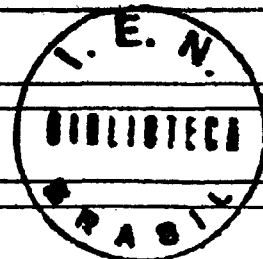


IEN / DERE	COMUNICAÇÃO TÉCNICA	BR8817391	DISER-02/84
		DATA	10.02.84

DE
David Adjuto Botelho

PARA
Distribuição

ASSUNTO
Cálculo Termohidráulico do Circuito Primário de Reatores Refrigerados a Água



RESUMO

São apresentados modelos matemáticos e numéricos do código RETRAN⁽¹⁾, desenvolvidos para computação digital simulando transitórios em reatores. As equações da continuidade, conservação de energia e da quantidade de movimento, para escoamento unidimensional, são integradas pelos métodos adotados no código FLASH, utilizando o código STEAM para correlacionar variáveis de estado termodinâmico. O algoritmo obtido foi programado em linguagem FORTRAN e utilizado para efetuar cálculos de um reator PWR típico.

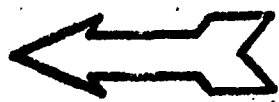
Autor:

David A. Botelho

Chefe do Grupo de Análise de Acidentes em Reatores-GAR/DERE

Distribuição:

- DIR
- DERE
- GAR (3)
- DINEU
- DITRA
- DINFO



Aprovação:

[Signature]

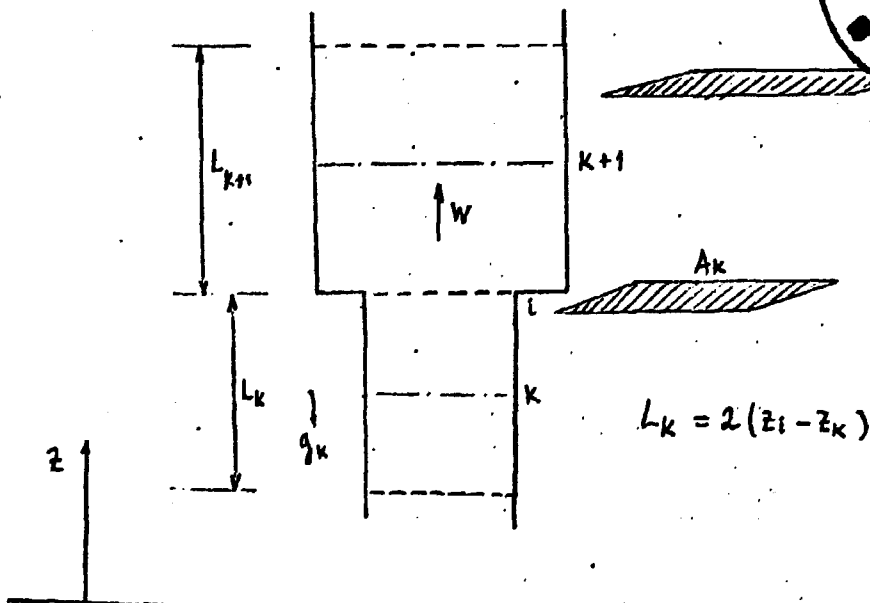
Lic. Odório de Erto Aguiar
Diretor de DERE/IN/CNEN

1. INTRODUÇÃO

Tomando como base a formulação matemática do código RETRAN⁽¹⁾, foi desenvolvido um programa de computação digital em linguagem FORTRAN, com o objetivo de simular transitórios em reatores PWR. As equações da continuidade, conservação de energia e da quantidade de movimento, para escoamento unidimensional, são integradas pelos métodos adotados no código FLASH⁽²⁾. As requeridas funções de estado termodinâmico são obtidas de subrotinas do código STEAM⁽³⁾, desenvolvido pela ASME. Este trabalho, por um lado, constitui um esforço para desenvolvimento próprio, de métodos de cálculo e análise de centrais nucleares. Por outro lado, apesar de ser menos geral que o código RETRAN, este programa é mais simples, o que facilita eventuais adaptações para análise de outros reatores refrigerados a água leve, como por exemplo, do Reator Produtor de Radioisótopos, que vem sendo desenvolvido pela CNEN. A partir deste programa será desenvolvido outro, para simular transientes em reatores refrigerados a sódio.

2. MODELO MATEMÁTICO

Considerando dois volumes de controle, K e K+1, separados pela junção i, conforme a figura abaixo, escreve-se:



- continuidade ou conservação de massa

$$\frac{dM_k}{dt} = w_{i-1}^{n+1} - w_i^{n+1} \quad (2.1)$$

- Conservação da Energia

$$\frac{dU_k}{dt} = w_{i-1}^{n+1} e_{i-1}^n - w_i^{n+1} e_i^n + Q_k^n - \frac{L_k}{2 A_k} \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{w_k^2}{\rho_k} \right) \right]^n \quad (2.2)$$

$$e_i = h_i + \frac{1}{2} \left(\frac{w_i}{\rho_i A_i} \right)^2 + g_k (z_i - z_k)$$

- Conservação da Quantidade de Movimento

$$I_i \frac{dw_i^{n+1}}{dt} = [MF_k - MF_{k+1}]^n - (\rho_k - \rho_{k+1})^{n+1} - F_{fi}^{n+1} + \Delta P_p + [F_k + F_{k+1}]^n - [P_{gk} - P_{gk+1}]^n \quad (2.3)$$

Onde

$$I_i = \frac{1}{2} \left[\frac{L_k}{A_k} + \frac{L_{k+1}}{A_{k+1}} \right]$$

$$MF_k = \frac{w_k^2}{\rho_k A_k^2}$$

$$F_k = f_k \frac{L_k}{D_{hk}} MF_k$$

$$F_{fi} = \frac{\kappa_i (w_i^n)^2}{2 \rho_i A_i^2}$$

$$P_{gk} = \frac{1}{2} \rho_k L_k g_k$$

- A_i, A_k = áreas das seções transversais
 D_{hk} = diâmetro hidráulico
 f'_k = coeficiente de atrito
 g_k = aceleração gravitacional
 h_i = entalpia específica
 L_k = comprimento
 M_k = massa
 p_k = pressão
 Δp_p = incremento de pressão na bomba
 Q_k = potência térmica transferida
 t = tempo
 U_k = energia interna
 W_i, W_k = vazões
 Z_i, Z_k = cotas
 k_i = coeficiente de queda de pressão devido a curvas, expansão, contração, locais, grades espaçadoras, etc.
 ρ_i, ρ_k = massas específicas
 i = índice de junção
 k = índice de volume
 n = índice de tempo

Essas equações podem também ser escritas da seguinte forma:

$$\underbrace{\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} W_i \\ M_k \\ U_k \end{bmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{bmatrix} I_i^{-1} (p_k - p_{k+1})^{m_i} - I_i^{-1} F_{fi}^{m_i} \\ W_{i-1}^{m_i} - W_i^{m_i} \\ W_{i-1}^{m_i} e_i^n - W_i^{m_i} e_i^n \end{bmatrix}}_{f^{m_i}} + \underbrace{\begin{bmatrix} I_i^{-1} (M F_k - M F_{k+1}) - I_i^{-1} (F_k + F_{k+1}) - I_i^{-1} (P_{gk} + P_{gk+1}) \\ 0 \\ Q_k - \frac{L_k}{2A_k} \frac{d}{dt} \left(\frac{W_k^2}{\rho_k} \right) \end{bmatrix}}_{g^n} \quad (2.4)$$

ou

$$\frac{dY}{dt} = f^{n+1} + g^n \quad (2.5)$$

Definindo-se uma matriz Jacobiana

$$\left[\frac{\partial f}{\partial y} \right] = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial y_1} & \frac{\partial f_1}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial y_N} \\ \frac{\partial f_2}{\partial y_1} & \frac{\partial f_2}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial y_N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_N}{\partial y_1} & \frac{\partial f_N}{\partial y_2} & \dots & \frac{\partial f_N}{\partial y_N} \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

efetua-se a seguinte linearização (1,4)

$$f^{n+1} = f^n + \left[\frac{\partial f}{\partial y} \right] (Y^{n+1} - Y^n) \quad (2.7)$$

sendo $0 < \theta < 1$, a equação 2.4 pode ser generalizada em grau variável, desde totalmente explícita, até um valor máximo, em que as incógnitas serão calculadas em um esquema implícito, ou seja:

$$\begin{aligned} \frac{dY}{dt} &= \theta f^{n+1} + (1-\theta)f^n + g^n \\ &= \theta \left[\frac{\partial f}{\partial y} \right] (Y^{n+1} - Y^n) + f^n + g^n \end{aligned} \quad (2.8)$$

Nesta forma, escreve-se

$$\begin{aligned} \frac{dw_i^{n+1}}{dt} &= \theta \left[F_i^n (w_i^{n+1} - w_i^n) + I_i^{-1} \left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_k (M_k^{n+1} - M_k^n) - I_i^{-1} \left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_{k+1} (M_{k+1}^{n+1} - M_{k+1}^n) + \right. \\ &\quad \left. + I_i^{-1} \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_k (u_k^{n+1} - u_k^n) - I_i^{-1} \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} (u_{k+1}^{n+1} - u_{k+1}^n) \right] + F_i^n \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} \frac{du_k^{n+1}}{dt} &= \theta \left[(w_{i-1}^{n+1} - w_{i-1}^n) e_{i-1}^n - (w_i^{n+1} - w_i^n) e_i^n \right] + (w_{i-1}^n e_{i-1}^n - w_i^n e_i^n) + \\ &\quad + Q_k^n - \frac{L_k}{\lambda_{k+1}} \left[\frac{d}{dt} \left(\frac{w_k^2}{p_k} \right) \right]^n \end{aligned} \quad (2.10)$$

$$\frac{dM_k^{n+1}}{dt} = \theta \left[(w_{i-1}^{n+1} - w_{i-1}^n) - (w_i^{n+1} - w_i^n) \right] + (w_{i-1}^n - w_i^n) \quad (2.11)$$

