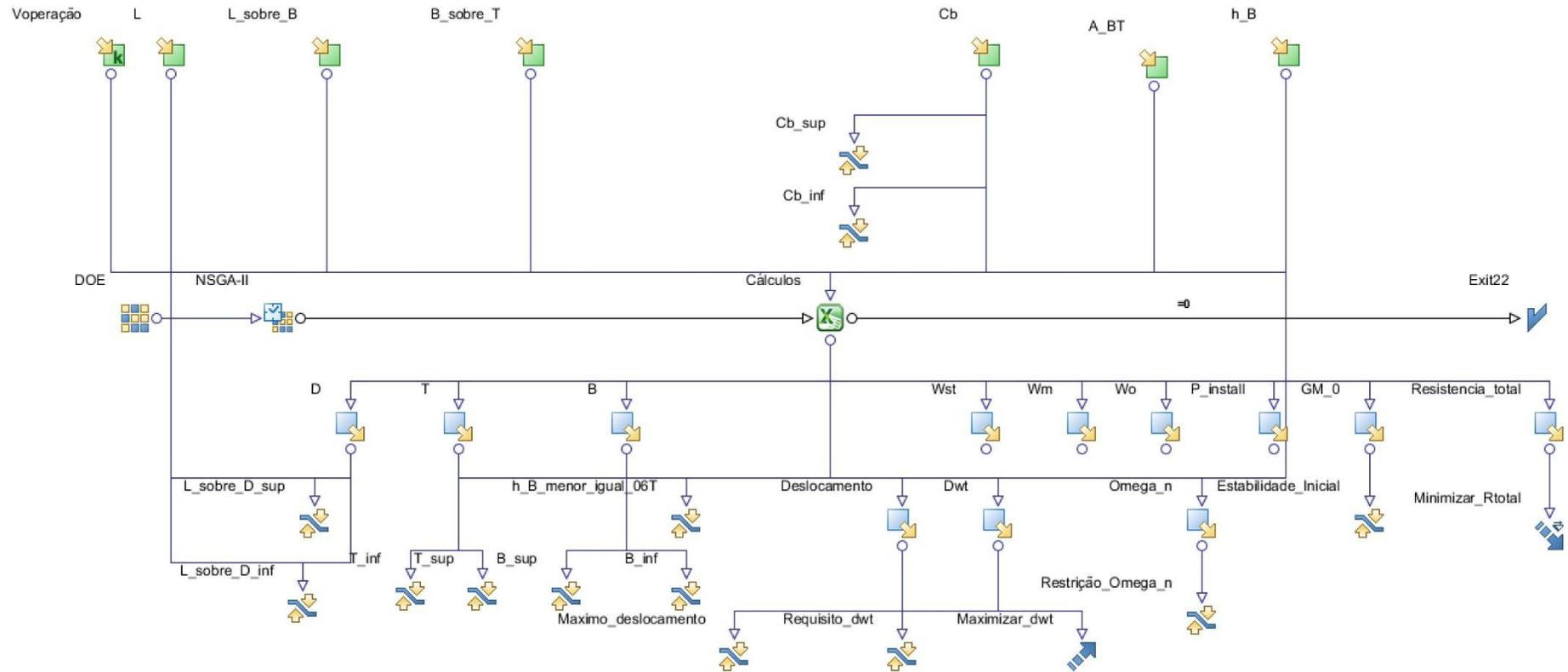
Os modelos de otimização no modeFRONTIER® para as variáveis convencionais é apresentado na Figura 16, e para as variáveis não convencionais, que pode ser visto na Figura 17. Os quadrados destacados em verde representam os ‘nós’ de variáveis de entradas, os quadrados em azul são os ‘nós’ das variáveis de saída, os ícones com duas flechas amarelas em sentidos opostos representam os ‘nós’ de restrição, as setas em azul representam os ‘nós’ objetivos, seta para baixo indica que o parâmetro deve ser minimizado e seta para cima indica que o parâmetro deve ser maximizado, o ícone do Microsoft Excel® (em verde) representa o ‘nó’ de aplicação e os ‘nós’ lógicos são representados pelo ícone dividido em quadrados azuis e amarelos, a esquerda nas Figuras 16 e 17.

Figura 16 – Modelo de variáveis convencionais no modeFRONTIER®.



Fonte: O autor (2016).

Figura 17 – Modelo de variáveis não convencionais no modeFRONTIER®.



Fonte: O autor (2016).

### 3.15.1 Funções objetivo dos modelos

As otimizações multiobjetivo podem ser extremamente complexas e ter um alto custo computacional. Portanto, para a realização desse trabalho optou-se por trabalhar com modelos bi-objetivos, uma vez que seria necessário realizar vários processos de otimização para cada um dos modelos, a fim de se estudar a convergência da fronteira de Pareto em ambos os casos.

Além disso, no processo de otimização hierárquica, o custo computacional é maior do que em uma otimização global, uma vez que na hierarquização primeiro realiza-se uma otimização para as dimensões principais do casco e o coeficiente de bloco, e somente depois otimiza-se os parâmetros do bulbo.

Portanto, escolheu-se trabalhar com dois objetivos no processo do projeto de navios:

- Minimizar a resistência ao avanço;
- Maximizar a capacidade de carga do navio (*Deadweight*).

Conforme foi descrito na fundamentação teórica, a resistência ao avanço pode, eventualmente, ser associada ao custo operacional do navio. Enquanto que a capacidade de carga, está associada a maior eficiência da embarcação.

É interessante observar que as características do bulbo não afetam a capacidade de carga e por isso estão restritas a minimização da resistência ao avanço e as restrições de comportamento no mar da embarcação.

Por fim, a partir dos métodos empíricos estudados pode-se definir as funções objetivos para os modelos de otimização. Então, a função objetivo que visa minimizar a resistência ao avanço é dada pela Equação 43. Maiores detalhes para cada parcela da Equação 43 podem ser estudados em Holtrop e Mennen (1984).

$$R_{Total} = R_F(1 + k) + R_W + R_B + R_{TR} + R_A \quad (45)$$

A função objetivo da capacidade de carga do navio é dada pela Equação 46, que advém dos métodos apresentados e discutidos anteriormente.

$$DWT = L \cdot B \cdot T \cdot C_B \cdot \rho - 1,05 \cdot (W_S + W_M + W_O) \quad (46)$$

### 3.15.2 Restrições dos modelos de otimização

As restrições explícitas<sup>3</sup> dos modelos de otimização foram desenvolvidas a partir da análise de embarcações semelhantes. Já para os parâmetros de bulbo, as restrições se basearam na restrição do método de Holtrop e Mennen (1982) para o cálculo da resistência total ao avanço e em dados de um bulbo real de uma embarcação construída recentemente no Vale do Itajaí, cujas dimensões principais, parâmetros do bulbo e coeficientes de forma podem ser encontrados no APÊNDICE A.

Para que fosse possível obter soluções que não se restringissem apenas as dimensões principais dos navios semelhantes optou-se por extrapolar as dimensões principais e coeficientes de forma em 15% acima do limite superior e 15% abaixo do limite inferior dos valores encontrados na análise de semelhantes. Porém, o coeficiente de bloco não foi extrapolado com o objetivo de manter a coerência dos valores. Por fim, os parâmetros de bulbo foram variados de forma arbitrária devido à quantidade escassa de informações. Então, chegou-se ao hiperespaço das dimensões principais do navio e parâmetros do bulbo apresentados na Tabela 7 e aos coeficientes de forma apresentados na Tabela 8.

Tabela 7 – Hiperespaço das dimensões principais do navio e parâmetros do bulbo.

| Limite inferior   |   | Parâmetro       |   | Limite superior   |
|-------------------|---|-----------------|---|-------------------|
| 37,5 m            | < | L               | < | 102,5 m           |
| 9,86 m            | < | B               | < | 23 m              |
| 3,2 m             | < | T               | < | 7,5 m             |
| 10 m <sup>2</sup> | < | A <sub>BT</sub> | < | 15 m <sup>2</sup> |
| 2,3 m             | < | h <sub>B</sub>  | < | 3,5 m             |

Fonte: O autor (2016).

Tabela 8 – Hiperespaço dos coeficientes de forma do navio.

| Limite inferior |   | Parâmetro      |   | Limite superior |
|-----------------|---|----------------|---|-----------------|
| 0,52            | < | C <sub>B</sub> | < | 0,89            |
| 3,045           | < | L/B            | < | 6,32            |
| 2,2             | < | B/T            | < | 4,00            |
| 7,25            | < | L/D            | < | 16,0            |

Fonte: O autor (2016).

Para o modelo de variáveis convencionais adotou-se como faixa de variação das variáveis os valores apresentados na Tabela 7 e como restrições do modelo aqueles

<sup>3</sup> Aquelas explicitadas por uma única variável de projeto ou relações simples entre elas.

apresentados na Tabela 8 e para o modelo das variáveis não convencionais adotou-se como faixa de variação das variáveis os valores da Tabela 8 e como restrição do modelo aqueles apresentados pela Tabela 7.

Vale ressaltar que  $C_B$ ,  $A_{BT}$  e  $h_B$  são variáveis comuns aos dois modelos, portanto, os valores apresentados nas Tabela 7 e Tabela 8 para esses parâmetros foram utilizados como faixa de variação dessas variáveis em ambos os casos. Para o parâmetro  $h_B$  utilizou-se a restrição imposta pelo método de Holtrop e Menen (1982) já discutida anteriormente.

Além disso, outras três restrições comuns a ambos os modelos de otimização também foram estabelecidas. O critério de estabilidade transversal inicial foi determinada conforme descrito na NORMAM 01, a qual estabelece que a altura metacêntrica inicial ( $GM_0$ ) deve ser maior do que 0,15 m.

O comportamento no mar (*seakeeping*) das soluções foi tratado de forma simplificada no modelo. E para isso assumiu-se a hipótese de que quanto maior for a distância entre a frequência de pico do espectro de mar (ponto de maior energia do mar) e o período natural de *pitch* ou *heave* (o que tiver a menor distância) das soluções encontradas, menor será o momento espectral de primeira ordem (área abaixo da curva do espectro de resposta), ou seja, menor será a energia que o mar transfere ao navio, e portanto, menor a amplitude dos movimentos da embarcação nestes graus de liberdade.

Então, foi incluída uma restrição de que a frequência natural de *pitch* ou *heave* (a que for menor) deve ter uma distância mínima de 0,25 rad/s da frequência resultante de um mar com período de pico igual a 12 s, conforme dados fornecidos pela empresa Metocean Solutions Ltd. (2014) através de sua página virtual.

Por fim, optou-se por restringir o deslocamento das soluções em 12.000 toneladas, pois as embarcações construídas no Vale do Itajaí não ultrapassam esse valor e os modelos de otimização aqui construídos são fortemente baseados nessas embarcações.

### 3.15.3 Algoritmo Genético

O programa de otimização modeFRONTIER<sup>®</sup> disponibiliza de diversos algoritmos otimizadores. Dentre todos os métodos optou-se por utilizar um algoritmo evolucionário, o NSGA-II que é um algoritmo genético de seleção não-dominada (Deb et al., 2002).

Segundo Deb et al. (2002), as principais críticas aos algoritmos genéticos de seleção não-dominada (NSGA) até o ano de sua publicação eram a alta complexidade computacional para a seleção de solução não dominadas, a falta de elitismo e a necessidade de especificar um parâmetro de *sharing*.

No entanto, de acordo com os estudos de Deb et al. (2002) o algoritmo NSGA-II teve um melhor desempenho em manter a variabilidade de soluções e melhor convergência da fronteira se comparado a outros algoritmos evolucionários. Além disso, o mecanismo para preservar a diversidade das soluções utilizados pelo NSGA-II foi o melhor dentre os três métodos estudados por Deb et al. (2002).

As principais características do NSGA-II, conforme apresentado pelo modeFRONTIER<sup>®</sup> são:

- Possibilidade de se trabalhar com variáveis discretas e contínuas;
- Permitir que usuário defina a discretização das variáveis;
- Não usar parâmetros de penalização para o método de restrições;
- Implementa diversos métodos elitistas para uma busca multiobjetivo;
- Diversidade e propagação dos indivíduos é garantida sem a necessidade de parâmetros de Sharing;
- Permite avaliação de  $n$  indivíduos independentes ao mesmo tempo, permitindo o paralelismo das análises.

Por fim, o algoritmo evolucionário NSGA-II apresenta propriedades de um algoritmo de rápida seleção de soluções não dominadas aliada a uma estratégia elitista, uma abordagem que dispensa o uso de parâmetros para garantir a variabilidade e propagação das soluções e tem um método bastante eficiente para lidar com restrições, segundo Deb et al. (2002), justificando sua escolha dentre todos os outros métodos disponíveis na ferramenta.

O critério de convergência da fronteira de Pareto foi determinado através do número máximo de gerações. Então, a partir de uma população inicial de 20 indivíduos desejava se responder qual era o número de gerações necessárias para que a fronteira de Pareto convergisse.

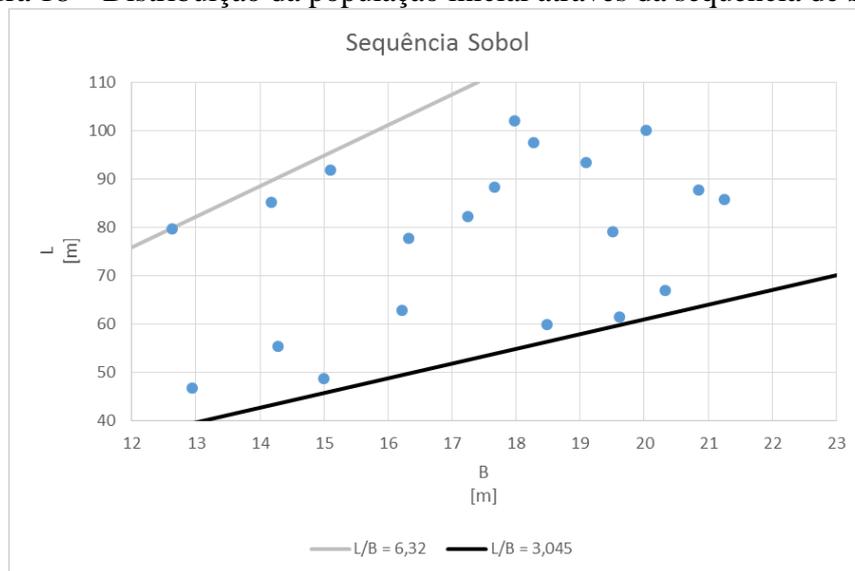
#### **3.15.4 População de indivíduos iniciais (DoE)**

A população dos indivíduos iniciais ou em inglês *design of experiments* (DoE) foi estabelecida em 20 indivíduos e obtida através de um método pseudo aleatório presente na ferramenta de otimização, denominada Sobol. Esse método distribui a população de indivíduos iniciais igualmente no espaço de estudo evitando a concentração de indivíduos em uma determinada região do espaço, como pode ser visto pela Figura 18 que apresenta um gráfico da distribuição no espaço de duas variáveis de projeto, o comprimento (L) e a boca (B).

Em contrapartida o método de distribuição aleatória dos indivíduos não consegue abranger todo o espaço em estudo, ou seja, ele acaba por concentrar os indivíduos em determinadas regiões, como pode ser visto pela Figura 19 que apresenta a distribuição das mesmas variáveis de projeto da Figura 18.

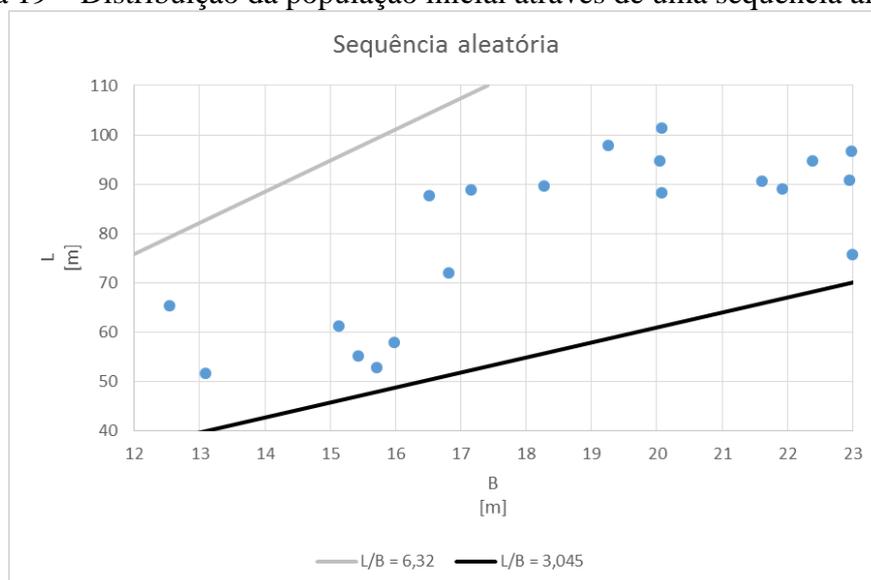
Portanto, a distribuição aleatória se torna pouco eficiente quando utilizada junto com algoritmos genéticos, uma vez que os algoritmos genéticos vão buscar novas soluções a partir de um conjunto inicial de indivíduos. Assim, justifica-se o uso da sequência de Sobol para se obter a população de indivíduos iniciais.

Figura 18 – Distribuição da população inicial através da sequência de Sobol.



Fonte: O autor (2016).

Figura 19 – Distribuição da população inicial através de uma sequência aleatória.

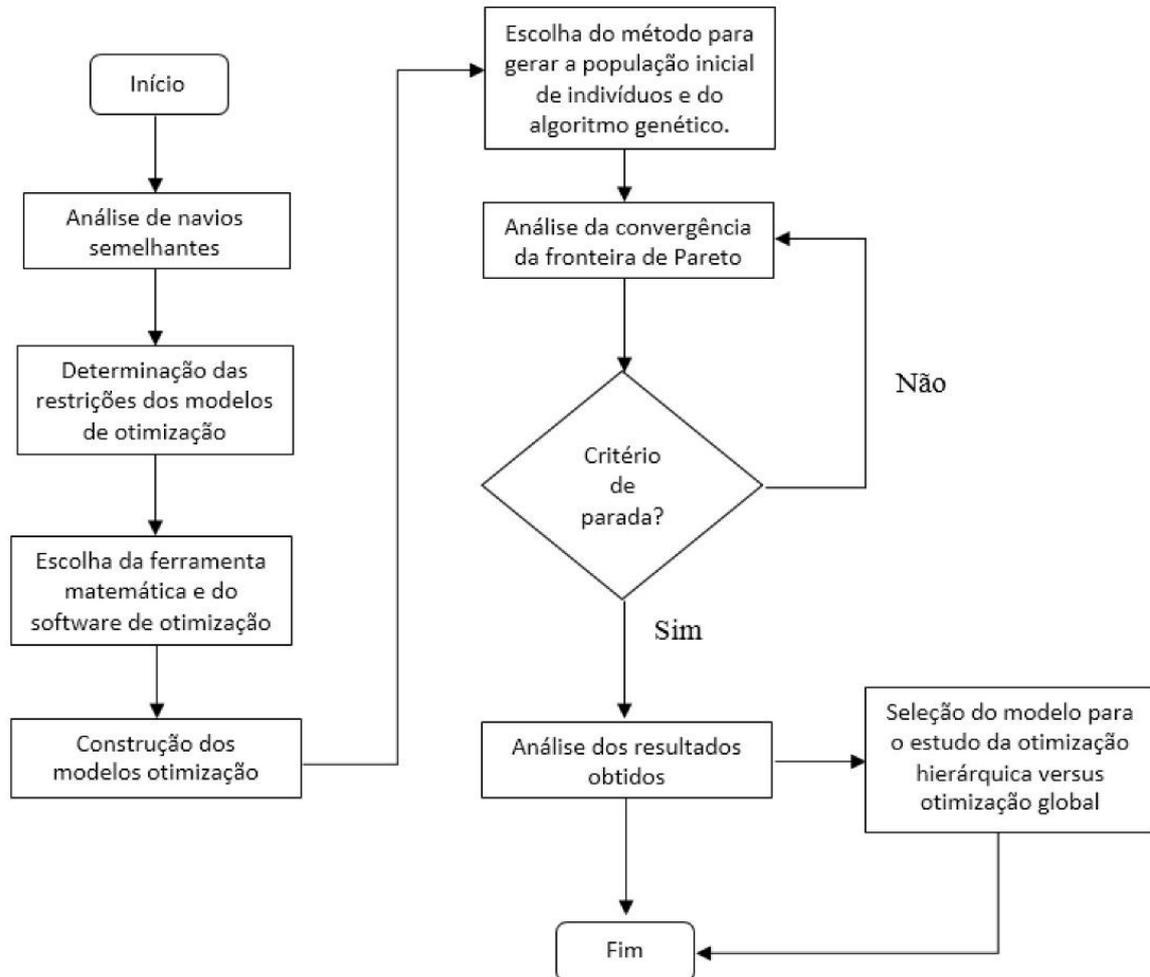


Fonte: O autor (2016).

### 3.16 Etapas de trabalho

As etapas do desenvolvimento deste trabalho são apresentadas na forma de fluxograma que pode ser visto através da Figura 20.

Figura 20 – Etapas do trabalho na forma de fluxograma.



Fonte: O autor (2016).

### 3.17 Considerações finais

Neste capítulo foram apresentadas a sequência de trabalho, as ferramentas computacionais, métodos empíricos utilizados, aproximações e considerações necessárias para que fosse possível a realização deste estudo.

No próximo capítulo são apresentados os resultados obtidos a partir dos dois modelos desenvolvidos seguido de uma discussão dos resultados. Compara-se as soluções otimizadas e os navios existentes a fim de verificar a aderência dos resultados. Discute-se sobre a

hierarquização ou não no processo de otimização. Finalmente, são estabelecidas dimensões principais e o coeficiente de bloco típico para navios PSV.

