



GILBERTO ALVES DOS SANTOS
 Coordenadora para Projetos Especiais - COPESP/RTS
 ROBERTO LONGO FREITAS
 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/RTS



RESUMO

O modelo bifásico das bombas de refrigeração do circuito primário de reatores nucleares a água leve pressurizada é um fator importante para a análise de um acidente por perda de refrigerante primário. As curvas homólogas estabelecem o desempenho completo da componente bomba, e são solicitadas como dados de entrada para os códigos termoidrúlicos aplicáveis à análise de acidentes. Este trabalho propõe um modelo matemático capaz de descrever as curvas homólogas bifásicas considerando as condições geométricas e operacionais da bomba. Os resultados deste modelo são comparados com dados experimentais da literatura, apresentando uma concordância bastante satisfatória.

INTRODUÇÃO

No projeto dos sistemas de segurança e durante o processo de licenciamento de reatores nucleares a água leve pressurizada é dado grande importância para a refrigeração do núcleo quando de um acidente postulado de perda de refrigerante primário. A análise deste acidente inclui estudos sobre a vazão no núcleo e a sobrevelocidade da bomba no circuito quebrado, ambos dependentes das características das Bombas de Refrigeração do Reator (BRRs). Outros eventos, como por exemplo, partida de circuito primário inativo e parada de uma ou mais BRRs, também necessitam destas características de desempenho. A simulação destes eventos é normalmente realizada através de códigos computacionais termoidrúlicos [1], tais como: CATHARE, DRUFAN-01/MOD2, THYDE/P2, RELAP4/MOD5, RELAPS/MOD1, RETRAN/02 e TRAC/PF1. Para a modelagem das BRRs, o usuário deve fornecer informações específicas do transiente operacional ou do acidente simulado, tais como, as condições nominais de operação e as curvas características das bombas. Estas curvas características representam o desempenho das BRRs e são expressas em termos de curvas homólogas e dos multiplicadores de degradação bifásicos, onde estes últimos são funções relacionando as curvas homólogas monofásicas e bifásicas.

O objetivo deste trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo matemático para obtenção de curvas homólogas monofásicas e bifásicas de bombas de refrigeração de reatores nucleares refrigerados a água leve pressurizada. O modelo é baseado na equação de Euler para bombas e tem como parâmetros básicos as condições geométricas e operacionais das BRRs. Elaborou-se um programa computacional denominado CURVHOM (CURVAS HOMÓLOGAS) capaz de fornecer as homólogas bifásicas e os multiplicadores de degradação bifásicos.

CURVAS HOMÓLOGAS

Normalmente, o desempenho completo das BRRs pode ser obtido relacionando a razão normalizada da vazão volumétrica ν e a velocidade de rotação α , para as diferentes zonas de operação. Assim o plano ν - α pode ser dividido em quatro quadrantes, a saber:

- 1º quadrante ($\nu \geq 0$ e $\alpha \geq 0$): Normal (N)
- 2º quadrante ($\nu < 0$ e $\alpha > 0$): Dissipação (D)
- 3º quadrante ($\nu \leq 0$ e $\alpha \leq 0$): Turbina (T)
- 4º quadrante ($\nu > 0$ e $\alpha < 0$): Reverso (R)

onde ν e α são definidos pelas seguintes expressões:

$$\nu = \frac{Q}{Q_r} \quad \text{e} \quad \alpha = \frac{\omega}{\omega_r} \quad (1)$$

sendo, Q = vazão volumétrica, ω = velocidade angular de rotação e o subscrito r denominando a condição nominal.

As curvas deste desempenho, no plano ν - α , são expressas pelas linhas constantes da altura manométrica normalizada h e do torque hidráulico normalizado β , onde h e β são definidos por:

$$h = \frac{H}{H_r} \quad \beta = \frac{T \cdot \rho_r}{T_r \cdot \rho_m} \quad (2)$$

com ρ = massa específica, ρ_m = massa específica média da mistura bifásica, H = altura manométrica e T = torque hidráulico.

