

SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE BOMBA CENTRÍFUGA PARA TURBOBOMBA DE MOTOR-FOGUETE A PROPELENTE LÍQUIDO

Renato Y. Tamashiro - rytamashiro@hotmail.com

João R. Barbosa - barbosa@mec.ita.cta.br

Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Departamento de Energia
12.228-901 São José dos Campos - SP

***Resumo.** Este trabalho visa a obtenção das curvas de variação do rendimento e perda de carga em função dos parâmetros que determinam as propriedades anti-cavitacionais de uma bomba centrífuga. É definida uma metodologia para dimensionamento e simulação de operação de uma bomba centrífuga aplicável em turbobombas de motor-foguete a propelente líquido. São determinadas as dimensões dos principais elementos de uma bomba: alimentador, indutor em espiral, impelidor, coletor e difusor, a partir das características do fluido e das suas condições de operação. Um modelo de perdas que leva em consideração as principais fontes de variação das condições ideais (Tamashiro, 1999) é utilizado. Um algoritmo, implementado em Mathcad, é utilizado para resolver o sistema de equações obtido. Definida a geometria da bomba, um novo algoritmo é definido para obter as perdas durante o funcionamento fora do ponto de projeto. A validade do modelo foi verificada através do dimensionamento e da simulação de uma turbobomba para utilização no motor RD-109, de fabricação russa, cujas características são conhecidas.*

***Palavras-chave:** Propulsão, Foguetes, Turbobomba, Bomba centrífuga.*

1. INTRODUÇÃO

As turbobombas para aplicação em motor-foguete necessitam trabalhar em rotação muito elevada, condições extremas de temperatura, alta confiabilidade, baixo custo, mínimo peso, fluxo estável dentro dos limites de operação, alta eficiência e desempenho adequado de sucção, dadas as características dos foguetes.

Neste trabalho é estudado o limiar de cavitação com vistas à definição do projeto final da bomba.

Denomina-se cavitação ao fenômeno do aparecimento de espaços mortos cheios de vapor no fluxo (Pfleiderer, 1979). Se a pressão absoluta em um fluxo líquido for igual à pressão de vapor ou menor que esta, aparecem bolhas de vapor, que são separadas do fluxo. As bolhas de vapor aparecem principalmente nas paredes do canal, pois em um fluxo livre de turbilhonamento as menores pressões ocorrem sempre nas paredes. Se a pressão estática no fluxo aumentar, as bolhas de vapor desaparecerão logo que a pressão de vapor seja ultrapassada. Isto, quando ocorre, é muito rápido, e as partículas fluidas atingem as paredes do canal com velocidades muito elevadas, o que causa solicitações mecânicas muito intensas no

material da parede, o que freqüentemente acarreta na destruição deste material.

O efeito de cavitação no desempenho da bomba não é estudado neste trabalho mas, sim, as condições em que o limiar de cavitação é atingido, para garantir que, em operação, a cavitação não aconteça.

2. CARACTERÍSTICAS DE CAVITAÇÃO EM BOMBAS DE MOTOR-FOGUETE

Usando-se a equação da energia em duas seções do impelidor centrífugo, uma na entrada do impelidor e outra na região de mínima pressão, localizada na parte côncava da pá, tem-se

$$p_{\min} + \rho \cdot \frac{w_{\max}^2}{2} = p_1 + \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} \quad (1)$$

onde p_1 é a pressão na saída do indutor
 p_{\min} é a pressão mínima no impelidor centrífugo
 w_{\max} é a máxima velocidade relativa.
 w_1 é a velocidade relativa do escoamento.
 ρ é a densidade do fluido.

Geralmente, quando a bomba trabalha com a pressão $p_1 = p_{kab}$, que corresponde ao limiar de cavitação, os parâmetros da bomba não se alteram. No entanto, observam-se alguns fenômenos oscilatórios. Esta situação caracteriza o modo de cavitação latente.

Devido ao curto período de operação, permite-se atingir o limiar da cavitação. Geralmente a falha na operação da bomba sob essa condição ocorre após um tempo de funcionamento maior que o requerido para uso da bomba.