## 4 RESULTADOS

Apresenta-se neste capítulo os resultados obtidos a partir dos dois modelos de síntese e otimização desenvolvidos quanto à convergência da fronteira de Pareto, comparando-os. Compara-se também as soluções otimizadas e os navios existentes com a finalidade de verificar e validar os resultados. Um estudo da efetividade das restrições é feito para determinar qual delas mais influenciou no procedimento de otimização. Analisa-se a sensibilidade das variáveis de projeto para compreender quais delas mais influenciaram nas funções objetivo. Discute-se os resultados da otimização global, comparando-os com a otimização hierárquica, que faz uso do modelo com a melhor convergência da fronteira de Pareto. E, finalmente, estabelece-se as dimensões principais e o coeficiente de bloco típico para navios do tipo PSV.

### 4.1 Comparativo entres os modelos de otimização propostos

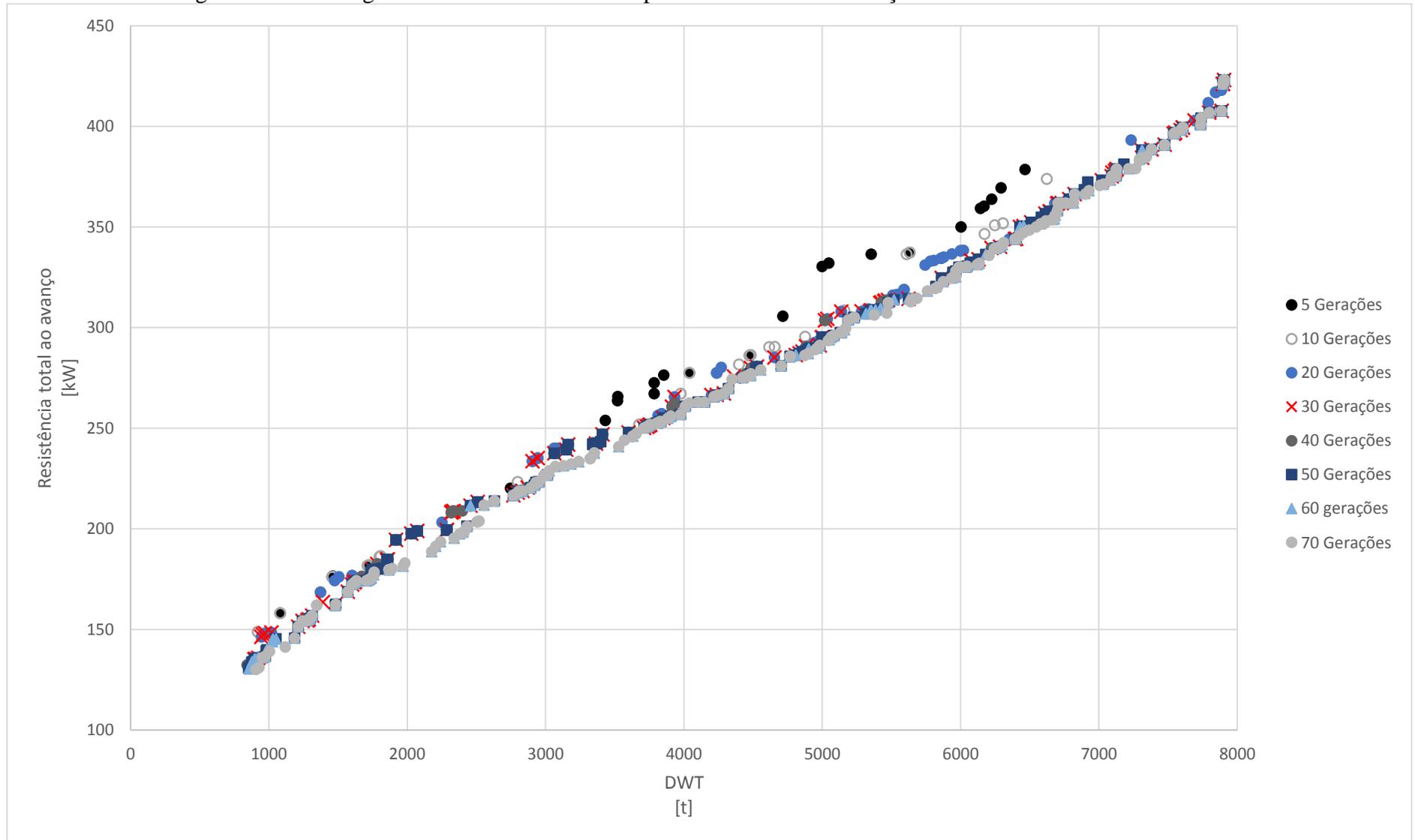
Apesar da aparente simplicidade de ambos os modelos de otimização, notou-se um alto custo computacional associado tanto ao modelo de variáveis convencionais quanto ao modelo de variáveis não convencionais. O tempo de processamento para que ambos os modelos se aproximassem da real fronteira de Pareto foi de aproximadamente 5 horas, com 70 iterações, em que cada iteração representa a geração de uma nova população, a partir da população inicial. No entanto, nos dois modelos a fronteira de Pareto converge com um número de iterações menor que 70. Além disso, os diferentes modelos desenvolvidos apresentaram desempenho bastante similar, uma vez que em ambos os casos pode-se afirmar que a fronteira de Pareto converge a partir da 30-ésima iteração. As soluções obtidas para 30 gerações de ambos com os modelos de síntese e otimização de variáveis convencionais e não convencionais podem ser vistas nos Apêndices B e C, respectivamente.

A Figura 21 mostra a convergência da fronteira de Pareto para o modelo que utiliza as variáveis convencionais. Observando-se o gráfico desta figura, nota-se que ao utilizar 5, 10 e 20 gerações existe uma maior quantidade de pontos que se afasta da fronteira se comparado as otimizações com maior número de gerações. Além disso, a partir de 30 gerações há convergência para a fronteira de Pareto, fato este que pode ser percebido pela dificuldade em

distinguir os pontos, mesmo utilizando cores e formas diferentes, independentemente da quantidade de gerações utilizadas.

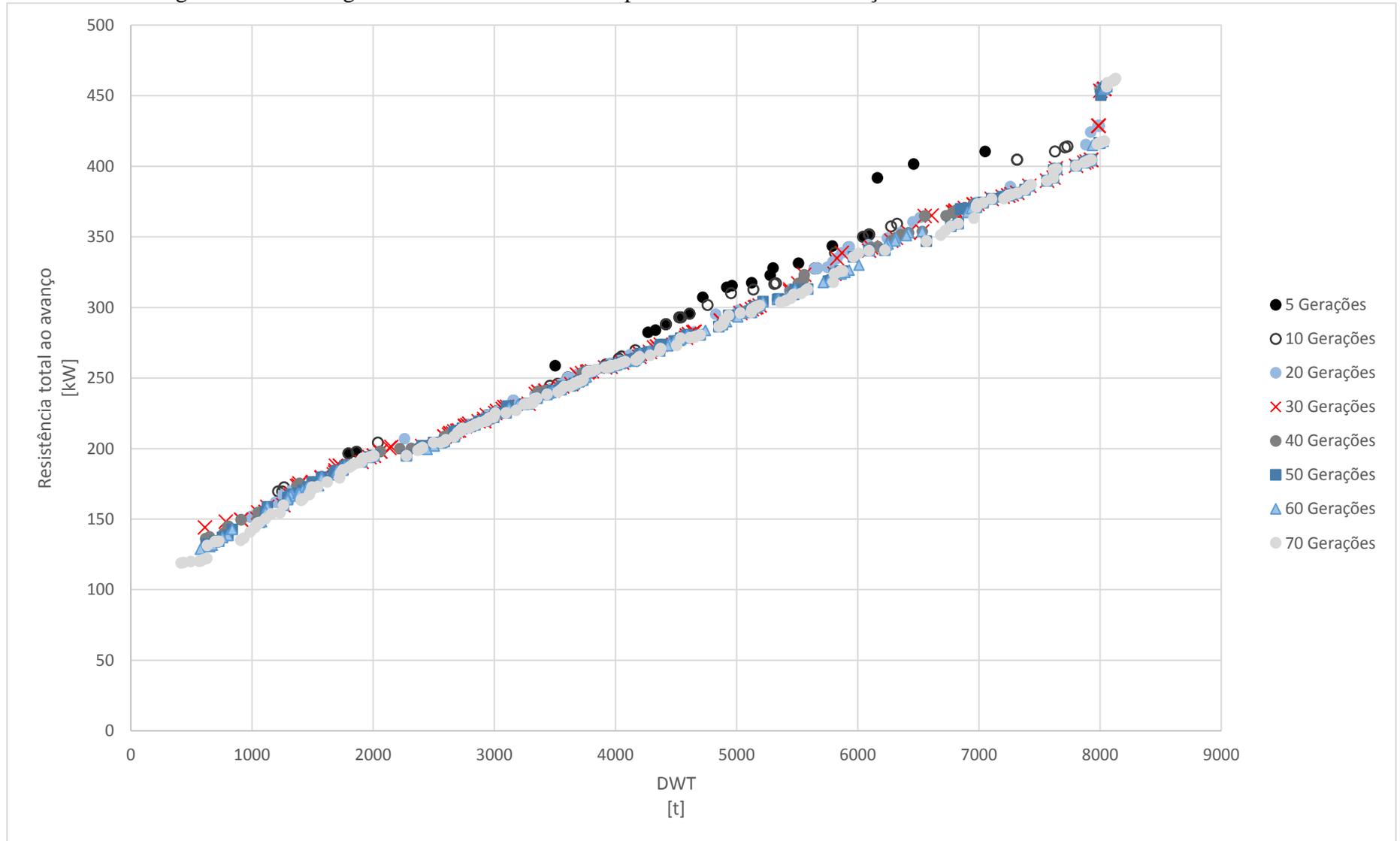
As fronteiras de Pareto obtidas utilizando o modelo de otimização com variáveis não convencionais tiveram comportamento semelhante ao modelo com as variáveis convencionais, como pode ser verificado na Figura 22. Pode-se observar a semelhança entre as fronteiras de Pareto em ambos os modelos de otimização ao se comparar as Figura 21 e Figura 22. Embora observe-se uma maior proximidade das fronteiras ao se analisar o modelo correspondente as variáveis não convencionais, essa maior proximidade entre as fronteiras de Pareto pode indicar uma maior eficiência do processo de otimização ao se considerar as variáveis não convencionais, embora as evidências não sejam suficientes para substanciar essa conclusão.

Figura 21 – Convergência da fronteira de Pareto para o modelo de otimização com as variáveis convencionais.



Fonte: O autor (2016).

Figura 22 – Convergência da fronteira de Pareto para o modelo de otimização com as variáveis não convencionais.

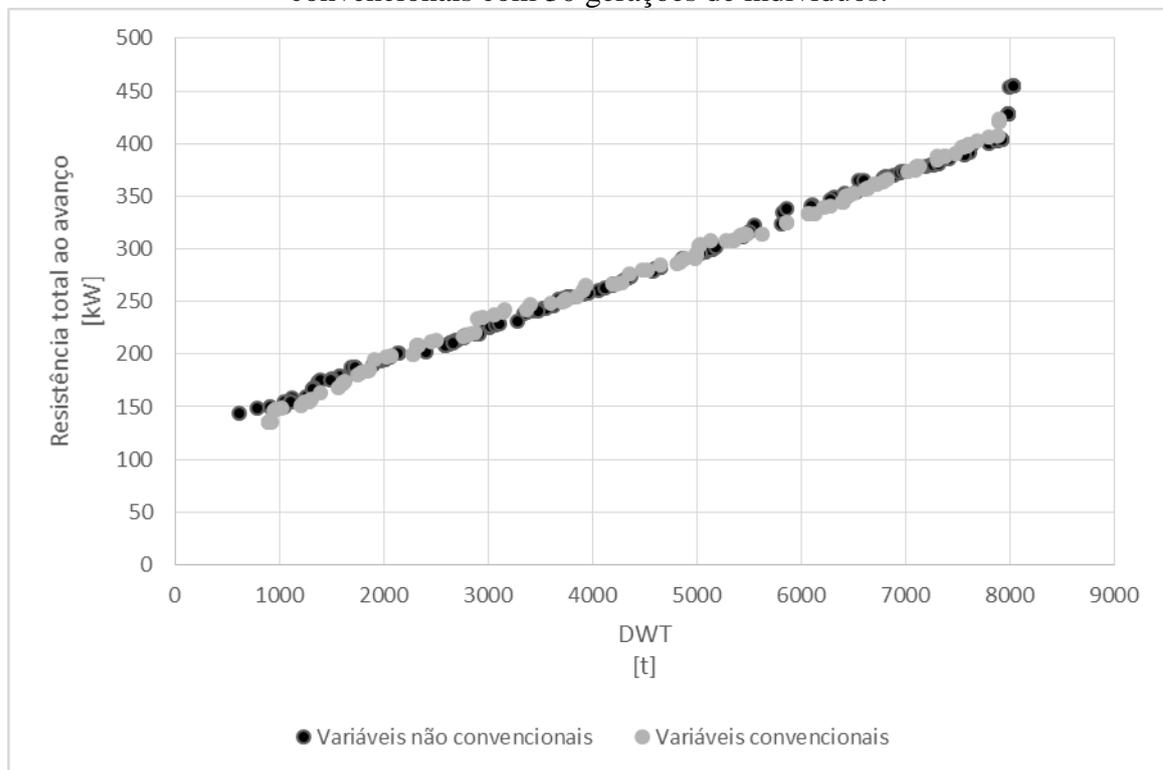


Fonte: O autor (2016).

O modelo de otimização utilizando variáveis não convencionais também apresentou convergência da fronteira de Pareto a partir de 30 gerações, pois verifica-se o mesmo afastamento da fronteira de Pareto por soluções encontradas nas otimizações com 5, 10 e 20 gerações e a mesma dificuldade de distinguir as fronteiras de Pareto para as otimizações com 30 ou mais gerações devido à grande sobreposição de pontos.

Determinado a convergência da fronteira de Pareto em 30 gerações pôde-se avaliar os modelos quanto a dominância de suas soluções por um modelo ou pelo outro. A Figura 23 mostra a fronteiras de Pareto, com 30 gerações de indivíduos, dos modelos de variáveis convencionais em relação ao modelo de variáveis não convencionais.

Figura 23 – Comparativo entre as fronteiras de Pareto das variáveis convencionais e não convencionais com 30 gerações de indivíduos.



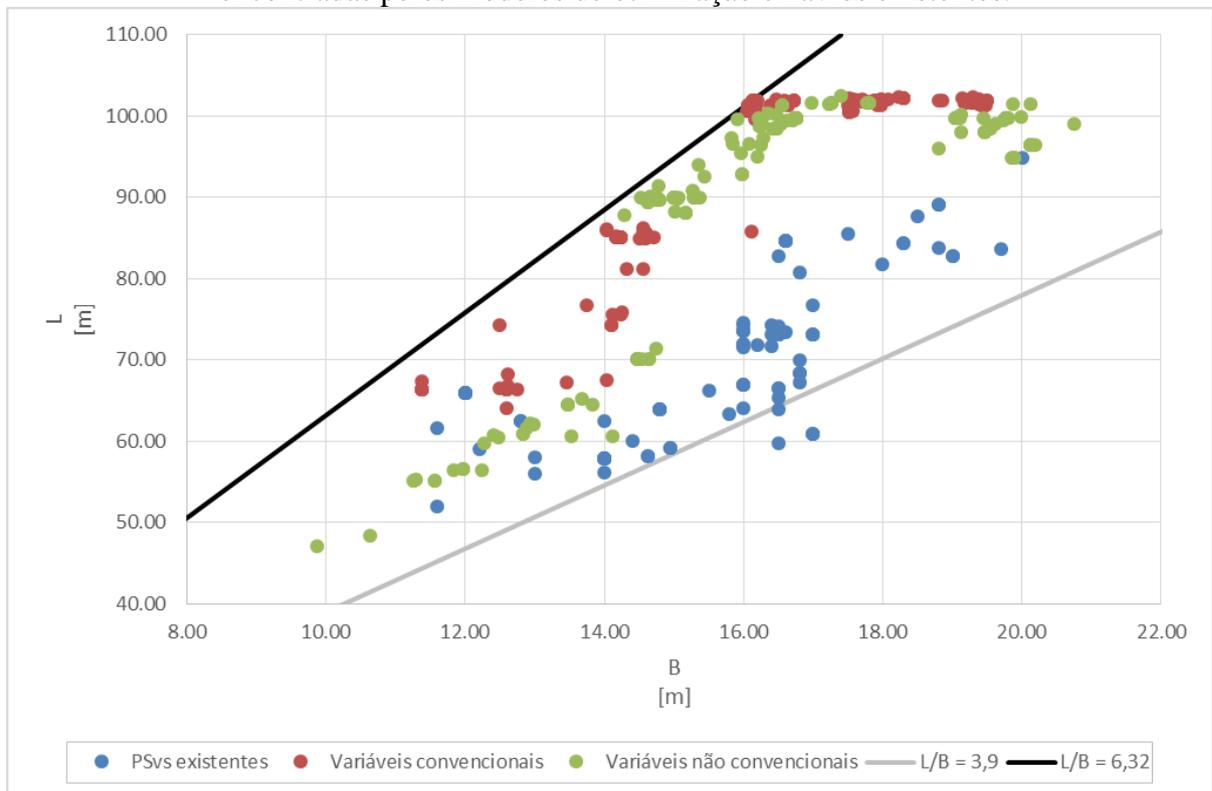
Fonte: O autor (2016).

Pode-se observar, através da Figura 23, que as soluções do modelo de otimização com variáveis não convencionais não dominam as soluções do modelo com variáveis convencionais e vice-versa. Portanto, é possível afirmar que as soluções dos dois modelos desenvolvidos são igualmente otimizadas. No entanto, do ponto de vista das soluções encontradas os modelos divergem, ou seja, os dois modelos apesar de resultarem em uma mesma fronteira de Pareto não resultam nos mesmos navios. Isso pode ser constatado ao se comparar as soluções na

fronteira de Pareto encontradas através dos dois modelos de otimização. Além disso, do ponto de vista de projeto de navios é de extrema importância comparar os resultados obtidos por ambos os modelos com os navios do banco de dados, ou seja, navios existentes.

Uma análise do Adimensional  $L/B$ , mostra a divergência entre as soluções obtidas por ambos os modelos, como pode ser visto pela Figura 24. Porém, os dois modelos seguem a tendência de aumento desse coeficiente, o que do ponto de vista de redução da resistência total ao avanço faz sentido, uma vez que navios com maiores coeficientes de  $L/B$  apresentam menor resistência ao avanço, conforme já visto em Tancredi et al. (2014).

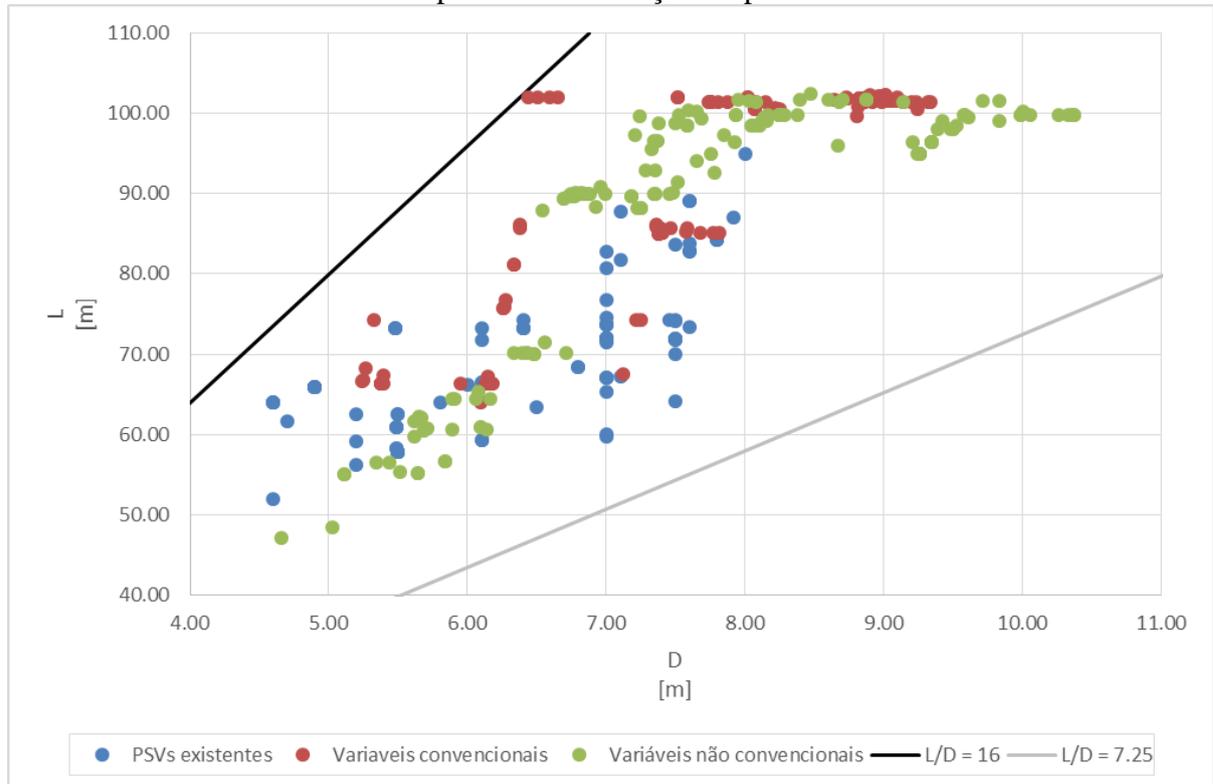
Figura 24 – Comparativo do comprimento ( $L$ ) em função da boca ( $B$ ) entre as soluções encontradas pelos modelos de otimização e navios existentes.