Para as curvas homólogas, os eixos da abscissa (X) e da ordenada (Y) são definidos da seguinte forma:

$$|\nu/\alpha| \leq 1, \quad X = \frac{\nu}{\alpha} \quad Y = \frac{h}{\alpha^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\beta}{\alpha^2} \quad (3)$$

$$|\alpha/\nu| < 1, \quad X = \frac{\alpha}{\nu} \quad Y = \frac{h}{\nu^2} \quad \text{ou} \quad \frac{\beta}{\nu^2} \quad (4)$$

sendo que a nomenclatura das curvas homólogas é estabelecida pela identificação das três letras (L1L2L3) que compõe o seu título, da seguintes forma:

- L1 { H - altura manométrica
B - torque hidráulico
- L2 { A - denominador α
V - denominador ν
- L3 { N - quadrante normal
D - quadrante dissipação
T - quadrante turbina
R - quadrante reverso

Na simulação de um Acidente por Perda de Refrigerante Primário (APRP), pode-se postular a ruptura da tubulação na sucção ou na descarga das BRRs e, dependendo do arranjo da planta, uma bomba pode estar conectada em paralela com a bomba do circuito quebrado ou intacto. Estas bombas também estarão sujeitas ao escoamento avante e reverso, e necessitam da identificação das suas características nestas situações adversas. Devido a configuração dos projetos de reatores nucleares, torna-se difícil descrever as circunstâncias nas quais as BRRs seriam forçadas a operar no quarto quadrante, ou seja, vazão avante e velocidade de rotação reversa. Diante disso, o presente modelo não abrange o quadrante reverso.

MODELO BIFÁSICO PARA CURVAS HOMÓLOGAS

Quadrante Normal. Para o escoamento bifásico, admitiu-se que a altura manométrica é caracterizada pela ponderação do título mássico x nas alturas manométricas das fases líquida e vapor. Assim:

$$H^{bif} = (1 - x) \cdot H^l + x \cdot H^v \quad (5)$$

com, H^k dado pela equação de Euler para bombas, ou seja:

$$H^k \cdot g = u_2^k \cdot v_{u2}^k - u_1^k \cdot v_{u1}^k \quad k = l, v \quad (6)$$

onde, u a velocidade circunferencial, H^{bif} a altura manométrica bifásica, subscrito k sendo fase líquida (l) ou vapor (v), e subscrito 1 e 2 sendo sucção e descarga.

Admitindo escoamento radial na entrada, as velocidades periféricas de v podem ser dadas por:

$$v_{u1}^k = 0 \quad v_{u2}^k = u_2^k - \frac{v_{m2}^k}{tg\beta_2'} \quad (7)$$

sendo β' o ângulo de inclinação da pá, e a componente meridiana v_m sendo dada por:

$$v_{m1}^l = \frac{(1-x) \cdot \rho_{bif} \cdot Q_{bif}}{(1-\alpha_{f1}) \cdot A_1 \cdot \rho_l} \quad v_{m1}^v = \frac{x \cdot \rho_{bif} \cdot Q_{bif}}{\alpha_{f1} \cdot A_1 \cdot \rho_v} \quad (8)$$

com A_1 área de escoamento, α_f fração de vazio e $i=1$ ou 2. A massa específica bifásica pode ser dada por:

$$\rho_{bif1} = (1 - \alpha_{f1}) \cdot \rho_l + \alpha_{f1} \cdot \rho_v \quad (9)$$

