

METODOLOGIA DE ANÁLISE PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS ASSOCIADOS A FEIXES TUBULARES CARACTERÍSTICOS DE UNIDADES GERADORAS DE VAPOR

Antonio Carlos Ribeiro Nogueira

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
88.040-970 – Florianópolis - SC
nogueira@emc.ufsc.br

Edson Bazzo

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
88.040-970 – Florianópolis - SC
ebazzo@emc.ufsc.br

Luis Omar Suescún Armesto

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
88.040-970 – Florianópolis - SC
omar@labcet.ufsc.br

Luiz Felipe

Tractebel Energia S/A
Capivari de Baixo - SC
lfelippe@tractebelenergia.com.br

Resumo: O modelamento numérico de unidades geradoras de vapor requer atenção especial na definição do domínio computacional de interesse, que efetivamente resolva o problema de combustão, escoamento e transferência de calor, considerando tempo e capacidade de armazenamento compatíveis com os recursos computacionais disponíveis. Este trabalho propõe uma metodologia para análise do problema de transferência de calor nos feixes tubulares para o lado dos gases, especificamente para o superaquecedor final de uma unidade existente, com a expectativa de resolver problemas complexos relacionados com os espaçamentos longitudinal e transversal, bem como para as definições dos domínios e sub-domínios a serem utilizados para regimes de carga típicos de unidades geradoras de vapor. O artigo também contempla um estudo de malha para definir um tamanho que minimize o número de volumes utilizados para a discretização, decorrente das diferenças de escala geométrica entre tubos e áreas de escoamento dos gases. Diante dos resultados obtidos, considera-se que o método atende a expectativa inicial para o domínio e sub-domínios selecionados, considerando malhas de formato hexaédrica como a melhor opção tendo em vista número de elementos e tempo computacional.

Palavras Chaves: *Geração Termelétrica, Unidade Geradora de Vapor, Superaquecedor Final, Feixes Tubulares*

1. Introdução

A geração termelétrica a carvão sempre ocupou uma posição de destaque na matriz energética nacional, garantindo disponibilidade de energia elétrica nos momentos de crise. Entretanto, tendo-se em vista a idade avançada do parque gerador atual, tem havido ocorrências frequentes de indisponibilidades causadas por problemas associados a gradientes térmicos na câmara de combustão e superaquecedores das unidades geradoras de vapor.

A possibilidade real de ocorrência de novos blecautes exigem uma intervenção firme do Governo no sentido de se estimular a produção de energia elétrica e aumento da margem de segurança, no que tange a capacidade do sistema elétrico brasileiro. A necessidade de instalação de novas usinas termoeletricas ampliando a matriz energética do País é premente. A otimização do uso dos recursos de geração disponíveis se impõe pelos benefícios que é capaz de produzir, tanto para os agentes setoriais como para o conjunto dos consumidores. A execução de diagnósticos regulares tem atendido necessidades tanto da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) quanto do ONS (Operador Nacional do Sistema), ao identificar as não conformidades, avaliar conseqüências e determinar medidas corretivas a serem implantadas pela empresa autorizada do serviço de geração. Como resultado destes trabalhos de campo, problemas diversos têm sido identificados, requerendo soluções de médio ou de longo prazo, os quais precisam receber atenção de pessoal especializado.

Os custos de produção, diretamente vinculados aos níveis de rendimentos atingidos, se refletem na capacidade de oferecer energia a custos vantajosos, tanto para a população em geral, como para a empresa geradora. Neste caso a competitividade das empresas é altamente bem vinda tanto do ponto de vista social, como também no sentido de mantê-la atualizada tecnologicamente e rentável.

Empresas geradoras vêm dedicando especial atenção à solução dos problemas de manutenção, buscando trabalhar com suas unidades em condições de operação próximas à plena carga e garantir uma maior disponibilidade da planta. Para tanto, esforços têm sido concentrados na investigação e solução dos problemas de falhas em caldeiras, com o intuito de prolongar a sua vida útil e minimizar a frequência de paralisações de unidades geradoras, assegurando a oferta de energia elétrica. Graças à parceria estabelecida entre a UFSC e a Tractebel Energia S/A via Projetos de Pesquisa & Desenvolvimento, informações importantes têm sido obtidas com relação ao escoamento de gases, condições de operação, quantidade e disposição de queimadores ativos, regiões de recirculação e condições globais de operação de unidades geradoras de vapor do complexo Jorge Lacerda, Reinaldo (2004). Estudo de gradientes térmicos transversais nos tubos dos painéis do superaquecedor final, visando minimizar problemas relacionados com o aparecimento freqüente de trincas na parede dos tubos, também tem sido objeto de estudo graças a esta parceria Nogueira *et al.* (2003). No caso específico da Usina Jorge Lacerda, estes componentes são responsáveis por grande parte das paradas forçadas da unidade geradora. Este artigo é focado nos resultados parciais obtidos com a simulação numérica do escoamento ao longo do superaquecedor final da unidade VI da UTL-B, em uma condição de operação típica.