A Fig. 1 mostra as características de cavitação típicas de uma bomba de motor-foguete a propelente líquido. A redução da pressão de entrada na bomba p_{in} está relacionada com o início da cavitação na bomba. Quando a pressão de entrada atinge o valor p_{kp} , a capacidade de carga da bomba começa a diminuir. Esta situação caracteriza o modo crítico de cavitação.

Quando a pressão na entrada da bomba diminui para p_{cpb} , a pressão e a capacidade de carga da bomba sofrem uma redução drástica. Também diminuem o rendimento e a vazão da bomba. Esta situação caracteriza o modo de limiar de cavitação da bomba. No caso de bomba centrífuga sem indutor, o modo crítico coincide com o modo de limiar de cavitação. A pressão mínima para a operação sem cavitação é dada por:

$$p_{cpb} = \lambda_{cpb} \cdot \rho \cdot \frac{w_1^2}{2} + p_s \quad (2)$$

onde: p_{cpb} é a pressão na entrada da bomba na qual ocorre o limiar de cavitação.

λ_{cpb} é o coeficiente de limiar de cavitação.

p_s é a pressão de vapor na entrada da bomba.

O valor de p_{cpb} é determinado experimentalmente. Neste trabalho, p_{cpb} é obtido a partir da queda de pressão total Δp_{cpb}^* , de acordo com a Eq. (5).

A condição de operação sem cavitação da bomba é dada por:

$$p_{in} > p_{cpb} \quad (3)$$

Quando se está projetando uma bomba, admite-se que o excesso disponível na pressão é

maior que a necessária. A diferença é dada pela reserva de cavitação Δp_{res} :

$$p_{in}^* - p_s - \Delta p_{res} = \Delta p_{cpb}^* \quad (4)$$

Com a introdução de Δp_{res} , considera-se uma eventual imprecisão na determinação do excesso necessário na pressão total. Recomenda-se que esse valor varie entre 10 e 30 J/kg [Ovsiannikov].

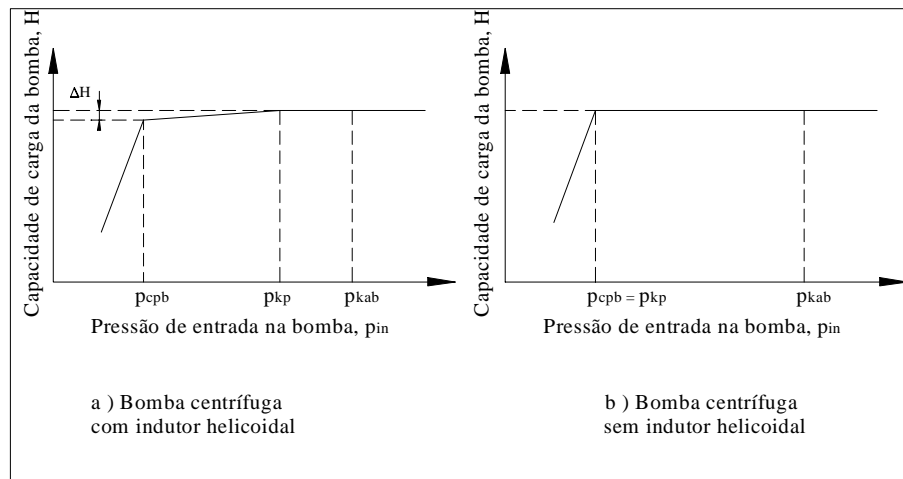


Figura 1 – Características de cavitação em bombas centrífugas

3. PARÂMETROS DE INFLUÊNCIA NA CAVITAÇÃO DO INDUTOR

3.1 Coeficiente de limiar de cavitação λ_{cpb}

O coeficiente de limiar de cavitação λ_{cpb} depende da densidade de pás do indutor, que, por sua vez, depende da forma do perfil, do ângulo das pás β_B e do ângulo de incidência i . A Fig. 2 indica como λ_{cpb} varia com a razão de velocidades.