Admitindo um parâmetro a_1 dado por:

$$a_1 = \frac{\rho_v}{\rho_l} \cdot \frac{\alpha_{f1}}{1 - \alpha_{f1}} \quad (10)$$

e o título mássico:

$$x = \frac{1}{1 + \frac{\rho_l}{\rho_v} \cdot \frac{1 - \alpha_{f1}}{\alpha_{f1}} \cdot \frac{1}{S_1}} \quad (11)$$

onde S_1 é a velocidade de deslizamento entre fases, definida por:

$$S_1 = \frac{v_{mi}^v}{v_{mi}^l} \quad (12)$$

Podemos obter de (10) a (12) uma equação simplificada para o título mássico, ou seja:

$$x = \frac{a_1 \cdot S_1}{a_1 \cdot S_1 + 1} \quad (13)$$

Substituindo as equações (9) e (13) em (8), obtemos:

$$v_{m1}^l = \frac{1+a_1}{1+a_1 \cdot S_1} \cdot \frac{Q_{bif}}{A_1} \quad v_{m1}^v = S_1 \cdot \left(\frac{1+a_1}{1+a_1 \cdot S_1} \right) \cdot \frac{Q_{bif}}{A_1} \quad (14)$$

Supondo que a velocidade circunferencial entregue a cada fase da mistura na entrada ou saída do impelidor seja dada por:

$$u_1^l = \frac{(1-\alpha_{f1}) \cdot \rho_l}{\rho_{bif}} \cdot u_1 \quad u_1^v = \frac{\alpha_{f1} \cdot \rho_v}{\rho_{bif}} \cdot u_1 \quad (15)$$

e substituindo as equações (9) a (15) em (5), teremos:

$$H^{bif} = \left[\frac{1 + a_2^3 \cdot S_2}{(1+a_2 \cdot S_2) \cdot (1+a_2)^2} \right] \cdot \frac{\omega_r^2 \cdot r_2^2}{g} +$$

$$- \left[\frac{1 + a_2^2 \cdot S_2^2}{(1+a_2 \cdot S_2)^2} \right] \cdot \frac{\omega_r \cdot Q^{bif}}{2\pi g \cdot b_2 \cdot tg\beta_2'} \quad (16)$$

com b = profundidade da pá do impelidor.

Assumindo os seguintes parâmetros adimensionais generalizados:

$$\alpha = \frac{\omega_r}{\omega_r} \quad v = \frac{Q^{bif}}{Q_r} \quad h^{bif} = \frac{H^{bif}}{H_r} \quad (17)$$

teremos para o quadrante normal:

$$h_{nor}^{bif} = \left[\frac{1 + a_2^3 \cdot S_2}{(1+a_2 \cdot S_2) \cdot (1+a_2)^2} \right] \cdot \frac{\omega_r^2 \cdot r_2^2}{H_r \cdot g} \cdot \alpha^2 +$$

$$- \left[\frac{1 + a_2^2 \cdot S_2^2}{(1+a_2 \cdot S_2)^2} \right] \cdot \frac{\omega_r \cdot Q_r}{2\pi g H_r} \cdot \frac{1}{b_2 \cdot tg\beta_2'} \cdot \alpha \cdot v \quad (18)$$

As perdas devidas aos atritos e turbulência no impelidor, mudanças bruscas de direção e transformação de velocidade em pressão, são consideradas supondo suas proporcionalidades ao quadrado da velocidade do escoamento e, portanto, ao parâmetro v. Deste modo, admite-se um coeficiente de perda proporcional a v^2 resultando em:

$$h^{bif} = C_1 \cdot D_2 \cdot \alpha^2 - C_2 \cdot C_3 \cdot E_2 \cdot \alpha \cdot v - K_4 \cdot v^2 \quad (19)$$

com

$$C_1 = \frac{\omega_r^2 \cdot r_2^2}{H_r \cdot g} \quad C_2 = \frac{\omega_r \cdot Q_r}{2\pi \cdot H_r \cdot g} \quad C_3 = \frac{1}{b_2 \cdot tg\beta_2'} \quad (20)$$

$$D_2 = \frac{1 + a_2^3 \cdot S_2}{(1+a_2 \cdot S_2) \cdot (1+a_2)^2} \quad E_2 = \frac{1 + a_2^2 \cdot S_2^2}{(1+a_2 \cdot S_2)^2} \quad (21)$$