2. Caracterização do problema

Na Figura 1 são apresentados os componentes principais da unidade geradora de vapor em análise. No presente trabalho, o componente de interesse é o superaquecedor final, localizado na parte superior da câmara de combustão.

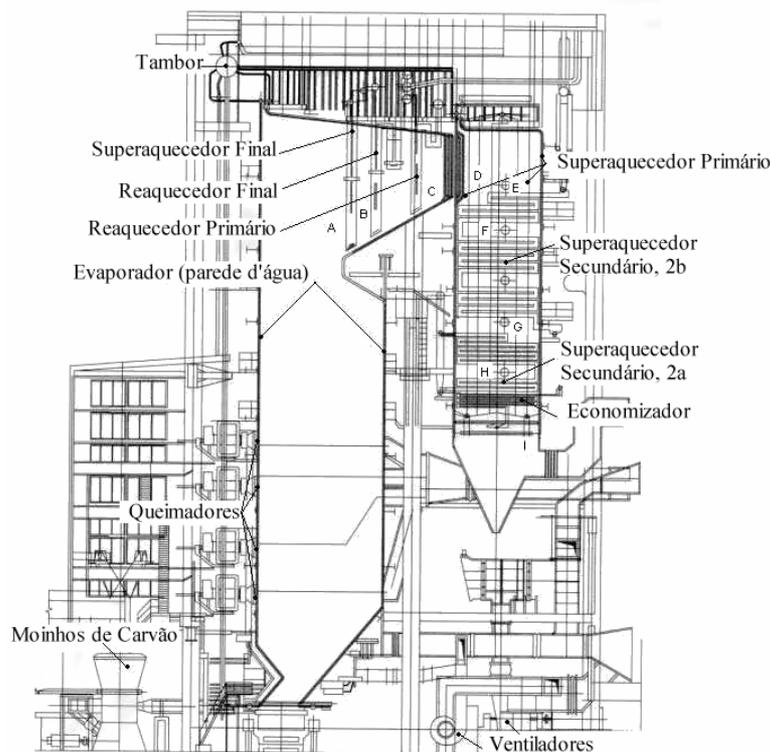


Figura 1 – Unidade geradora de vapor e seus componentes principais

Na Figura 2 é apresentada a região superior da caldeira, mostrando a posição do superaquecedor final e reaquecedor de vapor. Por extensão, de acordo com a Figura 3, pode-se observar detalhes relacionados com a geometria, diâmetro externo dos tubos, altura do feixe, espaçamento longitudinal e espaçamento transversal, bem como a localização dos coletores de entrada e saída do vapor superaquecido. O superaquecedor final é composto por 40 painéis, com 7 tubos por painel. Detalhes do conjunto de painéis podem ser observados na fotografia da Figura 4.