Fonte: O autor (2016).

Outro adimensional bastante importante na determinação da resistência estrutural da embarcação, segundo Tancredi et al. (2014), é o adimensional  $L/D$ . Portanto, avaliar aonde se inserem as soluções encontradas através do procedimento de otimização junto a navios existentes é de extrema importância. A Figura 25 mostra a dispersão do comprimento em função do pontal para os navios do banco de dados e as soluções obtidas por otimização.

Figura 25 – Sobreposição das soluções obtidas por otimização e navios existentes do comprimento em função do pontal.



Fonte: O autor (2016).

Mais uma vez é possível observar a diferença entre as soluções obtidas pelo modelo que utiliza as variáveis convencionais e o modelo que utiliza as variáveis não convencionais. No entanto, pela análise da Figura 25 observa-se que as soluções obtidas por ambos os modelos de otimização estão na mesma região do coeficiente  $L/D$  que navios existentes, para comprimentos menores do que 90 m, para as soluções com comprimentos maiores que 90 m não se pode fazer a mesma afirmação já que o banco de dados não dispunha de muitos navios com esse comprimento.

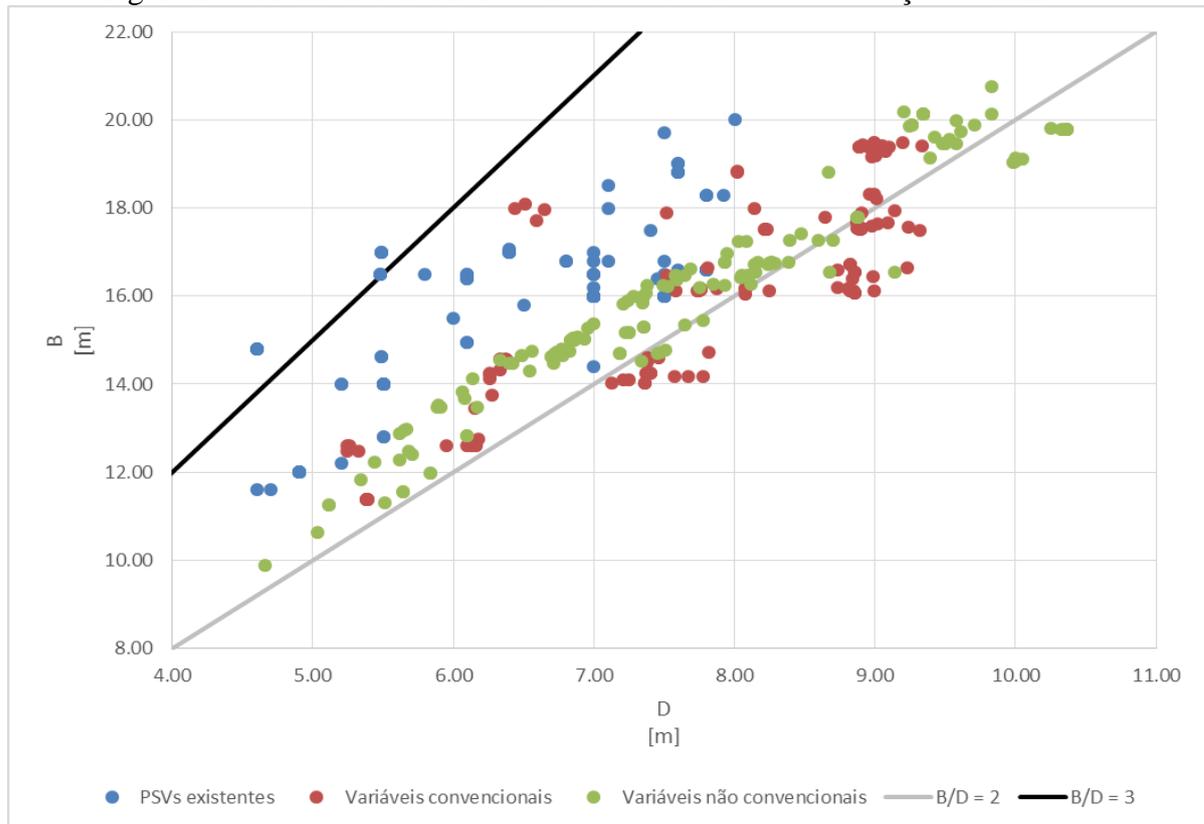
Outro fato importante da análise do adimensional  $L/D$  é que apesar da extrapolação de 15% acima do limite superior e 15% do limite inferior, encontrados a partir da análise dos navios semelhantes, nota-se que as soluções otimizadas, em sua maioria, ficaram longe das restrições impostas pelos modelos de otimização. Portanto, pode-se concluir que o adimensional  $L/D$  teve pouca influência no procedimento de otimização.

O adimensional  $B/D$  tem influência na estabilidade transversal do navio e segundo Tancredi et al. (2014) quanto maior esse adimensional mais estável será a embarcação. Fazendo uma análise das soluções otimizadas, nota-se a tendência de menores valores para o adimensional, conforme visto na Figura 26. Comparando esses valores com navios existentes

fica claro a tendência de baixos valores para o adimensional B/D. Além disso, muitas das soluções obtidas com o modelo que utiliza variáveis convencionais estão fora do limite inferior de B/D encontrado nos navios semelhantes, aproveitando-se do relaxamento em 15% aplicado a essa restrição. Neste caso recomenda-se realizar uma análise do impacto que esses valores de B/D apresentam em outras características, eventualmente não analisadas, das embarcações.

No entanto, apesar da influência na estabilidade transversal do adimensional B/D a média da altura metacêntrica para as soluções do modelo que utiliza variáveis convencionais foi de 1,27 m e para as soluções do modelo com variáveis não convencionais foi de 1,36 m. Além disso, nenhuma das soluções dos dois modelos tiveram valor da altura metacêntrica menor do que 0,6 m, valor que incorpora a reserva de estabilidade transversal estipulada pela *International Maritime Organization* (1985). Portanto, apenas um estudo mais aprofundado de estabilidade, o qual não faz parte do escopo deste trabalho, poderá dizer se as soluções otimizadas comprometem o projeto.

Figura 26 – Adimensional B/D de navios existentes e das soluções otimizadas.

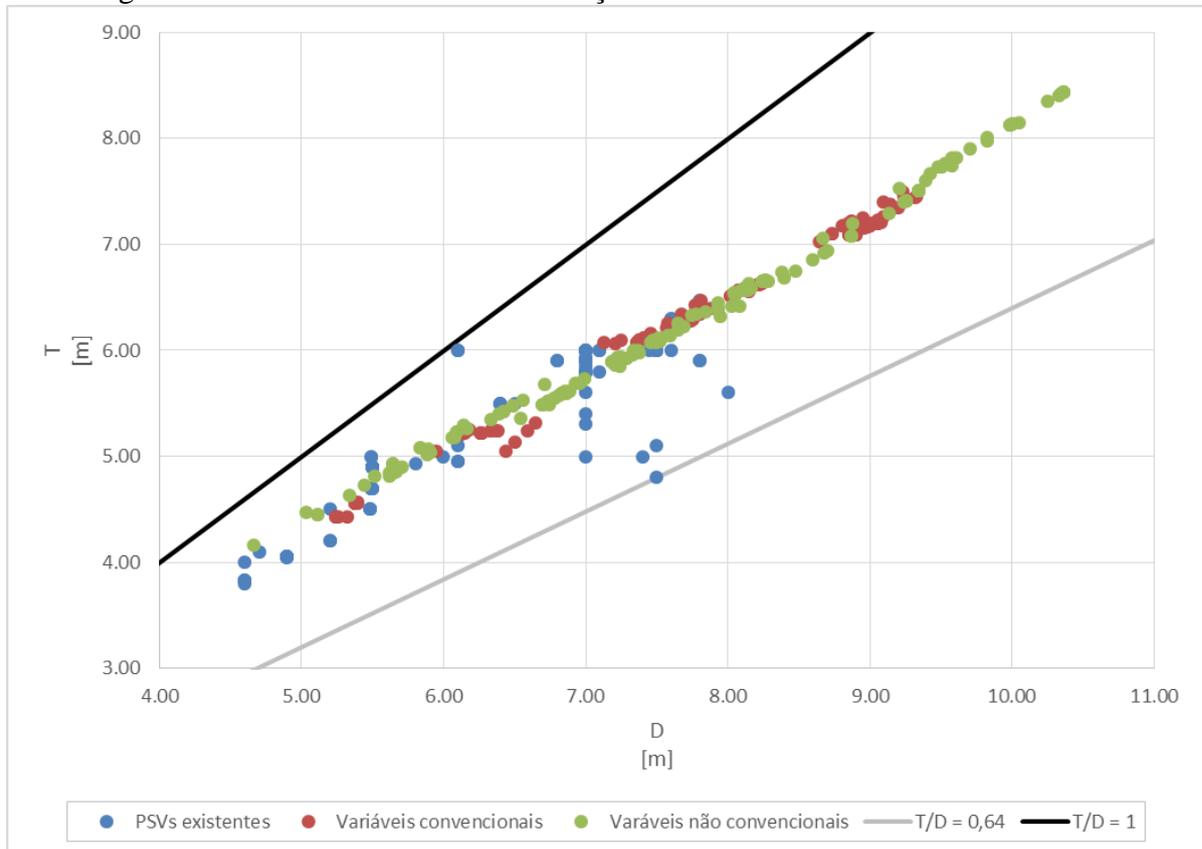


Fonte: O autor (2016).

Os resultados obtidos para o adimensional de T/D das soluções otimizadas estão de acordo com navios existentes, conforme mostra a Figura 27. O cumprimento das normas se

deve ao fato de que nos modelos de síntese foi incorporado o cálculo de borda livre para as soluções otimizadas, garantindo a coerência dos resultados para esse adimensional.

Figura 27 – Adimensional T/D das soluções otimizadas e dos navios semelhantes.

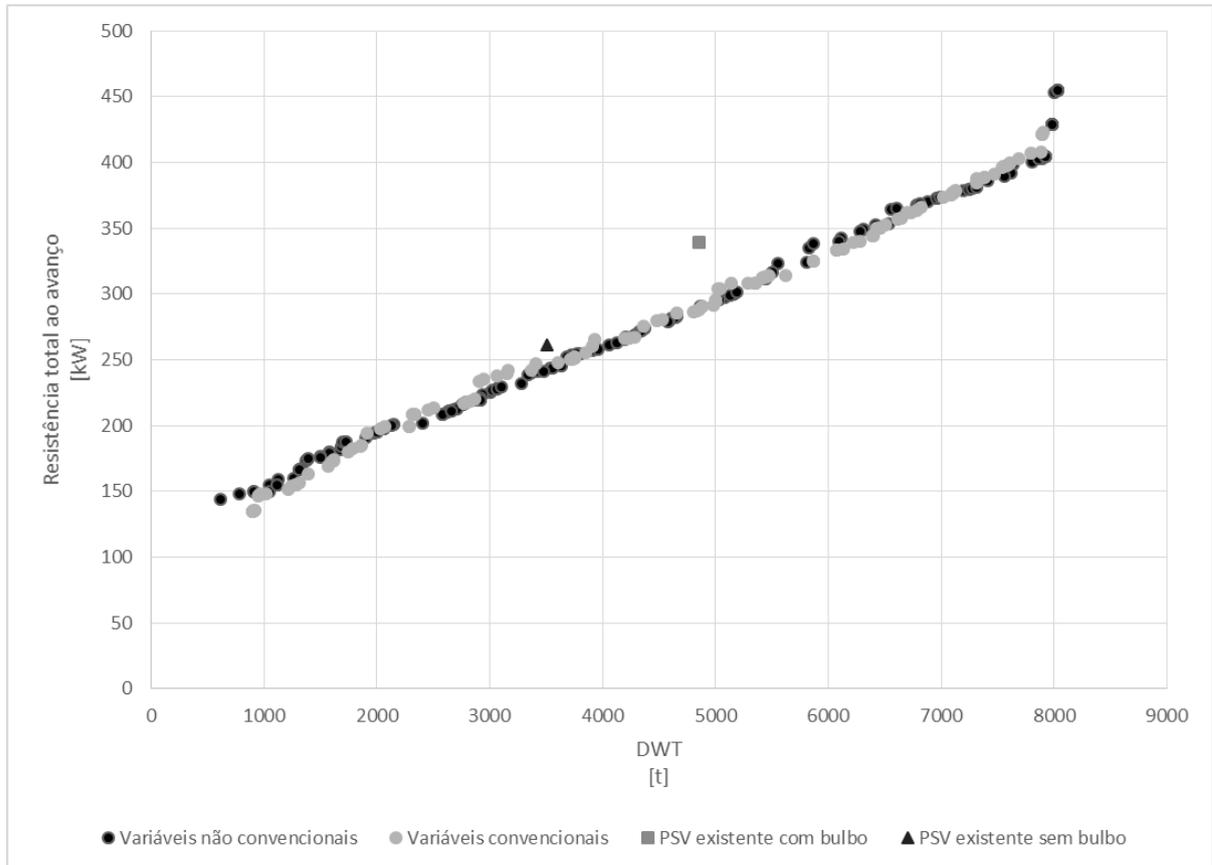


Fonte: O autor (2016).

A Figura 28 mostra um gráfico onde são comparadas as fronteiras de Pareto para os diferentes modelos de síntese de otimização e dois PSVs<sup>4</sup> (Apêndice A), hoje em operação e que foram construídos no vale do Itajaí, um deles não possui bulbo e o outro navio possui bulbo. Nota-se, que ambos os modelos de otimização foram capazes de gerar soluções que superam o desempenho dos navios hoje em operação o que mostra a adequação dos modelos para o projeto conceitual de navios e a importância dos procedimentos de otimização nos problemas reais de engenharia.

<sup>4</sup> Maiores informações sobre esses PSVs, como por exemplo os nomes e números IMO, não puderam ser divulgadas devido a exigências de confidencialidade por parte do estaleiro que os construiu.

Figura 28 – Comparativo entre as fronteiras de Pareto de ambos os modelos com navios existentes.



Fonte: O autor (2016).

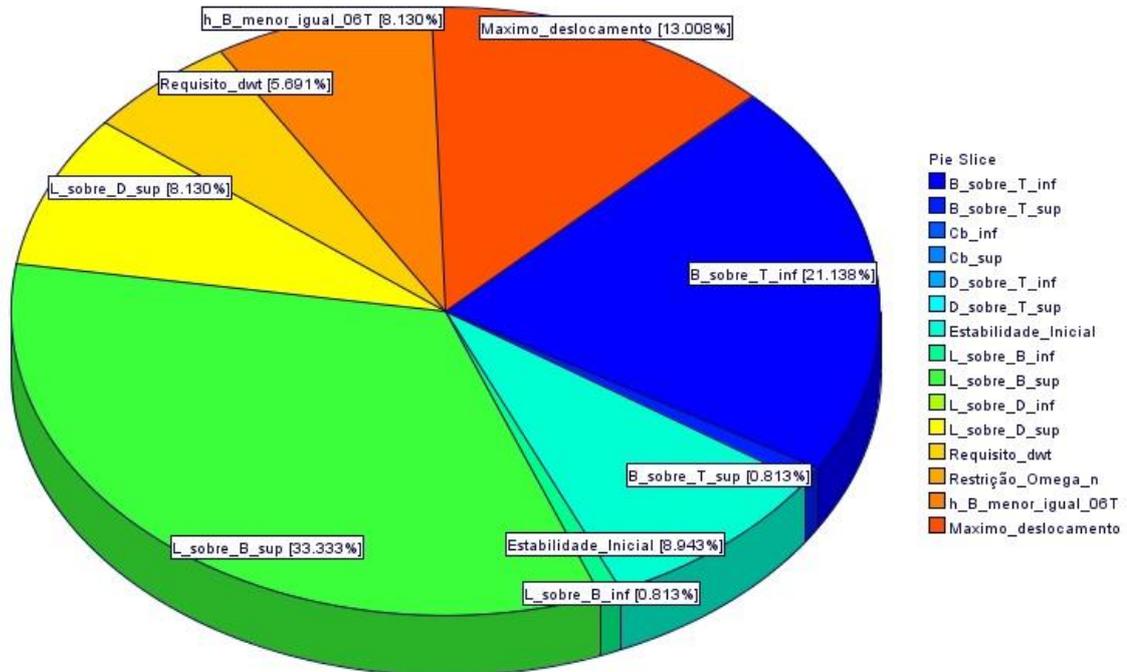
Finalmente, conclui-se que ambos os modelos necessitam de esforço computacional igual para convergir a fronteira de Pareto e que as soluções obtidas por ambos os modelos são igualmente otimizadas. Porém, é notável a diferença entre os navios obtidos pelos diferentes modelos de síntese. No entanto, não existe uma prova clara de que um modelo de síntese seja melhor do que o outro, deixando a cargo das informações disponíveis ou da preferência do engenheiro a opção por um deles. Sendo assim, para o estudo da otimização hierárquica em comparação à otimização global optou-se pelo modelo de síntese que utiliza variáveis convencionais.

#### 4.2 Efetividade das restrições

Foi realizado um estudo da efetividade das restrições impostas após o processo de otimização para ambos os modelos. O objetivo desse estudo foi entender melhor como o problema de otimização foi abordado pelos diferentes modelos de otimização desenvolvidos.

Conforme pode ser verificado pela Figura 29, as restrições mais efetivas para o modelo de variáveis convencionais foram o limite superior do adimensional L/B, o limite inferior do adimensional B/T e a restrição de deslocamento.

Figura 29 – Efetividade das restrições no modelo de variáveis convencionais.

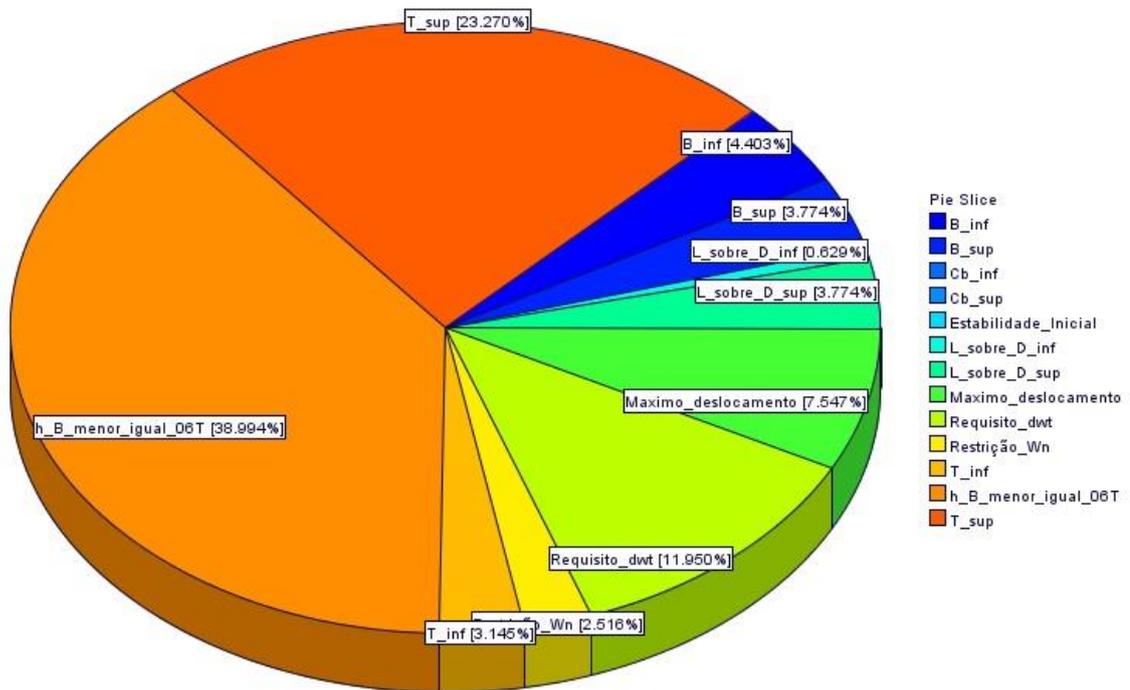


Fonte: O autor (2016).

Além disso, pode-se destacar as restrições que tiveram pouca ou nenhuma influência nos resultados desse modelo. O limite inferior do adimensional L/B e o limite superior do adimensional B/T tiveram pouca expressividade nos resultados. Já o limite superior e inferior do coeficiente de bloco, os limites superior e inferior para o adimensional D/T, o limite inferior do adimensional L/D e a restrição da distância mínima entre o período de pico do mar e menor período natural do navio não tiveram nenhuma influência na análise dos resultados.

As restrições com maior influência nos resultados obtidos com o modelo de variáveis não convencionais estão destacadas na Figura 30. Para esse modelo as restrições mais efetivas foram a altura do centro da área da seção transversal do bulbo ( $h_B$ ), limite superior e inferior de calado (T) e o requisito da capacidade de carga.

Figura 30 –Efetividade das restrições no modelo de variáveis não convencionais.



Fonte: O autor (2016).

E mais uma vez, os limites superior e inferior do coeficiente de bloco não tiveram influência nos resultados. Além disso, é surpreendente notar que o critério de estabilidade não foi violado por nenhuma vez nesse modelo.

A análise da efetividade das restrições também deixa claro a diferença nas soluções obtidas entre os dois modelos de otimização, uma vez que, a efetividade das restrições incomum à ambos os modelos tiveram grande diferença.

