

CÓDIGO CB3PMF - ANÁLISE TERMO-HIDRÁULICA  
COM O MÉTODO DE FRONTEIRA LATERAL ABERTA

RONALDO CÉLEM BORGES  
GILBERTO GOMES DE ANDRADE

Departamento de Tecnologia de Reatores  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - CNEN/SP

R E S U M O

Este artigo apresenta um método de cálculo para a análise termo-hidráulica utilizando o conceito de fronteira lateral aberta, desenvolvido para o código COBRA-IIIP. O método é apropriado ao estudo dos parâmetros termo-hidráulicos de reatores que apresentam um grande número de subcanais.

Através deste método a análise termo-hidráulica de uma região com um número elevado de subcanais é decomposta em mais de uma etapa de cálculo, permitindo assim determinar, de forma natural, a região quente do canal ou núcleo estudado.

O cálculo com fronteira lateral aberta mantém, em etapas de cálculo mais detalhadas, a influência das fronteiras externas do canal em estudo e acrescenta à face externa do modelo físico do canal características importantes que os modelos computacionais identificam somente a nível de subcanal, permitindo, assim, conservar as características de mistura que existem entre o canal analisado e seus vizinhos da etapa anterior.

É mostrado que o método de fronteira lateral aberta é válido, confiável e aplicável à análise termo-hidráulica em estado estacionário, além de permitir maior flexibilidade na aplicação de coeficientes e correlações utilizadas pelo código. O acréscimo no tempo computacional pode ser considerado desprezível face as informações obtidas. A precisão dos resultados é considerada satisfatória, conforme analisado no estudo.

## 1. INTRODUÇÃO

A análise do comportamento de centrais nucleares é desenvolvida em várias etapas de cálculo. A fim de reter as características dos materiais e evitar danos a equipamentos e pessoal é fato conhecido que as limitações originam-se na termo-hidráulica, cuja análise representa uma das etapas de cálculo.

Os modelos matemáticos adotados na análise termo-hidráulica geralmente apoiam-se no cálculo de subcanais resultando numa formulação tridimensional que representa o canal de escoamento em estudo. Assim, é importante diferenciar os conceitos de canal e subcanal.

Neste trabalho, o canal é constituído pelo volume dentro do contorno do modelo, composto por áreas de escoamento e restrições ao fluxo. Subcanal é uma divisão existente dentro do canal, composto pela superposição de volumes de controle onde são calculados os balanços de massa, energia e quantidade de movimento.

O melhor modelo para o cálculo termo-hidráulico de um reator nuclear é o modelo de núcleo inteiro, onde cada subcanal é representado por quatro barras combustíveis, constituindo-se na própria região de escoamento do fluido, existindo assim, uma analogia perfeita entre o modelo e o núcleo. Entretanto, este modelo do ponto de vista computacional torna-se impraticável face ao elevado número de subcanais e de barras combustíveis. Como o projeto de um núcleo de reator obedece, geralmente, a uma certa simetria, uma análise mais simples pode ser considerada como representativa de todo o núcleo.

Este trabalho visa apresentar as modificações introduzidas no código COBRA-IIIP[1] permitindo realizar a análise termo-hidráulica do canal decompondo-o em etapas sucessivas de cálculo, como mostrado na figura 1. Isto é possível pela inclusão da capacidade de cálculo com fronteira lateral aberta[2] que permite obter, naturalmente, a região quente do canal estudado.

O método de fronteira lateral aberta foi introduzido no código COBRA-IIIP gerando uma nova versão denominada código CB3PMF[2]. As modificações foram incluídas no código COBRA-IIIP porque este