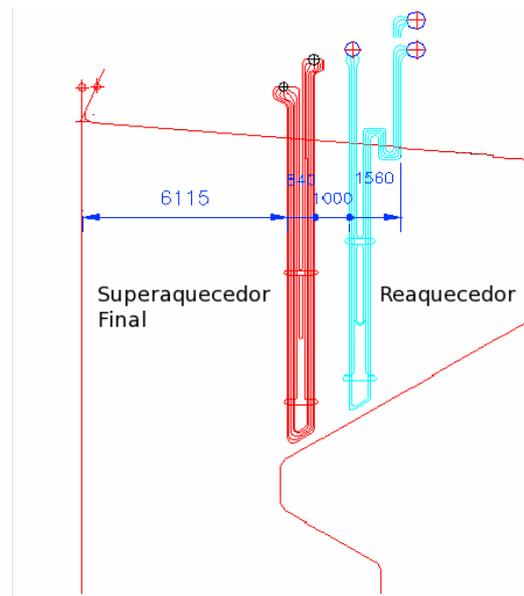


Figura 2 – Região do superaquecedor final e reaquecedor

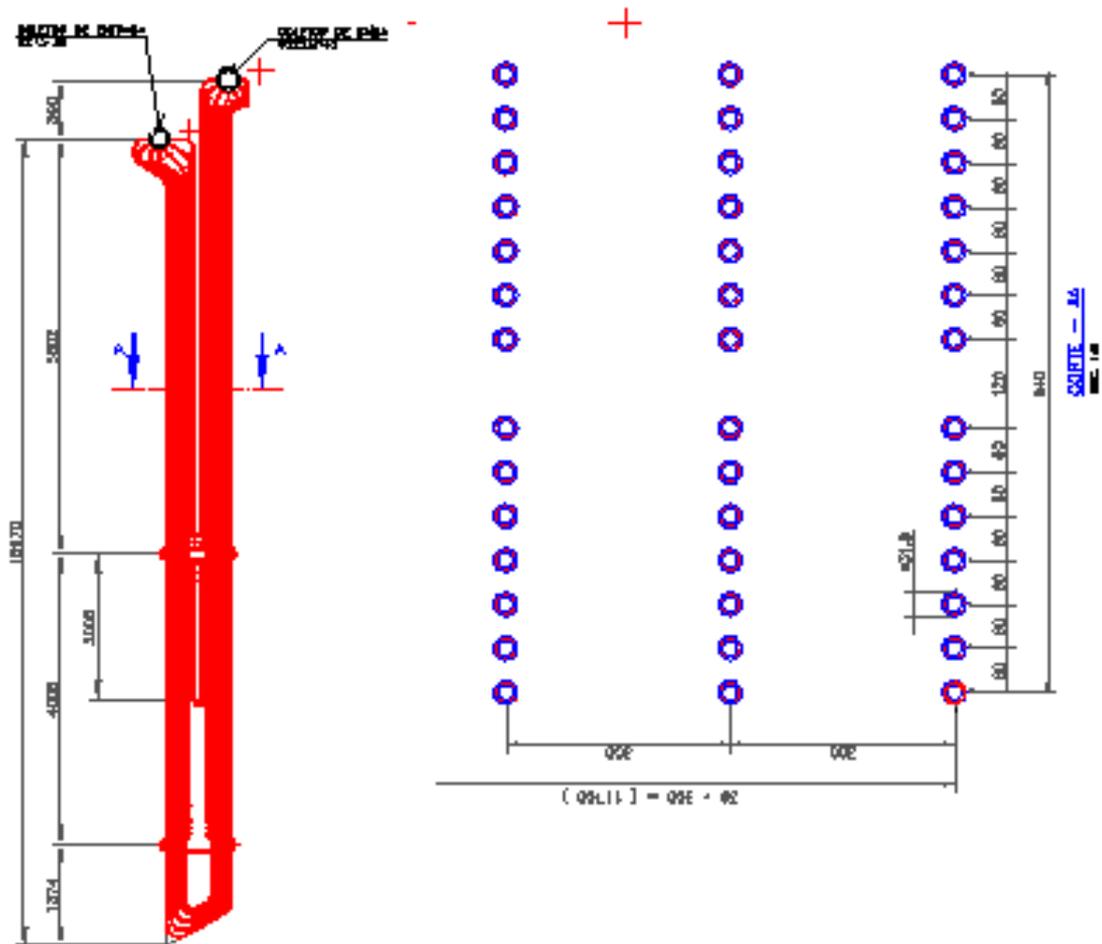


Figura 3 – Espaçamentos longitudinal e transversal dos painéis do superaquecedor final

Com o objetivo de se analisar o grau de influência que os espaçamentos longitudinal e transversal exercem sobre o gradiente transversal de temperatura nos tubos do superaquecedor final, é feita uma simulação numérica do escoamento dos gases através daquela região, utilizando-se o algoritmo computacional ANSYS-CFX 10.0. A região de estudo definida para análise do escoamento se concentra entre a região de saída da câmara de combustão e de entrada do

reaquecedor de vapor. Será adotado como hipótese simplificativa que o superaquecedor seja constituído por tubos de mesmo comprimento, formando uma fileira de 14 tubos retilíneos na direção do escoamento, com os espaçamentos longitudinais e transversais mostrados na Fig. 3 e dimensão perpendicular ao plano do papel de 10 metros

3. Domínio computacional

Tendo-se em vista a enorme diferença de escala entre o diâmetro dos tubos do superaquecedor final ($\phi 31,8\text{mm}$) e a largura total da unidade geradora de vapor (12,0m), o domínio computacional total da geometria apresentada acima foi subdividido em sub-domínios computacionais, que resultassem em um número de células compatíveis com a capacidade de armazenamento e de processamento dos computadores disponíveis em laboratório.