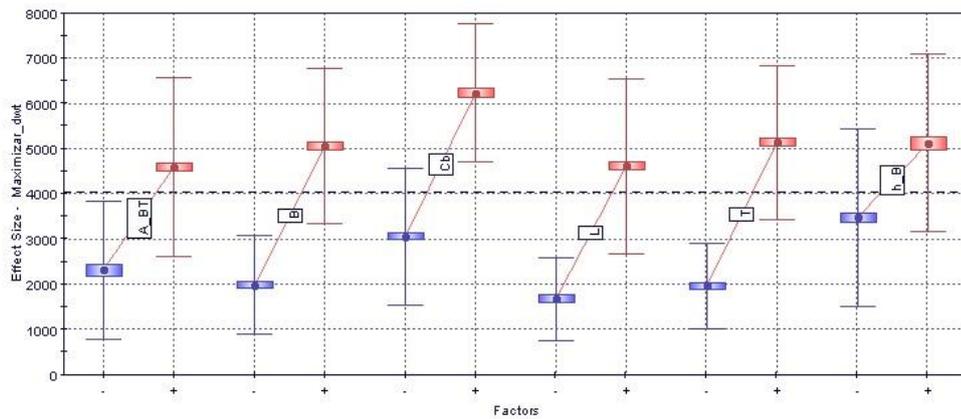
#### 4.3 Análise de sensibilidade

Analisar a influência das variáveis de projeto em relação as funções objetivos são importantes para que se tenha um melhor entendimento da fronteira de Pareto. Essa análise foi feita através de gráficos de efeitos, nos quais, segundo Tancredi (2014) cada fator (variáveis de projeto) é dividido em dois grupos, a partir da mediana, a distância entre os valores médios está diretamente relacionada com a influência que esse parâmetro tem no atributo analisado.

A Figura 31 mostra o gráfico de efeitos para as variáveis de projeto em relação a capacidade de carga do modelo com variáveis convencionais. Pode-se observar que todas as variáveis de projeto apresentaram influências similares na capacidade de carga das soluções. Apesar da restrita faixa de variação, os atributos referentes a geometria bulbo também apresentaram influência significativa na capacidade de carga o que, provavelmente, deve-se à

redução da resistência ao avanço o que indiretamente beneficia a capacidade de carga por meio de redução do peso de máquinas. A menor influência do comprimento em relação aos outros parâmetros deve-se, ao fato de que grande parte das soluções se restringiu a valores entre 100 e 102,5 m, como pôde ser observado nas Figura 24 e Figura 25, fazendo com outros parâmetros de projeto, como a boca (B) e calado (T), tenham maior influência sobre a capacidade de carga.

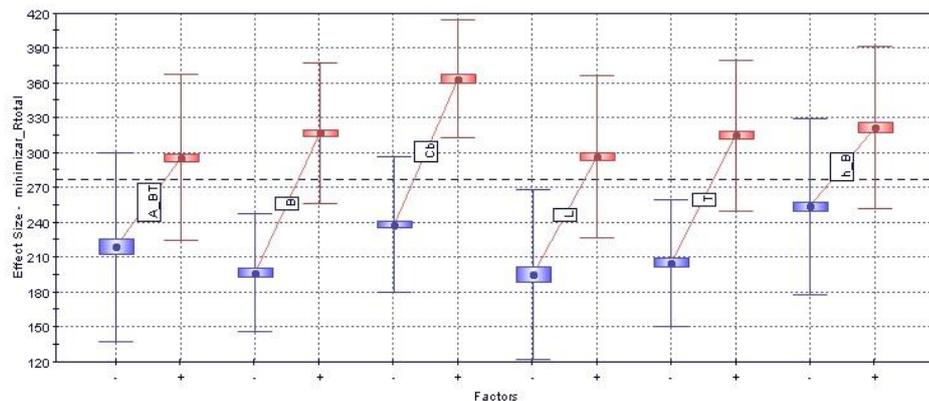
Figura 31 – Efeitos das variáveis de projeto do modelo de variáveis convencionais no atributo capacidade de carga da embarcação.



Fonte: O autor (2016).

Na Figura 32 é mostrada a influência das variáveis de projeto no atributo resistência total ao avanço do modelo que utiliza variáveis convencionais. Nota-se um comportamento semelhante para a influência dos parâmetros na resistência total ao avanço. Isso deve ao fato de que as dimensões principais do navio e o coeficiente de bloco estão diretamente relacionados com o cálculo da capacidade de carga e da resistência ao avanço do navio.

Figura 32 - Efeitos das variáveis de projeto do modelo de variáveis convencionais no atributo resistência total ao avanço da embarcação.



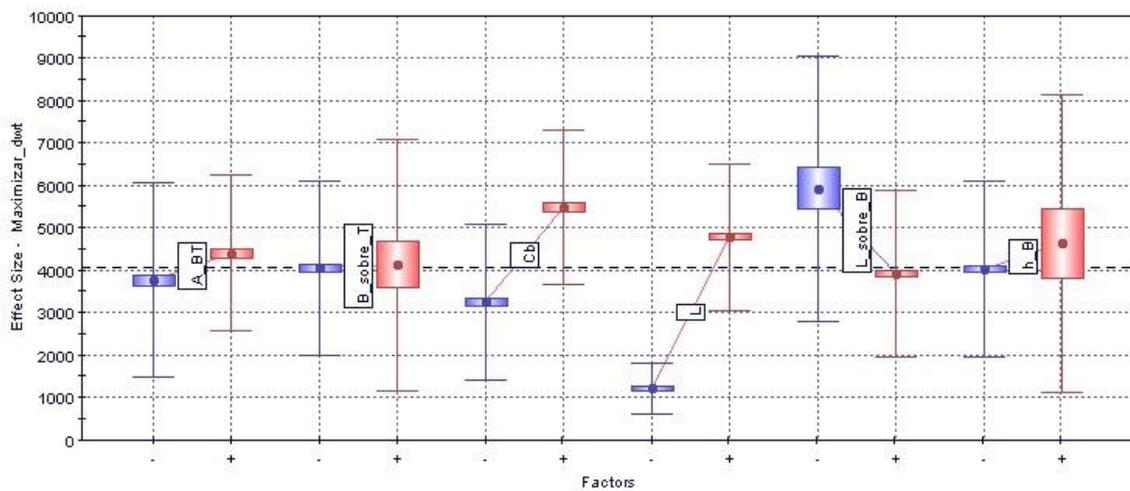
Fonte: O autor (2016).

Para o modelo de variáveis não convencionais os efeitos das variáveis de projeto em relação aos atributos não são facilmente compreendidos pois, sabe-se que as dimensões principais tem efeitos diretos no cálculo na capacidade de carga e resistência ao avanço. Porém, não se pode afirmar que os efeitos que os coeficientes de forma  $L/B$  e  $B/T$  tem os mesmos efeitos no cálculo desses atributos.

A Figura 33 mostra os efeitos das variáveis não convencionais no atributo capacidade de carga da embarcação. Nota-se uma forte influência por parte de todas as variáveis de projeto, com exceção do comprimento (L) que deve-se, ao mesmo motivo observado no modelo de variáveis convencionais já que grande parte das soluções obtidas por esse modelo também apresentaram comprimentos entre 100 e 102,5 m. Aqui o coeficiente de bloco apresentou maior influência do que visto anteriormente no modelo de variáveis convencionais.

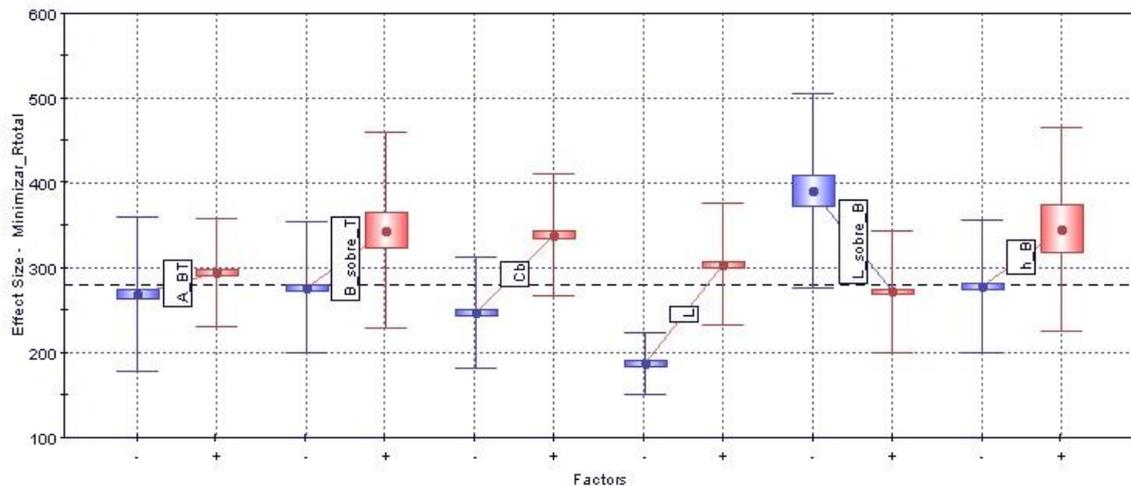
Na Figura 34, pode ser observado o mesmo padrão de influência das variáveis de projeto no atributo resistência ao avanço do modelo de variáveis não convencionais. Apenas no adimensional  $B/T$  houve uma pequena redução em sua influência na resistência total ao avanço do navio.

Figura 33 - Efeitos das variáveis de projeto do modelo de variáveis não convencionais no atributo capacidade de carga da embarcação.



Fonte: O autor (2016).

Figura 34 - Efeitos das variáveis de projeto do modelo de variáveis não convencionais no atributo resistência total ao avanço da embarcação.



Fonte: O autor (2016).

Por fim, pode-se observar a diferença na influência dos atributos capacidade de carga e resistência total ao avanço entre as variáveis de projeto dos diferentes modelos. O que reafirma o fato de que os modelos geram diferentes soluções para obter uma mesma fronteira de Pareto.

#### 4.4 Otimização hierárquica versus otimização global

Para fins deste estudo entende-se por otimização hierárquica aquela na qual primeiro realiza o procedimento de otimização utilizando apenas as variáveis relacionadas ao casco do navio (L, B, T e  $C_B$ ) e em seguida realiza-se outro procedimento de otimização no qual fixa-se as variáveis já otimizadas do casco e a busca continua apenas variando os parâmetros do bulbo.

Após ser determinado qual modelo de otimização seria utilizado para dar continuidade nos estudos propostos, realizou-se a otimização sem os parâmetros do bulbo, ou seja, nessa primeira etapa de otimização obteve-se a fronteira de Pareto para as soluções otimizadas que não incluíssem o bulbo.

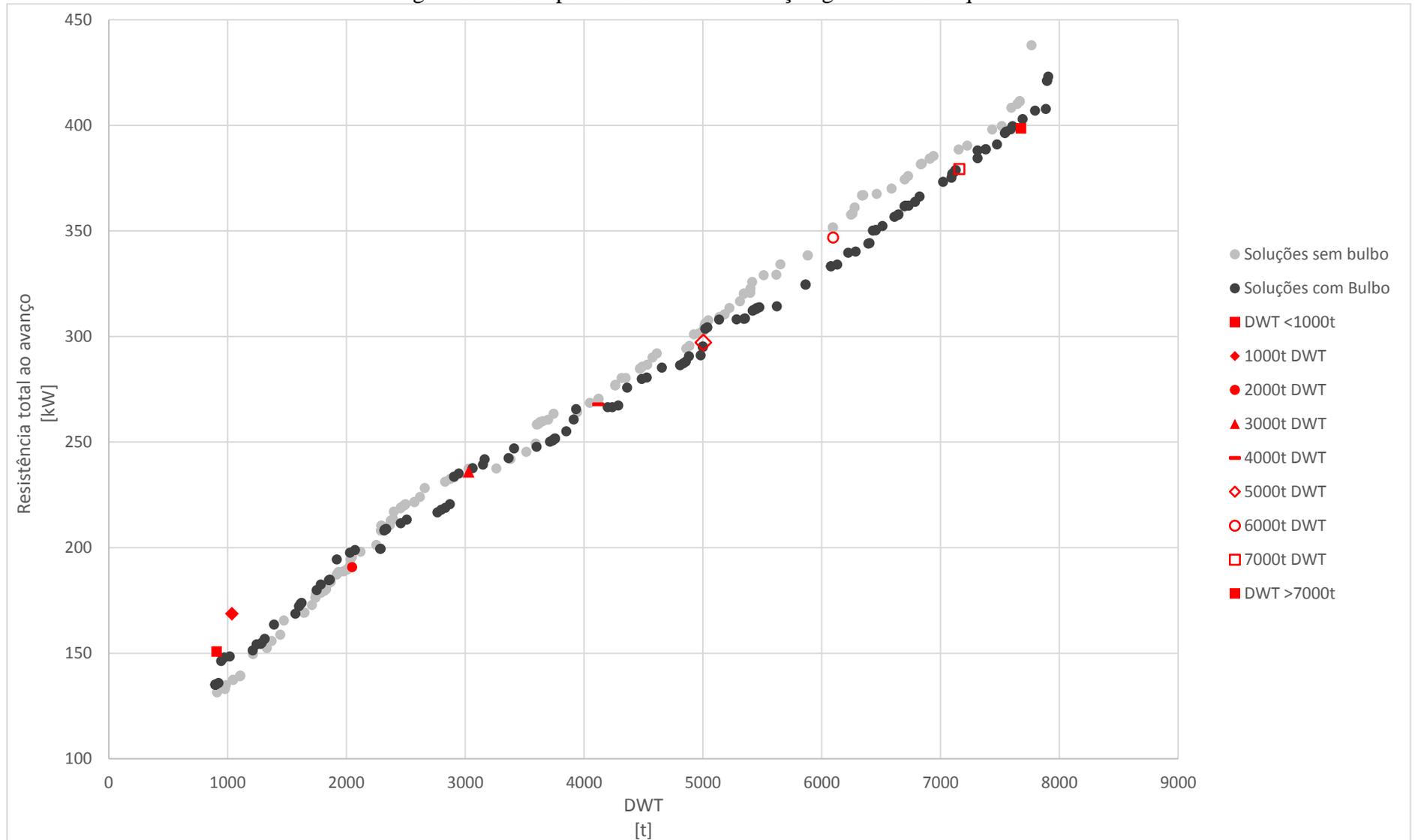
Em seguida, foram escolhidas algumas soluções da fronteira de Pareto para as soluções sem o bulbo, e assim, foi realizado um novo procedimento de otimização para cada uma delas, cujo objetivo era incluir os parâmetros do bulbo sem que as dimensões principais e o coeficiente de bloco da embarcação fossem alterados.

A comparação entre as otimizações global e hierárquica pode ser vista na Figura 35. Esta figura mostra um gráfico que compara as fronteiras de Pareto para as soluções com e sem bulbo e também as soluções otimizadas através de hierarquização (pontos destacados em vermelho).

A partir da Figura 20 pode-se concluir que, para navios com capacidade de carga menor do que 2000 t a inclusão de bulbo não se faz necessário, pois as soluções encontradas apenas para a otimização das dimensões principais (L, B, T) e o coeficiente de bloco (CB) dominam a solução global. Além disso, a solução hierarquizada do problema resulta em uma otimização final pior do que o navio ótimo sem bulbo, uma vez que essa solução é dominada tanto pelas soluções sem bulbo quanto pelas soluções da otimização global.

É importante destacar que, no caso de navios com aproximadamente 2.000 toneladas de DWT, apesar da solução hierárquica superar a solução por otimização global, as soluções sem bulbo dominam as soluções globais e a solução hierarquizada não foi capaz de superar as soluções sem bulbo. Portanto, não se pode dizer que a hierarquização na faixa de 2.000 toneladas de capacidade de carga melhora a solução final.

Figura 35 – Comparativo entre a otimização global e hierárquica.



Fonte: Autor (2016).

Na faixa de capacidades de carga entre 3000t e 4000t nota-se que as soluções com e sem bulbo se confundem, levando à conclusão de que a inclusão do bulbo nessa faixa não alterou a solução final, ou seja, todas as três soluções podem ser ditas como igualmente otimizadas. E neste caso aspectos construtivos podem ser utilizados como critério para a inclusão ou não do bulbo, já que é possível se obter uma solução ótima sem bulbo.

Acima de 4.000 toneladas de dwt constata-se que a inclusão do bulbo é vantajosa para a otimização das embarcações, uma vez que as soluções com bulbo dominam as soluções sem bulbo. E mais uma vez verifica-se que a otimização hierárquica não foi capaz de superar a otimização global, no máximo, ela se igualou à fronteira de Pareto da otimização global.

Então, esse estudo evidenciou que a otimização hierárquica resultou, para alguns pontos de dwt, em soluções piores do que aquelas obtida através da otimização global, e quando essas soluções não foram piores elas apenas se igualavam às soluções obtidas por uma otimização global. Assim, o esforço computacional para realizar uma otimização hierárquica não se justifica.

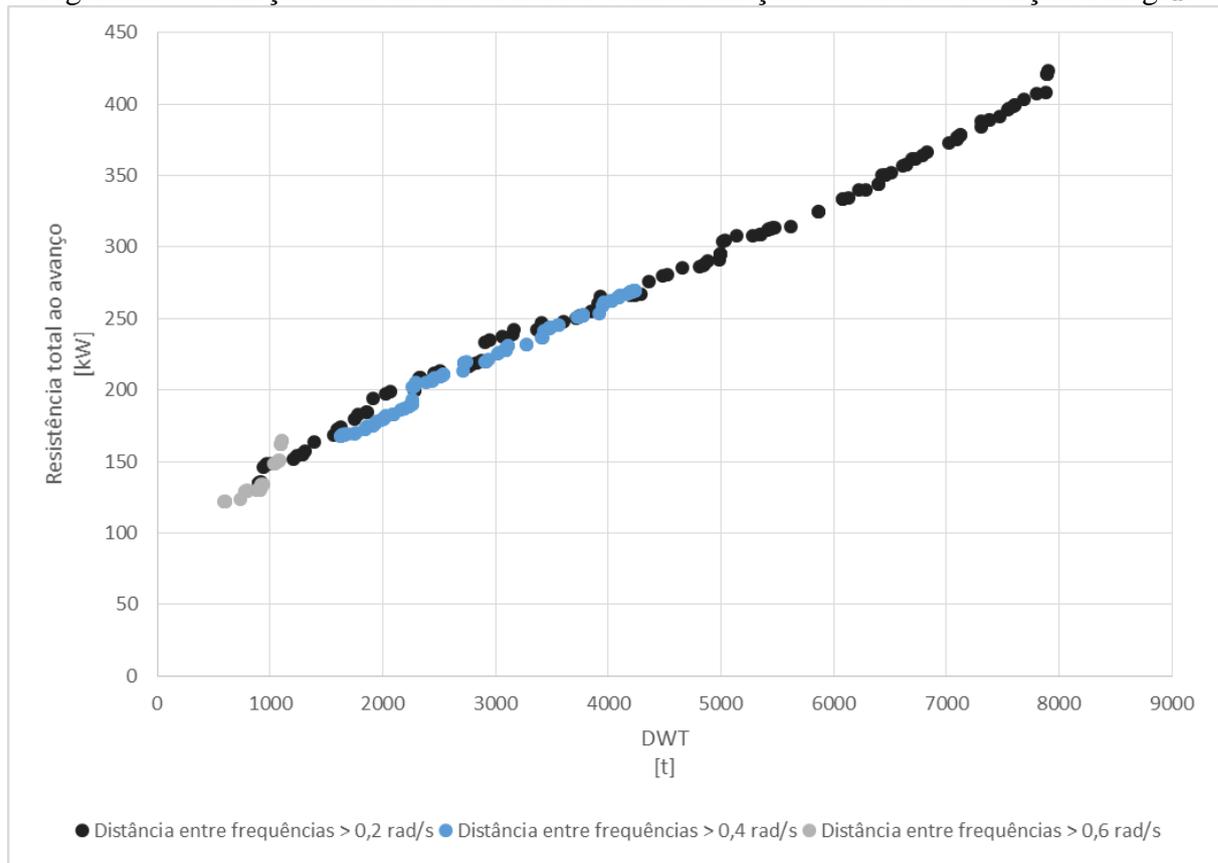
#### **4.5 Influência da restrição $\hat{\Omega}_n$ na fronteira de Pareto**

A restrição que visa não deixar com que a frequência de maior energia do espectro de mar tenha uma distância mínima da menor frequência natural do navio dentre as frequências naturais de *pitch* e *heave* é uma restrição forte, pois ela modifica a fronteira de Pareto. Aumentando-se o valor dessa distância a fronteira de Pareto caminha no sentido de navios com menor capacidade de carga. A Figura 36 mostra a fronteira de Pareto obtida para uma distância de 0,6 rad/s entre a frequência de máxima energia do espectro de mar e a menor frequência natural do navio.

Analisando a Figura 36, nota-se que a fronteira de Pareto se restringiu a navios com capacidade de carga menores do que 2.000 toneladas e resistência ao avanço máximo de pouco mais do que 150 kW, ou seja, a fronteira de Pareto foi “cortada” no sentido do mínimo global da resistência ao avanço.

Ao reduzir essa restrição para 0,4 rad/s, pode-se verificar um aumento das soluções na fronteira de Pareto assim, navios com maior capacidade de carga passam a ser parte das soluções otimizadas. Finalmente, alterando-se a restrição das distâncias entre frequência de pico do mar e da menor frequência natural do navio para 0,2 rad/s, nota-se que a fronteira de Pareto não é mais afetada pela restrição, como pode ser visto através da Figura 36.

Figura 36 – Variação da fronteira de Pareto com a variação do valor da restrição  $\hat{\Omega}_n$ .



Fonte: O autor (2016).

Esses resultados obtidos mostraram que a restrição de distância entre frequência de pico do mar e a menor frequência natural do navio faz com que não haja mais concorrência entre as funções objetivo e restringe o número de soluções na fronteira de Pareto, fenômeno similar a esse foi observado por Ribeiro et al. (2012) em seu estudo.

