

Modelo de Síntese e Processo de Otimização para o Projeto Conceitual/Preliminar de uma Embarcação para o Transporte de Gás Natural Comprimido

Rafael Máximo Carreira Ribeiro
Lucas Lopes de Cerqueira
Prof. Dr. Bernardo Luis Rodrigues de Andrade
Prof. Dr. Claudio Mueller Prado Sampaio
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3 nº 380
CEP 05508-010 - São Paulo - SP

RESUMO

Este trabalho descreve um procedimento de projeto e otimização desenvolvido para determinar as características principais e uma representação preliminar da superfície do casco de um navio de gás natural comprimido (CNG) armazenado em cilindros verticais, com capacidade total de carga de 1,6M de metros cúbicos normais (CNP), velocidade de serviço de 15 nós e projetado para operar no escoamento da produção de gás dos campos da costa brasileira.

O procedimento proposto está baseado em dois modelos de síntese hierárquicos. O primeiro é um modelo de síntese paramétrico para o projeto conceitual que foi desenvolvido com base em regressões empíricas e representações geométricas simples dos principais espaços e volumes do navio, permitindo dessa forma a avaliação dos atributos de desempenho a partir dos parâmetros geométricos principais do navio definidos como variáveis de projeto.

O objetivo primordial desta fase é a busca das configurações ótimas, tendo em vista a minimização de dois atributos distintos e conflitantes (potência instalada e peso leve), sob a influência de restrições específicas.

O processo de otimização baseou-se na versão NSGA-II do algoritmo genético, sendo que diferentes combinações dos parâmetros de otimização foram testadas a fim de se descobrir qual a melhor combinação destas, em relação ao seu custo computacional e confiabilidade das respostas.

Concluiu-se nesta fase de projeto conceitual, que a altura dos cilindros, é um fator determinante para o projeto de um navio CNG no qual o gás seja armazenado em vasos de pressão dispostos verticalmente ao longo dos compartimentos de carga.

Em seguida, a partir das dimensões principais obtidas com a primeira etapa de síntese e otimização, foi desenvolvido o segundo modelo de síntese, que é um modelo paramétrico para representar matematicamente a superfície do casco. Os cascos gerados por este modelo paramétrico devem possuir as dimensões principais e coeficientes de forma definidos na fase conceitual. As descrições matemáticas dos cascos geradas neste segundo modelo de síntese permitem agora uma avaliação mais elaborada, através de simulação numérica, de alguns atributos de desempenho, como a resistência ao avanço e o comportamento no mar.

Para o novo modelo, novas variáveis de projeto e novas funções objetivo foram escolhidas. Os resultados para potência instalada obtidos nessa nova etapa são comparados com os da etapa anterior, a fim de validar os modelos construídos, sendo encontrada uma boa concordância dos mesmos.

Palavras-chave: Procedimento de projeto, CNG, projeto conceitual, projeto preliminar, otimização, algoritmo genético.

I. INTRODUÇÃO

O Brasil vive um período de descobertas de reservas petróleo e gás natural em campos submarinos, e ao se pensar em sua produção, é necessária a definição de um meio de escoamento de sua produção.

Dentre os diferentes meios existentes, os principais são: gás natural liquefeito (LNG), gás natural comprimido (CNG), gasodutos e linhas de transmissão (energia) [1]. Neste artigo é apresentado um estudo conceitual/preliminar para a definição das melhores soluções de projeto de um navio CNG, no qual se procura determinar as principais características e atributos de desempenho deste tipo de embarcação, considerando-se como requisitos aqueles presentes em problema típico de transporte do gás natural de uma bacia *offshore*.

O transporte de gás por CNG é viável a pequenas e médias distâncias - de 200 a 2 700 milhas náuticas, e quantidades que não justifiquem a implantação de gasodutos [2], o que vem ao encontro da situação brasileira atual. Segundo dados do anuário estatístico da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) [3], a produção brasileira anual de gás natural a partir de campos em alto mar ultrapassa os 15 bilhões de metros cúbicos, gerando um mercado potencial para o transporte de gás por embarcações CNG, dado que a maioria das reservas encontra-se na Zona Econômica Exclusiva (ZEE).

Há diversas configurações do sistema de contenção de gás comprimido que podem ser instaladas a bordo de um navio [4]. Escolheu-se para este estudo, o sistema de contenção constituído por vasos de pressão cilíndricos, de maneira similar ao sistema Knutsen [5].