Onde

$$F_i^n = - \frac{\partial (I_i^{-1} F_i)}{\partial w_i} = - I_i^{-1} \frac{\partial}{\partial w_i} \left(\frac{k_i w_i^2}{2 \beta_i A_i^2} \right) = - k_i \frac{w_i^n}{I_i \beta_i A_i^2} \quad (2.12)$$

$$E_i^n = I_i^{-1} \left[(p_k - p_{k+1}) + (M F_k - M F_{k+1}) - (F_k + F_{k+1}) - (p_{gk} - p_{gk+1}) - F_{fi} \right]^n \quad (2.13)$$

Tomando-se

$$\frac{dw_i^{n+1}}{dt} \approx \frac{\Delta w_i^n}{\Delta t} = \frac{w_i^{n+1} - w_i^n}{\Delta t}$$

$$\frac{du_k}{dt} \approx \frac{\Delta u_k}{\Delta t} = \frac{u_k^{n+1} - u_k^n}{\Delta t}$$

$$\frac{dM_k}{dt} \approx \frac{\Delta M_k}{\Delta t} = \frac{M_k^{n+1} - M_k^n}{\Delta t}$$

escreve-se

$$\Delta M_k^n = \theta \Delta t \left[\Delta w_{i-1}^n - \Delta w_i^n \right] + \Delta t (w_{i-1}^n - w_i^n) \quad (2.14)$$

$$\Delta u_k^n = \theta \Delta t \left[e_{i-1}^n \Delta w_{i-1}^n - e_i^n \Delta w_i^n \right] + \Delta t \left[w_{i-1}^n e_{i-1}^n - w_i^n e_i^n + \right. \\ \left. + Q_k^n - \frac{L_k}{2A_k \Delta t} \Delta \left(\frac{w_k^2}{\beta_k} \right)^n \right] \quad (2.15)$$

$$\Delta w_i^n = \theta \Delta t \left\{ F_i^n \Delta w_i^n + I_i^{-1} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_k \Delta M_k^n - \left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_{k+1} \Delta M_{k+1}^n + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_k \Delta u_k^n - \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} \Delta u_{k+1}^n \right] \right\} + \Delta t E_i^n \quad (2.16)$$

Substituindo-se as equações 2.14 e 2.15 na equação 2.17 obtém-se

$$\begin{aligned} (1 - \theta \Delta t) \Delta w_i^m &= \theta \Delta t I_i^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_k \left[\theta \Delta t (\Delta w_{i-1}^m - \Delta w_i^m) + \Delta t (w_{i-1}^m - w_i^m) \right] \right. \\ &- \left. \left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_{k+1} \left[\theta \Delta t (\Delta w_i^m - \Delta w_{i+1}^m) + \Delta t (w_i^m - w_{i+1}^m) \right] + \right. \\ &+ \left. \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_k \left[\theta \Delta t (e_{i-1}^m \Delta w_{i-1}^m - e_i^m \Delta w_i^m) + \Delta t (w_{i-1}^m e_{i-1}^m - w_i^m e_i^m + Q_k^m - \frac{L_k}{2A_k} \frac{\Delta (w_k^2 / \rho_k)^m}{\Delta t}) \right] + \right. \\ &- \left. \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} \left[\theta \Delta t (e_i^m \Delta w_i^m - e_{i+1}^m \Delta w_{i+1}^m) + \Delta t (w_i^m e_i^m - w_{i+1}^m e_{i+1}^m + Q_{k+1}^m - \frac{L_{k+1}}{2A_{k+1}} \frac{\Delta (w_{k+1}^2 / \rho_{k+1})^m}{\Delta t}) \right] \right\} + \\ &+ \Delta t E_i^m \end{aligned}$$

Esta equação pode ser rearranjada na seguinte forma

$$\begin{aligned} -(\theta \Delta t)^2 I_i^{-1} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_k + \frac{\partial p}{\partial u} e_i^m \right] \Delta w_{i-1}^m + \left\{ 1 - \theta \Delta t E_i^m + \theta (\Delta t)^2 I_i^{-1} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_k + \left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_{k+1} + \right. \right. \\ \left. \left. + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_k e_i^m + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} e_i^m \right] \right\} \Delta w_i^m - (\theta \Delta t)^2 I_i^{-1} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_{k+1} + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} e_{i+1}^m \right] \Delta w_{i+1}^m = \\ \theta (\Delta t)^2 I_i^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_k (w_{i-1}^m - w_i^m) - \left(\frac{\partial p}{\partial M} \right)_{k+1} (w_i^m - w_{i+1}^m) + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_k \left[w_{i-1}^m e_{i-1}^m - w_i^m e_i^m + \right. \right. \\ \left. \left. + Q_k^m - \frac{L_k}{2A_k} \frac{\Delta (w_k^2 / \rho_k)^m}{\Delta t} \right] - \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} \left[w_i^m e_i^m - w_{i+1}^m e_{i+1}^m + Q_{k+1}^m + \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{L_{k+1}}{2A_{k+1}} \frac{\Delta (w_{k+1}^2 / \rho_{k+1})^m}{\Delta t} \right] \right\} + \Delta t E_i^m \end{aligned}$$

ou ainda

$$A_{i,i-1}^m \Delta w_{i-1}^m + A_{ii}^m \Delta w_i^m + A_{i,i+1}^m \Delta w_{i+1}^m = B_{i,i-1}^m w_{i-1}^m + B_{ii}^m w_i^m + B_{i,i+1}^m w_{i+1}^m + C_i^m$$

ou

$$(2.17)$$

$$[A^n] \underline{\Delta w} = [B^n] \underline{w}^n + \underline{C}^n \quad (2.18) \quad 7/40$$

onde

$$C_i^n = \theta (\Delta t)^2 I_i^{-1} \left\{ \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_k \left[Q_k - \frac{L_k}{2A_k} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_k^2}{\rho_k} \right)^n \right] - \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} \left[Q_{k+1} - \frac{L_{k+1}}{2A_{k+1}} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{w_{k+1}^2}{\rho_{k+1}} \right)^n \right] \right\}$$

$$A_{i,i\pm 1} = -(\theta \Delta t)^2 C_{d,i\pm 1} = -\theta \tilde{B}_{i,i\pm 1}$$

$$A_{ii} = 1 - \theta \Delta t F_i^n + (\theta \Delta t)^2 C_{di}$$

$$\tilde{B}_{ii} = -\theta (\Delta t)^2 C_{di}$$

$$C_{d,i-1} = I_i^{-1} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial m} \right)_k + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_k e_{i-1}^n \right]$$

$$C_{di} = I_i^{-1} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial m} \right)_k + \left(\frac{\partial p}{\partial m} \right)_{k+1} + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_k e_i^n + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} e_{i+1}^n \right]$$

$$C_{d,i+1} = I_i^{-1} \left[\left(\frac{\partial p}{\partial m} \right)_{k+1} + \left(\frac{\partial p}{\partial u} \right)_{k+1} e_{i+1}^n \right]$$

$[A^n]$ e $[B^n]$ são matrizes quadradas com estrutura tridiagonal e \underline{C}^n , Δw^n e \underline{w}^n são vetores coluna. O sistema de equações 2.8 é resolvido por fatorização da matriz $[A^n]$ em matrizes triangulares, eliminação e substituição⁽⁵⁾.

3. MODELO DE TRANSPORTE DE ENTALPIA

Para que se tenha número suficiente de equações é necessário relacionar as entalpias das junções i com as dos volumes k . Da mesma forma que o código RETRAN, utiliza-se as seguintes equações:

$$h_i + \frac{1}{2} \left(\frac{w_i}{\rho_i A_i} \right)^2 + g_i z_i = h_k + \frac{1}{2} \left(\frac{w_k}{\rho_k A_k} \right)^2 + g_k z_k + \Delta h_{aik} \quad (3.1)$$

$$M_k \frac{dh_i}{dt} + (w_i + w_k) h_i = (w_i + w_k) h_k + Q_k \quad (3.2)$$

8/40

A equação 3.2 deriva-se de um modelo que leva em conta as trocas de entalpia entre o fluido em movimento e as superfícies laterais do volume k . Baseia-se em balanços de massa e energia na metade do volume k , desprezando-se as energias cinéticas e potencial, ou seja

$$\frac{du}{dt} = w_k h_k - w_i h_i + \frac{Q_k}{2}$$

$$\frac{dM}{dt} = w_k - w_i$$

Sendo

$$U = uM = Mh - pV$$

$$\frac{dU}{dt} = h \frac{dM}{dt} + M \frac{dh}{dt} - v \frac{dp}{dt}$$

Obtem-se

$$h[w_k - w_i] + M \frac{dh}{dt} - v \frac{dp}{dt} = w_k h_k - w_i h_i + \frac{Q_k}{2}$$

Supondo-se

$$v \frac{dp}{dt} \approx 0$$

$$h = \frac{h_k + h_i}{2}$$

$$\frac{dh}{dt} \approx \frac{dh_k}{dt} \approx \frac{dh_i}{dt}$$

$$M \approx \frac{M_k}{2}$$

Obtem-se a equação 3.2.