#### 4.6 Características típicas de PSVs com até 8.000 toneladas de capacidade de carga

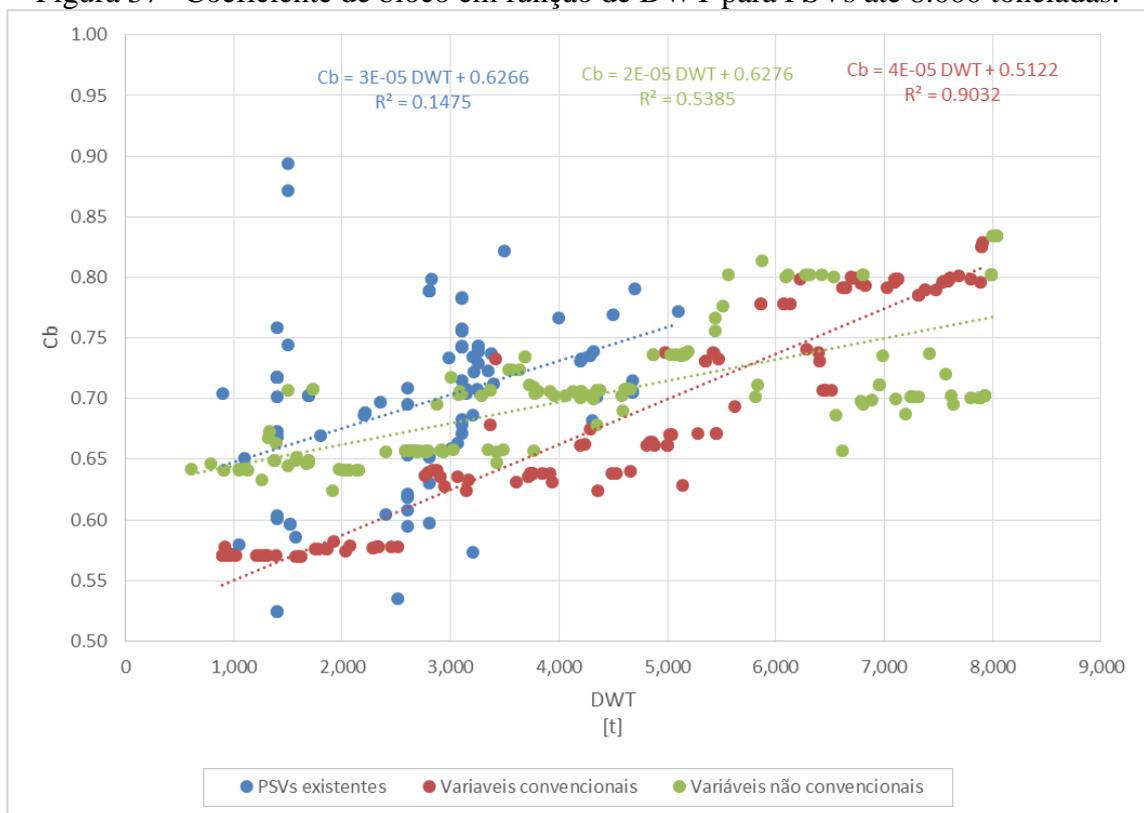
A partir dos resultados obtidos através do procedimento de otimização foi possível determinar equações que caracterizem as dimensões principais (L, B e T) e o coeficiente de bloco típicos de navios PSV em função de sua capacidade de carga.

O gráfico da Figura 37 mostra o coeficiente de bloco em função da capacidade de carga dos navios obtidos através do procedimento de otimização por ambos os modelos de otimização e os compara com navios existentes. Assim, pode-se observar uma melhor caracterização dos navios através das soluções obtidas com o modelo de otimização de variáveis convencionais. Portanto, a equação típica para PSVs com até 8.000 toneladas de capacidade de carga do coeficiente de bloco em função de DWT é dada pela Equação 40.

$$C_B = 4 \cdot 10^{-5} \times DWT + 0,5122 \quad (47)$$

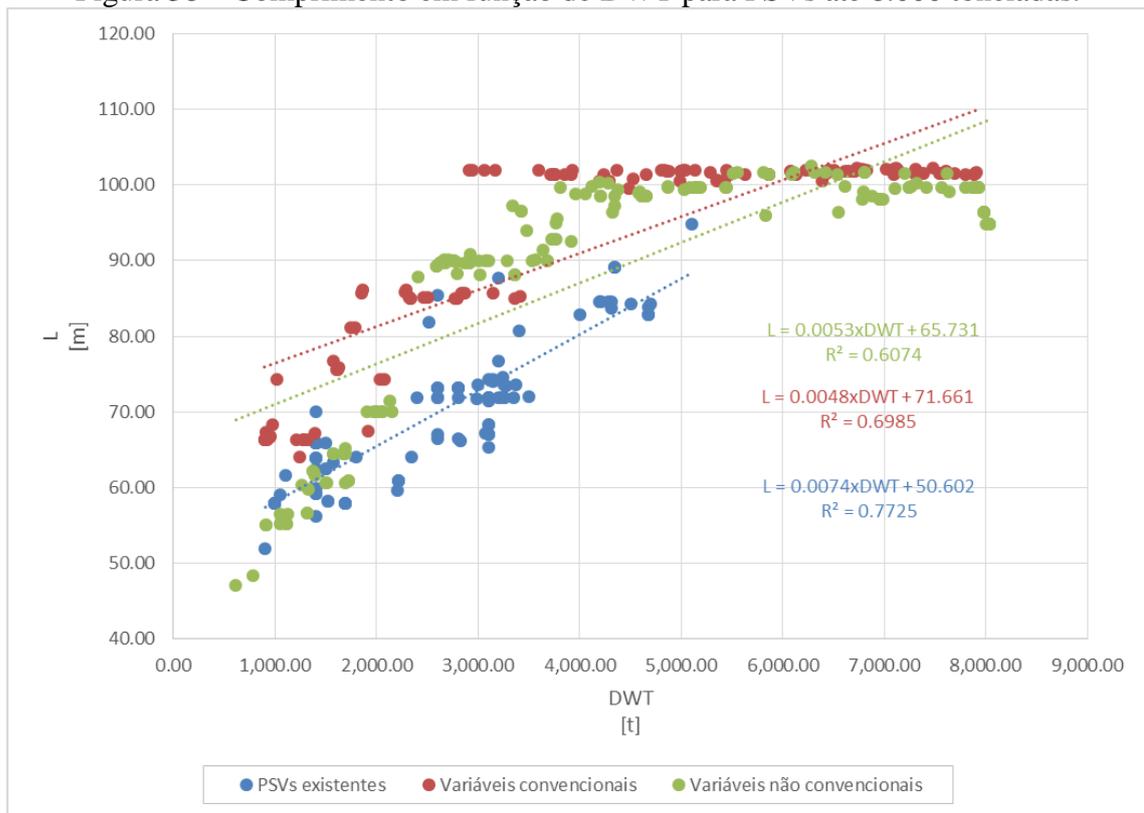
A Figura 38 mostra os resultados obtidos para a variação do comprimento em função do DWT em comparação com navios PSV existentes. A diferença entre os modelos de otimização é evidente e a equação que melhor representa o comprimento típico de um PSV advêm dos resultados do modelo com variáveis convencionais.

Figura 37 – Coeficiente de bloco em função de DWT para PSVs até 8.000 toneladas.



Fonte: O autor (2016).

Figura 38 – Comprimento em função de DWT para PSVs até 8.000 toneladas.



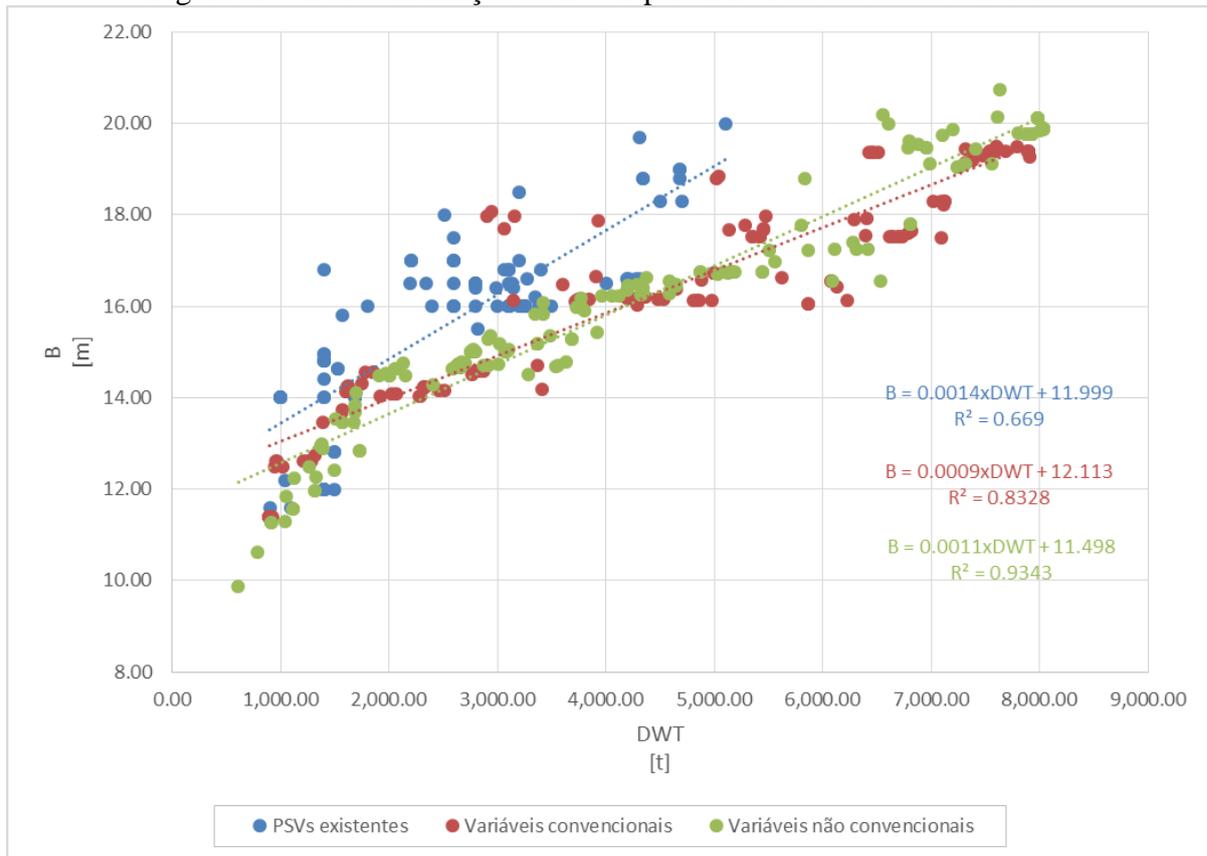
Fonte: O autor (2016).

Portanto, a equação que melhor caracteriza o comprimento de navios PSV com até 8.000 toneladas de DWT é dada pela Equação 41, por ter apresentado melhor correlação entre os dados.

$$L = 0.0048 \times DWT + 71.661 \quad (48)$$

Na Figura 39, pode-se observar a variação da boca em função da capacidade de carga. Desta vez, ambos os modelos resultaram na boa aderência por uma reta da boca em função de DWT. Porém, a equação escolhida para representar o tamanho típico de boca para PSVs de até 8.000 toneladas foi retirada das soluções obtidas pela otimização com as variáveis convencionais para que fosse mantida a coerência de valores.

Figura 39 – Boca em função do DWT para PSVs de até 8.000 toneladas.



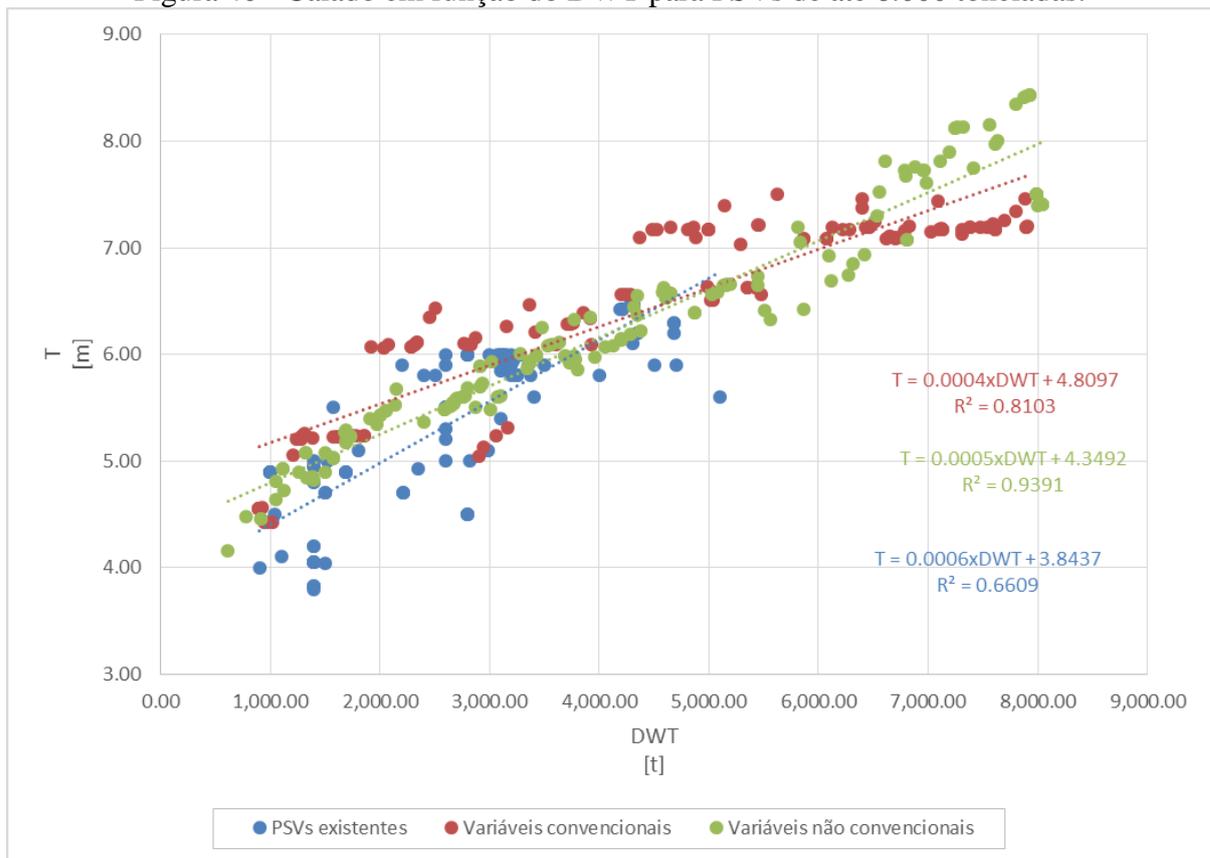
Fonte: O autor (2016).

Assim, o valor de boca típico para PSVs com até 8.000 toneladas de capacidade de carga pode ser obtido através da Equação 42.

$$B = 0,0009 \times DWT + 12.113 \quad (49)$$

Por fim, a Figura 40 mostra o calado em função da capacidade de carga. E novamente observa-se uma boa aproximação por uma reta em ambos os modelos. No entanto, a equação escolhida para representar os navios ótimos com até 8.000 toneladas de capacidade de carga, e mais uma vez, foi aquela obtida através das soluções na fronteira de Pareto do modelo de variáveis convencionais pra que a coerência de valores fosse mantida.

Figura 40 - Calado em função do DWT para PSVs de até 8.000 toneladas.



Fonte: O autor (2016).

Logo, o calado ótimo para PSVs om até 8000t de capacidade de carga pode ser estimado através da equação 43.

$$T = 0,0004 \times DWT + 4,8097 \quad (50)$$

É importante ressaltar que as equações escolhidas para caracterizar o coeficiente de bloco, comprimento, boca e calado típicos obtidas através da otimização com o modelo de variáveis convencionais apresentaram, na média, melhor aderência a uma reta. Então, é razoável afirmar que essas equações representam melhor os PSVs com até 8.000 toneladas de capacidade de carga do que os resultados obtidos com o modelo de varáveis não convencionais.

A pouca aderência dos navios existentes a um reta para as dimensões principais e o coeficiente de bloco em função da capacidade de carga deve-se, provavelmente, a não otimização das soluções encontradas pelos projetistas daqueles, ou seja, eventualmente são solução que atendam às necessidades do armador, mas não de maneira ótima. Além disso, fatores, como por exemplo, as diversas funções específicas de cada navio presente no banco de

dados podem afetar de maneira significativa as dimensões da embarcação e até mesmo resistência total ao avanço desses navios pode não ter sido uma prioridade em seus projetos.

Apesar dessas diferenças encontradas entre os navios existentes e as soluções otimizadas nota-se que essas soluções estão entre os navios que já existem o que é uma forte prova de que os modelos de otimização são adequados e não apresentam soluções discrepantes com a realidade.

## 5 CONCLUSÃO

### 5.1 Conclusão do trabalho e considerações finais

A partir dos resultados obtidos é possível concluir que a metodologia empregada foi satisfatória no desenvolvimento dos modelos de otimização com a inclusão dos parâmetros do bulbo. Ambos os modelos de otimização se mostram adequados aos problemas de engenharia naval, uma vez que as soluções otimizadas estão inseridas no espaço dos navios semelhantes.

A comparação entre os modelos deixou claro, do ponto de vista do esforço computacional, que utilizar coeficientes de forma como conjuntos de variáveis de projeto ou as dimensões principais do navio não tem influência na velocidade da convergência da fronteira de Pareto. No entanto, do ponto de vista de projeto de navios, apesar de ambos os modelos de otimização apresentarem a mesma fronteira de Pareto, os navios que compõe essas fronteiras não são os mesmos e modelo de otimização que utiliza as dimensões principais e o coeficiente de bloco como as variáveis de projeto mostrou ser mais consistente nos resultados.

Através do estudo da hierarquização no procedimento de otimização foi possível verificar que, para PSVs com capacidades de carga até 2.000 toneladas, não é necessário o bulbo e um possível procedimento de otimização para inclusão do bulbo resulta em uma solução pior do que a solução sem a presença do bulbo. Além disso, ficou claro que a otimização hierárquica não produz soluções melhores do que em procedimento de otimização global.

Por fim, pode-se concluir que a metodologia empregada foi sólida e robusta permitindo desenvolver os modelos de otimização propostos, fazer a análise das embarcações semelhantes, que por sua vez, resultaram na determinação do hiperespaço das variáveis de projeto e nas restrições do modelo. Do ponto de vista científico, pôde-se realizar as análises propostas quanto a convergência da fronteira de Pareto e a hierarquização do processo de otimização. Além disso, do ponto de visto de projeto de navios, pôde-se determinar um modelo empírico de projeto que caracterizem o navio do tipo PSV com até 8.000 toneladas de capacidade de carga, como função da capacidade de carga requerida. Pode-se, determinar a influência da distância entre o período de pico do mar e o menor período natural da embarcação, a qual interferiu de forma significativa

na fronteira de Pareto. Contribuindo dessa maneira pra a comunidade científica e de engenheiros navais.

## **5.2 Propostas para trabalhos futuros**

A partir dos estudos realizados, propõe-se outros trabalhos que busquem superar as dificuldades aqui encontradas, como por exemplo, adotar métodos mais robustos para a análise de *seakeeping* das embarcações.

Sugere-se também, que modelos em CAD de algumas dessas soluções encontradas sejam produzidas para que sejam feitas simulações computacionais de dinâmica dos fluidos explorando com maior nível de detalhes o assunto e possivelmente realizar um procedimento de otimização acoplado ao invés de utilizar métodos empíricos e estatísticos.

Por fim, essa metodologia poderia ser utilizada para o desenvolvimento modelos de síntese de otimização para o projeto conceitual de outros tipos de embarcação. Além disso, pode-se incluir um modelo de síntese e otimização para o projeto estrutural desses navios.

## REFERÊNCIAS

- AMARAL, J. R. **Otimização do Projeto Estrutural de Embarcações de Alta Velocidade Produzidas em Material Compósito**. 2016. 94 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, No prelo 2016.
- AMERICAN BUREAU OF SHIPPING. **PARTE 3, CAPÍTULO 2, SEÇÃO 4/3**: Rules for Building and Classing Steel Vessels. Houston: 2015. Disponível em: <www.eagle.org>. Acesso em: 20 fev. 2016.
- AUGUSTO, O. B. **Projeto Racional Otimizado e Automatizado da Estrutura de Embarcações**. 1996. 149 p. Tese (Livre Docência) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Naval, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. Cap. 6. p. 56-74.
- CHAME, M. E. F. **Projeto Conceitual de Embarcações Utilizando Fórmulas Empíricas**. 2014. 100 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2014.
- CHAVES, V. T.; TANCREDI, T. P.; ANDRADE, B. L. R. Modelo de Redes Neurais para estimativa de Peso Estrutural Otimizado de Embarcações. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 24. Rio de Janeiro. **SOBENA**. Rio de Janeiro: out. 2012. p. 1 - 11.
- DEB, K. et al. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. **Evolutionary Computation: IEEE Transactions on evolutionary computation**, New York, v. 6, n. 2, p.182-197. 2002.
- EVANS, J. H. Basic Design Concepts. **Journal of the American Society of Naval Engineers**. v. 71. p. 671-678. nov. 1959.
- GALE, P. A. The Ship Design Process. In: LAMB, Thomas. The Society of Naval Architects and Marine Engineers (Ed.). **Ship Design and Construction**. New Jersey, 2003. Cap. 5. p. 1-40.
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **A-562**: Recomendação a um vento forte e critério de rolamento para a estabilidade intacta de navios de passageiros e de carga de 24 metros de comprimento e mais. 1985.
- INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION. **Load Lines 1966/1988**: International Convention on Load Lines. London: IMO, 2005.
- KISS, R. K. Mission Analysis and Basic Design. In: TAGGART, Robbert (Ed.). **Ship Design and Construction**. New Jersey, 1980. Cap. 1. p. 1-49.
- KRACHT, A. M. Design of Bulbous Bow. **SANAME Transactions**. v. 86. p. 197-217. 1978.
- LAMB, T. A Ship Design Procedure. **Marine Technology**. p. 362-405. 1969.