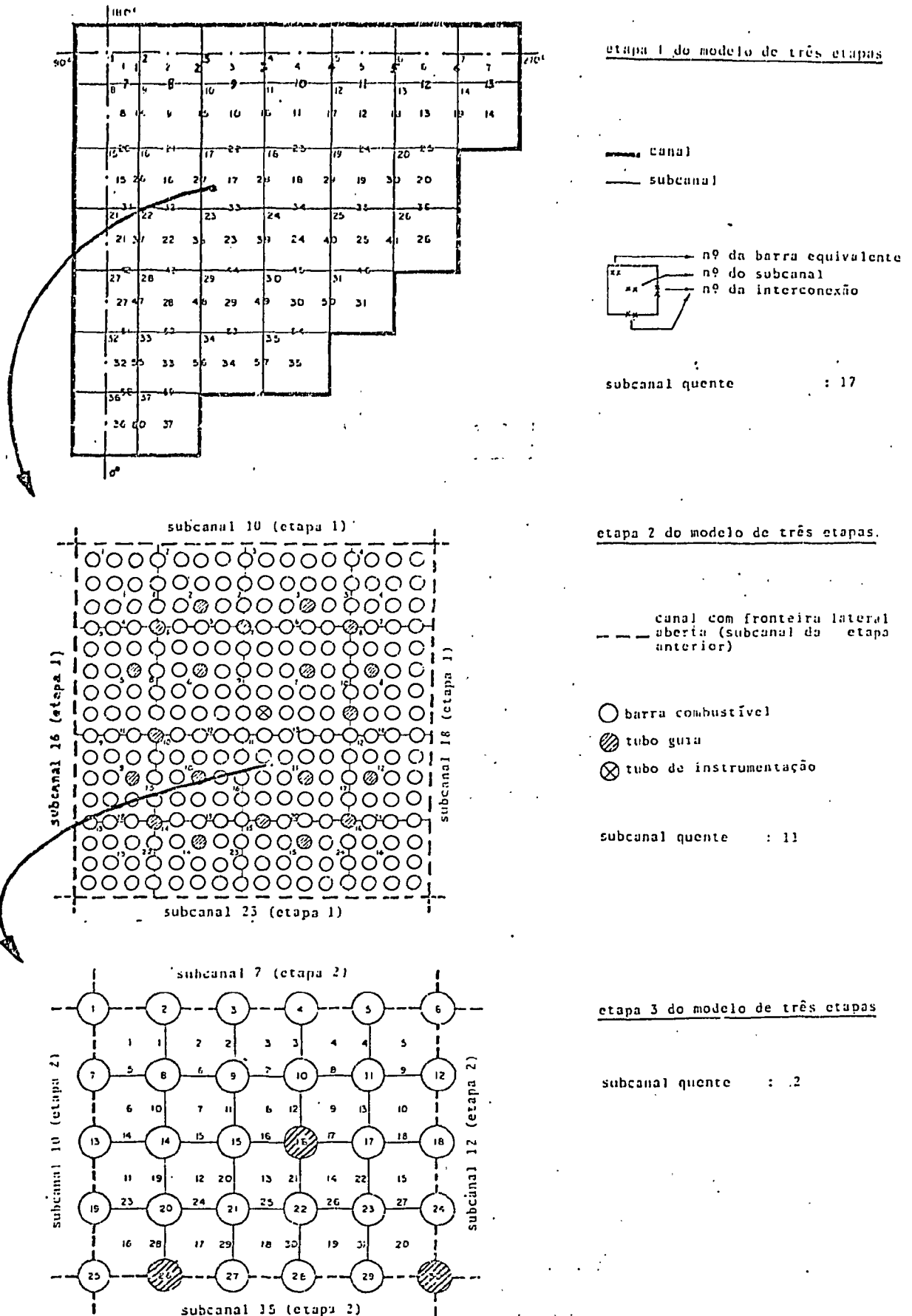


Figura 1: Modelo para cálculo com fronteira lateral aberta.

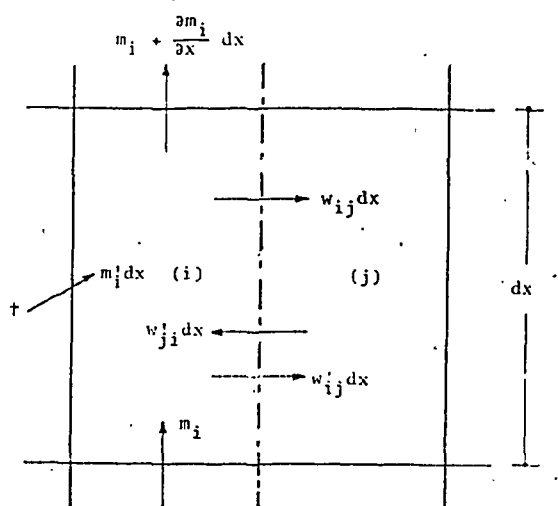
possui técnicas numéricas eficientes para resolver o conjunto de equações de conservação usadas originalmente no código COBRA-IIIC[3]. Além disso, o código resolve o campo de pressões a partir de estimativas dos campos de entalpias e vazões e possui capacidade para solucionar problemas maiores e mais complexos.