Para a condição nominal $\alpha=v=1$, a altura manométrica é uma função da fração de vazio α_f , onde a escolha deste parâmetro é realizada através de análise do comportamento mais conservativo dos coeficientes D_2 e E_2 , ou seja, é escolhido aquele que produz a maior degradação na variação da fração de vazio. Deste modo, teremos: curva HAN:

$$\frac{h}{\alpha^2} = 0,585 \cdot \left\{ C_1 \cdot D_2 - C_2 \cdot C_3 \cdot E_2 \left(\frac{v}{\alpha} \right) + \right.$$

$$\left. - \left[C_1 \cdot D_2 - C_2 \cdot C_3 \cdot E_2 - \frac{h_r(\alpha_f)}{0,585} \right] \cdot \left(\frac{v}{\alpha} \right)^2 \right\} \quad (22)$$

curva HVN:

$$\frac{h}{v^2} = \eta \cdot \left\{ C_1 \cdot D_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{v} \right)^2 - C_2 \cdot C_3 \cdot E_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{v} \right) + \right.$$

$$\left. - \left[C_1 \cdot D_2 - C_2 \cdot C_3 \cdot E_2 - \frac{h_r(\alpha_f)}{\eta} \right] \right\} \quad \text{com } \eta = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\omega \cdot T} \quad (23)$$

onde as correções em $v=0$ foram obtidas de Stepanoff [2].

Quadrante Dissipação. Admite-se que as componentes periféricas de v são dadas por:

$$v_{u1}^k = u_1^k + \frac{v_{m1}^k}{tg\beta_1'} \quad v_{u2}^k = \frac{v_{m2}^k}{tg\alpha_3'} \quad (24)$$

com α_3 ângulo de inclinação do difusor, e a equação de Euler para bombas podendo ser expressa por:

$$H^k \cdot g = u_1^k \cdot v_{u1}^k - u_2^k \cdot v_{u2}^k \quad k=l,v \quad (25)$$

Fazendo as mesmas considerações, sobre as perdas, que são proporcionais à velocidade do escoamento, e as hipóteses adotadas para a condição nominal, teremos:

Curva HAD:

$$\frac{h}{\alpha^2} = C_4 \cdot D_1 - (C_7 \cdot E_1 - C_8 \cdot E_2) \cdot C_2 \cdot \left(\frac{v}{\alpha}\right) + \left[C_4 \cdot D_1 - (C_7 \cdot E_1 - C_8 \cdot E_2) \cdot C_2 - h_r(\alpha_f) \right] \cdot \left(\frac{v}{\alpha}\right)^2 \quad (26)$$

Curva HVD:

$$\frac{h}{v^2} = C_4 \cdot D_1 \cdot \left(\frac{\alpha}{v}\right)^2 - (C_7 \cdot E_1 - C_8 \cdot E_2) \cdot C_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{v}\right) + \left[C_4 \cdot D_1 - (C_7 \cdot E_1 - C_8 \cdot E_2) \cdot C_2 - h_r(\alpha_f) \right] \quad (27)$$

com

$$C_4 = \frac{\omega_r^2 \cdot r_1^2}{H_r \cdot g} \quad C_7 = \frac{1}{b_1 \cdot \text{tg} \beta'_1} \quad C_8 = \frac{1}{b_2 \cdot \text{tg} \alpha'_3} \quad (28)$$

$$D_1 = \frac{1 + a_1^3 \cdot S_1}{(1 + a_1 \cdot S_1) \cdot (1 + a_1)^2} \quad E_1 = \frac{1 + a_1^2 \cdot S_1^2}{(1 + a_1 \cdot S_1)^2} \quad (29)$$

Quadrante Turbina. Baseado no fato de que o escoamento é reverso no segundo e terceiro quadrantes, para o quadrante turbina supõe-se a mesma equação das fases (25) do quadrante dissipação. Onde:

$$v_{u1}^k = u_1^k - \frac{v_{m1}}{\text{tg} \beta'_1} \quad k=1, v \quad (30)$$

e v_{u2}^k é dado pela equação (24).