MANEN, J. D. V.; OOSSANEN, P. V. Resistance. In: LEWIS, E. V. (ed.). **Principles of Naval Architecture: Volume II - Resistance, Propulsion and Vibration**. 2. ed. Jersey City, NJ: SNAME, 1998. cap. 5, p. 1–93.

MARINHA DO BRASIL. **01/DCP: Normas De Autoridade Marítima Para Embarcações Empregadas na Navegação em mar aberto**. 2005. Rio de Janeiro: 2005.

METOCEAN SOLUTIONS LTD. (Nova Zelândia) (Org.). **MetOcean View**. 2014. Disponível em: <<https://metoceanview.com/>>. Acesso em: 15 abr. 2016.

MOLLAND, A. F.; TURNOCK, S. R.; HUDSON, D. A. Hull form design. In: \_\_\_\_ . **Ship resistance and propulsion: practical estimation of propulsive power**. 1. ed. [S.l.]: Cambridge university press, 2011. cap. 14, p. 313–336.

MONTEIRO, T. G.; EL DIDI, Y. S. **OTIMIZAÇÃO MULTI OBJETIVO DE UMA EMBARCAÇÃO DE APOIO À PLATAFORMA**. 2013. 116 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

OLIVEIRA, D. et al. Synthesis and optimization of oceanographic ship design. In: \_\_\_\_ . **Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources**. CRC Press, 2013. p. 491–500. ISBN 978-1-138-00124-4.

PARSONS, M. G. Parametric Design. In: LAMB, Thomas. The Society of Naval Architects and Marine Engineers (Ed.). **Ship Design and Construction**. New Jersey, 2003. Cap. 11. p. 1-48.

RIBEIRO, R. M. C., et al. Modelo de Síntese e Processo de Otimização para o Projeto Conceitual/Preliminar de uma Embarcação para o Transporte de Gás Natural Comprimido. In OFFSHORE AND MARINE TECHNOLOGY: SCIENCE AND INNOVATION (NAVTEC), 2012 International Conference. **IEEE**. 2012. p. 5-8.

SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V. Lines design. In: SCHNEEKLUTH, H.; BERTRAM, V. **Ship Design for Economy and Efficiency**. 2. ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 1998. Cap. 2. p. 34-83.

SINAVAL (Org.). **Cenário da construção naval brasileira: Balanço de 2014 e visão para 2015**. Rio de Janeiro, 2015. 15 p. Disponível em: <<http://sinaval.org.br/cenarios/>>. Acesso em: 23 set. 2015a.

SINAVAL (Org.). **Cenário da construção naval: 1º semestre de 2015**. Rio de Janeiro, 2015. 16 p. Disponível em: <<http://sinaval.org.br/cenarios/>>. Acesso em: 23 set. 2015b.

TANCREDI, T. P. et al. Projeto de platform supply boats baseado em otimização multiobjetivo. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 25. Rio de Janeiro. **SOBENA**. Rio de Janeiro: nov. 2014. p. 1-17.

TANCREDI, T. P.; ANDRADE, B. L. R. Multiobjective optimization of tugboats. In: 15th International Congress of the International Maritime Association of the Mediterranean, 2013, La Coruña. **Developments in Maritime Transportation and Exploitation of Sea Resources**. London: CRC Press/Balkema, 2013. v. 1. p. 519-530.

TANCREDI, T. P. **Otimização Multidisciplinar Distribuída aplicada a Projetos de Engenharia**. 2008. 190 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Cap. 2.

VÁSQUEZ, C. A. M. **A methodology to select the electric propulsion system for Platform Supply Vessels (PSV)**. 2014. 225 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Naval, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. Cap. 3.

WEISS, J. M. G. et al. Desenvolvimento de supply boats para operações na Baía de Santos. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 24. 2012, Rio de Janeiro. **SOBENA**. Rio de Janeiro: 2012. p. 1 - 16.

WHITE, R. Offshore Support Vessels. In: LAMB, Thomas. The Society of Naval Architects and Marine Engineers (Ed.). **Ship Design and Construction**. New Jersey, 2003. Cap. 42. p. 1-15.

XUEBIN, L. Multiobjective optimization and multiattribute decision making study of ship's principal parameters in conceptual design. **Journal of Ship research**. v. 53(2). p. 83-92. 2009.

ZIMMERMANN, D. C. **Influência do Bulbo no Comportamento de Mar de um Casco da Série 60 em Ondas de Proa**. 2015. 117 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Naval, Centro de Joinville, Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015.

## APÊNDICE A – DADOS DOS PSVs CONSTRUÍDOS NO VALE DO ITAJAÍ

| PSV sem bulbo   |         |                | PSV com bulbo   |          |                |
|-----------------|---------|----------------|-----------------|----------|----------------|
| LOA             | 79.25   | m              | LOA             | 92.58    | m              |
| LBP             | 74.3    | m              | LBP             | 87.01    | m              |
| B               | 17.07   | m              | B               | 18.29    | m              |
| D               | 6.4     | m              | D               | 7.92     | m              |
| T               | 5.205   | m              | T               | 6.35     | m              |
| $\Delta$        | 5281.13 | t              | $\Delta$        | 8197.36  | t              |
| $P_I$           | 3971.7  | kW             | $P_I$           | 5000     | kW             |
| dwt             | 3505    | t              | dwt             | 4854.81  | t              |
| lightship       | 1793.06 | t              | lightship       | 3342.55  | t              |
| $A_{wp}$        | 1180.1  | m <sup>2</sup> | $A_{wp}$        | 1507.23  | m <sup>2</sup> |
| $A_M$           | 108.92  | m <sup>2</sup> | $A_M$           | 115.62   | m <sup>2</sup> |
| $T_{AT}$        | 1.707   | m              | $T_{AT}$        | 2.49     | m              |
| $A_T$           | 29.13   | m <sup>2</sup> | $A_T$           | 45.54    | m <sup>2</sup> |
| $B_{AT}$        | 17.07   | m              | $B_{AT}$        | 18.29    | m              |
| $C_b$           | 0.780   |                | $C_b$           | 0.791    |                |
| $C_p$           | 0.637   |                | $C_p$           | 0.795    |                |
| $C_m$           | 0.997   |                | $C_m$           | 0.996    |                |
| $C_{wp}$        | 0.930   |                | $C_{wp}$        | 0.947    |                |
| $V_{max}$       | 14.2    | kn             | $V_{max}$       | 14.5     | kn             |
| $V_{operação}$  | 13      | kn             | $V_{operação}$  | 13       | kn             |
| $V_{deslocado}$ | 5152.3  | m <sup>3</sup> | $V_{deslocado}$ | 7997.424 | m <sup>3</sup> |
| Freeboard       | 0.914   | m              | $A_{BT}$        | 13.294   | m <sup>2</sup> |
| Area Molhada    | 1951.6  | m <sup>2</sup> | $h_B$           | 2.938    | m              |
| $A_{leme}$      | 24.5    | m <sup>2</sup> | Freeboard       | 1.19     | m              |
| $A_{Skeg}$      | 73.6    | m <sup>2</sup> | Area molhada    | 2525.2   | m <sup>2</sup> |
| $A_{APP}$       | 98.1    | m <sup>2</sup> | $A_{leme}$      | 25.2     | m <sup>2</sup> |
|                 |         |                | $A_{Skeg}$      | 80       | m <sup>2</sup> |
|                 |         |                | $A_{APP}$       | 105.2    | m <sup>2</sup> |
|                 |         |                | LCG             | 3.5      | m              |
|                 |         |                | LCB             | 2.1      | m              |

**APÊNDICE B – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA 30 GERAÇÕES COM O MODELO DE VARIÁVEIS CONVENCIONAIS.**

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B<br>[m] | $C_B$<br>- | L<br>[m] | T<br>[m] | $h_B$<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | $\Omega_n$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|---------------------|
| 10.10                         | 18.0     | 0.636      | 102.0    | 5.05     | 2.35         | 6.44     | 6030            | 2906       | 3.32          | 233.6             | 0.457               |
| 14.92                         | 14.2     | 0.733      | 85.2     | 6.21     | 2.99         | 7.57     | 5632            | 3412       | 0.67          | 246.9             | 0.423               |
| 14.91                         | 14.2     | 0.578      | 85.1     | 6.34     | 2.89         | 7.67     | 4527            | 2457       | 0.66          | 211.6             | 0.466               |
| 10.10                         | 18.1     | 0.627      | 102.0    | 5.13     | 2.35         | 6.51     | 6084            | 2945       | 3.30          | 235.1             | 0.454               |
| 14.91                         | 14.2     | 0.578      | 85.1     | 6.12     | 2.89         | 7.41     | 4387            | 2334       | 0.82          | 208.8             | 0.476               |
| 14.97                         | 14.7     | 0.678      | 85.1     | 6.47     | 2.89         | 7.81     | 5623            | 3365       | 0.77          | 242.4             | 0.420               |
| 14.85                         | 17.7     | 0.671      | 101.9    | 7.21     | 2.98         | 8.87     | 8930            | 5449       | 1.32          | 313.0             | 0.359               |
| 14.91                         | 14.2     | 0.578      | 85.0     | 6.12     | 2.89         | 7.41     | 4386            | 2334       | 0.82          | 208.8             | 0.476               |
| 14.91                         | 14.2     | 0.578      | 85.1     | 6.43     | 2.89         | 7.77     | 4589            | 2509       | 0.62          | 213.3             | 0.462               |
| 12.53                         | 17.9     | 0.632      | 101.9    | 6.09     | 2.33         | 7.51     | 7188            | 3932       | 2.29          | 265.5             | 0.412               |
| 14.85                         | 17.7     | 0.629      | 101.9    | 7.40     | 2.98         | 9.09     | 8581            | 5138       | 1.22          | 308.0             | 0.365               |
| 14.91                         | 14.2     | 0.578      | 85.1     | 6.10     | 2.89         | 7.38     | 4375            | 2322       | 0.83          | 208.5             | 0.477               |
| 14.94                         | 14.5     | 0.637      | 85.0     | 6.10     | 2.33         | 7.38     | 4905            | 2767       | 0.92          | 216.7             | 0.452               |
| 14.94                         | 17.7     | 0.671      | 101.7    | 7.21     | 2.99         | 8.87     | 8931            | 5453       | 1.34          | 313.4             | 0.359               |
| 12.49                         | 17.7     | 0.636      | 102.0    | 5.24     | 2.31         | 6.59     | 6165            | 3063       | 2.98          | 237.6             | 0.451               |
| 14.77                         | 18.8     | 0.670      | 102.0    | 6.51     | 2.81         | 8.02     | 8573            | 5019       | 2.37          | 303.6             | 0.374               |
| 12.53                         | 14.6     | 0.576      | 81.2     | 5.24     | 2.32         | 6.33     | 3657            | 1783       | 1.60          | 182.5             | 0.517               |
| 12.57                         | 14.6     | 0.576      | 85.7     | 5.24     | 2.31         | 6.37     | 3858            | 1853       | 1.55          | 184.5             | 0.517               |
| 12.60                         | 18.0     | 0.633      | 102.0    | 5.31     | 2.31         | 6.65     | 6315            | 3163       | 3.07          | 241.9             | 0.445               |
| 12.56                         | 16.5     | 0.631      | 102.0    | 6.09     | 2.34         | 7.51     | 6622            | 3601       | 1.61          | 247.8             | 0.429               |
| 14.99                         | 18.8     | 0.670      | 102.0    | 6.51     | 2.78         | 8.02     | 8600            | 5038       | 2.39          | 304.3             | 0.373               |
| 12.53                         | 16.6     | 0.638      | 101.4    | 6.34     | 2.91         | 7.81     | 6991            | 3914       | 1.51          | 260.7             | 0.414               |
| 12.57                         | 14.6     | 0.641      | 85.7     | 6.10     | 2.31         | 7.39     | 5007            | 2832       | 0.94          | 218.8             | 0.449               |
| 12.67                         | 14.6     | 0.641      | 85.7     | 6.16     | 2.33         | 7.46     | 5054            | 2872       | 0.91          | 220.6             | 0.447               |

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B<br>[m] | $C_B$<br>- | L<br>[m] | T<br>[m] | $h_B$<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | $\Omega_{n}$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| 14.67                         | 14.2     | 0.578      | 85.1     | 6.09     | 2.89         | 7.37     | 4372            | 2319       | 0.84          | 208.1             | 0.477                 |
| 12.57                         | 14.6     | 0.639      | 85.0     | 6.09     | 2.33         | 7.37     | 4949            | 2798       | 0.96          | 218.0             | 0.450                 |
| 14.97                         | 16.1     | 0.798      | 101.9    | 7.17     | 2.31         | 8.99     | 9647            | 6224       | 0.60          | 339.6             | 0.346                 |
| 14.58                         | 16.1     | 0.664      | 101.9    | 7.17     | 2.30         | 8.82     | 8029            | 4837       | 0.74          | 287.3             | 0.378                 |
| 14.97                         | 19.4     | 0.797      | 101.6    | 7.19     | 3.02         | 9.01     | 11584           | 7552       | 1.97          | 396.9             | 0.314                 |
| 14.65                         | 17.8     | 0.671      | 101.7    | 7.03     | 2.99         | 8.65     | 8744            | 5284       | 1.50          | 308.1             | 0.365                 |
| 10.08                         | 12.6     | 0.570      | 68.3     | 4.43     | 2.32         | 5.26     | 2229            | 971        | 1.45          | 148.1             | 0.603                 |
| 12.60                         | 16.1     | 0.638      | 101.4    | 6.29     | 2.31         | 7.75     | 6720            | 3739       | 1.31          | 250.9             | 0.423                 |
| 12.53                         | 14.3     | 0.576      | 81.1     | 5.24     | 2.32         | 6.33     | 3592            | 1749       | 1.48          | 179.9             | 0.521                 |
| 14.97                         | 19.4     | 0.797      | 101.6    | 7.23     | 3.02         | 9.05     | 11629           | 7592       | 1.94          | 398.1             | 0.313                 |
| 14.77                         | 19.4     | 0.825      | 101.6    | 7.19     | 3.02         | 9.05     | 11994           | 7896       | 1.95          | 421.1             | 0.308                 |
| 10.13                         | 12.6     | 0.571      | 66.8     | 4.43     | 2.30         | 5.24     | 2182            | 958        | 1.47          | 147.3             | 0.603                 |
| 14.52                         | 19.4     | 0.707      | 102.0    | 7.20     | 3.06         | 8.89     | 10317           | 6455       | 2.05          | 350.4             | 0.334                 |
| 10.13                         | 12.5     | 0.571      | 66.6     | 4.43     | 2.30         | 5.24     | 2153            | 945        | 1.42          | 146.3             | 0.605                 |
| 14.50                         | 14.1     | 0.579      | 74.3     | 6.09     | 2.72         | 7.25     | 3784            | 2072       | 0.90          | 198.9             | 0.479                 |
| 12.60                         | 16.1     | 0.636      | 101.4    | 6.29     | 2.31         | 7.75     | 6689            | 3714       | 1.31          | 250.2             | 0.424                 |
| 12.57                         | 14.6     | 0.576      | 86.2     | 5.24     | 2.31         | 6.38     | 3882            | 1860       | 1.55          | 184.8             | 0.517                 |
| 13.11                         | 16.2     | 0.638      | 101.4    | 6.30     | 2.31         | 7.76     | 6744            | 3756       | 1.32          | 251.7             | 0.422                 |
| 14.95                         | 17.6     | 0.795      | 102.0    | 7.17     | 2.32         | 8.98     | 10484           | 6787       | 1.19          | 363.8             | 0.332                 |
| 10.10                         | 12.6     | 0.571      | 66.4     | 5.21     | 2.30         | 6.13     | 2549            | 1278       | 0.92          | 154.4             | 0.552                 |
| 12.60                         | 16.1     | 0.638      | 101.4    | 6.28     | 2.31         | 7.74     | 6713            | 3734       | 1.32          | 250.7             | 0.423                 |
| 14.52                         | 19.4     | 0.707      | 102.0    | 7.20     | 3.06         | 8.89     | 10317           | 6455       | 2.05          | 350.4             | 0.334                 |
| 14.86                         | 19.4     | 0.796      | 101.6    | 7.20     | 3.08         | 9.02     | 11572           | 7541       | 1.97          | 396.3             | 0.314                 |
| 14.50                         | 16.1     | 0.662      | 101.9    | 7.17     | 2.81         | 8.82     | 7995            | 4809       | 0.74          | 286.4             | 0.379                 |
| 14.52                         | 19.4     | 0.707      | 101.9    | 7.25     | 3.06         | 8.95     | 10376           | 6511       | 2.01          | 352.3             | 0.332                 |
| 14.40                         | 16.1     | 0.664      | 101.8    | 7.20     | 2.30         | 8.85     | 8049            | 4857       | 0.72          | 288.1             | 0.378                 |
| 14.50                         | 16.7     | 0.662      | 101.9    | 7.17     | 2.81         | 8.82     | 8290            | 5000       | 0.97          | 295.1             | 0.373                 |

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B<br>[m] | $C_B$<br>- | L<br>[m] | T<br>[m] | $h_B$<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | $\Omega_{n}$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| 14.52                         | 19.4     | 0.707      | 101.6    | 7.20     | 3.06         | 8.89     | 10269           | 6430       | 2.06          | 350.1             | 0.334                 |
| 10.10                         | 12.6     | 0.571      | 66.4     | 5.05     | 2.30         | 5.95     | 2471            | 1213       | 1.02          | 151.3             | 0.562                 |
| 12.57                         | 17.6     | 0.793      | 102.0    | 7.20     | 2.32         | 9.02     | 10533           | 6824       | 1.20          | 366.3             | 0.331                 |
| 14.95                         | 18.3     | 0.798      | 102.2    | 7.17     | 2.35         | 9.00     | 10972           | 7126       | 1.48          | 378.6             | 0.324                 |
| 14.51                         | 14.1     | 0.574      | 74.3     | 6.06     | 2.72         | 7.21     | 3735            | 2030       | 0.92          | 197.6             | 0.482                 |
| 14.95                         | 19.4     | 0.802      | 101.6    | 7.26     | 3.02         | 9.10     | 11745           | 7691       | 1.91          | 403.0             | 0.311                 |
| 13.11                         | 16.2     | 0.638      | 100.8    | 7.17     | 2.35         | 8.82     | 7642            | 4529       | 0.77          | 280.6             | 0.386                 |
| 13.05                         | 16.4     | 0.640      | 101.4    | 7.19     | 2.31         | 8.84     | 7834            | 4654       | 0.84          | 285.2             | 0.382                 |
| 10.13                         | 12.5     | 0.571      | 74.3     | 4.43     | 2.30         | 5.33     | 2403            | 1018       | 1.33          | 148.5             | 0.605                 |
| 14.50                         | 16.2     | 0.661      | 100.5    | 6.56     | 2.81         | 8.07     | 7238            | 4200       | 1.15          | 266.5             | 0.403                 |
| 14.95                         | 17.9     | 0.741      | 101.9    | 7.17     | 2.32         | 8.91     | 9927            | 6285       | 1.38          | 340.2             | 0.341                 |
| 14.95                         | 16.1     | 0.624      | 85.7     | 6.26     | 2.31         | 7.58     | 5536            | 3149       | 1.49          | 239.3             | 0.428                 |
| 13.11                         | 16.6     | 0.778      | 101.8    | 7.09     | 2.30         | 8.86     | 9520            | 6078       | 0.84          | 333.2             | 0.349                 |
| 14.97                         | 17.5     | 0.738      | 100.5    | 6.62     | 2.93         | 8.22     | 8825            | 5420       | 1.62          | 312.2             | 0.365                 |
| 14.74                         | 19.3     | 0.790      | 102.3    | 7.20     | 3.07         | 9.01     | 11509           | 7475       | 1.92          | 390.9             | 0.316                 |
| 14.50                         | 16.7     | 0.662      | 101.9    | 7.17     | 2.81         | 8.82     | 8290            | 5000       | 0.97          | 295.1             | 0.373                 |
| 14.77                         | 19.4     | 0.825      | 101.6    | 7.19     | 3.02         | 9.05     | 11994           | 7896       | 1.95          | 421.1             | 0.308                 |
| 14.86                         | 19.4     | 0.796      | 101.4    | 7.46     | 3.08         | 9.33     | 11962           | 7887       | 1.78          | 407.8             | 0.305                 |
| 14.52                         | 16.2     | 0.624      | 101.9    | 7.10     | 2.71         | 8.73     | 7492            | 4363       | 0.82          | 275.7             | 0.393                 |
| 14.98                         | 17.5     | 0.800      | 101.8    | 7.09     | 2.93         | 8.90     | 10374           | 6705       | 1.21          | 361.9             | 0.334                 |
| 14.94                         | 19.2     | 0.785      | 102.2    | 7.17     | 2.35         | 8.98     | 11295           | 7313       | 1.88          | 384.4             | 0.319                 |
| 14.91                         | 14.0     | 0.582      | 67.5     | 6.07     | 2.33         | 7.12     | 3431            | 1919       | 0.97          | 194.4             | 0.479                 |
| 13.11                         | 16.6     | 0.778      | 101.8    | 7.09     | 2.30         | 8.86     | 9520            | 6078       | 0.84          | 333.2             | 0.349                 |
| 13.06                         | 14.0     | 0.577      | 85.9     | 6.07     | 2.30         | 7.36     | 4327            | 2284       | 0.75          | 199.4             | 0.481                 |
| 14.53                         | 16.4     | 0.778      | 101.4    | 7.19     | 2.87         | 8.98     | 9553            | 6131       | 0.73          | 334.0             | 0.346                 |
| 13.11                         | 16.1     | 0.778      | 101.3    | 7.09     | 2.30         | 8.85     | 9199            | 5865       | 0.65          | 324.6             | 0.354                 |
| 14.95                         | 18.0     | 0.733      | 101.3    | 6.56     | 2.32         | 8.14     | 8975            | 5475       | 1.88          | 313.8             | 0.364                 |