Para o desenvolvimento do primeiro modelo, o problema de projeto do navio CNG é tratado como um problema de otimização com múltiplos objetivos. Para sua solução foi desenvolvido um modelo de síntese, baseado num elenco de equações paramétricas, que permitem a avaliação dos principais atributos de uma solução de projeto em função do conjunto de variáveis de projeto escolhido para descrevê-la, nos moldes dos modelos propostos por Lyon e Mistree [6], Parsons [7], Xuebin [8] e Andrade [9]. Este modelo foi então integrado a um algoritmo de otimização capaz de aproximar uma região de soluções não dominadas.

Para garantir a fidelidade do modelo e calibrar os parâmetros do algoritmo de otimização empregado, foram realizados diferentes testes nos quais foram avaliados o custo computacional, a acurácia e a convergência da resposta final.

No desenvolvimento do segundo modelo, foi construído um modelo paramétrico da superfície 3D do casco, a partir da definição de suas linhas longitudinais principais, linha de centro, curva de área seccional e curva de linha d'água no calado de projeto, a partir das quais são definidas as variáveis de projeto. A superfície é então gerada de maneira automatizada, e em seguida, são realizados os cálculos hidrodinâmicos necessários para a avaliação do seu desempenho.

Ambos os modelos encontram-se completamente descritos em [10].

II. MODELO DE SÍNTESE – PROJETO CONCEITUAL

As variáveis de projeto escolhidas para descrever uma solução conceitual do navio CNG são o comprimento, L , a boca, B , o calado, T e o coeficiente de bloco, C_b . A figura 1 traz um exemplo de navio CNG cujos cilindros são dispostos verticalmente.

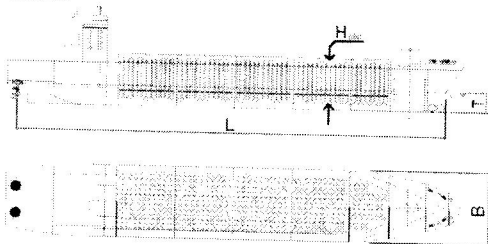


Figura 1 – Exemplo de navio CNG

Para o presente estudo os objetivos considerados foram: 1) O peso leve do navio e; 2) A potência instalada.

As principais restrições referem-se às limitações dos modelos paramétricos empregados, a limitações de estabilidade e comportamento no mar e principalmente a limitações quanto à altura dos cilindros de contenção.

Tais limitações de altura provêm, por exemplo, do requisito de visibilidade da ponte de comando, das limitações impostas no transporte dos cilindros até o estaleiro ou ainda das limitações da infraestrutura do próprio estaleiro.

Para o desenvolvimento do modelo de síntese do navio CNG admitiu-se que seus atributos e características principais pudessem ser calculados através das expressões e modelos paramétricos empregados para o cálculo dos atributos de um navio tanque. As adaptações inseridas no modelo estão de acordo com o guia da ABS [11].

A. Algoritmo de otimização

O programa computacional escolhido para implementação do modelo de síntese e execução do procedimento de otimização foi o ModeFrontier®, pois este apresenta diversas ferramentas e opções de algoritmos de otimização. Escolheu-se tratar o problema através do algoritmo evolutivo conhecido como NSGA II (*Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*), desenvolvido por Deb Kalyanmoy [12].

Após testes de calibração e validação do modelo, em termos do número de indivíduos por geração e do número de gerações, parâmetros do algoritmo, chegou-se aos valores de, respectivamente, 500 e 100, como sendo uma combinação adequada do ponto de vista de confiabilidade da solução, a um custo computacional aceitável.

III. PROBLEMA DE PROJETO CONSIDERADO

O problema de projeto considerado no estudo conceitual de um navio CNG tem como requisitos e características que o definem, em primeiro lugar, uma capacidade de carga de 1,6 milhões de metros cúbicos de gás natural (a pressão ambiente), que deverão ser armazenados a 250 bar, num sistema semelhante ao sistema Knutsen [5].

A embarcação deve ter autonomia de sete mil milhas náuticas e viajar a uma velocidade de cruzeiro de 15 nós.

Tais definições representam uma determinada situação de mercado, não sendo objeto de estudo deste trabalho.