Aplicando o mesmo desenvolvimento dado ao quadrante dissipação, teremos:

Curva HAT:

$$\frac{h}{\alpha^2} = C_4 \cdot D_1 - (C_7 \cdot E_1 + C_8 \cdot E_2) \cdot C_2 \cdot \left(\frac{v}{\alpha}\right) + \left[\eta^2 \cdot C_4 \cdot D_1 - \eta \cdot (C_7 \cdot E_1 + C_8 \cdot E_2) \cdot C_2 - h_r(\alpha_f) \right] \cdot \left(\frac{v}{\alpha}\right)^2 \quad (31)$$

Curva HVT:

$$\frac{h}{v^2} = C_4 \cdot D_1 \cdot \left(\frac{\alpha}{v}\right)^2 - (C_7 \cdot E_1 + C_8 \cdot E_2) \cdot C_2 \cdot \left(\frac{\alpha}{v}\right) + \left[\eta^2 \cdot C_4 \cdot D_1 - \eta \cdot (C_7 \cdot E_1 + C_8 \cdot E_2) \cdot C_2 - h_r(\alpha_f) \right] \quad (32)$$

sendo que a correção dada no ponto nominal relacionando o quadrante normal (nor) e o turbina (tur), é dada por [2]:

$$H_{\text{tur}} = \frac{H_{\text{nor}}}{\eta^2} \quad Q_{\text{tur}} = \frac{Q_{\text{nor}}}{\eta} \quad (33)$$

MULTIPLICADOR DE DEGRADAÇÃO BIFÁSICO

Tendo em vista a dificuldade de se inserir as curvas homólogas bifásicas para cada valor de fração de vazão nos códigos computacionais, utiliza-se um multiplicador de degradação bifásico, que é uma função de ponderação, capaz de prever curvas homólogas com diferentes valores de fração de vazão. O multiplicador de degradação $M(\alpha_f)$ relaciona valores da curva homóloga de degradação $Y(\alpha_f)$ para fração de vazão α_f , a curva homóloga monofásica $Y_{\text{min}}^{\text{mon}}(X)$, ($X = \alpha/v$), e a curva homóloga bifásica $Y_{\text{min}}^{\text{bif}}(X)$. Neste modelo $M(\alpha_f)$ dependerá dos valores assumidos

para X . Uma vez estipulado este valor, podemos reproduzir $Y_{\text{min}}^{\text{bif}}$ para qualquer valor de α_f . Ou seja:

$$Y(\alpha_f)^{\text{bif}} = Y(X)^{\text{mon}} - M(\alpha_f) \cdot \left[Y(X)^{\text{mon}} - Y(X)^{\text{bif}} \right] \quad (34)$$

Em geral, os códigos computacionais termohidráulicos têm apresentado tabelas dos multiplicadores de degradação para valores de $X=1,0$ com $\alpha=v=0,5$, e aplicam estes valores para todos os quadrantes de qualquer bomba.

FRAÇÃO DE VAZIO NO IMPELIDOR

Para a resolução das curvas homólogas bifásicas, verificou-se a necessidade do conhecimento da fração de vazão na saída (vazão avante) ou entrada (vazão reversa) do impelidor. O modelo adotado neste trabalho segue o mesmo tratamento que Hensch e Johnston [3] utilizaram para resolver o problema de escoamento bifásico com bolhas em difusores e, em linhas gerais acompanha a filosofia desenvolvida por Furuya [4] e Zakem [5].

Supondo escoamento a bolhas no interior da bomba, a somatória das forças envolvidas pode ser expressa da seguinte forma:

$$\rho_v \cdot V_v \cdot \frac{dv}{dt} = \sum F_s \quad (35)$$

sendo

V_v volume da bolha de vapor.