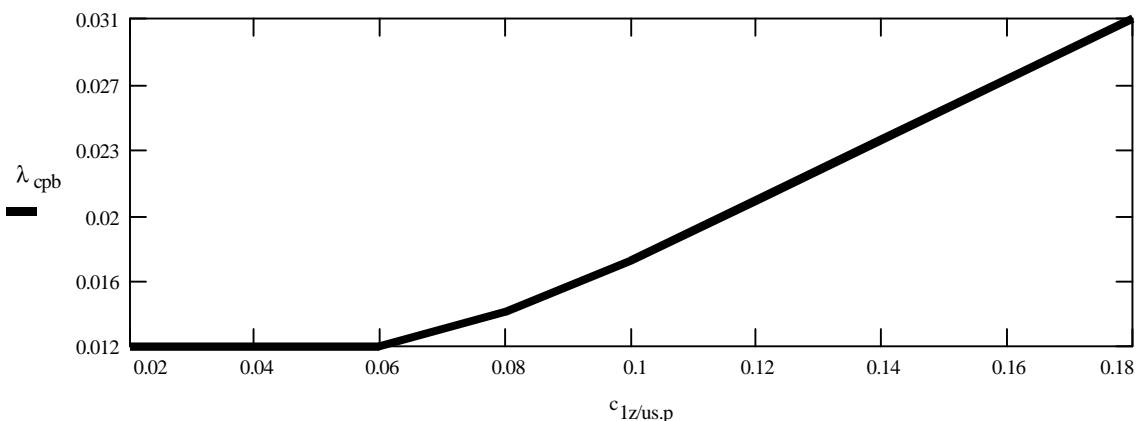


Figura 2- Dependência de λ_{cpb} em relação a razão de velocidades $c_{1z.s}/u_{s.p}$

Com a redução da razão $c_{1z.s}/u_{s.p}$, o valor de λ_{cpb} também diminui. No entanto, dados experimentais (Ovsiannikov, 1973) mostram que para valores abaixo de 0,06, o coeficiente λ_{cpb} pode ser considerado constante e igual a 0,012. Quanto menor o valor de λ_{cpb} , melhor o

desempenho da bomba no que se refere a cavitação.

3.2 Queda de pressão total Δp_{cpb}^* devido a cavitação

A cavitação no modo de limiar de cavitação é caracterizada pela magnitude da queda de pressão total Δp_{cpb}^* . Quanto menor Δp_{cpb}^* , menor a pressão do tanque de alimentação da bomba, p_{tank} , para a operação sem cavitação na bomba. Avalia-se Δp_{cpb}^* por

$$\Delta p_{cpb}^* = \Delta p_{1cpb} + \zeta_{podb} \cdot \rho \cdot \frac{c_{1z.s}^2}{2} + \rho \cdot \frac{c_{1z.s}^2}{2} \quad (5)$$

onde: ζ_{podb} é o coeficiente de perda na entrada da bomba

$c_{1z.s}$ é a componente axial da velocidade absoluta na entrada do indutor.

Essa equação mostra que para melhorar as qualidades anti-cavitacionais da bomba devem-se diminuir as perdas na tubulação de entrada da bomba.

3.3 Coeficiente de rotação específica de cavitação C_{cpb}

O coeficiente de rotação específica de cavitação C_{cpb} conecta os parâmetros básicos de vazão (V) e rotação (ω) com a queda de pressão total Δp_{cpb}^* devido à cavitação, conforme Eq. (6). Quanto menor o valor desta última e maior o valor de C_{cpb} , maiores as qualidades anti-cavitacionais da bomba.

$$C_{cpb} = 298 \cdot \frac{\omega \cdot \sqrt{V}}{\left(\frac{\Delta p_{cpb}^*}{\rho}\right)^{\frac{3}{4}}} \quad (6)$$

4. VERIFICAÇÃO DA VALIDADE DO MODELO

Foi utilizada a turbobomba do motor RD-109 para verificar a qualidade do modelo adotado.

O motor RD-109 é usado nos estágios superiores de um veículo de lançamento. Este motor foi desenvolvido entre 1958 e 1962 e é produzido até hoje pelos russos.

O RD-109 utiliza o oxigênio líquido como oxidante e o querosene como combustível. A turbobomba deste motor movimenta o propelente para o interior da câmara de combustão e do gerador de gás. Ela possui um eixo simples onde estão acoplados a turbina e duas bombas centrífugas. O conjunto rotativo tem seu movimento e apoio proporcionados por dois rolamentos especiais. A bomba de oxidante possui um impelidor do tipo centrífugo, fechado, com uma entrada axial e um indutor helicoidal.