| $A_{BT}$          | B    | $C_B$ | L     | T    | $h_B$ | D    | $\Delta$ | Dwt  | $GM_t$ | $R_{Total}$ | $\Omega_n$ |
|-------------------|------|-------|-------|------|-------|------|----------|------|--------|-------------|------------|
| [m <sup>2</sup> ] | [m]  | -     | [m]   | [m]  | [m]   | [m]  | [t]      | [t]  | [m]    | kW          | rad/s      |
| 14.95             | 18.3 | 0.796 | 102.1 | 7.17 | 2.35  | 8.99 | 10938    | 7098 | 1.49   | 377.0       | 0.325      |
| 14.86             | 17.6 | 0.738 | 100.6 | 7.46 | 3.08  | 9.24 | 9963     | 6394 | 1.07   | 344.0       | 0.335      |
| 10.05             | 14.1 | 0.570 | 75.6  | 5.22 | 2.30  | 6.26 | 3262     | 1602 | 1.46   | 172.3       | 0.527      |
| 13.16             | 16.2 | 0.639 | 101.4 | 6.40 | 2.32  | 7.88 | 6856     | 3851 | 1.25   | 255.1       | 0.417      |
| 14.90             | 18.3 | 0.798 | 102.2 | 7.17 | 2.35  | 9.00 | 10977    | 7129 | 1.49   | 378.8       | 0.324      |
| 14.86             | 17.9 | 0.731 | 101.3 | 7.38 | 3.06  | 9.14 | 10046    | 6402 | 1.27   | 344.2       | 0.336      |
| 14.49             | 16.6 | 0.694 | 101.4 | 7.50 | 3.08  | 9.23 | 8988     | 5624 | 0.73   | 314.3       | 0.353      |
| 14.88             | 19.5 | 0.799 | 101.9 | 7.17 | 2.81  | 8.99 | 11671    | 7606 | 2.02   | 399.5       | 0.313      |
| 14.90             | 18.3 | 0.791 | 102.2 | 7.15 | 2.35  | 8.96 | 10851    | 7022 | 1.51   | 373.2       | 0.326      |
| 10.02             | 13.7 | 0.570 | 76.7  | 5.22 | 2.30  | 6.27 | 3218     | 1570 | 1.28   | 168.8       | 0.533      |
| 13.14             | 16.2 | 0.638 | 99.6  | 7.17 | 2.35  | 8.80 | 7550     | 4485 | 0.78   | 279.9       | 0.386      |
| 13.06             | 14.0 | 0.577 | 86.1  | 6.07 | 2.30  | 7.36 | 4336     | 2288 | 0.75   | 199.5       | 0.481      |
| 14.77             | 16.7 | 0.662 | 101.9 | 7.17 | 3.01  | 8.82 | 8291     | 5000 | 0.97   | 295.3       | 0.373      |
| 14.66             | 18.2 | 0.798 | 102.3 | 7.18 | 2.35  | 9.01 | 10957    | 7116 | 1.44   | 377.9       | 0.325      |
| 10.02             | 11.4 | 0.571 | 66.4  | 4.55 | 2.30  | 5.38 | 2011     | 896  | 0.83   | 135.1       | 0.618      |
| 10.15             | 13.5 | 0.571 | 67.2  | 5.22 | 2.32  | 6.15 | 2760     | 1391 | 1.26   | 163.5       | 0.538      |
| 14.51             | 16.2 | 0.663 | 101.3 | 6.56 | 2.30  | 8.08 | 7308     | 4238 | 1.14   | 266.5       | 0.403      |
| 14.98             | 17.5 | 0.737 | 100.5 | 6.63 | 2.95  | 8.23 | 8833     | 5427 | 1.62   | 312.5       | 0.365      |
| 14.98             | 17.5 | 0.800 | 101.8 | 7.09 | 2.93  | 8.89 | 10365    | 6698 | 1.22   | 361.7       | 0.335      |
| 14.88             | 19.5 | 0.799 | 101.9 | 7.17 | 2.81  | 8.99 | 11671    | 7606 | 2.02   | 399.5       | 0.313      |
| 14.98             | 17.5 | 0.800 | 102.3 | 7.09 | 2.93  | 8.90 | 10420    | 6731 | 1.21   | 361.9       | 0.334      |
| 10.02             | 11.4 | 0.571 | 66.4  | 4.55 | 2.30  | 5.38 | 2011     | 896  | 0.83   | 135.1       | 0.618      |
| 14.71             | 19.2 | 0.790 | 101.6 | 7.19 | 3.02  | 9.00 | 11356    | 7381 | 1.88   | 388.6       | 0.317      |
| 13.13             | 16.1 | 0.738 | 100.6 | 6.64 | 2.35  | 8.25 | 8144     | 4983 | 1.00   | 291.1       | 0.380      |
| 14.97             | 17.5 | 0.798 | 101.4 | 7.44 | 2.88  | 9.32 | 10804    | 7092 | 0.98   | 375.2       | 0.323      |
| 14.71             | 19.2 | 0.790 | 101.6 | 7.19 | 3.02  | 9.00 | 11356    | 7381 | 1.88   | 388.6       | 0.317      |
| 13.11             | 16.2 | 0.638 | 101.4 | 6.30 | 2.31  | 7.76 | 6744     | 3756 | 1.32   | 251.7       | 0.422      |

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B<br>[m] | $C_B$<br>- | L<br>[m] | T<br>[m] | $h_B$<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | $\Omega_{n}$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|-----------------------|
| 10.02                         | 11.4     | 0.571      | 67.4     | 4.55     | 2.30         | 5.39     | 2041            | 906        | 0.82          | 135.3             | 0.618                 |
| 10.10                         | 12.7     | 0.571      | 66.4     | 5.26     | 2.30         | 6.18     | 2600            | 1313       | 0.95          | 156.9             | 0.547                 |
| 14.42                         | 16.6     | 0.662      | 101.8    | 7.10     | 2.92         | 8.73     | 8135            | 4883       | 0.96          | 290.6             | 0.377                 |
| 10.02                         | 11.4     | 0.571      | 66.4     | 4.55     | 2.30         | 5.38     | 2011            | 896        | 0.83          | 135.1             | 0.618                 |
| 10.02                         | 11.4     | 0.571      | 66.4     | 4.55     | 2.30         | 5.38     | 2011            | 896        | 0.83          | 135.1             | 0.618                 |
| 10.17                         | 14.2     | 0.570      | 75.6     | 5.22     | 2.30         | 6.26     | 3287            | 1615       | 1.51          | 173.4             | 0.526                 |
| 14.86                         | 19.5     | 0.798      | 101.4    | 7.35     | 2.33         | 9.20     | 11869           | 7797       | 1.89          | 406.9             | 0.308                 |
| 14.84                         | 19.3     | 0.829      | 101.6    | 7.21     | 3.04         | 9.08     | 11992           | 7906       | 1.88          | 423.0             | 0.308                 |
| 14.98                         | 17.5     | 0.792      | 101.8    | 7.11     | 2.92         | 8.91     | 10306           | 6647       | 1.21          | 357.8             | 0.335                 |
| 10.02                         | 11.4     | 0.578      | 66.4     | 4.56     | 2.30         | 5.39     | 2042            | 923        | 0.83          | 135.9             | 0.614                 |
| 10.13                         | 14.3     | 0.570      | 75.9     | 5.22     | 2.30         | 6.26     | 3305            | 1623       | 1.52          | 173.8             | 0.525                 |
| 13.29                         | 16.1     | 0.638      | 101.4    | 6.30     | 2.31         | 7.76     | 6736            | 3750       | 1.32          | 251.4             | 0.422                 |
| 10.10                         | 12.6     | 0.571      | 66.4     | 5.24     | 2.30         | 6.16     | 2562            | 1289       | 0.90          | 155.0             | 0.551                 |
| 14.98                         | 17.5     | 0.792      | 101.8    | 7.08     | 2.92         | 8.87     | 10267           | 6613       | 1.23          | 356.7             | 0.336                 |
| 14.50                         | 16.0     | 0.675      | 100.5    | 6.56     | 2.32         | 8.07     | 7322            | 4289       | 1.08          | 267.3             | 0.401                 |
| 14.96                         | 17.5     | 0.731      | 100.5    | 6.62     | 2.34         | 8.21     | 8739            | 5347       | 1.63          | 308.3             | 0.367                 |
| 13.11                         | 16.1     | 0.778      | 101.3    | 7.09     | 2.30         | 8.85     | 9199            | 5865       | 0.65          | 324.6             | 0.354                 |
| 13.11                         | 19.4     | 0.785      | 101.3    | 7.13     | 2.30         | 8.91     | 11301           | 7313       | 2.06          | 388.1             | 0.318                 |
| 10.04                         | 12.6     | 0.571      | 64.0     | 5.21     | 2.30         | 6.10     | 2458            | 1243       | 0.95          | 154.2             | 0.552                 |
| 14.84                         | 17.5     | 0.731      | 100.7    | 6.62     | 2.34         | 8.21     | 8752            | 5355       | 1.63          | 308.5             | 0.367                 |
| 14.98                         | 17.5     | 0.792      | 101.8    | 7.11     | 2.92         | 8.91     | 10302           | 6644       | 1.21          | 357.6             | 0.335                 |

**APÊNDICE C – RESULTADOS DA OTIMIZAÇÃO PARA 30 GERAÇÕES COM O MODELO DE VARIÁVEIS NÃO CONVENCIONAIS.**

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B/T<br>- | $C_B$<br>- | L<br>[m] | L/B<br>- | $h_B$<br>[m] | B<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | T<br>[m] | $\Omega_n$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|----------|---------------------|
| 10.51                         | 2.683    | 0.652      | 64.5     | 4.785    | 2.56         | 13.5     | 5.89     | 2913            | 1576       | 1.43          | 179.7             | 5.02     | 0.518               |
| 10.79                         | 2.556    | 0.707      | 88.1     | 5.808    | 2.73         | 15.2     | 7.25     | 5755            | 3365       | 1.24          | 240.2             | 5.94     | 0.430               |
| 10.51                         | 2.673    | 0.649      | 64.5     | 4.785    | 2.56         | 13.5     | 5.91     | 2912            | 1575       | 1.42          | 179.3             | 5.04     | 0.518               |
| 10.68                         | 2.641    | 0.649      | 65.3     | 4.771    | 2.56         | 13.7     | 6.08     | 3076            | 1688       | 1.40          | 183.1             | 5.18     | 0.507               |
| 10.79                         | 2.556    | 0.707      | 88.1     | 5.808    | 2.73         | 15.2     | 7.25     | 5755            | 3365       | 1.24          | 240.2             | 5.94     | 0.430               |
| 10.84                         | 2.558    | 0.646      | 64.5     | 4.785    | 2.57         | 13.5     | 6.17     | 3028            | 1675       | 1.26          | 181.8             | 5.27     | 0.506               |
| 10.79                         | 2.672    | 0.710      | 92.8     | 5.807    | 2.53         | 16.0     | 7.35     | 6455            | 3769       | 1.51          | 253.9             | 5.98     | 0.417               |
| 10.92                         | 2.683    | 0.717      | 90.0     | 6.111    | 2.63         | 14.7     | 6.74     | 5343            | 3007       | 1.34          | 225.1             | 5.49     | 0.455               |
| 10.92                         | 2.681    | 0.657      | 90.0     | 5.996    | 2.63         | 15.0     | 6.83     | 5082            | 2759       | 1.42          | 215.9             | 5.60     | 0.463               |
| 14.00                         | 2.520    | 0.711      | 98.1     | 5.038    | 2.67         | 19.5     | 9.50     | 10753           | 6959       | 1.74          | 373.0             | 7.73     | 0.315               |
| 14.14                         | 2.697    | 0.711      | 92.8     | 5.807    | 2.59         | 16.0     | 7.29     | 6406            | 3726       | 1.55          | 253.4             | 5.93     | 0.419               |
| 10.92                         | 2.681    | 0.657      | 90.0     | 5.855    | 2.63         | 15.4     | 6.99     | 5331            | 2938       | 1.48          | 223.6             | 5.73     | 0.452               |
| 10.51                         | 2.673    | 0.649      | 64.5     | 4.660    | 2.56         | 13.8     | 6.06     | 3069            | 1689       | 1.48          | 184.6             | 5.17     | 0.505               |
| 10.92                         | 2.681    | 0.657      | 90.0     | 5.996    | 2.63         | 15.0     | 6.83     | 5082            | 2759       | 1.42          | 215.9             | 5.60     | 0.463               |
| 10.92                         | 2.681    | 0.657      | 90.0     | 5.996    | 2.66         | 15.0     | 6.83     | 5084            | 2760       | 1.42          | 216.3             | 5.60     | 0.463               |
| 14.00                         | 2.520    | 0.698      | 98.1     | 5.038    | 2.67         | 19.5     | 9.48     | 10553           | 6786       | 1.76          | 367.5             | 7.73     | 0.318               |
| 10.51                         | 2.674    | 0.649      | 62.1     | 4.785    | 2.56         | 13.0     | 5.67     | 2607            | 1384       | 1.36          | 173.9             | 4.86     | 0.537               |
| 10.92                         | 2.679    | 0.647      | 96.6     | 6.008    | 2.63         | 16.1     | 7.37     | 6187            | 3424       | 1.54          | 241.1             | 6.00     | 0.433               |
| 14.00                         | 2.520    | 0.698      | 98.5     | 5.038    | 2.67         | 19.5     | 9.53     | 10693           | 6884       | 1.77          | 370.4             | 7.76     | 0.316               |
| 14.00                         | 2.520    | 0.711      | 98.1     | 5.038    | 2.67         | 19.5     | 9.50     | 10749           | 6956       | 1.74          | 372.9             | 7.73     | 0.315               |
| 10.51                         | 2.674    | 0.649      | 62.2     | 4.807    | 2.56         | 12.9     | 5.65     | 2594            | 1373       | 1.35          | 173.3             | 4.84     | 0.539               |
| 10.92                         | 2.681    | 0.657      | 89.9     | 5.974    | 2.63         | 15.0     | 6.85     | 5106            | 2778       | 1.43          | 216.8             | 5.61     | 0.462               |
| 10.79                         | 2.556    | 0.658      | 88.1     | 5.808    | 2.63         | 15.2     | 7.22     | 5356            | 3022       | 1.27          | 226.6             | 5.94     | 0.444               |

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B/T<br>- | $C_B$<br>- | L<br>[m] | L/B<br>- | $h_B$<br>[m] | B<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | T<br>[m] | $\Omega_{n_1}$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|----------|-------------------------|
| 10.92                         | 2.681    | 0.706      | 90.0     | 5.996    | 2.73         | 15.0     | 6.86     | 5463            | 3084       | 1.39          | 229.4             | 5.60     | 0.449                   |
| 10.92                         | 2.647    | 0.657      | 90.0     | 6.095    | 2.63         | 14.8     | 6.81     | 4983            | 2696       | 1.32          | 212.6             | 5.58     | 0.468                   |
| 14.08                         | 2.557    | 0.707      | 97.3     | 5.976    | 2.73         | 16.3     | 7.85     | 7307            | 4345       | 1.32          | 272.2             | 6.37     | 0.397                   |
| 13.94                         | 2.683    | 0.802      | 96.4     | 4.790    | 2.67         | 20.1     | 9.34     | 11968           | 7988       | 2.12          | 428.7             | 7.50     | 0.296                   |
| 13.63                         | 2.699    | 0.658      | 97.3     | 6.147    | 2.67         | 15.8     | 7.21     | 6084            | 3344       | 1.52          | 238.6             | 5.86     | 0.439                   |
| 10.92                         | 2.669    | 0.657      | 89.7     | 6.095    | 2.63         | 14.7     | 6.74     | 4903            | 2638       | 1.35          | 210.7             | 5.52     | 0.471                   |
| 14.08                         | 2.647    | 0.657      | 96.5     | 6.095    | 2.63         | 15.8     | 7.35     | 6154            | 3423       | 1.44          | 241.0             | 5.98     | 0.434                   |
| 14.18                         | 2.665    | 0.711      | 96.0     | 5.104    | 2.56         | 18.8     | 8.67     | 9286            | 5831       | 1.95          | 334.8             | 7.06     | 0.343                   |
| 10.92                         | 2.669    | 0.657      | 89.7     | 6.095    | 2.63         | 14.7     | 6.74     | 4903            | 2638       | 1.35          | 210.7             | 5.52     | 0.471                   |
| 10.92                         | 2.434    | 0.706      | 92.6     | 5.996    | 2.73         | 15.4     | 7.78     | 6559            | 3915       | 1.03          | 257.5             | 6.34     | 0.408                   |
| 14.04                         | 2.671    | 0.707      | 99.4     | 5.980    | 2.73         | 16.6     | 7.69     | 7453            | 4375       | 1.56          | 273.6             | 6.22     | 0.399                   |
| 10.92                         | 2.681    | 0.703      | 90.0     | 5.996    | 2.69         | 15.0     | 6.86     | 5445            | 3070       | 1.39          | 228.1             | 5.60     | 0.449                   |
| 10.36                         | 2.674    | 0.663      | 61.6     | 4.785    | 2.56         | 12.9     | 5.62     | 2601            | 1393       | 1.35          | 175.3             | 4.82     | 0.537                   |
| 14.00                         | 2.683    | 0.687      | 96.4     | 4.776    | 2.69         | 20.2     | 9.20     | 10303           | 6552       | 2.25          | 364.7             | 7.52     | 0.321                   |
| 10.56                         | 2.674    | 0.641      | 70.1     | 4.785    | 2.56         | 14.6     | 6.48     | 3694            | 2059       | 1.56          | 197.9             | 5.48     | 0.479                   |
| 10.92                         | 2.681    | 0.706      | 98.5     | 5.984    | 2.73         | 16.5     | 7.58     | 7203            | 4203       | 1.56          | 267.1             | 6.14     | 0.405                   |
| 10.92                         | 2.669    | 0.657      | 89.7     | 6.095    | 2.63         | 14.7     | 6.74     | 4903            | 2638       | 1.35          | 210.7             | 5.52     | 0.471                   |
| 11.17                         | 2.668    | 0.644      | 60.6     | 4.481    | 2.38         | 13.5     | 5.89     | 2750            | 1504       | 1.46          | 176.3             | 5.07     | 0.517                   |
| 14.01                         | 2.683    | 0.705      | 95.5     | 5.982    | 2.73         | 16.0     | 7.33     | 6554            | 3781       | 1.51          | 254.7             | 5.95     | 0.420                   |
| 10.92                         | 2.669    | 0.657      | 89.7     | 6.067    | 2.63         | 14.8     | 6.77     | 4949            | 2670       | 1.37          | 212.1             | 5.54     | 0.469                   |
| 11.20                         | 2.683    | 0.658      | 90.8     | 5.944    | 2.46         | 15.3     | 6.96     | 5320            | 2917       | 1.46          | 221.0             | 5.69     | 0.454                   |
| 14.08                         | 2.717    | 0.706      | 99.7     | 6.266    | 2.76         | 15.9     | 7.24     | 6710            | 3806       | 1.52          | 254.8             | 5.85     | 0.425                   |
| 13.94                         | 2.683    | 0.802      | 96.4     | 4.790    | 2.67         | 20.1     | 9.34     | 11968           | 7988       | 2.12          | 428.7             | 7.50     | 0.296                   |
| 11.35                         | 2.555    | 0.734      | 90.0     | 5.886    | 2.73         | 15.3     | 7.35     | 6193            | 3683       | 1.21          | 252.4             | 5.98     | 0.419                   |
| 13.93                         | 2.372    | 0.701      | 99.7     | 5.038    | 2.57         | 19.8     | 10.26    | 11840           | 7803       | 1.47          | 400.4             | 8.35     | 0.296                   |
| 10.56                         | 2.551    | 0.641      | 56.5     | 4.777    | 2.37         | 11.8     | 5.34     | 2037            | 1052       | 1.08          | 154.7             | 4.64     | 0.575                   |
| 10.92                         | 2.523    | 0.708      | 98.5     | 5.984    | 2.67         | 16.5     | 8.05     | 7677            | 4608       | 1.28          | 281.0             | 6.53     | 0.388                   |