$\sum F_s$ força de pressão (F_p) + força centrífuga (F_{cf}) + força de Drag (F_D) + força de massa virtual (F_{mv}) + força devido a diferença de massa específica entre as fases (F_y) + força de Basset (F_B).

com

$$F_p = - \frac{\partial p}{\partial s} \cdot V_v \quad (36)$$

$$F_{cf} = \rho_v \cdot V_v \cdot r \cdot \omega^2 \cdot \sin \beta' \cdot \cos \gamma' \quad (37)$$

$$F_D = C_D \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot (w_1 - w_v) \cdot |w_1 - w_v| \cdot \pi \cdot R_B^2 \quad (38)$$

$$F_{mv} = - \frac{1}{2} \cdot \rho_1 \cdot V_v \cdot (a_v - a_1) \quad (39)$$

sendo C_D = coeficiente de Drag, R_B = raio da bolha, e

$$a_k = \frac{dw_k}{dt} = \frac{\partial w_k}{\partial t} + w_k \cdot \frac{\partial w_k}{\partial s} \quad k=1, v \quad (40)$$

De acordo com os estudos experimentais e teóricos realizados por Minemura e Murakami [6] em bombas centrífugas com escoamento bifásico, os termos F_y e F_B são muito pequenos comparados aos demais, podendo assim, serem desprezados na somatória das forças governantes. Desenvolvendo a expressão (35), teremos:

$$\begin{aligned} & \frac{\rho_1}{[1-(1-S) \cdot \alpha_f]^2} \left\{ 1 + \frac{1}{2(1-\alpha_f)} + S^2 \left[\frac{\rho_v}{\rho_1} \cdot (1-\alpha_f) + \frac{1}{2} \right] \right\} \cdot \frac{d\alpha_f}{ds} = \\ & = \frac{\rho_1}{A \cdot [1-(1-S) \cdot \alpha_f]^2} \left\{ \frac{3}{2} + \alpha_f - S^2 \left[\frac{\rho_v}{\rho_1} \cdot (1-\alpha_f) + \frac{1}{2} \right] \right\} \cdot \frac{dA}{ds} + \\ & + (1-\alpha_f) \cdot [\rho_1 - \rho_v] \cdot r \cdot \sin \beta' \cdot \cos \gamma' \cdot \left(\frac{A \cdot \omega}{Q_r} \right)^2 \cdot \left(\frac{\alpha}{v} \right)^2 + \\ & - \frac{3}{8} \cdot \frac{C_D}{R_B} \cdot \rho_1 \cdot \left[\frac{1-S}{1-(1-S) \cdot \alpha_f} \right] \cdot \left| \frac{1-S}{1-(1-S) \cdot \alpha_f} \right| \quad (41) \end{aligned}$$

e conforme Hensch e Johnston [3], $\frac{C_D}{R_B}$ pode ser dado por:

$$\frac{C_D}{R_B} = \begin{cases} 109,843.(1-\alpha_f)^3 \text{ m}^{-1} & \text{para } \alpha_f > 0,3 \\ 339,623 \text{ m}^{-1} & \text{para } \alpha_f \leq 0,3 \end{cases}$$

e para $\alpha_f > 0,3$ o termo de massa virtual da equação (41) pode ser desprezado. Portanto, conhecendo as condições geométricas do impelidor, ou seja, $A_1, A_2, r_1, r_2, \beta_1, \beta_2, \gamma_1, \gamma_2$, as funções de $A(s), r(s), \beta'(s), \gamma'(s)$ e $S(s)$, as condições nominais ωr e Qr , e admitindo valores de pressão e de α/ν , podemos considerar que a expressão (41) é uma equação diferencial ordinária, tendo como variável dependente a fração de vazio α_f . Resolvendo-se esta equação, pode-se inferir a variação de α_f ao longo de s (coordenada absoluta) e calcular as curvas homólogas bifásicas nos diferentes quadrantes.