4.1 Projeto de bombas utilizando a metodologia desenvolvida

A Tabela 1 mostra os dados iniciais relativos à bomba de oxidante do motor RD-109, para os cálculos da bomba centrífuga usados neste trabalho:

A partir destes dados e obedecendo algumas restrições de projeto, tais como qualidade anti-cavitacional e tensão de torção admissível do eixo, obtém-se a velocidade angular, o rendimento, a potência consumida e as principais dimensões da bomba centrífuga. Os detalhes do projeto podem ser obtidos em Tamashiro (1999).

Tabela 1 - Dados iniciais para o cálculo da bomba de oxidante

Dados iniciais	símbolo	valor	unidade
Vazão de massa	m_p	11,83	kg/s
Pressão requerida na saída da bomba	P_{out}	6,57	MPa
Pressão mínima na entrada da bomba	P_{in}	0,29	MPa
Temperatura máxima na entrada da bomba	T_{in}	90	K
Pressão de vapor	P_s	0,13	MPa
Densidade	ρ	1140	kg/m ³
Viscosidade	ν	$1,66 \cdot 10^{-7}$	m ² /s
Potência consumida pela bomba (oxidante)	N_o	102,9	kW
Potência consumida pela bomba (combustível)	N_f	109,62	kW
Tensão de torção admissível do eixo	τ_{adm}	$1,0 \cdot 10^8$	Pa
Ângulo de saída do impelidor	$\beta_{2,B}$	8°	
Ângulo de incidência do impelidor	l	0,7°	

Utilizando-se os modelos de perdas indicados, foi montada uma seqüência de cálculos utilizando-se o software Mathcad. Os dados de entrada são a geometria da bomba, a vazão requerida e a rotação. Como resultado, obtém-se a capacidade de carga H, as perdas e o rendimento. O programa utilizado faz variar automaticamente a vazão e a rotação, obtendo-se os dados necessários para a construção das curvas ilustradas nas Figuras 3 e 4, também obtidas automaticamente.

Os valores que definem a geometria da bomba, a velocidade de rotação, rendimento e potência consumida estão listados na Tabela 2, bem como os respectivos valores para a bomba de oxidante do motor RD-109 e a variação percentual obtida entre essas medidas (Tamashiro, 1999).

Os resultados dos cálculos poderiam ser mais próximos dos valores da bomba do RD-109, uma vez que alguns dados de projeto poderiam ter sido alterados. Neste trabalho optou-se por adotar valores médios.

Tabela 2 - Valores calculados comparados com os valores da bomba do motor RD-109

Parâmetros	símbolo	calculado	RD-109	Variação %
Velocidade de rotação (rpm)	n_{RPM}	36544	33800	8
Diâmetro do cubo (mm)	d_{hub}	18,25	18,59	2
Diâmetro externo do indutor (mm)	D_s	40,74	41,50	2
Diâmetro na entrada do impelidor (mm)	D_1	33,00	36,40	9
Diâmetro de entrada no impelidor (mm)	D_0	40,74	44,85	9
Altura inicial da pá do impelidor (mm)	b_1	16,75	18,35	9
Diâmetro externo na entrada do impelidor (mm)	D'_1	49,70	50,57	2
Altura final da pá do impelidor (mm)	b_2	4,59	5,38	15
Diâmetro na saída do impelidor (mm)	D_2	73,93	80,50	8
Rendimento da bomba de oxidante	η_o	0,61	0,58	5
Capacidade de carga (J/kg)	H_{real}	5590,0	5590,0	0
Potência consumida (kW)	N_o	115,4	121,6	5

As Figuras 3 e 4 mostram qual o comportamento da capacidade de carga e do rendimento da bomba centrífuga em função do coeficiente de limiar de cavitação λ_{cpb} e do coeficiente de rotação específica de cavitação C_{cpb} , para valores de rotação variando entre 40% e 140%:

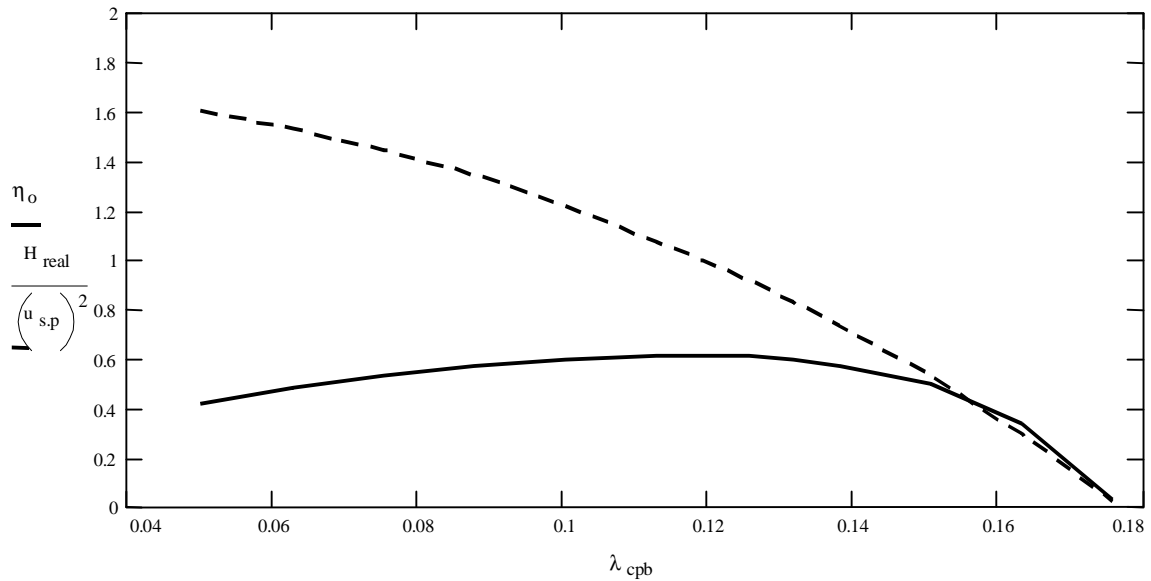


Figura 3 - Comportamento da capacidade de carga e do rendimento da bomba em função do coeficiente de limiar de cavitação λ_{cpb}

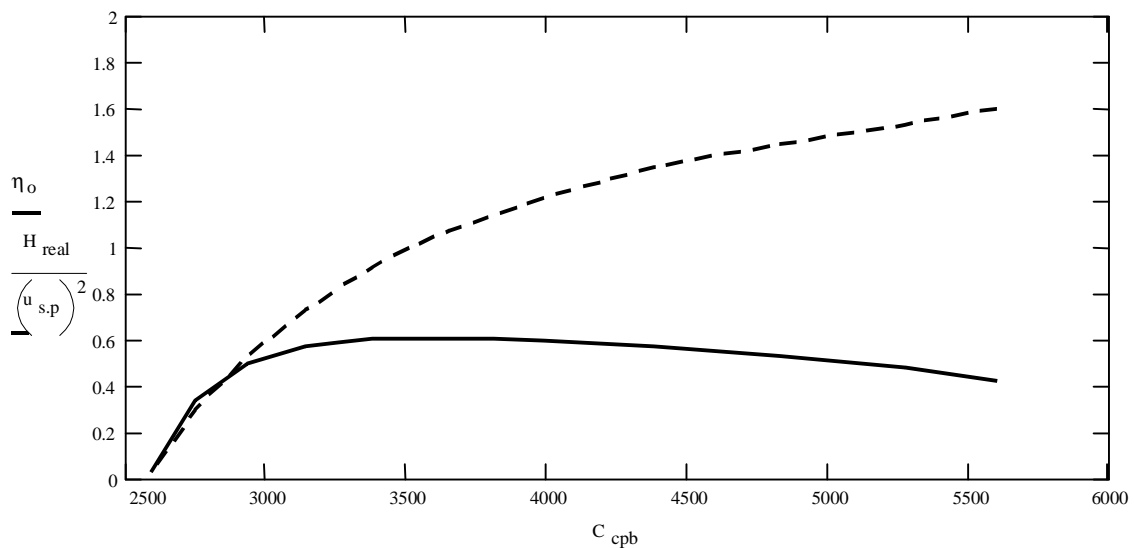


Figura 4 - Comportamento da capacidade de carga e do rendimento da bomba em função do coeficiente de rotação específica de cavitação C_{cpb}

5. COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

O modelo adotado, considerando-se as dimensões básicas obtidas e o comportamento das curvas ilustradas nas Figuras 4 e 5, mostrou-se adequado ao dimensionamento de uma bomba centrífuga. Observa-se que quanto maior o valor de C_{cpb} , maior a capacidade de carga da bomba e que o rendimento atinge valores máximos quando C_{cpb} varia entre 3000 e 4500. Com relação ao coeficiente de limiar de cavitação λ_{cpb} , observa-se que à medida que seu valor aumenta, a capacidade de carga diminui, sendo que, para valores de λ_{cpb} variando entre 0,08 e 0,10, o rendimento atinge valores ótimos. Dados da literatura (Ovsyannikov, 1973) ratificam os resultados obtidos nesses gráficos. A simulação de seu funcionamento fora do ponto de

projeto também mostrou que a geometria básica ora determinada está adequada.

A bomba projetada, cujas dimensões estão indicadas na Tabela 2, opera com os seguintes valores de parâmetros: $\lambda_{cpb} = 0,126$ e $C_{cpb} = 3408$, valores obtidos de Tamashiro (1999) ou interpolados das Figuras 3 e 4, respectivamente.

Verifica-se que C_{cpb} tem valor dentro da faixa recomendada por Ovsyannikov (1973) mas λ_{cpb} está fora da faixa recomendada pelo mesmo autor. Entretanto, analisando-se a forma das curvas apresentadas nas Figuras 3 e 4 observa-se que a de eficiência varia muito pouco numa ampla faixa de variação dos parâmetros λ_{cpb} e C_{cpb} , indicando que a adoção do parâmetro λ_{cpb} fora da faixa recomendada não tem muito efeito na eficiência da bomba. Entretanto, há perda significativa de altura de energia H_{real} , dando ensejo a se procurar novas dimensões para a bomba, compatíveis com menores valores de λ_{cpb} e maiores de C_{cpb} . Com isso é possível que se diminua o tamanho da bomba, o que é valioso para uma turbobomba para motor foguete. Esta pesquisa, entretanto, não foi realizada neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Huzel, Dieter K., Huang, David H., 1992, Modern Engineering for Design of Liquid-Propellant Rocket Engine, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington DC, 431p.
- Ovsyannikov, B. V., Borovskiy, B. I., 1973, Theory and Calculation of Feed Units of Liquid Propellant Rocket Engines, Foreign Technology Division, Ohio, 485p.
- Ovsyannikov, B. V., Celifonov, B. C., 1996, Theory and Calculation of Screw Centrifugal Pumps, Moscow Aviation Institute, 71p.
- Pfleiderer, C., Petermann Hartwig, 1979, Máquinas de Fluxo”, Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 454p.
- Tamashiro, R.Y., 1999, Simulação Numérica de Bomba Centrífuga para Aplicação em Motor-Foguete a Propelente Líquido, Tese de Mestrado, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, S.P., 127p.

PERFORMANCE SIMULATION OF A CENTRIFUGAL PUMP FOR LIQUID ROCKET ENGINE TURBOPUMP

Abstract. *The head and efficiency curves as functions of anti-cavitation parameters are obtained. A methodology for the design and simulation of a centrifugal pump for liquid rocket engine turbopump is defined. The pump major dimensions are determined: pump inlet, screw inducer, impeller, volute and diffuser, from the fluid characteristics and the pump design point condition. A loss model that takes in account the most important loss sources (Tamashiro, 1999) is defined. An algorithm, written in MathCAD language, is used to solve the related system of equations. After the pump geometry is calculated, a new algorithm is defined to calculate the losses and other pump parameters at off-design point operation. The quality of the adopted model was verified comparing data from the RD-109 rocket engine turbopump with the calculated in this work.*

Keywords: *Propulsion, Rockets, Turbopump, Centrifugal pump*