Sendo $\tau = \frac{M_k}{w_i + w_k}$, escreve-se

$$\frac{dh_i}{dt} + \frac{h_i}{\tau} = \frac{h_k}{\tau} + \frac{Q_k}{M_k}$$

Multiplicando por $e^{t/\tau}$

$$\frac{d}{dt} \left[e^{t/\tau} h_i(t) \right] = \left(\frac{h_k}{\tau} + \frac{Q_k}{M_k} \right) e^{t/\tau}$$

Integrando-se

$$e^{\Delta t/\tau} h_i(\Delta t) - h_i(0) = \left[h_k + \frac{Q_k \tau}{M_k} \right] (e^{\Delta t/\tau} - 1)$$

$$\Delta h_i(\Delta t) = h_i(0) e^{-\Delta t/\tau} + \left[h_k + \frac{Q_k \tau}{M_k} \right] (1 - e^{-\Delta t/\tau})$$

$$\Delta h_{aik}(\Delta t) = h_i(\Delta t) - h_k = [h_i(0) - h_k] e^{-\Delta t/\tau} + \frac{Q_k \tau}{M_k} (1 - e^{-\Delta t/\tau})$$

Levando-se em conta as energias cinética e potencial incluídas na equação 3.1, escreve-se

$$h_i(\Delta t) = h_k + \frac{1}{2} \left(\frac{W_k}{P_k A_k} \right)^2 - g_k \frac{L_k}{2} - \frac{1}{2} \left(\frac{W_i}{P_i A_i} \right)^2 +$$

$$+ [h_i(0) - h_k] e^{-\frac{M_k \Delta t}{W_i + W_k}} + \frac{Q_k}{W_i + W_k} \left[1 - e^{-\frac{M_k \Delta t}{W_i + W_k}} \right] \quad (3.3)$$

ou

$$e_i(\Delta t) = h_i + \frac{1}{2} \left(\frac{W_i}{P_i A_i} \right)^2 + g_i (z_i - z_k) = h_k + \frac{1}{2} \left(\frac{W_k}{P_k A_k} \right)^2 +$$

$$+ [h_i(0) - h_k] e^{-\Delta t/\tau} + \frac{Q_k \tau}{M_k} [1 - e^{-\Delta t/\tau}]$$

Tomando-se

$$h_k + \frac{1}{2} \left(\frac{W_k}{P_k A_k} \right)^2 \approx \frac{e_i + e_{i-1}}{2}$$

$$h_i(0) - h_k \approx \frac{e_i - e_{i-1}}{2}$$

$$\frac{Q_k \tau}{M_k} = \frac{Q_k}{W_i + W_k} \approx \frac{W_i e_i - W_{i-1} e_{i-1}}{W_i + W_k}$$

resulta

$$e_i^n = \frac{e_i^{n-1} + e_{i-1}^{n-1}}{2} + \frac{e_i^{n-1} - e_{i-1}^{n-1}}{2} \exp\left(-\frac{M_k \Delta t}{W_i + W_k}\right) + \frac{W_i e_i^{n-1} - W_{i-1} e_{i-1}^{n-1}}{W_i + W_k} \left[1 - \exp\left(\frac{-M_k \Delta t}{W_i + W_k}\right) \right] \quad (3.4)$$

4. CONCEITO DE CÉLULA DOADORA

A pressão na junção i é

$$p_i = p_k - f_k \frac{L_k}{D_{hk}} \times \frac{W_k^2}{\rho_k A_k^2} - \rho_k g_k \frac{L_k}{2} \quad (4.1)$$

5. FUNÇÕES DE ESTADO TERMODINÂMICO

A entalpia específica h , o volume específico v e a temperatura T são calculados, iterativamente, utilizando sub-rotinas da ASME:

$$h = h(p, T) \quad (5.1)$$

$$v = v(p, T) \quad (5.2)$$

$$T = T(p, h) \quad (5.3)$$

6. CÁLCULO DA PRESSÃO

De

$$h = u + pv$$

$$\bar{u} = \frac{U}{M} = U \frac{v}{V}$$

$$v = \frac{V}{M}$$

resulta

$$\frac{dh}{dt} = \frac{du}{dt} + p \frac{dv}{dt} + v \frac{dp}{dt}$$

$$\frac{du}{dt} = \frac{u}{v} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{v} \frac{du}{dt}$$

11/40

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{v}{v^2} \frac{dM}{dt} = -\frac{v}{M} \frac{dM}{dt}$$

Por substituição, obtem-se

$$M \frac{dh}{dt} = \frac{du}{dt} + v \frac{dv}{dt} - \left(\frac{u}{v} + p \right) \frac{dM}{dt} \quad (6.1)$$

Das equações de estado 5.2 e 5.3, resultam

$$\frac{dv}{dt} = \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \frac{dp}{dt} + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \frac{dT}{dt}$$

$$\frac{dT}{dt} = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \frac{dp}{dt} + \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \frac{dh}{dt}$$

Eliminando-se dT/dt , tem-se

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T \frac{dp}{dt} + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left[\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \frac{dp}{dt} + \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \frac{dh}{dt} \right] \\ -v \frac{dM}{dt} &= M \left[\left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \right] \frac{dp}{dt} + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p M \frac{dh}{dt} \end{aligned} \quad (6.2)$$

Eliminando-se $M \frac{dh}{dt}$ das equações 6.2 e 6.1 resulta

$$\begin{aligned} \left\{ M \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left[M \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h + \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p v \right] \right\} \frac{dp}{dt} = \\ - \left\{ 1 - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \left[\frac{u}{v} + p \right] \right\} v \frac{dM}{dt} - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \frac{du}{dt} \end{aligned} \quad (6.3)$$

e portanto

$$\Delta p_k^m = - \frac{\left\{ 1 - \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \left[\frac{u}{v} + p \right] \right\}_k v_k \Delta M_k + \left[\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p \right]_k \Delta u_k}{\left\{ M \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T + \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \left[M \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h + \left(\frac{\partial T}{\partial h} \right)_p v \right] \right\}_k} \quad (6.4)$$

12/40

$$p_k^{n+1} = p_k^n + \Delta p_k^n \quad (6.5)$$

7. DADOS GEOMÉTRICOS E TERMOHIDRÁULICOS

O circuito primário de uma central PWR típica⁽⁶⁾ é representado por 12 regiões:

1. Núcleo do reator
2. Cobertura do Núcleo
3. Região plena superior
4. Tubulação da perna quente
5. Tubos do Gerador de Vapor
6. Tubulação Vertical
7. Tubulação horizontal de sucção da bomba
8. Bomba
9. Tubulação da perna fria
10. Região plena de entrada
11. Região descendente do vaso do reator
12. Região plena inferior.

Essas regiões são divididas em 68 volumes. Com os dados geométricos, térmicos e hidráulicos do projeto, são determinados os coeficientes de queda de pressão e geradas às distribuições estacionárias de pressão, temperatura, entalpia e volume específico. A diferença de pressão, entre junções do volume da bomba, é obtida de sua curva característica.

7.1. DADOS GEOMÉTRICOS DO REATOR

Diâmetro da vareta combustível = 0,374"

Passo = 0,485"

Número de Varetas = 28435

$$\text{Diâmetro hidráulico} = \frac{4 \times [(0,485)^2 - \frac{\pi}{4} (0,374)^2]}{\pi \times 0,374 \times 12} = 0,03557 \text{ ft} \\ = 0,01084 \text{ m}$$

Comprimento da Vareta = 12 ft

$$\text{Área transversal} = 28435 \left[\frac{(0,485)^2 - \frac{\pi}{4} (0,374)^2}{144} \right] = 24,76 \text{ ft}^2 \\ \text{entre varetas}$$

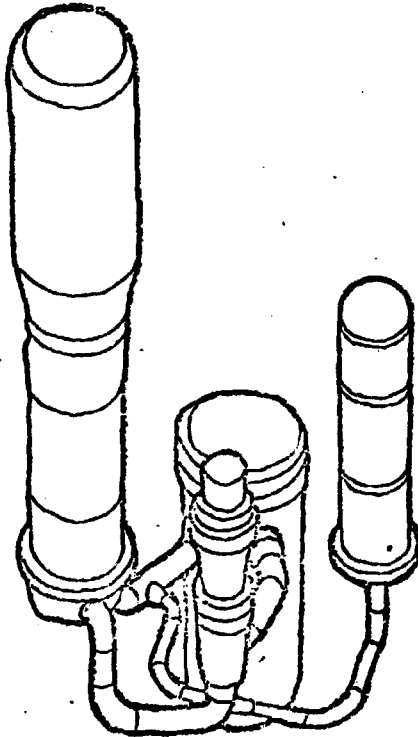


FIG.7.1 - CIRCUITO PRIMÁRIO E SEUS COMPONENTES.