IV. RESULTADOS – PROJETO CONCEITUAL

A tabela 1 mostra um conjunto representativo das soluções de projeto não dominadas (fronteira de Pareto), obtidas a partir do processamento do modelo de síntese no programa ModeFrontier®. Os resultados, extraídos de modo a cobrir toda a extensão da fronteira, representam a solução para o problema de otimização sem a restrição de altura dos cilindros.

A solução é representativa para todos os casos analisados com diferentes valores de restrição de altura dos cilindros, pois esta restrição atua de forma a “cortar” a fronteira inicial no sentido de aproximá-la ao mínimo global de potência.

Tabela 1 – Resultados obtidos para o problema de otimização sem restrição de altura dos cilindros

H_{cilin} (m)	L (m)	B (m)	T (m)	C_b (-)	Pot (MW)	W_s (t)
13,7	153	18,5	6,8	0,7	3,73	4 407
14,0	147	18,9	6,9	0,7	3,74	4 332
14,3	143	19,3	6,9	0,7	3,76	4 292
14,9	136	19,8	7,1	0,7	3,78	4 184
15,9	124	20,9	7,2	0,7	3,86	4 052
16,5	118	21,5	7,3	0,7	3,91	3 989
17,0	113	22,1	7,4	0,7	3,96	3 937
17,5	109	22,7	7,5	0,7	4,02	3 902
18,1	106	23,3	7,5	0,7	4,08	3 872
19,2	99	24,3	7,7	0,7	4,20	3 815
20,2	94	25,3	7,8	0,7	4,32	3 776

Observa-se uma variação significativa das soluções quanto aos parâmetros de comprimento e boca, da ordem de 40 e 30 por cento, respectivamente. A variação do calado é da ordem de 10 por cento, enquanto o coeficiente de bloco não apresenta nenhuma variação ao longo da fronteira, sendo que seu valor mínimo leva às soluções não dominadas para ambas as funções objetivo.

V. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A. Influência da restrição de altura dos cilindros no modelo

Mudando-se a restrição de altura no modelo é modificada a fronteira de Pareto do problema. A restrição de altura dos cilindros faz com que a fronteira seja “cortada” no sentido da potência ótima global, como pode ser visto na figura 2, na qual estão representados a potência no eixo das abscissas e o peso leve no eixo das ordenadas.

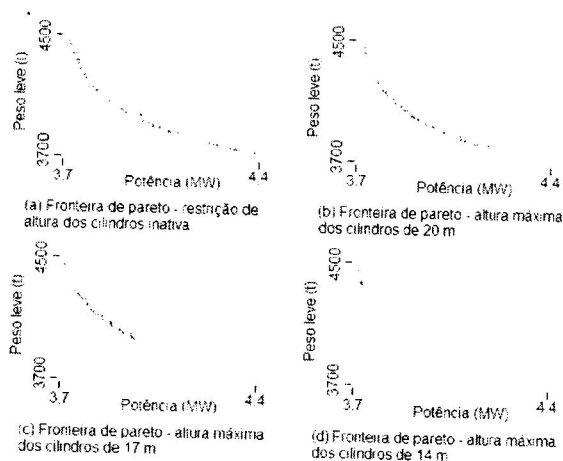


Figura 2 – Fronteiras de Pareto para os diferentes casos de restrição de altura dos cilindros analisados

É possível então encontrar um valor para restrição de altura no qual a solução do problema de otimização torna-se o ótimo global para a potência. Valores abaixo deste fazem com que não haja mais concorrência entre as funções objetivo. Dessa forma, não se obtém mais nenhum ponto da fronteira inicial, como pode ser visto na tabela 2 – os resultados para os navios com cilindros de no máximo 11 m apresentam resultados significativamente distantes dos resultados ótimos iniciais, e muito próximos entre si.

As modificações causadas pela restrição de altura mostram que este parâmetro é um dos principais determinantes deste problema de otimização.

Tabela 2 – Resultados das fronteiras de Pareto com diferentes restrições de altura dos cilindros

H _{máx}	Pot _{min}	W _{LS min}	N
	Pot (MW)	W _{LS} (t)	
∞	3,73	4 407	56
20	3,73	4 414	62
17	3,74	4 362	49
14	3,73	4 420	15
11	3,82	5 216	4

VI. MODELO PARAMÉTRICO E ANÁLISES COMPUTACIONAIS – PROJETO PRELIMINAR

As variáveis de projeto escolhidas foram os ângulos de entrada e saída das curvas longitudinais, o comprimento e a posição do centro do corpo paralelo médio e a porcentagem do volume do navio, excluído o volume do corpo paralelo, que se aloca no corpo de saída ($V_{saída}/(V_{saída} + V_{entrada})$). A figura 3 traz uma representação da superfície gerada.