## 2. MODELO ANALÍTICO DO CÓDIGO CB3PMF

O modelo analítico apresentado neste trabalho apoia-se no modelo do código COBRA-IIIP[1] incluindo em suas equações de conservação as parcelas relativas ao cálculo com fronteira lateral aberta [2]. Assim, usando-se a metodologia COBRA, o volume de controle consiste em um segmento de subcanal (i) conectado a um ou mais subcanais (j), todos pertencentes ao mesmo canal de escoamento. Este canal por sua vez, quando a opção de cálculo com fronteira lateral aberta é considerada, representa o subcanal (I) da etapa de cálculo anterior que também conectava-se a subcanais (J).

### 2.1 - Equação de conservação de massa

Aplicando o princípio de conservação de massa ao volume de controle da figura 2 com as parcelas relativas ao escoamento transverso e ao cálculo com fronteira lateral aberta conforme descrito na referência[2],



† parcela referente ao cálculo com fronteira lateral aberta.

Figura 2 : Volume de controle para a equação de conservação de massa.

obtém-se o seguinte balanço de massa:

$$A_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial m_i}{\partial x} = - \sum_{j=1}^N w_{ij} + m'_i \quad (1)$$

onde  $t$  é o tempo,  $x$  é o comprimento axial,  $A$  é a área de escoamento,  $\rho$  é a massa volumétrica,  $m$  é a vazão mássica na direção axial,  $w$  é o escoamento transverso de dispersão por unidade de comprimento,  $m'$  é a vazão mássica por unidade de comprimento na fronteira lateral aberta,  $N$  é o número de subcanais ( $j$ ) adjacentes ao subcanal ( $i$ ) em estudo e  $w'$  é o escoamento transverso turbulento por unidade de comprimento.

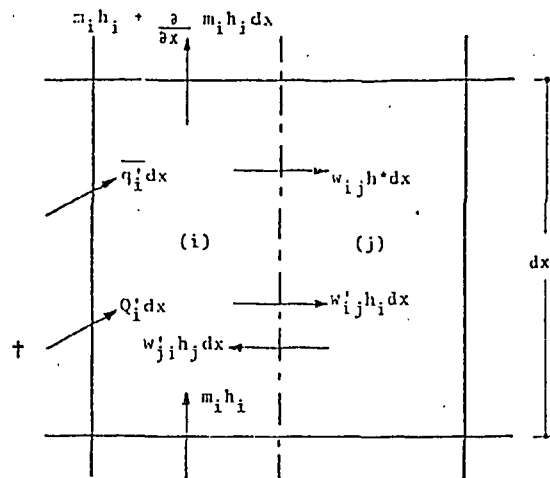
O lado esquerdo da equação (1) representa respectivamente, a taxa de variação da massa volumétrica do fluido no subcanal ( $i$ ) por unidade de comprimento causada pela expansão ou contração do fluido, e a taxa de variação da vazão mássica do subcanal ( $i$ ) por unidade de comprimento na direção axial. O lado direito desta equação representa respectivamente, a taxa efetiva de variação de vazão do subcanal ( $i$ ) em termos do escoamento transverso de dispersão entrando ou saindo no subcanal ( $i$ ), e a fração de massa recebida ou cedida pelo subcanal ( $i$ ) que está na fronteira entre os subcanais ( $I$ ) e ( $J$ ) da etapa de cálculo anterior.

## 2.2 - Equação de conservação de energia

Considerando o princípio de conservação de energia ao volume de controle da figura 3, com as parcelas relativas ao escoamento transverso e ao cálculo com fronteira lateral aberta como apresentado na referência[2], obtém-se o seguinte balanço de energia:

$$\frac{1}{u'_i} \frac{\partial h_i}{\partial t} + \frac{\partial h_i}{\partial x} = \frac{q'_i}{m_i} - \sum_{j=1}^N (T_i - T_j) \frac{C'_i}{m_i} + \sum_{j=1}^N (h_j - h_i) \frac{w'_{ij}}{m_i} + \sum_{j=1}^N (h_i - h^*) \frac{w_{ij}}{m_i} + \frac{Q'_i}{m_i} - h_i \frac{m'_i}{m_i} \quad (2)$$

onde  $u''$  é a velocidade efetiva para transporte de entalpia,  $h$  é a entalpia do fluido,  $q'$  é a taxa linear de transferência de calor na superfície do combustível,  $T$  é a temperatura do fluido,  $C'$  é o coeficiente de condução térmica,  $h^*$  é a entalpia do escoamento transversal de dispersão,  $Q'$  é o fluxo de calor linear na fronteira lateral e  $\bar{q}'$  é a densidade linear média de potência adicionada ao subcanal.