RESULTADOS

O modelo do programa CURVHOM foi utilizado para simular o desempenho bifásico da bomba testada pela Combustion-Engineering (C-E) [7], para fração de vazio 0,4 e velocidade de deslizamento 3,0 e 5,0, onde apresentam resultados satisfatórios para o quadrante normal, conforme figura 1. Os multiplicadores de degradação bifásicos são comparados com as curvas do quadrante normal, figura 2, onde o modelo prevê desempenho distinto para cada quadrante, e é mais degradante para o quadrante normal. Ressalta-se que a C-E não apresenta resultados experimentais suficientes para comparações satisfatórias nos quadrantes dissipação e turbina, e que os dados experimentais da figura 2, são na verdade, ajustes realizados pela C-E com diversos valores de pressão. Diversas comparações experimentais e o desempenho teórico da evolução espacial da fração de vazio no interior da bomba, são apresentados detalhadamente por Dos Santos [8].

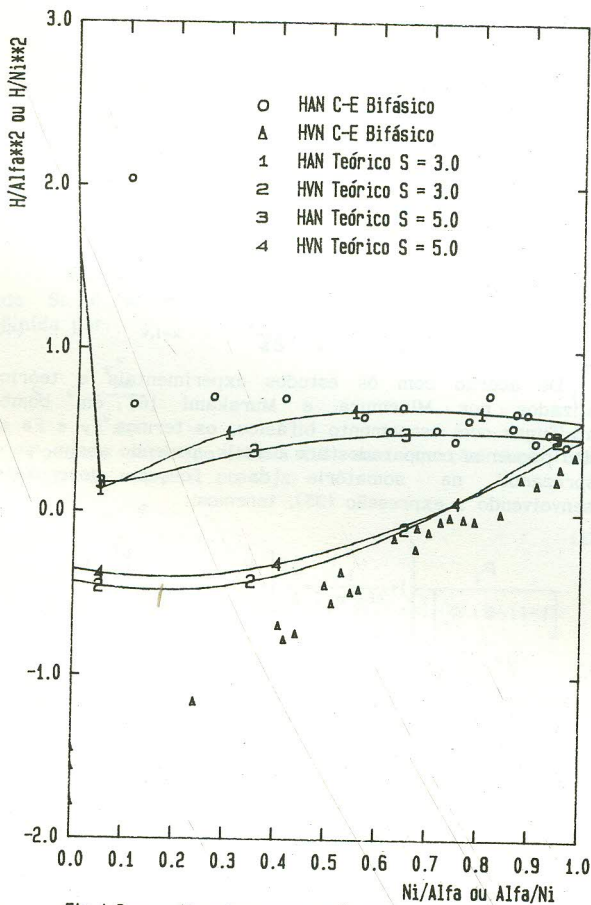


Fig.1 Comparação entre curvas teóricas e experimentais
(Fração de vazio=0,40).