A Figura 5 apresenta um subdomínio computacional utilizado no processo de simulação numérica. Ele é composto por um cubo de 1000 mm x 1200 mm x 1080 mm. Neste cubo pode-se observar 4 painéis constituídos por 14 tubos, representando uma fatia dos 7 tubos da configuração real, divididos em sua metade. O escoamento se dá da esquerda para a direita, orientado na direção dos painéis de tubos e no sentido das setas mostradas na Fig. 5

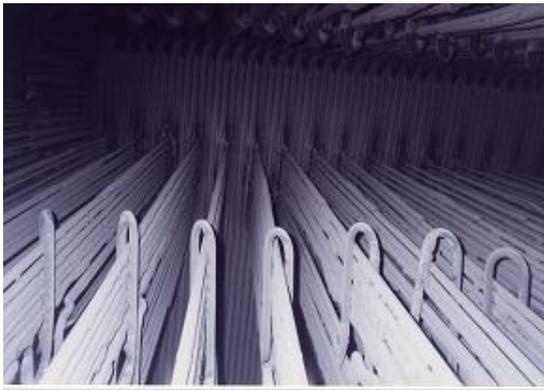


Figura 4 – Detalhes de montagem dos painéis do superaquecedor final

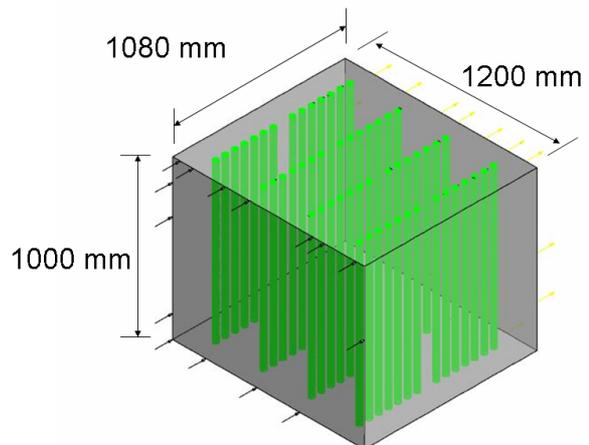


Figura 5 – Subdomínio computacional para solução numérica do problema associado ao superaquecedor final

4. Algoritmo numérico e equações governantes

O algoritmo numérico utilizado para tratamento do problema de CFD é o ANSYS-CFX 10.0. Este algoritmo traz embutido em seu código, o método dos volumes finitos desenvolvido por Patankar (1975), utilizado na discretização das equações de conservação da massa, quantidade de movimento linear e conservação da energia. Estão considerados ainda os diversos modelos matemáticos associados aos processos de turbulência e radiação.

Dois modelos de transferência de calor por radiação tem sido consideradas na simulação numérica, quais sejam o método de Monte Carlo e o Método de Ordenada Discreta. O método de Monte-Carlo é um método estatístico que determina o comportamento de um sistema através de uma amostragem de eventos (Sigel e Howell, 1972). Na sua forma mais simples, o método consiste em simular um número finito de trajetórias de fótons (pacotes de energia), através da utilização de um gerador de números aleatórios. Para cada fóton, números aleatórios são gerados e utilizados para fornecer distribuições de probabilidades apropriadas. Para um problema em regime permanente, cada trajetória é iniciada através da atribuição de valores de energia, posição e direção para cada fóton. Após esta etapa, o caminho livre no qual o fóton se propaga é determinado. Os coeficientes de absorção e espalhamento são escolhidos aleatoriamente e a partir daí é definido se o fóton é absorvido ou espalhado. Se ele for absorvido, sua trajetória é finalizada. Por outro lado, se ele for espalhado, uma distribuição de ângulos de espalhamento é determinada aleatoriamente e uma nova direção é atribuída ao fóton. A sua trajetória é dessa forma continuada até que ele alcance uma superfície de contorno. Este método fornece soluções que flutuam em torno de uma solução verdadeira, tornando-se mais fidedigno à medida que se aumenta o número de fótons. Por outro lado, o método de Ordenadas Discreta foi desenvolvido por Lockwood e Shah (1981), combinando características do método de Monte-Carlo, método de zonas e métodos de fluxos. O domínio é dividido em zonas (volumes de controle) para a radiação, e as direções de transmissão da radiação são especificadas. A equação da transferência de radiação (RTE) é discretizada nas zonas ao longo das direções representativas. Assim, contrariamente ao método de Monte-Carlo que escolhe as direções aleatoriamente, neste método elas são pré-fixadas. Em cada zona assume-se que as propriedades radiantes e a intensidade de radiação são uniformes. A transferência de radiação ao longo da zona é rastreada até atingir as fronteiras do domínio. Portanto, para que os resultados sejam precisos, as zonas devem ser escolhidas de modo que o campo de radiação seja homogêneo no interior das mesmas. Isto significa, por exemplo, que elas devem ser suficientemente pequenas para que a profundidade de espalhamento óptico