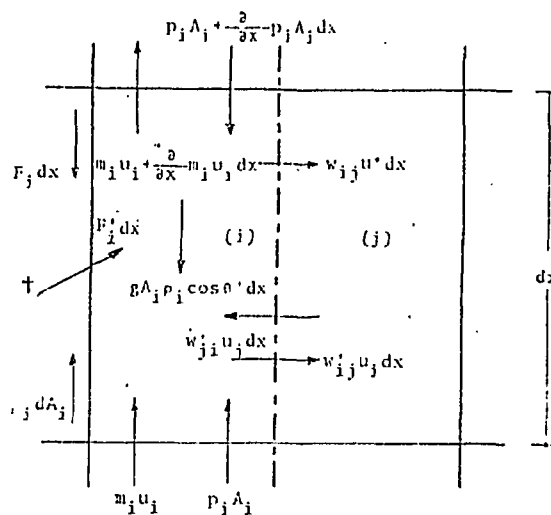
† parcela referente ao cálculo com fronteira lateral aberta.

Figura 3 : Volume de controle para a equação de conservação de energia.

O lado esquerdo da equação (2) descreve a contribuição transiente para a taxa de variação da entalpia no subcanal (i) isto é, a taxa de acumulação de energia cinética, e a taxa de acumulação de energia interna. O primeiro termo do lado direito representa a taxa de variação de entalpia se não existe mistura térmica; o segundo termo, é a taxa de calor retirado por condução térmica na mistura; o terceiro e quarto termos representam, respectivamente, as taxas de entalpia transportada pela mistura turbulenta e pelo escoamento transversal de dispersão. Os dois termos finais nesta equação mostram as parcelas referentes ao cálculo com fronteira lateral aberta indicando, respectivamente, a fração de energia e a fração do transporte de entalpia, cedida ou recebida pelo subcanal (i) que está na fronteira entre os subcanais (I) e (J) da etapa de cálculo anterior.

### 2.3 - Equação de conservação da quantidade de movimento

Aplicando o conceito da conservação da quantidade de movimento ao volume de controle da figura 4, com as parcelas referentes ao escoamento transverso e ao cálculo com fronteira lateral aberta como desenvolvido na referência[2],



† parcela referente ao cálculo com fronteira lateral aberta.

Figura 4 : Volume de controle para a equação de conservação da quantidade de movimento.

obtem-se o seguinte balanço de quantidade de movimento:

$$\frac{1}{A_i} \frac{\partial m_i}{\partial t} - 2u_i \frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \frac{\partial p_i}{\partial x} = - \left(\frac{m_i}{A_i}\right)^2 \left[ a_i' + A_i \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v_i'}{A_i} \right) \right] -$$

$$- g \rho_i \cos \theta' - f_T \sum_{j=1}^N (u_i - u_j) \frac{w_{ij}}{A_i} + \sum_{j=1}^N (2u_i - u^*) \frac{w_{ij}}{A_i} + \frac{F_i}{A_i} -$$

$$- 2u_i \frac{m_i}{A_i} \quad (3)$$

onde  $u$  é a velocidade efetiva para a quantidade de movimento,  $p$  é a pressão do fluido,  $a'$  é o coeficiente de perda de pressão por fricção

e forma,  $v'$  é o volume mássico efetivo para a quantidade de movimento,  $g$  é a aceleração da gravidade,  $\theta'$  é o ângulo de orientação do canal de escoamento em relação à vertical,  $f_T$  é o fator da quantidade de movimento turbulento,  $u^*$  é a velocidade do escoamento transverso de dispersão,  $F'$  é a força por unidade de comprimento na fronteira lateral aberta e  $F$  é a força por unidade de comprimento devida ao atrito do fluido com as paredes e grades espaçadoras.