O estudo numérico dos modelos envolveu basicamente a análise da parcela de ondas da resistência ao avanço, pois seu custo computacional é baixo (~30 s por indivíduo), e a análise da amplitude significativa máxima da aceleração vertical na proa (~30 s por indivíduo). A análise da parcela viscosa da resistência ao avanço foi estimada segundo o método proposto na ITTC'78, uma vez que o seu custo computacional é alto (~8 h por indivíduo). O que implica em certa perda de precisão no resultado final, que, no entanto, pode ser assumida perante as demais imprecisões inerentes aos modelos criados e dado que

os objetivos principais são o estudo das tendências e a validação dos modelos.

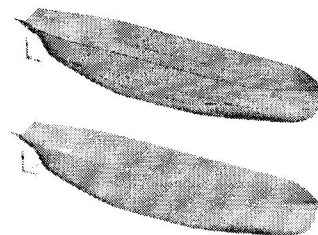


Figura 3 – Representação da superfície do casco

Uma vez o modelo parametrizado, foi possível realizar um processo de otimização diante a imposição de algumas restrições ao modelo, expressas basicamente pela comparação de atributos do modelo preliminar com os do conceitual, sendo adotada uma margem de diferença máxima permissível de 15%. Para este processo, foram escolhidos 3 indivíduos na fronteira de Pareto obtida da etapa conceitual para a análise computacional dos modelos. Os pontos selecionados na fronteira foram aqueles relativos às soluções dos problemas mono-objetivos (extremos da fronteira), e mais um ponto intermediário escolhido arbitrariamente.

VII. RESULTADOS – PROJETO PRELIMINAR

A tabela 3 traz os resultados obtidos ao final da etapa de otimização do projeto preliminar, para cada um dos objetivos analisados.

Tabela 3 – Resultados da etapa preliminar

Casco	C _{w min}		$\ddot{z}_{proa min}$	
	C _w (10 ⁻⁴)	\ddot{z}_{proa} (m/s ²)	C _w (10 ⁻⁴)	\ddot{z}_{proa} (m/s ²)
A	0,25	3,50	7,32	2,68
B	2,06	4,73	25,0	2,92
C	4,70	5,95	35,4	2,73

As figura 4 e figura 5 mostram, respectivamente, a evolução do processo de otimização para C_w e \ddot{z}_{proa} , para o casco A, evidenciando a convergência do processo de otimização em cada caso. Para a faixa de número de Froude dos cascos avaliados (0,19 – 0,25), a parcela de ondas representa usualmente 10 % da resistência total. Entre as figuras 7C e 7D, há uma redução de aproximadamente 20 vezes do valor de C_w, ou seja, por volta de 9,5 % de redução da resistência total. Em relação à aceleração vertical na proa, há uma redução de aproximadamente 7 %.

Os valores estimados de potência para os cascos A, B e C, otimizados para parcela de resistência de ondas, são:

- Casco A: Pot = 3,10 MW
- Casco B: Pot = 3,31 MW
- Casco C: Pot = 3,71 MW

E os valores estimados no primeiro modelo são:

- Casco A: Pot = 3,73 MW
- Casco B: Pot = 3,96 MW
- Casco C: Pot = 4,32 MW

Observa-se que os resultados são coerentes, pois apresentam a mesma ordem de grandeza e seguem a mesma tendência em termos de variação de valor de um casco para outro.

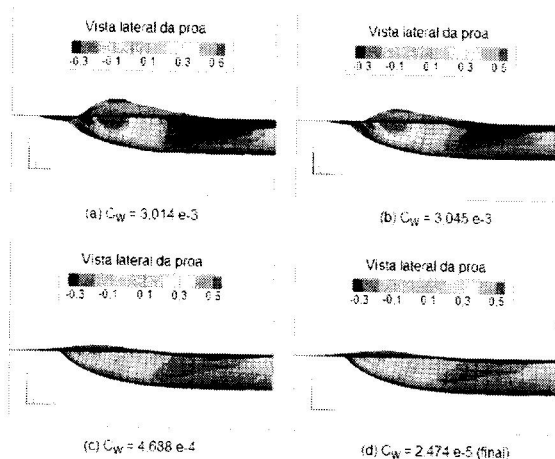


Figura 4 – Evolução do campo de pressão na proa (casco A) ao longo do processo de otimização de C_w – Vista lateral