através de cada zona seja menor do que a unidade. Os modelos não cinzentos são efetuados tratando-se cada banda com um cálculo em separado. Isso é possível, uma vez que espalhamento e reflexão são assumidos coerentes. As trajetórias são calculadas uma única vez. O caminho dos raios são escolhidos para dar bons resultados para os fluxos pontuais em cada banda, sendo os resultados combinados para fornecer a transferência de calor radiativo total.

O algoritmo utilizado disponibiliza ainda o modelo de turbulência conhecido como SST (Shear Stress Transport) k-Omega (k- ω), uma vez que o modelo k- ϵ que é o modelo tradicionalmente usado em problemas simples de engenharia, não é apropriado para o caso em questão, pois pode apresentar erros significativos quando se tem escoamentos com superfícies curvas, descolamentos de camada limite e recirculações, como acontece na parte posterior dos tubos do superaquecedor final. O modelo SST k-Omega difere do k-Omega normal por levar em consideração o transporte de tensões de cisalhamento turbulento, característica que permite captar os fortes gradientes nas regiões próximas às paredes. O algoritmo computacional utiliza como condição de contorno de entrada uma intensidade média de turbulência de 5% e uma relação entre a viscosidade turbulenta e a viscosidade molecular igual à 10. Os valores para a energia cinética turbulenta, k e a dissipação da energia cinética turbulenta, ϵ , segundo Launder & Spalding (1973), podem ser obtidos das seguintes relações:

$$k = 1,5.V^2.I^2 \quad (1)$$

$$I = \frac{1}{2} \left(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2} \right) \quad (2)$$

$$\epsilon = \frac{C_\mu \cdot k^2}{\left(\frac{\mu_t}{\mu} \right) \cdot \nu} = \frac{C_\mu \cdot k^2}{10 \cdot \nu} \quad (3)$$

sendo I o valor estimado da intensidade turbulenta ($I = 0,05$), u' , v' e w' os componentes das flutuações macroscópicas de velocidade do escoamento turbulento, $\mu_t/\mu = 10$, C_μ uma constante empírica conhecida, V a velocidade média do ar no plano de entrada do superaquecedor final, μ_t a viscosidade turbulenta, μ a viscosidade absoluta e ν (μ/ρ) a viscosidade cinemática.

5. Metodologia adotada e condições de contorno

A técnica adotada consiste na resolução numérica, passo a passo, de cada sub-domínio, conforme mostrado na Fig. 5, considerando condições de contorno localmente parabólicas nas interfaces entre os sub-domínios e nas faces coincidentes com o plano de saída do superaquecedor. Nos subdomínios adjacentes às paredes laterais, paredes superior e inferior da região do superaquecedor final e reaquadadores, assume-se condição de contorno sólido sem escorregamento. Na entrada, a condição de contorno é prescrita, utilizando-se dados de velocidade e de temperatura previamente estabelecidos. O processo é iterativo, varrendo-se o domínio de parede a parede. Para tanto, os resultados correspondentes à face direita de um subdomínio tem que ser guardado para servir como condição de entrada para a face coincidente do subdomínio subsequente. Por outro lado, todos os resultados referentes às interfaces aos subdomínios adjacentes deverão ser armazenados para servirem de condição de entrada para os cálculos subsequentes.

Visando-se trabalhar com o menor número de células possível, simulações numéricas foram feitas para os dois tipos de malhas disponibilizados pelo código computacional, malha hexaédrica e malha tetraédrica (Fig 6), considerando-se condições de contorno localmente parabólicas nas interfaces entre os sub-domínios e na saída do superaquecedor.