Os dois primeiros termos do lado esquerdo da equação (3) representam a componente transiente do gradiente de pressão axial no subcanal (i), e o terceiro termo é o gradiente axial no subcanal (i). Os três primeiros termos do lado direito da equação (3) descrevem respectivamente, a perda de pressão por atrito e forma, o gradiente de pressão devido a aceleração do fluido e o gradiente de pressão gravitacional no subcanal (i). O quarto termo indica o transporte da quantidade de movimento turbulento devido à mistura entre os subcanais (i) e (j); o quinto termo é o transporte da quantidade de movimento devido ao escoamento transverso de dispersão entre os subcanais (i) e (j). Os dois últimos termos do lado direito representam respectivamente, a fração da quantidade de movimento e o transporte da quantidade de movimento devido a fração de massa, cedida ou recebida pelo subcanal (i) que está na fronteira entre os subcanais (I) e (J) da etapa de cálculo anterior.

#### 2.4 - Equação de conservação da quantidade de movimento transversa

Esta equação manteve-se inalterada em relação a versão original do código[1-3].

### 3. DETERMINAÇÃO DOS TERMOS PARA O CÁLCULO COM FRONTEIRA LATERAL ABERTA

A avaliação dos termos para cálculo com fronteira lateral aberta[2] é possível somente a partir da segunda etapa de cálculo que visa o detalhamento dos resultados obtidos na etapa precedente. Assim, desejando-se analisar uma região específica de um canal, considera-se esta região, agora, como um canal, trazendo os resultados das fronteiras conforme obtidos na etapa anterior do estudo. É importante considerar que ao transformar o subcanal da etapa anterior em canal da nova etapa, deve-se considerar uma distribuição adequada



dos valores de massa, energia e quantidade de movimento da fronteira para todos os subcanais da nova fronteira.

### 3.1 - Vazão mássica por unidade de comprimento na fronteira lateral (m')

O valor deste termo é obtido atribuindo-se ao subcanal (i) uma fração do escoamento transversal de dispersão existente entre os subcanais (I) e (J) da etapa de cálculo precedente; assim:

$$m_i' = - w_{IJ} \cdot \frac{s_i}{s_{IJ}} \quad (4)$$

onde  $s_i$  é o espaçamento do subcanal de fronteira (i) pertencente ao subcanal (I) da etapa de cálculo anterior; e  $s_{IJ}$  é o espaçamento existente entre os subcanais (I) e (J) na etapa de cálculo anterior.

### 3.2 - Fluxo de calor linear na fronteira lateral (Q')

Este termo é obtido pela fração da energia transferida pelos escoamentos transversos de dispersão e turbulento e por condução térmica, existentes entre os subcanais (I) e (J) da etapa de cálculo precedente, ou seja:

$$Q_i' = - [h_I^* w_{IJ} + (h_I - h_J) w'_{IJ} + (T_I - T_J) C'_{IJ}] \frac{s_i}{s_{IJ}} \quad (5)$$

### 3.3 - Força por unidade de comprimento na fronteira lateral (F')

A avaliação deste termo é dada pela fração da quantidade de movimento transferida pelos escoamentos transversos de dispersão e turbulento, existentes entre os subcanais (I) e (J) da etapa de cálculo anterior, assim:

$$F_i' = - [u_I^* w_{IJ} + f_T (u_I - u_J) w'_{IJ}] \frac{s_i}{s_{IJ}} \quad (6)$$

## 4. VERIFICAÇÃO DA VALIDADE DO MÉTODO DE FRONTEIRA LATERAL ALBERTA

A fim de avaliar a validade do método utilizando fronteira

lateral aberta para análise termo-hidráulica de núcleos de reatores à água leve pressurizada, utilizou-se dados do reator Angra I[4].

O modelo computacional aqui adotado, denominado modelo de três etapas, é o mesmo apresentado na figura 1. Assim, o canal da primeira etapa representa 1/4 do núcleo do reator Angra I e seus subcanais indicam os elementos combustíveis. O subcanal quente desta primeira etapa é o canal da segunda etapa que tem seus subcanais representados conforme indicado também na figura 1. Raciocínio análogo é feito ao passar da segunda para a terceira etapa.

A validade do método de fronteira lateral aberta pode ser visualizada pura e simplesmente pelos resultados obtidos em cada uma das etapas. Assim, os resultados obtidos para o subcanal estudado em uma das três etapas têm que ser idênticos aos resultados médios do canal da etapa seguinte, se um estudo detalhado for feito para o citado subcanal.