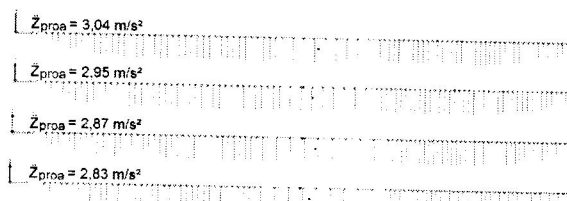


Figura 5 – Evolução no processo de otimização de \ddot{z}_{proa} – Vista lateral

VIII. CONCLUSÕES

Na primeira etapa do estudo, o modelo de síntese desenvolvido mostrou que a altura do cilindro de contenção de gás é um dos principais parâmetros que governa a configuração das soluções ótimas, quando avaliadas segundo os critérios de mínimo peso leve e mínima potência instalada.

A análise realizada para a variação da restrição de altura mostrou que esta modifica substancialmente a extensão da fronteira de Pareto, podendo reduzir ou aumentar o número de possíveis soluções não-dominadas quanto mais ou menos restrito for o valor máximo permitido para esta altura.

Na segunda etapa, com relação à otimização da parcela de resistência de ondas, concluiu-se que o parâmetro que exerce maior influência em seu cálculo é o ângulo de entrada na linha d'água, sendo que para os cascos A e C, estes valores estão contidos na faixa proposta por [13].

Já com relação à aceleração vertical na proa, notou-se que, nos três cascos estudados, o valor do comprimento do corpo paralelo médio é próximo ao limite superior, para as soluções ótimas. Não foi observada nenhuma influência direta das outras variáveis de projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (USP) e ao Tanque de Provas Numérico (TPN),

desta mesma instituição, por disponibilizar os recursos necessários ao desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS

- [1] RIGOLIN, P. H. C. Avaliação global dos modos energéticos do gás natural inclusive como energia secundária. Tese (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Junho 2007.
- [2] WHITE, C. et al. The impact of compressed natural gas shipping upon offshore gas development. *Offshore Technology Conference*. Houston, Texas, E.U.A. : s.n., 5-8 de Maio de 2003.
- [3] Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário estatístico brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2010.
- [4] Review of Compressed Natural Gas Vessels. *SIGITO Panel*. American Bureau of Shipping (ABS), Setembro de 2003.
- [5] *Pressurised Natural Gas - A New Alternative for Natural Gas Transport*. s.l. : Knutsen OAS Shipping, 2004.
- [6] LYON, T. D. e MISTREE, F. A computer-based method for the preliminary design of ships. *Journal of Ship Research*. Dezembro de 1985, Vol. 29, 4, pp. 251-269.
- [7] PARSONS, M. G. e SCOTT, R. L. Formulation of multicriterion design optimization problems for solution with scalar numerical optimization methods. *Journal of Ship Research*. Março de 2004, Vol. 48, 1, pp. 61-76.
- [8] XUEBIN, L. Multiobjective optimization and multiattribute decision making study of ship's principal parameters in conceptual design. *Journal of Ship Research*. Junho de 2009, Vol. 53, 2, pp. 83-92.
- [9] ANDRADE, B. L. R. e SIMÕES, F. A. C. Modelo de síntese e otimização para o projeto preliminar de embarcações de planeio. *23º Congresso Nacional de Transporte Aquaviário, Construção Naval e Offshore*. 25-29 de Outubro de 2010.
- [10] Ribeiro, R. M. C. e Cerqueira, L. L. *Modelo de síntese e processo de otimização para o projeto conceitual/preliminar de um navio CNG*. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo : s.n., 2011.
- [11] *Guide for Vessels Intended to Carry Compressed Natural Gases in Bulk*. s.l. : American Bureau of Shipping, 2005.
- [12] Kalyanmoy, B. et al. A fast elitist non-dominated sorting genetic algorithm for multi-objective optimization: NSGA-II. *Kanpur Genetic Algorithm Laboratory*.
- [13] SAUNDERS, H. E. *Hydrodynamics in ship design*. 74 Trinity Place, New York 6, N. SNAME, 1957.