Como condições de contorno, utilizou-se, preliminarmente, velocidade prescrita normal ao plano de entrada do superaquecedor final igual a 4,5 m/s e nula nas direções paralelas àquele plano. Nos contornos rígidos utilizou-se condição de não escorregamento. No planos das interfaces adjacentes a um volume subsequente utilizou-se a condição disponibilizada no código computacional e conhecida como "condição de saída", a qual corresponde à condição de contorno localmente parabólica.

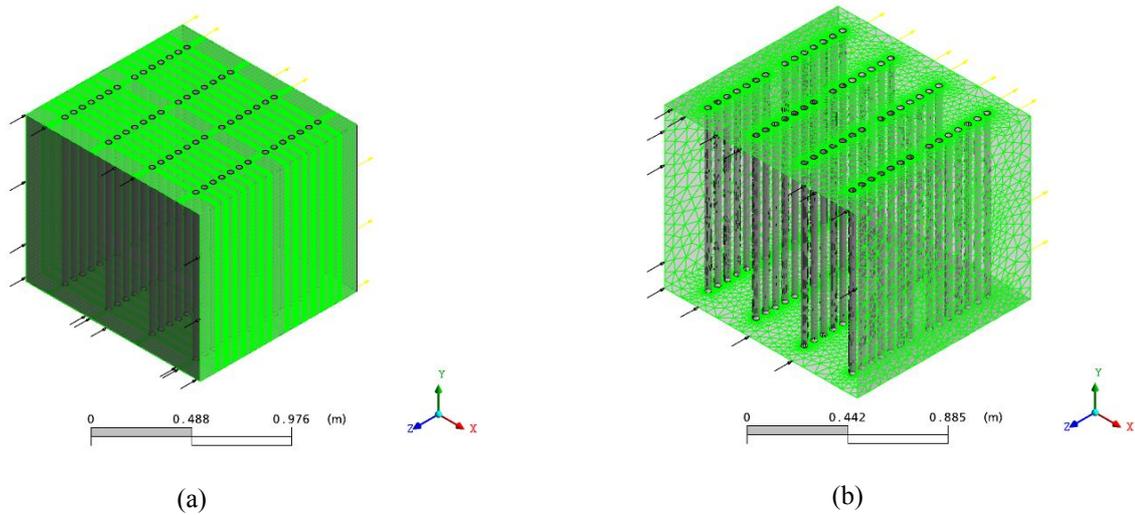


Figura 6– Configuração das malhas hexaédrica e tetraédrica para o subdomínio computacional.

5.2. Dimensões da malha

A malha hexaédrica foi inicialmente definida com tamanho máximo de 25 mm. Por seu lado, a malha tetraédrica foi gerada com tamanho global máximo de 100 mm, sendo que na vizinhança dos tubos o seu tamanho foi reduzido para 10 mm. Na geração da malha tetraédrica, o algoritmo faz o ajuste automático dos tamanhos dos volumes. No refinamento da malha tetraédrica na vizinhança dos tubos, utilizou-se 4 camadas de prismas, iniciando-se com um valor de 2 mm. A taxa de crescimento dos volumes foi de 1.2, conforme mostrado na Figura 7, a qual apresenta 4 tubos na vista superior do subdomínio. A malha hexaédrica junto aos tubos foi definida com 7 mm na direção circunferencial, espaçadas com 3 mm na direção radial, num total de 4 camadas externas de elementos, como pode ser observado na Fig. 7(a). Pode-se observar uma grande diferença no número de elementos para cada tipo de malha. Para as malhas hexaédricas, a quantidade de elementos resultantes para a malha hexaédrica resultou em torno de 554.561 elementos, enquanto que para a malha tetraédrica a quantidade subiu para 1.977.189 elementos. Tendo-se em vista o menor número de elementos resultantes para a malha hexaédrica, optou-se trabalhar com este tipo de malha, o que representa uma redução significativa no tempo computacional da solução numérica correspondente ao domínio computacional como um todo.