Os resultados obtidos nesta análise, pelo código CB3PMF, para as três etapas de cálculo podem ser vistos nas tabelas 1 à 4.

Como exemplo, as informações obtidas (tabela 1) para o subcanal quente, nº 17, da primeira etapa de cálculo têm que ser iguais aos resultados médios do canal (tabela 2) da segunda etapa de cálculo, que é um estudo detalhado do subcanal nº17 da primeira etapa, como mostrado na figura 1.

Pode-se verificar desses resultados que o erro máximo encontrado, entre as etapas de cálculo, para as diferenças entre os valores de saída e de entrada do canal e subcanal é da ordem de  $\pm 0,50\%$ . Verifica-se portanto, que o método de fronteira lateral aberta é válido como uma ferramenta de cálculo na análise termo-hidráulica de núcleos de reatores tipo água pressurizada.

## 5. CONCLUSÕES

O cálculo com fronteira lateral aberta permite manter em etapas de cálculo mais detalhadas, a influência das regiões externas do canal em estudo através das frações de massa, energia e quantidade de movimento que são trocadas lateralmente entre o canal

Distância (m)	Perda de pressão (bar)	Entalpia (KJ/kg)	Temperatura (°C)	Massa volumétrica (Kg/m³)	Vazão mássica (Kg/s)	Fluxo mássico (Kg/sm²)
0,00	1,60	1.276,51	287,50	736,21	68,50	3.303,64
0,39	1,45	1.284,10	288,92	733,65	70,95	3.421,77
0,77	1,27	1.303,85	292,56	726,44	72,13	3.559,02
1,16	1,19	1.333,66	297,97	715,70	72,72	3.588,17
1,54	1,01	1.370,14	304,45	702,25	72,79	3.591,43
1,93	0,82	1.409,63	311,26	687,19	72,62	3.583,02
2,31	0,64	1.448,20	317,68	671,97	72,41	3.572,85
2,69	0,55	1.481,88	323,10	658,20	72,17	3.561,19
3,08	0,36	1.506,93	327,01	647,47	71,96	3.550,47
3,46	0,17	1.520,51	329,08	641,54	71,86	3.545,59
3,85	0,00	1.522,63	329,40	640,74	71,85	3.545,05

Tabela 1 - Resultados para o subcanal quente, nº 17, da primeira etapa de cálculo.

Distância (m)	Perda de pressão (bar)	Entalpia (KJ/kg)	Temperatura (°C)	Massa volumétrica (Kg/m³)	Vazão mássica (Kg/s)	Fluxo mássico (Kg/s)
0,00	1,60	1.276,51	287,50	736,21	68,50	3.303,64
0,39	1,45	1.284,10	288,92	733,65	70,95	3.421,77
0,77	1,27	1.303,82	292,56	726,44	72,13	3.559,15
1,16	1,19	1.333,64	297,97	715,70	72,72	3.588,31
1,54	1,01	1.370,09	304,44	702,25	72,79	3.591,70
1,93	0,82	1.409,56	311,24	687,19	72,62	3.583,16
2,31	0,64	1.448,15	317,67	671,97	72,41	3.572,98
2,69	0,55	1.481,79	323,08	658,20	72,18	3.561,32
3,08	0,36	1.506,84	326,99	647,47	71,96	3.550,61
3,46	0,17	1.520,42	329,06	641,70	71,86	3.545,59
3,85	0,00	1.522,56	329,38	640,74	71,85	3.545,18

Tabela 2 - Resultados médios para o canal da segunda etapa de cálculo.

Distância (m)	Perda de pressão (bar)	Entalpia (KJ/Kg)	Temperatura (°C)	Massa volumétrica (Kg/m³)	Vazão mássica (Kg/s)	Fluxo mássico (Kg/sm²)
0,00	1,60	1.276,51	287,50	736,21	5,24	3.303,64
0,39	1,45	1.284,66	289,02	733,32	5,36	3.380,26
0,77	1,27	1.305,68	292,89	725,80	5,45	3.527,28
1,16	1,19	1.337,25	298,61	714,26	5,48	3.543,69
1,54	1,01	1.375,51	305,38	700,17	5,49	3.554,54
1,93	0,82	1.416,68	312,44	684,47	5,49	3.551,83
2,31	0,64	1.456,69	319,07	668,61	5,48	3.546,13
2,69	0,55	1.491,16	324,56	654,35	5,44	3.519,96
3,08	0,36	1.516,28	328,43	643,46	5,43	3.514,94
3,46	0,17	1.529,07	330,37	637,85	5,44	3.517,65
3,85	0,00	1.529,75	330,47	637,53	5,44	3.518,06

Tabela 3 - Resultados para o subcanal quente, nº 11, da segunda etapa de cálculo.