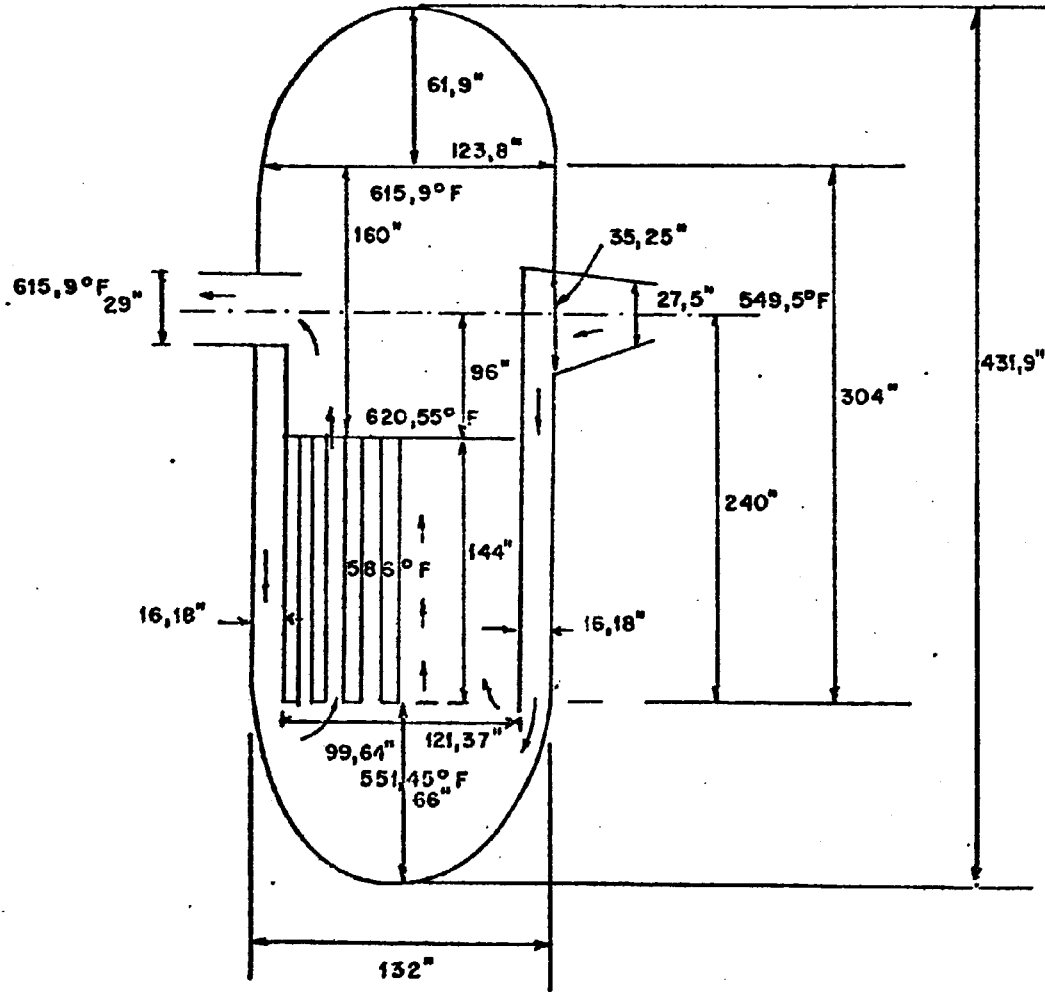


FIG.7.2 - DIMENSÕES DO REATOR E VASO DE PRESSÃO

15/40

Área transversal efetiva,
incluindo bordas $= 26,4 \text{ ft}^2 = 2,45 \text{ m}^2$

Área transversal da região
descendente $= \frac{\pi}{4} \left(\frac{132^2 - 96,64^2}{144} \right) = 40,88 \text{ ft}^2$

Área "transversal" estimada
da região plena inferior $\approx \frac{6,42}{5,89} \times 40,88 = 44,56 \text{ ft}^2$

(Estimada pela relação de áreas da região descendente e da região plena inferior do Reator Ringhals 3⁽⁷⁾, respectivamente $6,42 \text{ m}^2$ e $5,89 \text{ m}^2$).

Comprimento estimado da região plena inferior $= (240 - \frac{35,25}{2}) / 12 =$
 $= 18,53 \text{ ft}$

Áreas "transversais" estimadas das regiões plenas de entrada e superior e da cobertura do núcleo

Essas áreas são estimadas em proporção aos dados correspondentes ao Reator Ringhals 3, e as áreas efetivas de escoamento no núcleo.

Área "transversal" da região
plena de entrada $= \left(\frac{2,45}{3,80} \right) \frac{5,89}{(0,3048)^2} = 40,88 \text{ ft}^2$

Área "transversal" da cobertura do núcleo e região plena superior $= \left(\frac{2,45}{3,80} \right) \frac{9,81}{(0,3048)^2} = 62,15 \text{ ft}^2$

Comprimento da região plena de entrada $= 0,25 \text{ m} = 0,82 \text{ ft}$

"Comprimento" da região plena inferior $= \frac{66,3}{2 \times 12} = 2,76 \text{ ft}$

"Comprimento" da região plena inferior $= \frac{29}{5 \times 12} = 0,48 \text{ ft}$

Diâmetros Hidráulicos Estimados

Diâmetro hidráulico da região descendente e da região plena de
entrada $= \frac{4 \frac{\pi}{4} (132^2 - 99,64^2)}{12 (132 + 99,64)} = 2,70 \text{ ft}$

Diâmetro hidráulico das regiões plena inferior e superior e da cobertura do núcleo (estimado como sendo proporcional ao do reator Ringhals 3, sendo coeficiente de proporcionalidade a relação entre os diâmetros hidráulicos dos núcleos)

$$= \left(\frac{0,01089}{0,0118} \right) \times \frac{0,1}{0,3048} = 0,3014 \text{ ft}$$

7.2. DADOS DO GERADOR DE VAPOR (GV)

- Número total de tubos = 4674
- Diâmetro externo = 0,750"
- Espessura nominal da parede dos tubos = 0,043"
- Diâmetro interno = 0,664" = 0,0553 ft
- Área transversal = $\frac{\pi \times (0,664)^2}{4} \times 4674 = 11,24 \text{ ft}^2$
- Área total de transferência de calor = 48300 ft²
- Comprimento médio equivalente dos tubos para fins de transferência de calor = $\frac{48300}{\pi \times 0,707 \times \frac{4674}{12}} = 55,93 \text{ ft}$

7.3. DADOS SOBRE A BOMBA (Ringhals 3)

- Comprimento efetivo = 1,64 ft
- Diâmetro = 2,292 ft
- Área transversal = 4,126 ft²
- Altura total = 27,2 ft

7.4. DADOS SOBRE TUBULAÇÕES

Perna Quente (Reator - GV):

- Comprimento = 13,21 ft⁽⁸⁾
- Diâmetro = 2,4167 ft
- Área transversal = 4,587 ft
- Cota de saída do reator = 25,35 ft⁽⁸⁾
- Cota de entrada no GV = 27,79 ft⁽⁸⁾
- Variação Δ = 2,42 ft

Curva	Raio/Diâmetro	ângulo θ	k (coeficiente perda pressão)
5	15	50°	0,12

R = Raio da curva = 1,5 \times 2,4167 = 3,63 ftComprimento da curva $L \approx R\theta = 3,63 \times \frac{50\pi}{180} = 3,16 \text{ ft}$ Variação da Cota na curva = $L \times \sin \theta = 2,42 \text{ ft}$

Comprimento total = 13,21 + 3,16 = 16,37 ft

Tubulação de Sucção da Bomba (CV - Bomba)

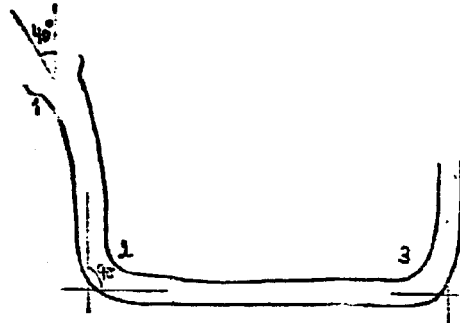
- Comprimento = 12,40 ft⁽⁸⁾
- Diâmetro = 2,583 ft

17/40

Área transversal = = 5,24 ft²

Cota de saída do GV = 27,79 ft

Curvas	Raio/Diâmetro	Ângulo θ	Coefficiente de queda de pressão
1	1,75	40°	0,09
2	1,50	90°	0,18
3	1,50	90°	<u>0,18</u>
			K = 0,45



R = Raio da curva (1) = 1,75 × 2,583 = 4,52 ft

Comprimento da curva (1) $\approx R\theta = 4,52 \times \frac{40\pi}{180} = 3,16$ ft

Raio das curvas (2,3) = 1,50 × 2,583 = 3,87 ft

Comprimento das curvas (2,3) = 3,87 $\frac{90\pi}{180} = 6,09$ ft

Comprimento das curvas (1+2) = 9,96 ft

Comprimento das curvas (1+2+3) = 16,05 ft

Comprimento da tubulação vertical = 16,05 - 12,4 = 3,65 ft

Tubulação da perna fria (Bomba - Reator)

Comprimento = 11 ft

Diâmetro = 2,292 ft

Área transversal = 4,126 ft²

Cota de entrada no reator = 25,35 ft

Curvas	Raio/Diâmetro	Ângulo θ	Coefficiente queda pressão
4	1,5	35°	0,08
5	1,5	50°	<u>0,12</u>
			K = 0,20

Raio das curvas = 1,5 × 2,292 = 3,44 ft

Comprimento da curva 4 = 3,44 × $35 \frac{\pi}{180} = 2,10$ ftComprimento da curva 5 = 3,44 × $\frac{50}{180} = 3,00$ ft

18/40

Comprimento das curvas (4 + 5) = 5,10 ft

Comprimento total = 16,10 ft

Os dados geométricos são resumidos na tabela 7.1.