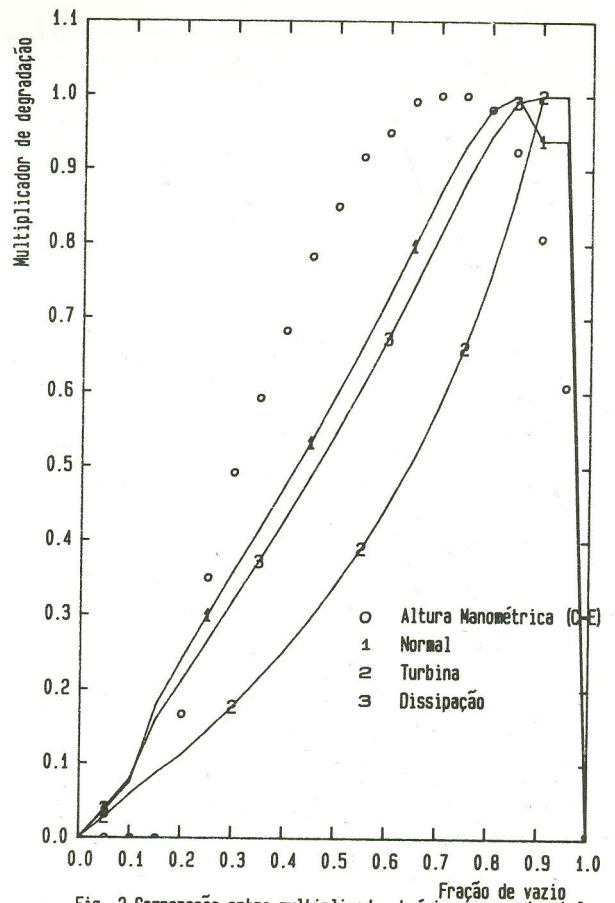


Fig. 2 Comparação entre multiplicador teórico e experimental

CONCLUSÃO

A análise de um acidente por perda de refrigerante primário em reatores nucleares refrigerados a água leve pressurizada envolve o desempenho das bombas de refrigeração de reatores. As características de desempenho destas bombas são dados de entrada solicitados pelos códigos computacionais termohidráulicos aplicáveis a este propósito, sob a forma de curvas homólogas. Neste contexto, elaborou-se um programa computacional denominado CURVHOM, baseado na equação Euler para bombas e modelos da evolução da fração de vazio ao longo do impelidor, para que possa ser avaliado e analisado com dados experimentais disponíveis. O modelo não dispõe de mecanismos que alterem o percurso realizado pelo fluido quando a bomba impõe funcionamento para condições fora de projeto. Contudo, este modelo quando aplicado à bomba testada pela C-E [7], revelou-se bastante satisfatório e com forte conservantismo para as condições fora de projeto, mesmo considerando o fato de grandes inconsistências encontradas nos dados experimentais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Forge, A.; Pochard, R.; Porrachia, A.; Miro, J.; Sonnenburg, G.; Steinhoff, F. e Teschebdorff, V. "Comparison of thermal-hydraulic safety codes for PWR systems". London, Graham & Trotman, 1988.
- [2] Stepanoff, A.J. "Centrifugal and axial flow pumps". New York, NY, J. Wiley, 1957.
- [3] Hench, J.E. & Johnston, J.P. "Two-dimensional diffuser performance with subsonic, two-phase, air-water flow". *J. Basic Eng., Trans. ASME*, 94:(D1):105-21, 1972.

- [4] Furuya, O. "An analytical model for prediction of two-phase (noncondensable) flow pump performance". J. Fluids Eng.,107(3):139-47, 1985.
- [5] Zakem, S. "Analysis of gas accumulation and slip velocity in a rotating impeller". ASME century 2 emerging technology conference, held in San Francisco, 10-22 August, 1980. New York. 1980. p.167-73.
- [6] Minemura, K. & Murakami, M. "A theoretical study on air bubble motion in a centrifugal pump impeller". J. Fluids Eng. 102(4):446-55, 1980.
- [7] Kennedy, W.G.; Jacob, M.C.; Whitehouse, J.C.; Fishburn, J.D.; Kanupla, G.J. "Pump two-phase performance program". Palo Alto, CA, Electric Power Research Inst., Sept. 1980 (EPRI-NP-1556 Vol. 1-8).
- [8] Dos Santos, G.A. "Curvas homólogas monofásicas e bifásicas para bombas de refrigeração de reatores nucleares a água leve pressurizada". Dissertação de Mestrado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, SP, Brasil, 1990 (em defesa).

ABSTRACT

The two-phase coolant pump model of pressurized light water nuclear reactors is an important point for the loss of primary coolant accident analysis. The homologous curves set up the complete performance of the pump and are input for accidents analysis thermal-hydraulic codes. This work propose a mathematical model able to predict the two-phase homologous curves where it was incorporated geometric and operational pump condition. The results were compared with the experimental tests data from literature and it has showed a good agreement.