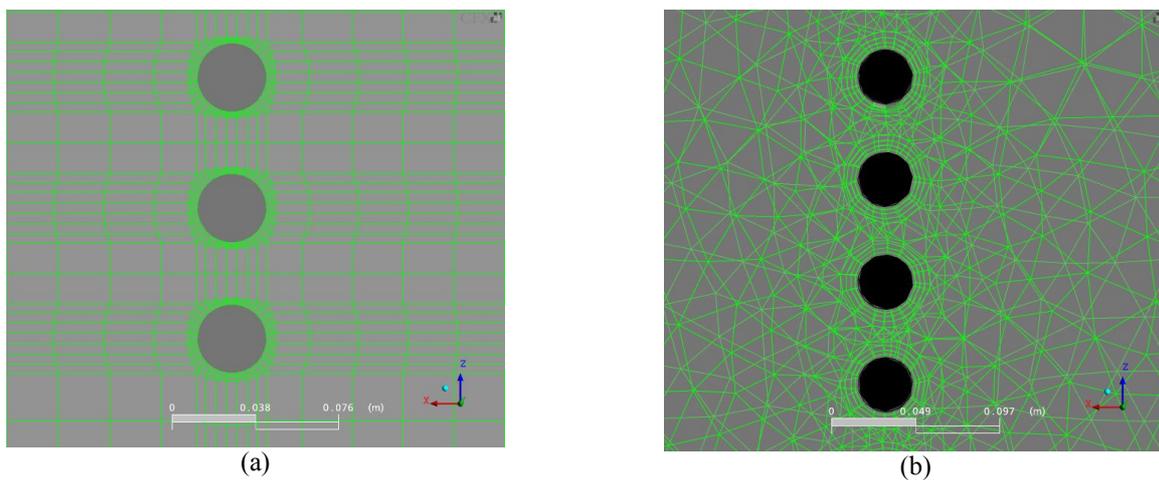


Figura 7- Refinamento das malhas, (a) hexaédrica e (b) tetraédrica, junto às paredes dos tubos.

5.3. Análise comparativa dos resultados numéricos

Definido o tipo de malha como hexaédrica, procedeu-se o estudo de diferentes tamanhos de malha, com a finalidade de se encontrar um tamanho adequado que, partindo-se de um refinamento adicional, produzisse melhorias pouco significativas na qualidade da solução obtida. Desta maneira obteve-se o maior tamanho de malha possível com uma qualidade tolerável da solução convergida. Foram testados 4 diferentes tamanhos de malha: 100 mm (com 92.611 elementos), 50 mm (com 206.221 elementos), 25 mm (com 554.561 elementos) e 15 mm (com 1.235.347 elementos). Nas Fig. 8 e 9 são apresentados resultados relativos a velocidade do escoamento de gases através dos painéis do superaquecedor final, considerando-se 4 tamanhos de malha.

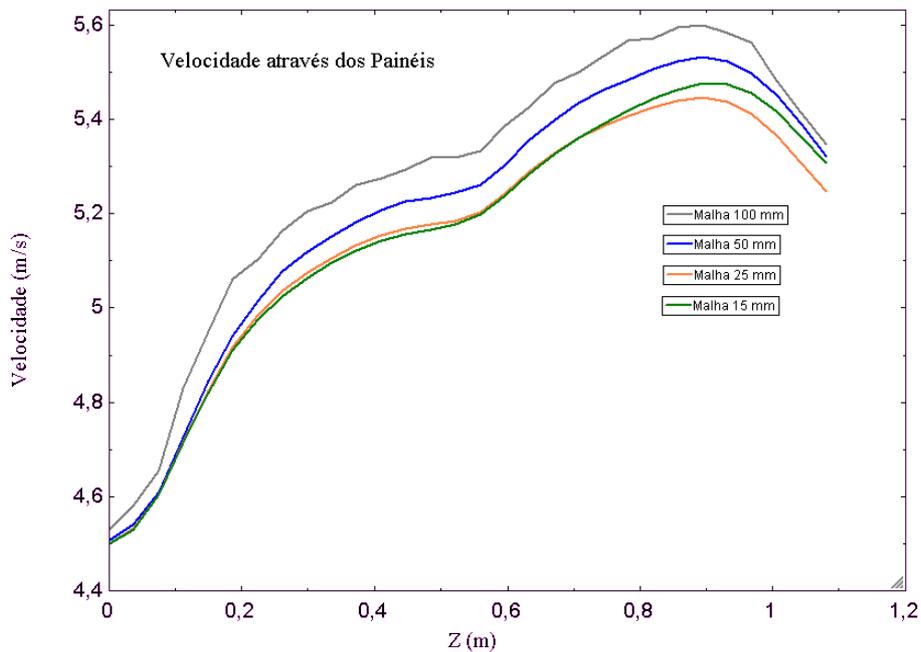


Figura 8- Velocidade dos gases de combustão através dos painéis, considerando-se diferentes tamanhos de malhas.