Distância (m)	Perda de pressão (bar)	Entalpia (KJ/Kg)	Temperatura (°C)	Massa volumétrica (Kg/m³)	Vazão mássica (Kg/s)	Fluxo mássico (Kg/sm²)
0,00	1,59	1.276,51	287,50	736,21	5,24	3.303,64
0,39	1,44	1.284,66	289,02	733,32	5,36	3.380,26
0,77	1,27	1.305,73	292,90	725,80	5,45	3.527,14
1,16	1,19	1.337,34	298,63	714,26	5,48	3.543,55
1,54	1,00	1.375,72	305,42	700,17	5,49	3.554,54
1,93	0,82	1.417,03	312,51	684,31	5,49	3.551,69
2,31	0,63	1.457,18	319,15	668,45	5,48	3.546,00
2,69	0,55	1.491,86	324,67	654,03	5,44	3.519,82
3,08	0,36	1.517,16	328,57	643,14	5,43	3.514,94
3,46	0,17	1.530,14	330,53	637,37	5,44	3.517,51
3,85	0,00	1.530,91	330,64	637,05	5,44	3.518,06

Tabela 4 - Resultados médios para o canal da terceira etapa de cálculo.

analisado e seus vizinhos da etapa anterior.

A condição de fronteira lateral aberta acrescenta à face externa do modelo físico do canal analisado características importantes que os modelos computacionais identificam somente a nível de subcanais, tais como gradientes radiais de pressão, turbulência do fluxo e dispersão do fluido devida às grades espaçadoras, permitindo, assim, reter as características de mistura que existiam entre o canal analisado e seus vizinhos da etapa anterior. Estas características existem sempre a nível de subcanais de uma mesma etapa.

O método de fronteira lateral aberta permite maior flexibilidade no emprego de coeficientes e correlações utilizadas pelo código face a maior semelhança geométrica entre subcanais de uma mesma etapa de cálculo. Conforme discutido na referência[2], a execução do modelo de três etapas necessitou 71,69 s de CPU, ao passo que este mesmo modelo executado sem a opção de fronteira lateral aberta, e assim, perdendo todas as informações externas ao canal, gastou 54,80 s de CPU. A análise em uma única fase, constituída pela superposição das três etapas apresentadas na figura 1, requereu 78,45 s de CPU. Verifica-se então, que o acréscimo no tempo computacional pode ser considerado desprezível face às informações obtidas e ao baixo tempo de CPU necessário para execução do código. A precisão dos resultados é bastante satisfatória, como visto no item anterior.

Conclui-se que o método de fronteira lateral aberta é válido, bastante confiável e bem aplicável à análise termo-hidráulica em estado estacionário. Este método pode ser considerado de grande valia na fase de projeto de núcleo, pois utilizando-se do processo de detalhar as regiões quentes e de interesse em várias etapas de cálculo, pode-se obter, naturalmente, o subcanal quente representado por quatro barras combustíveis.

O método de fronteira lateral aberta foi adicionado, opcionalmente, no código COBRA-IIIP[1] gerando a nova versão denominada código CB3PMF[2].

BIBLIOGRAFIA

- [1] MASTERSON, R. E., "Improved Multidimensional Numerical Methods for the Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Fuel Pin Bundles and Nuclear Reactor Cores" D.Sc. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, 1977.
- [2] BORGES, R. C., "Análise Termo-Hidráulica de Reatores Tipo PWR Utilizando o Método de Fronteira Lateral Aberta", Tese de Mestrado, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 1980.
- [3] ROWE, D. S., "COBRA-IIIC : A Digital Computer Program for Steady State and Transient Thermal-Hydraulic Analysis of Rod Bundle Nuclear Fuel Elements", BNWL - 1695, 1973.
- [4] "Final Safety Analysis Report - Angra I", Furnas Centrais Elétricas S.A., Rio de Janeiro, 1976.