Tabela 7.1

Parte Nº	Descrição	Comprimento, ft	Área, ft ²	Diâmetro Hidráulico, ft
1	Núcleo do Reator	12	26,4	0,03557
2	Cobertura do Núcleo	8	68,15	0,3014
3	Região plena superior	0,48	68,15	0,3014
4	Tubulação da perna quente	16,37	4,587	2,4167
5	Tubos do Gerador de Vapor	55,83	11,24	0,0553
6	Tubulação descendente vertical	3,65	5,24	2,583
7	Tubulação horizontal sucção da bomba	12,4	5,24	2,583
8	Bomba	1,64	4,126	2,292
9	Tubulação da perna fria	16,10	4,126	2,292
10	Região plena de entrada	0,82	40,88	2,70
11	Região descendente do vaso do reator	18,53	40,88	2,70
12	Região plena inferior	2,76	44,56	0,3014

7.5. DADOS TERMOHIDRÁULICOS

Nº de circuitos = 2

Vazão total = 19750 lb/s

Pressão no núcleo = 2235 psi

Quedas de pressão:

- através do núcleo = 28,2 psi

- através do vaso (e bocais) = 46,6 psi

Potência gerada pelo núcleo = $1,7786 \times 10^6$ BTU/s

Fração da potência gerada no núcleo = 0,974

Área de transf. de calor = $28435 \frac{\pi \times 0,374}{12} \times 12 = 33409,86 \text{ ft}^2$

Fluxo médio de calor = $\frac{0,974 \times 6,403 \times 10^9}{33409,86} = 186667 \text{ BTU/hrft}^2$

Variação média da entalpia = $\frac{0,974 \times 1,7786 \times 10^6}{19750} = 87,71 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$

Temperaturas (°F)

Entrada no vaso = 549,5

Saída do vaso = 615,9

Incremento no vaso = 66,4

Média no vaso = 582,7

Média no núcleo = 586

Incremento no núcleo = 69,1

Entrada no núcleo = 551,45

Saída do núcleo = 620,55

Para uma pressão $p = 2250$ psi a entalpia em função da temperatura é

T	h
OF	BTU/lb
550	546,8
615	634,98
620	646,2

A entalpia de saída do vaso é

$$h_s = 546,8 + 87,7 = 634,5 \text{ BTU/lb}$$

portanto, a temperatura de saída nesta pressão é aproximadamente $T \cong 615^\circ\text{F}$.

7.6. CÁLCULO MANUAL DE QUEDAS DE PRESSÃO

É feito o cálculo manual de quedas de pressão em estado estacionário para definir coeficientes apropriados de quedas de pressão ao longo do circuito primário. Com base em uma distribuição preliminar de temperaturas médias em cada região são determinados, inicialmente, os parâmetros termodinâmicos para uma pressão de 2250 psi, e apresentados na tabela 7.2.

Tabela 7.2

Região		Tempe- ratura °F	Densidade lb/ft ρ	Viscosidade lb/hrft μ	Vazão lb/hr W
1	Núcleo do reator	586	44,352	0,219	$71,1 \times 10^6$
2	Cobertura do núcleo	620,6	41,268	0,212	$71,1 \times 10^6$
3	Região Plena superior	615,9	41,6896	0,204	$71,1 \times 10^6$
4	Tubulação da perna-quente	615,9	41,6896	0,204	$71,1 \times 10^6$ 2
5	Gerador de Vapor	582,5	44,5955	0,222	$71,1 \times 10^6$ 2
6	Tubulação descendente	550	46,8724	0,235	$71,1 \times 10^6$ 2
7	Tubulação de sucção da bomba	550	46,8724	0,235	$71,1 \times 10^6$ 2
8	Bomba	550	46,8724	0,235	$71,1 \times 10^6$ 2
9	Tubulação da perna-fria	550	46,8724	0,235	$71,1 \times 10^6$ 2
10	Região plena de entrada	550	46,8724	0,235	$71,1 \times 10^6$ 2
11	Região descendente do vaso	550	46,8724	0,235	$71,1 \times 10^6$
12	Região plena inferior	550	46,8724	0,235	$71,1 \times 10^6$

Fórmulas Utilizadas

$$R_e = \frac{D_h W}{\mu A}$$

$$f \frac{L}{D_h} = 0,184 R_e^{-0,2} \frac{L}{D_h}$$

$$\frac{\Delta P}{f \frac{L}{D_h} + K} = \frac{1}{2} \left[\frac{(W/3600)^2}{\rho A^2 \times 32,17 \times 144} \right]$$

Núcleo do Reator

$$R_e = \frac{0,03557 \times 71,1 \times 10^6}{0,219 \times 26,4} = 4,374 \times 10^5$$

$$f = 0,184 (4,374 \times 10^5)^{-0,2} = 1,37 \times 10^{-2}$$

$$f \frac{L}{D_h} = 1,37 \times 10^{-2} \times \frac{12}{0,03557} = 4,621$$

$$K = 16,084 = \sum_{i=1}^8 K_i \quad (\text{grades espaçadoras})$$

$$K_1 = K_8 = 1,14885$$

$$K_2 = K_3 = K_4 = K_5 = K_6 = K_7 = 2,29769$$

$$f \frac{L}{D_h} + K = 20,705$$

$$\frac{\Delta P}{f \frac{L}{D_h} + K} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750}{26,4} \right)^2 \frac{1}{44,352 \times 32,17 \times 144} \right] = 1,362$$

$$\Delta P = 1,362 \times 20,705 = 28,2 \text{ psi}$$

Cobertura do Núcleo

$$R_e = \frac{0,3014 \times 71,1 \times 10^6}{0,212 \times 68,15} = 1,4832 \times 10^6$$

$$f = 1,0729 \times 10^{-2}$$

$$f \frac{L}{D} = 1,0729 \times 10^{-2} \times \frac{8}{0,3014} = 0,28479$$

$$K = 9,779$$

$$\Delta p = \left(f \frac{L}{D} + K \right) \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750}{68,15} \right)^2 \frac{1}{41,268 \times 32,17 \times 144} \right] = 0,21966$$

$$\Delta p = 2,2106 \text{ psi}$$

Região Plena Superior

$$R_e = \frac{0,3014 \times 71,1 \times 10^6}{0,204 \times 68,15} = 1,5414 \times 10^6$$

$$f = 1,0647 \times 10^{-2}$$

$$f \frac{L}{D} = 1,0647 \times 10^{-2} \frac{0,48}{0,3014} = 1,6956 \times 10^{-2}$$

$$K = 0,5822$$

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + K} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750}{68,15} \right)^2 \frac{1}{41,268 \times 32,17 \times 144} \right] = 0,21966$$

$$\Delta p = 0,1316 \text{ psi}$$

Tubulação Perna-Quente

$$R_e = \frac{2,4167 \times (71,1 \times 10^6 / 2)}{0,204 \times 4,587} = 9,1813 \times 10^7$$

$$f = 4,7015 \times 10^{-3}$$

$$f \frac{L}{D} = 4,7015 \times 10^{-3} \times \frac{16,37}{2,4167} = 0,031847$$

$$k = 0,72$$

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + k} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750/2}{4,587} \right)^2 \frac{1}{41,6896 \times 32,17 \times 144} \right] = 11,999$$

$$\Delta p = 9,0214 \text{ psi}$$

Gerador de Vapor

$$Re = \frac{0,0553 \times (71,1 \times 10^6 / 2)}{0,222 \times 11,24} = 7,8785 \times 10^5$$

$$f = 1,2177 \times 10^{-2}$$

$$f \frac{L}{D} = 1,2177 \times 10^{-2} \times \frac{55,83}{0,0553} = 12,2934$$

$$k = 1,5$$

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + k} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750/2}{11,24} \right)^2 \frac{1}{44,5955 \times 32,17 \times 144} \right] = 1,86813$$

$$\Delta p = 25,955 \text{ psi}$$

Tubulação Sucção da Bomba

$$Re = \frac{2,583 \times 71,1 \times 10^6 / 2}{0,235 \times 5,24} = 7,45701 \times 10^7$$

$$f = 4,90123 \times 10^{-3}$$

$$f \frac{L}{D} = 4,90123 \times 10^{-3} \times \frac{16,05}{2,583} = 0,030455$$

$$K = 0,45$$

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + K} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750/2}{5,24} \right)^2 \frac{1}{46,8724 \times 32,17 \times 144} \right] = 8,17807$$

$$\Delta p = 3,929 \text{ psi}$$

Bomba

$$Re = \frac{2,292 \times 71,1 \times 10^6 / 2}{0,235 \times 4,126} = 8,40344 \times 10^7$$

$$f = 4,78549 \times 10^{-3}$$

$$f \frac{L}{D} = f \times \frac{1,64}{2,292} = 3,4242 \times 10^{-3}$$

$$K = 0,1$$

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + K} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750/2}{4,126} \right)^2 \frac{1}{46,8724 \times 32,17 \times 144} \right] = 13,1903$$

$$\Delta p = 1,364 \text{ psi}$$

Tubulação Perna-Fria

$$Re = \frac{2,292 \times 71,1 \times 10^6 / 2}{0,235 \times 4,126} = 8,40344 \times 10^7$$

$$f = 4,78549 \times 10^{-3}$$

$$f \frac{L}{D} = f \frac{16,1}{2,292} = 3,36154 \times 10^{-2}$$

$$k = 1,037$$

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + k} = 13,1903$$

$$\Delta p = 14,122 \text{ psi}$$

Região Plena de Entrada

$$Re = \frac{2,70 \times 71,1 \times 10^6}{0,235 \times 40,88} = 1,9983 \times 10^7$$

$$f = 6,378 \times 10^{-3}$$

$$f \frac{L}{D} = f \times \frac{0,82}{2,7} = 1,937 \times 10^{-3}$$

$$k = 6,653 \times 10^{-2}$$

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + k} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750}{40,88} \right)^2 \frac{1}{46,87 \times 32,17 \times 144} \right] = 0,5375$$

$$\Delta p = 0,0368 \text{ psi}$$

Região Descendente do Vaso do Reator

$$Re = \frac{2,7 \times 71,1 \times 10^6}{0,235 \times 40,88} = 1,9983 \times 10^7$$

$$f = 6,378 \times 10^{-3}$$

$$f \frac{L}{D} = f \frac{18,53}{2,7} = 4,377 \times 10^{-2}$$

$$K = 8,818$$

26/40

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + K} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750}{40,88} \right)^2 \frac{1}{46,87 \times 32,17 \times 144} \right] = 0,5375$$

$$\Delta p = 4,7628 \text{ psia}$$

Região Plena Inferior

$$R_e = \frac{0,3014 \times 7,1 \times 10^6}{0,235 \times 44,56} = 2,0464 \times 10^6$$

$$f = 1,006 \times 10^{-2}$$

$$f \frac{L}{D} = f \frac{2,76}{0,3014} = 9,2126 \times 10^{-2}, \quad K = 15,953$$

$$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + K} = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{19750}{44,56} \right)^2 \frac{1}{46,87 \times 32,17 \times 144} \right] = 0,45236$$

$$\Delta p = 7,2583 \text{ psia}$$

Os valores dos coeficientes K, de queda de pressão foram ajustados de tal forma que se tivesse:

Queda total de pressão = 97 psia

Queda de pressão no vaso = 46,6 psia (incluindo bocais)

Queda de pressão nas tubulações e GV = 50,4 psia

Este ajuste é resumidamente apresentado na tabela 7.3, supondo que a queda de pressão nos bocais corresponde a 4 psia e está incorporado às tubulações. Portanto:

Queda de pressão (psia)

Núcleo = 28,2

Cobertura = 2,2106

Região Plena Sup. = 0,1316

Região Plena Entrada = 0,0368

Região descendente = 4,7628

Região Plena Inf. = 7,2583

Total no vaso = 42,6001 psia (sem bocais)

Tabela 7.3

Região Nº		f	$f \frac{L}{D}$	K	$f \frac{L}{D} + K$	$\frac{\Delta p}{f \frac{L}{D} + K}$	Δp (psia)
1	Núcleo do Reator	$1,37 \times 10^{-2}$	4,621	16,084	20,705	1,362	28,2
2	Cobertura do Núcleo	$1,0729 \times 10^{-2}$	0,2848	9,779	10,064	0,21966	2,106
3	Região Plena Superior	$1,0647 \times 10^{-2}$	$1,6956 \times 10^{-2}$	0,5822	0,5991	0,21966	0,1316
4	Tubulação Perna Quente	$4,7015 \times 10^{-3}$	0,031847	0,72	0,751847	11,999	9,021
5	Tubos do Gerador de Vapor	$1,2177 \times 10^{-2}$	12,2934	1,5	13,7934	1,86813	25,955
6,7	Tubulação Sucção da Bomba	$4,9012 \times 10^{-3}$	0,030455	0,45	0,480455	8,17807	3,929
8	Bomba	$4,7855 \times 10^{-3}$	$3,42417 \times 10^{-3}$	0,10	0,103424	13,1903	1,364
9	Tubulação Perna Fria	$4,7855 \times 10^{-3}$	$3,36154 \times 10^{-2}$	1,037	1,070644	13,1903	14,122
10	Região Plena de Entrada	$6,378 \times 10^{-3}$	$1,937 \times 10^{-3}$	$6,653 \times 10^{-2}$	$6,847 \times 10^{-2}$	0,53747	0,0368
11	Região Descendente do Vaso	$6,378 \times 10^{-3}$	$4,3772 \times 10^{-2}$	8,818	8,862	0,53747	4,7628
12	Região Plena Inferior	$1,006 \times 10^{-2}$	$9,2126 \times 10^{-2}$	15,953	16,045	0,45236	7,2583
	Total						96,99

28/40

Portanto, levando em conta os acidentes geométricos existentes e distribuindo os valores "artificiais" de K entre alguns volumes de controle, é definido o seguinte conjunto de dados de entrada.

Tabela 7.4

J, K		Área, ft ² AREA(K)	Comprimen- to ft XL(K)	Diâmetro ft DH(K)	Orienta- ção LGK(K)	Coef. queda pressão XKI(J)
1	Núcleo do Reator	26,4	0,75	0,03557	1	1,14885
2 - 11	" " "	"	1,50	"	1	2,2977
12	" " "	"	0,75	"	1	1,14885
13	Cobertura do Núcleo	68,15	2,00	0,3014	1	2,4448
14 - 15	" " "	"	2,00	"	1	2,4448
16	" " "	"	2,00	"	1	2,4448
17	Região Plena Superior	68,15	0,48	0,3014	1	0,5822
18 - 21	Perna Quente	9,174	2,64	2,4167	0	-
22	" " "	"	2,65	"	0	-
23	" " "	"	1,58	"	0	0,12
24	" " "	"	1,58	"	0	0,40
25 - 32	Tubos Gerador Vapor	22,48	3,10	0,0553	1	-
33	" " "	"	3,12	"	1	0,20
34	" " "	"	3,12	"	-1	-
35 - 41	" " "	"	3,10	"	-1	-
42	" " "	"	3,10	"	-1	1,00
43	Tubulação Sucção	10,48	1,825	2,583	-1	0,09
44	" " "	"	1,825	"	0	0,18
45 - 48	" " "	"	2,48	"	0	-
49	" " "	"	2,48	"	0	0,18
50	Bomba	8,252	1,64	2,292	1	0,10
51	Perna-Fria	8,252	2,10	2,292	0	0,08
52 - 55	" " "	"	2,20	"	0	-
56	" " "	"	2,20	"	0	0,12
57	" " "	"	3,00	"	0	0,837
58	Região Plena de Entrada	40,88	1,94	2,70	-1	0,8885
59	Região Descendente Vasc	40,88	1,94	2,70	-1	0,8885
60 - 67	" " "	40,88	1,94	"	-1	0,8885
68	Região Plena Inferior	44,56	2,76	0,3014	0	15,953

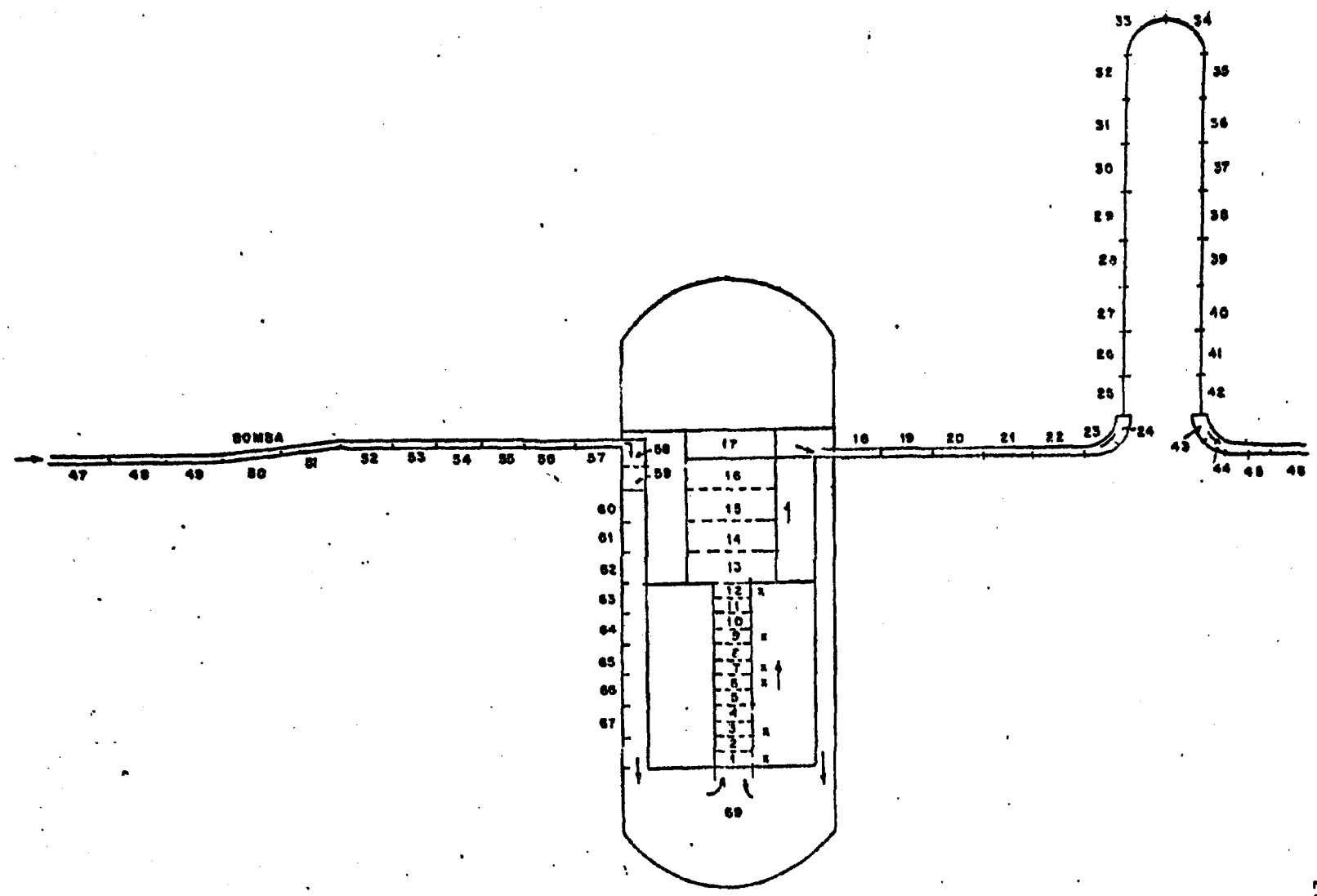
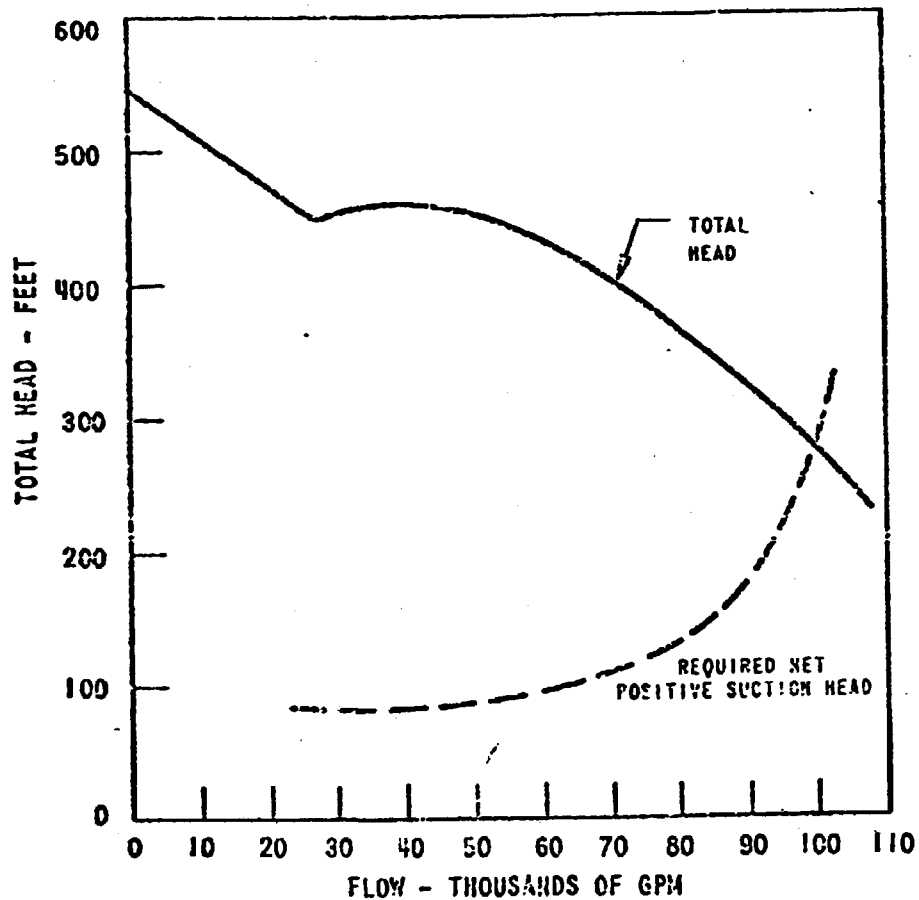