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B/T<br>- | $C_B$<br>- | L<br>[m] | L/B<br>- | $h_B$<br>[m] | B<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | T<br>[m] | $\Omega_{a_n}$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|----------|-------------------------|
| 10.58                         | 2.669    | 0.657      | 89.7     | 6.106    | 2.63         | 14.7     | 6.72     | 4886            | 2625       | 1.35          | 209.9             | 5.51     | 0.472                   |
| 11.35                         | 2.555    | 0.734      | 90.0     | 5.886    | 2.73         | 15.3     | 7.35     | 6193            | 3683       | 1.21          | 252.4             | 5.98     | 0.419                   |
| 10.40                         | 2.681    | 0.706      | 98.5     | 5.984    | 2.76         | 16.5     | 7.58     | 7204            | 4203       | 1.56          | 267.2             | 6.14     | 0.405                   |
| 13.94                         | 2.683    | 0.802      | 96.4     | 4.791    | 2.69         | 20.1     | 9.34     | 11965           | 7986       | 2.12          | 428.6             | 7.50     | 0.296                   |
| 10.56                         | 2.669    | 0.641      | 70.1     | 4.842    | 2.56         | 14.5     | 6.42     | 3621            | 2006       | 1.52          | 194.9             | 5.43     | 0.484                   |
| 10.56                         | 2.674    | 0.641      | 70.1     | 4.785    | 2.56         | 14.6     | 6.48     | 3694            | 2059       | 1.56          | 197.9             | 5.48     | 0.479                   |
| 13.94                         | 2.683    | 0.802      | 96.4     | 4.790    | 2.67         | 20.1     | 9.34     | 11968           | 7988       | 2.12          | 428.7             | 7.50     | 0.296                   |
| 14.03                         | 2.520    | 0.737      | 99.7     | 5.953    | 2.67         | 16.8     | 8.25     | 8389            | 5152       | 1.28          | 300.0             | 6.65     | 0.373                   |
| 13.94                         | 2.683    | 0.802      | 96.4     | 4.790    | 2.67         | 20.1     | 9.34     | 11968           | 7988       | 2.12          | 428.7             | 7.50     | 0.296                   |
| 14.30                         | 2.511    | 0.737      | 99.7     | 5.127    | 2.67         | 19.5     | 9.58     | 11348           | 7417       | 1.68          | 386.1             | 7.75     | 0.308                   |
| 14.03                         | 2.519    | 0.700      | 96.4     | 5.935    | 2.67         | 16.2     | 7.93     | 7244            | 4319       | 1.27          | 271.6             | 6.45     | 0.396                   |
| 13.94                         | 2.516    | 0.687      | 101.5    | 5.109    | 2.67         | 19.9     | 9.71     | 11219           | 7196       | 1.79          | 378.4             | 7.90     | 0.312                   |
| 14.03                         | 2.520    | 0.767      | 99.7     | 5.953    | 2.67         | 16.8     | 8.29     | 8730            | 5443       | 1.24          | 312.7             | 6.65     | 0.366                   |
| 14.03                         | 2.520    | 0.737      | 99.7     | 5.953    | 2.67         | 16.8     | 8.25     | 8395            | 5157       | 1.27          | 300.2             | 6.65     | 0.373                   |
| 13.97                         | 2.519    | 0.802      | 101.6    | 5.889    | 2.67         | 17.3     | 8.60     | 9882            | 6315       | 1.27          | 349.3             | 6.85     | 0.345                   |
| 10.92                         | 2.523    | 0.708      | 98.5     | 5.984    | 2.67         | 16.5     | 8.05     | 7677            | 4608       | 1.28          | 281.0             | 6.53     | 0.388                   |
| 10.92                         | 2.506    | 0.708      | 98.5     | 5.984    | 2.67         | 16.5     | 8.10     | 7729            | 4652       | 1.25          | 282.6             | 6.57     | 0.387                   |
| 13.97                         | 2.684    | 0.813      | 101.5    | 5.888    | 2.67         | 17.2     | 8.08     | 9359            | 5869       | 1.57          | 338.7             | 6.42     | 0.360                   |
| 10.59                         | 2.589    | 0.641      | 56.5     | 4.618    | 2.36         | 12.2     | 5.44     | 2148            | 1127       | 1.19          | 158.6             | 4.73     | 0.561                   |
| 14.44                         | 2.348    | 0.701      | 99.7     | 5.043    | 2.57         | 19.8     | 10.35    | 11939           | 7890       | 1.42          | 403.2             | 8.43     | 0.293                   |
| 10.55                         | 2.527    | 0.641      | 55.1     | 4.894    | 2.36         | 11.3     | 5.11     | 1815            | 911        | 0.98          | 149.6             | 4.45     | 0.599                   |
| 11.54                         | 2.557    | 0.657      | 99.8     | 4.997    | 2.63         | 20.0     | 9.58     | 10492           | 6610       | 1.93          | 365.1             | 7.81     | 0.322                   |
| 10.58                         | 2.669    | 0.695      | 89.7     | 6.106    | 2.67         | 14.7     | 6.74     | 5173            | 2871       | 1.33          | 219.3             | 5.51     | 0.460                   |
| 14.30                         | 2.514    | 0.735      | 98.1     | 5.127    | 2.67         | 19.1     | 9.39     | 10745           | 6988       | 1.65          | 373.4             | 7.61     | 0.316                   |
| 14.54                         | 2.592    | 0.695      | 99.1     | 4.776    | 2.73         | 20.8     | 9.83     | 11735           | 7635       | 2.11          | 398.5             | 8.01     | 0.299                   |
| 10.56                         | 2.552    | 0.641      | 70.1     | 4.842    | 2.56         | 14.5     | 6.71     | 3788            | 2150       | 1.35          | 201.1             | 5.68     | 0.471                   |
| 13.97                         | 2.582    | 0.802      | 101.6    | 5.888    | 2.67         | 17.3     | 8.40     | 9645            | 6111       | 1.39          | 342.5             | 6.69     | 0.351                   |

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B/T<br>- | $C_B$<br>- | L<br>[m] | L/B<br>- | $h_B$<br>[m] | B<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | T<br>[m] | $\Omega_{\alpha_n}$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|----------|------------------------------|
| 11.54                         | 2.557    | 0.695      | 99.1     | 5.052    | 2.73         | 19.6     | 9.42     | 10630           | 6800       | 1.85          | 367.5             | 7.67     | 0.319                        |
| 10.67                         | 2.349    | 0.642      | 55.3     | 4.894    | 2.36         | 11.3     | 5.51     | 1978            | 1047       | 0.77          | 150.2             | 4.81     | 0.573                        |
| 14.32                         | 2.526    | 0.700      | 99.5     | 5.043    | 2.57         | 19.7     | 9.61     | 11016           | 7106       | 1.80          | 376.9             | 7.81     | 0.312                        |
| 10.55                         | 2.527    | 0.641      | 55.1     | 4.894    | 2.36         | 11.3     | 5.11     | 1815            | 911        | 0.98          | 149.6             | 4.45     | 0.599                        |
| 10.56                         | 2.668    | 0.648      | 60.6     | 4.295    | 2.39         | 14.1     | 6.14     | 3008            | 1694       | 1.57          | 187.8             | 5.29     | 0.495                        |
| 14.44                         | 2.352    | 0.701      | 99.7     | 5.043    | 2.57         | 19.8     | 10.33    | 11915           | 7870       | 1.43          | 402.5             | 8.41     | 0.294                        |
| 14.02                         | 2.515    | 0.736      | 99.7     | 5.953    | 2.66         | 16.8     | 8.26     | 8405            | 5165       | 1.27          | 300.4             | 6.66     | 0.373                        |
| 14.03                         | 2.520    | 0.737      | 99.7     | 5.953    | 2.67         | 16.8     | 8.25     | 8389            | 5152       | 1.28          | 300.0             | 6.65     | 0.373                        |
| 14.03                         | 2.544    | 0.736      | 99.7     | 5.953    | 2.69         | 16.8     | 8.17     | 8307            | 5081       | 1.32          | 297.6             | 6.58     | 0.376                        |
| 13.68                         | 2.683    | 0.834      | 94.9     | 4.772    | 2.69         | 19.9     | 9.26     | 11948           | 8033       | 2.07          | 454.7             | 7.41     | 0.295                        |
| 10.92                         | 2.506    | 0.678      | 98.5     | 6.003    | 2.67         | 16.4     | 8.04     | 7362            | 4343       | 1.27          | 272.2             | 6.55     | 0.396                        |
| 10.56                         | 2.552    | 0.633      | 60.4     | 4.842    | 2.38         | 12.5     | 5.68     | 2393            | 1260       | 1.14          | 159.9             | 4.89     | 0.549                        |
| 11.22                         | 2.683    | 0.704      | 90.0     | 5.970    | 2.67         | 15.1     | 6.88     | 5493            | 3105       | 1.41          | 229.5             | 5.62     | 0.447                        |
| 11.17                         | 2.533    | 0.707      | 60.7     | 4.894    | 2.36         | 12.4     | 5.71     | 2670            | 1497       | 1.08          | 175.7             | 4.90     | 0.526                        |
| 10.92                         | 2.506    | 0.708      | 98.5     | 5.984    | 2.67         | 16.5     | 8.10     | 7732            | 4654       | 1.25          | 282.7             | 6.57     | 0.387                        |
| 13.89                         | 2.489    | 0.802      | 101.6    | 5.888    | 2.67         | 17.3     | 8.70     | 10005           | 6420       | 1.21          | 353.0             | 6.94     | 0.342                        |
| 10.55                         | 2.669    | 0.641      | 71.4     | 4.842    | 2.56         | 14.7     | 6.56     | 3824            | 2135       | 1.55          | 200.5             | 5.52     | 0.475                        |
| 13.68                         | 2.683    | 0.834      | 94.9     | 4.779    | 2.67         | 19.8     | 9.24     | 11908           | 8002       | 2.06          | 453.5             | 7.40     | 0.296                        |
| 13.97                         | 2.684    | 0.802      | 101.6    | 5.989    | 2.69         | 17.0     | 7.95     | 8967            | 5558       | 1.53          | 323.1             | 6.32     | 0.369                        |
| 10.82                         | 2.508    | 0.708      | 98.5     | 5.984    | 2.67         | 16.5     | 8.09     | 7715            | 4643       | 1.25          | 282.3             | 6.56     | 0.387                        |
| 14.07                         | 2.580    | 0.802      | 102.5    | 5.888    | 2.67         | 17.4     | 8.48     | 9887            | 6277       | 1.40          | 347.3             | 6.75     | 0.348                        |
| 10.58                         | 2.669    | 0.657      | 89.3     | 6.106    | 2.63         | 14.6     | 6.69     | 4824            | 2588       | 1.34          | 208.5             | 5.48     | 0.474                        |
| 10.58                         | 2.495    | 0.657      | 89.7     | 6.106    | 2.63         | 14.7     | 7.18     | 5228            | 2916       | 1.08          | 219.5             | 5.89     | 0.453                        |
| 11.08                         | 2.558    | 0.657      | 95.0     | 5.867    | 2.63         | 16.2     | 7.75     | 6552            | 3769       | 1.37          | 254.5             | 6.33     | 0.414                        |
| 11.35                         | 2.417    | 0.724      | 90.0     | 6.124    | 2.73         | 14.7     | 7.45     | 5958            | 3535       | 0.90          | 243.3             | 6.08     | 0.425                        |
| 14.41                         | 2.515    | 0.735      | 99.7     | 5.967    | 2.66         | 16.7     | 8.24     | 8356            | 5127       | 1.26          | 298.8             | 6.65     | 0.374                        |
| 13.68                         | 2.683    | 0.834      | 94.9     | 4.772    | 2.69         | 19.9     | 9.26     | 11951           | 8036       | 2.07          | 454.8             | 7.41     | 0.295                        |

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B/T<br>- | $C_B$<br>- | L<br>[m] | L/B<br>- | $h_B$<br>[m] | B<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | T<br>[m] | $\Omega_{a_n}$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|----------|-------------------------|
| 13.89                         | 2.662    | 0.701      | 100.4    | 6.136    | 2.57         | 16.4     | 7.59     | 7247            | 4199       | 1.50          | 265.1             | 6.14     | 0.407                   |
| 10.56                         | 2.720    | 0.642      | 70.1     | 4.823    | 2.56         | 14.5     | 6.33     | 3585            | 1971       | 1.61          | 194.0             | 5.34     | 0.487                   |
| 14.20                         | 2.344    | 0.702      | 99.7     | 5.237    | 2.57         | 19.0     | 9.99     | 11098           | 7242       | 1.31          | 379.2             | 8.12     | 0.308                   |
| 10.82                         | 2.347    | 0.642      | 55.2     | 4.772    | 2.37         | 11.6     | 5.64     | 2068            | 1113       | 0.81          | 155.0             | 4.93     | 0.560                   |
| 13.86                         | 2.524    | 0.702      | 101.5    | 5.043    | 2.57         | 20.1     | 9.83     | 11737           | 7616       | 1.83          | 392.0             | 7.98     | 0.303                   |
| 14.20                         | 2.344    | 0.721      | 99.7     | 5.219    | 2.57         | 19.1     | 10.05    | 11477           | 7563       | 1.29          | 389.8             | 8.15     | 0.302                   |
| 14.03                         | 2.544    | 0.736      | 99.5     | 5.953    | 2.69         | 16.7     | 8.14     | 8233            | 5032       | 1.32          | 296.0             | 6.57     | 0.377                   |
| 14.03                         | 2.623    | 0.736      | 99.7     | 5.953    | 2.69         | 16.8     | 7.93     | 8060            | 4869       | 1.46          | 290.6             | 6.39     | 0.383                   |
| 10.58                         | 2.495    | 0.657      | 89.7     | 6.106    | 2.63         | 14.7     | 7.18     | 5228            | 2916       | 1.08          | 219.5             | 5.89     | 0.453                   |
| 14.00                         | 2.675    | 0.702      | 98.8     | 6.085    | 2.57         | 16.2     | 7.49     | 7013            | 4055       | 1.51          | 260.9             | 6.07     | 0.412                   |
| 11.16                         | 2.533    | 0.673      | 59.8     | 4.872    | 2.42         | 12.3     | 5.62     | 2449            | 1330       | 1.08          | 167.6             | 4.84     | 0.542                   |
| 13.68                         | 2.683    | 0.834      | 94.9     | 4.772    | 2.69         | 19.9     | 9.26     | 11951           | 8036       | 2.07          | 454.8             | 7.41     | 0.295                   |
| 14.00                         | 2.486    | 0.756      | 99.7     | 5.953    | 2.66         | 16.8     | 8.38     | 8728            | 5441       | 1.19          | 311.3             | 6.74     | 0.365                   |
| 14.20                         | 2.344    | 0.702      | 99.7     | 5.237    | 2.57         | 19.0     | 9.99     | 11098           | 7242       | 1.31          | 379.2             | 8.12     | 0.308                   |
| 13.89                         | 2.497    | 0.690      | 99.1     | 5.989    | 2.57         | 16.5     | 8.15     | 7682            | 4588       | 1.26          | 280.1             | 6.63     | 0.388                   |
| 11.35                         | 2.391    | 0.800      | 101.4    | 6.124    | 2.73         | 16.6     | 8.68     | 9527            | 6093       | 0.93          | 340.2             | 6.92     | 0.350                   |
| 14.02                         | 2.515    | 0.739      | 99.7     | 5.953    | 2.66         | 16.8     | 8.27     | 8434            | 5190       | 1.26          | 301.4             | 6.66     | 0.372                   |
| 13.90                         | 2.717    | 0.702      | 98.8     | 6.085    | 2.57         | 16.2     | 7.38     | 6903            | 3961       | 1.58          | 258.0             | 5.98     | 0.416                   |
| 13.99                         | 2.472    | 0.702      | 99.0     | 6.085    | 2.57         | 16.3     | 8.12     | 7642            | 4582       | 1.16          | 278.5             | 6.59     | 0.390                   |
| 13.89                         | 2.516    | 0.802      | 101.6    | 5.710    | 2.67         | 17.8     | 8.87     | 10524           | 6809       | 1.34          | 368.4             | 7.07     | 0.332                   |
| 10.56                         | 2.683    | 0.624      | 70.1     | 4.842    | 2.56         | 14.5     | 6.39     | 3506            | 1906       | 1.54          | 190.6             | 5.40     | 0.492                   |
| 10.58                         | 2.375    | 0.642      | 47.1     | 4.766    | 2.37         | 9.9      | 4.66     | 1273            | 612        | 0.73          | 144.1             | 4.16     | 0.650                   |
| 10.82                         | 2.641    | 0.657      | 90.2     | 6.111    | 2.64         | 14.8     | 6.82     | 5001            | 2708       | 1.31          | 212.8             | 5.59     | 0.467                   |
| 10.82                         | 2.359    | 0.668      | 56.7     | 4.732    | 2.37         | 12.0     | 5.83     | 2358            | 1319       | 0.86          | 166.6             | 5.08     | 0.535                   |
| 10.58                         | 2.666    | 0.657      | 87.9     | 6.146    | 2.63         | 14.3     | 6.54     | 4532            | 2404       | 1.29          | 201.8             | 5.36     | 0.485                   |
| 10.56                         | 2.669    | 0.641      | 70.1     | 4.842    | 2.56         | 14.5     | 6.42     | 3621            | 2006       | 1.52          | 194.9             | 5.43     | 0.484                   |
| 10.58                         | 2.669    | 0.657      | 89.3     | 6.106    | 2.63         | 14.6     | 6.69     | 4824            | 2588       | 1.34          | 208.5             | 5.48     | 0.474                   |

| $A_{BT}$<br>[m <sup>2</sup> ] | B/T<br>- | $C_B$<br>- | L<br>[m] | L/B<br>- | $h_B$<br>[m] | B<br>[m] | D<br>[m] | $\Delta$<br>[t] | Dwt<br>[t] | $GM_t$<br>[m] | $R_{Total}$<br>kW | T<br>[m] | $\Omega_{n_1}$<br>rad/s |
|-------------------------------|----------|------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-----------------|------------|---------------|-------------------|----------|-------------------------|
| 14.20                         | 2.344    | 0.702      | 99.9     | 5.237    | 2.57         | 19.1     | 10.00    | 11139           | 7271       | 1.31          | 380.1             | 8.13     | 0.308                   |
| 13.89                         | 2.269    | 0.800      | 101.4    | 6.124    | 2.70         | 16.6     | 9.14     | 10041           | 6534       | 0.70          | 353.8             | 7.29     | 0.337                   |
| 14.20                         | 2.352    | 0.702      | 100.2    | 5.237    | 2.71         | 19.1     | 10.00    | 11213           | 7317       | 1.33          | 381.2             | 8.13     | 0.307                   |
| 11.32                         | 2.417    | 0.724      | 91.4     | 6.187    | 2.64         | 14.8     | 7.51     | 6126            | 3635       | 0.90          | 245.7             | 6.11     | 0.422                   |
| 11.35                         | 2.419    | 0.702      | 89.9     | 6.196    | 2.58         | 14.5     | 7.34     | 5642            | 3283       | 0.90          | 231.8             | 6.00     | 0.436                   |
| 13.89                         | 2.344    | 0.702      | 99.7     | 5.043    | 2.57         | 19.8     | 10.37    | 11980           | 7926       | 1.41          | 404.5             | 8.44     | 0.293                   |
| 10.82                         | 2.347    | 0.642      | 55.2     | 4.772    | 2.37         | 11.6     | 5.64     | 2068            | 1113       | 0.81          | 155.0             | 4.93     | 0.560                   |
| 11.19                         | 2.453    | 0.708      | 60.9     | 4.749    | 2.36         | 12.8     | 6.09     | 2968            | 1726       | 1.04          | 187.8             | 5.23     | 0.499                   |
| 10.82                         | 2.641    | 0.657      | 88.3     | 5.881    | 2.63         | 15.0     | 6.93     | 5077            | 2794       | 1.37          | 217.5             | 5.69     | 0.458                   |
| 13.68                         | 2.683    | 0.834      | 94.9     | 4.772    | 2.69         | 19.9     | 9.26     | 11951           | 8036       | 2.07          | 454.8             | 7.41     | 0.295                   |
| 10.82                         | 2.641    | 0.657      | 90.2     | 6.152    | 2.64         | 14.7     | 6.78     | 4934            | 2660       | 1.29          | 210.8             | 5.55     | 0.470                   |
| 11.58                         | 2.415    | 0.724      | 90.1     | 6.124    | 2.68         | 14.7     | 7.48     | 5995            | 3561       | 0.90          | 244.0             | 6.09     | 0.424                   |
| 13.97                         | 2.687    | 0.776      | 101.5    | 5.888    | 2.73         | 17.2     | 8.03     | 8931            | 5509       | 1.60          | 316.9             | 6.42     | 0.368                   |
| 10.49                         | 2.375    | 0.647      | 48.4     | 4.554    | 2.37         | 10.6     | 5.03     | 1525            | 784        | 0.81          | 148.1             | 4.47     | 0.608                   |
| 13.89                         | 2.344    | 0.702      | 99.7     | 5.043    | 2.57         | 19.8     | 10.37    | 11980           | 7926       | 1.41          | 404.5             | 8.44     | 0.293                   |
| 13.89                         | 2.516    | 0.802      | 101.6    | 5.710    | 2.67         | 17.8     | 8.87     | 10524           | 6809       | 1.34          | 368.4             | 7.07     | 0.332                   |
| 10.82                         | 2.359    | 0.668      | 56.7     | 4.732    | 2.37         | 12.0     | 5.83     | 2358            | 1319       | 0.86          | 166.6             | 5.08     | 0.535                   |
| 13.75                         | 2.344    | 0.702      | 99.7     | 5.043    | 2.67         | 19.8     | 10.36    | 11979           | 7925       | 1.41          | 404.4             | 8.44     | 0.293                   |
| 11.19                         | 2.453    | 0.708      | 60.9     | 4.749    | 2.36         | 12.8     | 6.09     | 2969            | 1726       | 1.04          | 187.8             | 5.23     | 0.499                   |
| 13.89                         | 2.471    | 0.701      | 101.6    | 5.716    | 2.57         | 17.8     | 8.88     | 9348            | 5808       | 1.36          | 323.8             | 7.19     | 0.351                   |
| 11.19                         | 2.456    | 0.658      | 94.0     | 6.124    | 2.72         | 15.4     | 7.65     | 6090            | 3482       | 1.07          | 241.1             | 6.25     | 0.427                   |
| 14.00                         | 2.660    | 0.702      | 100.2    | 6.085    | 2.57         | 16.5     | 7.65     | 7357            | 4286       | 1.51          | 268.5             | 6.19     | 0.404                   |
| 14.03                         | 2.623    | 0.736      | 99.8     | 5.953    | 2.69         | 16.8     | 7.93     | 8063            | 4871       | 1.46          | 290.7             | 6.39     | 0.383                   |
| 14.03                         | 2.666    | 0.706      | 99.8     | 6.150    | 2.63         | 16.2     | 7.52     | 7124            | 4125       | 1.48          | 262.9             | 6.09     | 0.410                   |