FIG.33- SEÇÕES DO CIRCUITO PRIMÁRIO

7.7. ALTURA DE CARGA DA BOMBA

A curva de carga da bomba apresentada abaixo é descrita através de um polinômio do 2º grau para $W \geq 40000\text{GPM}$



Do gráfico acima (Fig. 5.5-3 da ref.⁶) retira-se:

Vazão (GPM)	Head (ft)
40000	462,5
70000	407,5
103700	298

Em função de valores nominais, equivalem

Vazão x	Head
0,38573	1,55201
0,67502	1,36745
1,0	1,0

Para $x > 0,38573$

$$h = ax^2 + bx + c$$

onde

$$a = -0,80212$$

$$b = 0,21288$$

$$c = 1,58924$$

8. DISTRIBUIÇÕES ESTACIONÁRIAS DE POTÊNCIA TÉRMICA

A potência térmica transferida em regime estacionário nos vários volumes do circuito primário foram obtidas do relatório de segurança do reator⁽⁶⁾. Da curva 4.3-15 da referência (6) obtém-se:

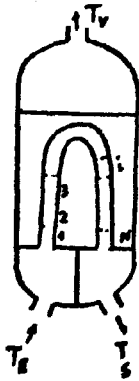
Região	Q_K/\bar{Q}_T	$Q_K, 10^6$ BTU/Sec
1	0,60	4,6074
2	0,96	14,744
3	1,19	18,276
4	1,25	19,197
5	1,24	19,044
6	1,21	18,583
7	1,17	17,969
8	1,10	16,894
9	1,02	15,665
10	0,91	13,976
11	0,73	11,211
12	0,40	3,0716

Onde

$$\bar{Q}_T = 0,974 \times 6,403 \times 10^6 \text{ BTU/hr} = 1,7324 \times 10^6 \text{ BTU/Sec}$$

A distribuição de potência no gerador de vapor é obtido de⁽⁹⁾:

$$\frac{P_i}{P_T} = \frac{T_E - T_V}{T_E - T_S} \times \frac{1}{N} \left[\frac{T_E - T_V}{T_S - T_V} \right]^{1/N} \ln \left(\frac{T_E - T_V}{T_S - T_V} \right)$$

Sendo $p_V = 920$ psi

$$T_V = 534,73^\circ\text{F} = 994,4^\circ\text{R}$$

$$T_E = 615^\circ\text{F} + 459,67 = 1074,67^\circ\text{R}$$

$$T_S = 550^\circ\text{F} = 1009,67^\circ\text{R}$$

$$N = 18$$

Sendo

$$\text{Potência total do NSSS} = 6421,6 \times 10^6 \text{ BTU/hr}$$

$$\text{Potência do vaso} = 6403 \times 10^6 \text{ BTU/hr}$$

$$\text{Potência da bomba} = 18,6 \times 10^6 \text{ BTU/hr}$$

$$\begin{aligned} \text{Potência na Região descendente} &= (1 - 0,974)6403 \times 10^6 = \\ &= 4,6244 \times 10^6 \text{ BTU/Sec} \end{aligned}$$

$$\text{Potência do GV, } P_T = 6421,6 \times 10^6 \text{ BTU/hr} = 1,783 \times 10^6 \text{ BTU/Sec}$$

A distribuição de calor na região descendente é tomada como proporcional ao fluxo de calor no núcleo.

i	K	ϕ	P_i/p	P_i BTU/Sec
1	62	1,13	0,09921	$4,58786 \times 10^3$
2	63	1,94	0,17032	$7,87650 \times 10^3$
3	64	2,27	0,19930	$9,21632 \times 10^3$
4	65	2,45	0,21510	$9,94713 \times 10^3$
5	66	2,44	0,21422	$9,90653 \times 10^3$
6	67	<u>1,16</u>	<u>0,10184</u>	<u>$4,70966 \times 10^3$</u>
		11,39	1,0000	$4,62440 \times 10^4$

O fluxo de calor por região é apresentado na tabela 8.1

Tabela 8.1

33/40

Região k	Descrição	ak (k,1) BTU/sec	Região k	Inscrição	Qk(k,1) BTU/sec
1	Núcleo do Reator	$4,6074 \times 10^4$	32	Gerador de Vapor	$-10,1753 \times 10^4$
2	" "	$14,744 \times 10^4$	33	" "	$-9,27916 \times 10^4$
3	" "	$18,276 \times 10^4$	34	" "	$-8,46193 \times 10^4$
4	" "	$19,197 \times 10^4$	35	" "	$-7,71666 \times 10^4$
5	" "	$19,044 \times 10^4$	36	" "	$-7,03704 \times 10^4$
6	" "	$18,583 \times 10^4$	37	" "	$-6,41727 \times 10^4$
7	" "	$17,969 \times 10^4$	38	" "	$-5,85208 \times 10^4$
8	" "	$16,894 \times 10^4$	39	" "	$-5,33668 \times 10^4$
9	" "	$15,665 \times 10^4$	40	" "	$-4,86666 \times 10^4$
10	" "	$13,976 \times 10^4$	41	" "	$-4,43804 \times 10^4$
11	" "	$11,211 \times 10^4$	42	" "	$-4,04717 \times 10^4$
12	" "	$3,0716 \times 10^4$	43 - 49	Tubulação	0
13-24	Cobert/Plen.Sup/ /Perna quente	0	50	Bomba	$5,1667 \times 10^3$
25	Gerador de Vapor	$-19,4011 \times 10^4$	51 - 61	Perna Fria	0
26	" "	$-17,6924 \times 10^4$	62	Reg. Descendente	$4,58786 \times 10^3$
27	" "	$-16,1342 \times 10^4$	63	"	$7,87650 \times 10^3$
28	" "	$-14,7132 \times 10^4$	64	"	$9,21632 \times 10^3$
29	" "	$-13,4174 \times 10^4$	65	"	$9,94713 \times 10^3$
30	" "	$-12,2357 \times 10^4$	66	"	$9,90653 \times 10^3$
31	" "	$-11,1580 \times 10^4$	67	"	$4,70966 \times 10^3$
			68	Reg. Plena inf.	0

O coeficiente XK(68) foi modificado posteriormente, de 15,953 passou a 4,953 para que o balanço de pressões ao longo do circuito primário reproduzisse a pressão original no 1º volume (2249 psi).

9. RESULTADOS

Os resultados de um cálculo estacionário das distribuições de temperatura e pressão ao longo do circuito primário são apresentadas na tabela 9.1. Esses resultados são compatíveis com o projeto. Até o momento, foram efetuados alguns cálculos transientes com perturbação nula, verificando-se que o algoritmo de cálculo é estável, desde que se utilize intervalos de tempo reduzidos. A estabilidade da solução depende sensivelmente da distribuição da entalpia nas junções.

10. CONCLUSÕES

O modelo matemático do código RETRAN é bastante adequado para simular, detalhadamente, o circuito primário de reatores refrigerados a água. Cuidados devem ser tomados para definir, corretamente as distribuições estacionárias de vazão entre os diversos volumes, especialmente no caso de ramificações⁽¹⁾, ou ajustar corretamente os coeficientes de quedas de pressão causadas por acidentes geométricos, quando são conhecidas as vazões nas diversas junções, para que se obtenha distribuições estacionárias de pressões. É necessário efetuar, cuidadosamente, cálculos de distribuições de entalpia nas junções, para que a solução se mantenha estável.

O programa desenvolvido ainda apresenta problemas de instabilidade na solução. Será necessário efetuar uma verificação cuidadosa de todas as subrotinas de cálculo. Posteriormente serão efetuadas comparações com resultados obtidos com outros programas já comprovados. Só depois dessas comparações e verificações poderá o programa ser utilizado em projeto ou análise de segurança. Como isto exige esforços de um pesquisador habilitado, esta tarefa foi proposta como tese de mestrado à seção de Energia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, por não dispormos atualmente de pessoal com tempo livre para dedicar a esta atividade.

Tabela 91 : Distribuição Estacionária de Parâmetros Termodinâmicos nos Volumes do Circuito Primário.

	Cálculos		Dados do Projeto	
	Pressão, psi	Temperatura, °F	Pressão, psi	Temperatura, °F
1	2250	552,4	2250	552,4
2	2247	556,3	-	-
3	2242	562,9	-	-
4	2238	570,3	-	-
5	2234	577,6	-	-
6	2229	584,7	-	-
7	2225	591,5	-	-
8	2220	597,8	-	-
9	2216	603,5	-	-
10	2211	608,3	-	-
11	2207	612,9	-	-
12	2203	615,2	2250 - 28,2 = 2221,8	-
13	2203	615,7	-	-
14	2202	615,7	-	-
15	2200	615,7	-	-
16	2199	615,7	-	-
17	2198	615,7	-	615,9
18	2168	615,5	2221,8 - 46,6 = 2175,2	-
19	2168	615,5	-	-
20	2168	615,5	-	-
21	2168	615,5	-	-
22	2168	615,5	-	-
23	2167	615,5	-	-
24	2166	615,5	-	-
25	2180	612,4	-	-
26	2178	606,1	-	-
27	2176	600,2	-	-
28	2174	594,6	-	-
29	2171	589,5	-	-
30	2169	584,8	-	-
31	2167	580,4	-	-
32	2165	576,3	-	-
33	2163	572,6	-	-

Distribuição Estacionária de Parâmetros Termodinâmicos
Cont. nos Volúmenes do Circuito Primário.

	Cálculos		Dados do Projeto	
	Pressão, psi	Temperatura, °F	Pressão, psi	Temperatura, °F
34	2161	569,1	-	-
35	2161	566,0	-	-
36	2160	563,1	-	-
37	2160	560,4	-	-
38	2160	558,0	-	-
39	2160	555,7	-	-
40	2160	553,7	-	-
41	2159	551,8	-	-
42	2159	550,1	-	-
43	2138	549,2	2175,2-26 *estimado 2149,2	-
44	2138	549,2	-	-
45	2136	549,2	-	-
46	2136	549,2	-	-
47	2136	549,2	-	-
48	2136	549,2	-	-
49	2136	549,2	2175,2 - 50,4=2124,8	-
50	2199	549,4	-	-
51	2246	549,5	2124,8 + 97=2221,8	-
52	2245	549,5	-	-
53	2245	549,5	-	-
54	2245	549,5	-	-
55	2245	549,5	-	-
56	2244	549,5	-	549,5
57	2243	549,5	-	-
58	2257	549,6	-	-
59	2257	549,6	-	-
60	2257	549,6	-	-
61	2257	549,6	-	-
62	2257	549,7	-	-
63	2257	549,9	-	-
64	2257	550,3	-	-
65	2257	550,7	-	-

37/40

Cont. Distribuição Estacionária de Parâmetros Termodinâmicos
nos Volúmenes do Circuito Primário.

	Cálculos		Dados do Projeto	
	Pressão, psi	Temperatura, °F	Pressão, psi	Temperatura, °F
66	2258	551,1	-	-
67	2258	551,4	-	-
68	2258	551,5	-	551,45
MÉDIA NO NÚCLEO	2235	586,3	2227	586

APÊNDICE A

MÉTODO DE FATORIZAÇÃO

A fatorização de uma matriz [A] em matrizes triangulares pode ser obtido do sistema de equação desenvolvido a seguir.

$$[A] = \begin{bmatrix} \alpha_1 & & & & \\ b_2 & \alpha_2 & & & \\ 0 & b_3 & \alpha_3 & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & b_{m-1} & \alpha_{m-1} \\ \beta_1 & \beta_2 & \dots & \beta_{m-2} & \beta_{m-1} & \alpha_m \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & \gamma_1 & 0 & \dots & 0 & \mu_1 \\ & 1 & \gamma_2 & & & \mu_2 \\ & & 1 & \gamma_3 & & \mu_3 \\ & & & \vdots & \ddots & \vdots \\ & & & & 1 & \gamma_{m-2} & \mu_{m-2} \\ & & & & & 1 & \gamma_{m-1} & \mu_{m-1} \\ & & & & & & 1 & \mu_m \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} a_1 & c_1 & 0 & \dots & 0 & b_1 \\ b_2 & a_2 & c_2 & 0 & & 0 \\ 0 & b_3 & a_3 & c_3 & 0 & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & & & & & 0 \\ c_m & 0 & \dots & 0 & 0 & b_m \\ & & & & & a_m \end{bmatrix}$$

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = a_1 & \alpha_1 \gamma_1 = c_1 & \alpha_1 \mu_1 = b_1 \\ b_2 \gamma_1 + \alpha_2 = a_2 & \alpha_2 \gamma_2 = c_2 & b_2 \mu_1 + \alpha_2 \mu_2 = 0 \\ b_3 \gamma_2 + \alpha_3 = a_3 & \alpha_3 \gamma_3 = c_3 & b_3 \mu_2 + \alpha_3 \mu_3 = 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_i \gamma_{i-1} + \alpha_i = a_i & \alpha_i \gamma_i = c_i & b_i \mu_{i-1} + \alpha_i \mu_i = 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ b_{m-1} \gamma_{m-2} + \alpha_{m-1} = a_{m-1} & b_{m-1} \mu_{m-2} + \alpha_{m-1} \gamma_{m-1} = c_{m-1} \end{array}$$

$$\beta_1 = c_n$$

$$\beta_1 \gamma_1 + \beta_2 = 0$$

$$\beta_2 \gamma_2 + \beta_3 = 0$$

$$\beta_{i-1} \gamma_{i-1} + \beta_i = 0$$

$$\beta_{m-2} \gamma_{m-2} + \beta_{m-1} = 0$$

$$\beta_{m-2} \gamma_{m-2} + \beta_{m-1} = b_m$$

$$\sum_{i=1}^{m-2} \beta_i \mu_i + \beta_{m-1} \gamma_{m-1} + d_m = a_m$$

Portanto:

$$d_1 = a_1$$

$$\gamma_1 = c_1 / d_1$$

$$\mu_1 = b_1 / d_1$$

$$\beta_1 = c_m$$

$$d_i = a_i - b_i \gamma_{i-1} \quad , \quad i = 2, 3, \dots, m-1$$

$$\mu_i = -b_i \mu_{i-1} / d_i \quad , \quad i = 2, 3, \dots, m-1$$

$$\gamma_i = c_i / d_i \quad , \quad i = 2, 3, \dots, m-2$$

$$\beta_i = -\beta_{i-1} \gamma_{i-1} \quad , \quad i = 2, 3, \dots, m-2$$

$$\gamma_{m-1} = c_{m-1} / d_{m-1} + \mu_{m-1}$$

$$\beta_{m-1} = b_m - \beta_{m-2} \gamma_{m-2}$$

$$d_m = a_m - \sum_{i=2}^{m-2} \beta_i \mu_i - \beta_{m-1} \gamma_{m-1}$$

REFERÊNCIAS

1. Electric Power Research Institute, Palo Alto, California. "RETRAN, A Program for One-Dimensional Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Complex Fluid Flow Systems". Computer Code Manual, V. 1, dez. 1976.
2. Margolis, S. G. e Redfield, J. A., Bethis Atomic Power Laboratory, West Miffhing, Pensilvania. "FLASH: A Program for Digital Simulation of the Loss of Coolant Accident". WAPD - TM - 534 1966.
3. Mc. Klintock, R. B., General Electric Company, e Silvestri, G. J., Westinghouse Electric Corporation, "Some Improved Steam Property Calculation Procedures" Separata do "ASME Journal of Engineering for Power", p. 123 - 134, abril 1970.
4. Porshing, T. A., Murphy, J. H. e Redfield, J. A., Westinghouse Electric Power Corporation, Bettis Atomic Power Laboratory, West Miffing, Pensilvania. "Stable Numerical Integration of Conservation Equations for Hydraulic Networks", Nuclear Science and Engineering, V. 43, p 218 - 285, 1981.
5. Isaacson, E. e Keller, H. B., Courant Institute of Mathematical Sciences, New York University. "Analysis of Numerical Methods. John Wiley and Sons, New York, London and Sydney (1966).
6. Furnas Centrais Elétricas S.A. - Rio de Janeiro. FSAR - Angra 1.
7. Norinder, O., "Statens Kärnkraftinspektion" (Comissão Sueca de Energia Atômica), "Project P/60 - The ATWS Sequence in a PWR - Results of phase I", RTS 12068 - Translation by: The British Library (Lending Division), November 1979.
8. Vanni, E. A., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. "Simulador Digital do Pressurizador e Bomba do Circuito Primário de um Reator com Água Pressurizada" - Tese de Mestrado, 1978.
9. Souza, A. L., Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, "Modelo Homogêneo de um Gerador de Vapor para Simulação de Transitórios Operacionais e Acidentes em Centrais Nucleares tipo PWR", Tese de Mestrado, 1981.