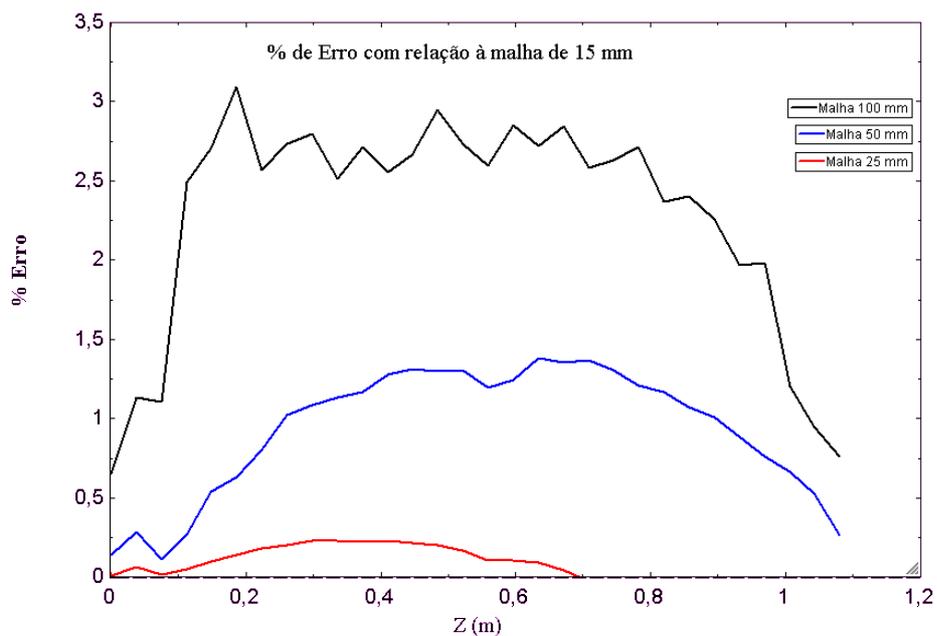


Figura 9- Erro percentual com relação à malha de 15 mm.

Pode perceber que a malha de 25 mm tem o comportamento muito similar àquele obtido para a malha de 15 mm em grande parte do domínio computacional e seu erro é tolerável quando comparado com os resultados obtidos com

malhas de 50 mm e de 100 mm. Ainda que a malha de 15 mm seja adequada para a discretização da solução, optou-se trabalhar com a malha de 25 mm, uma vez que a melhoria advinda na qualidade da solução não compensa o maior número de elementos resultantes, que é mais que o dobro daquele obtido com a malha de 25 mm.

Resultados preliminares são mostrados na Figura 10, considerando-se o fluxo de calor obtido no subdomínio computacional mostrado na Figura 5.

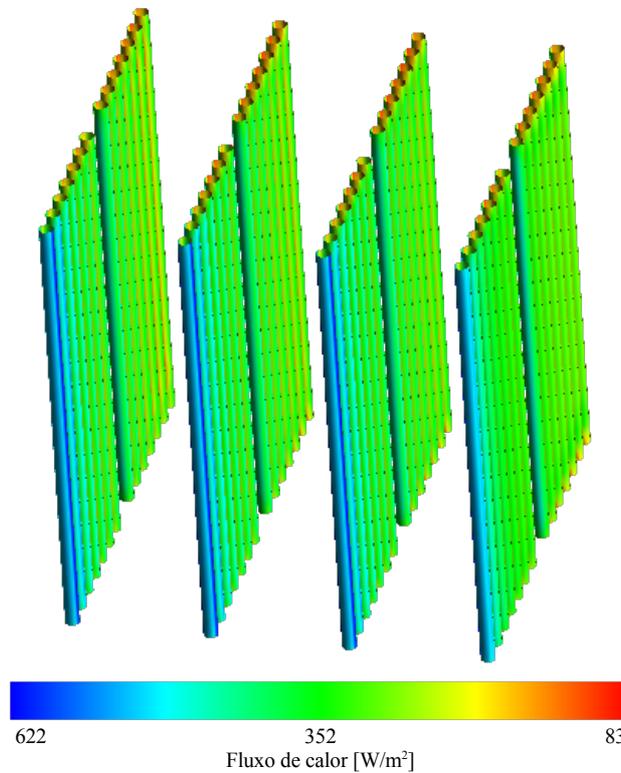


Figura 10- Resultados preliminares para o fluxo de calor no subdomínio computacional

Na Figura 10 pode-se observar o fluxo de calor obtido no subdomínio computacional considerado, levando-se em conta as seguintes hipóteses simplificativas:

- Ar escoando externamente aos tubos;
- Condição de fluxo prescrito nas paredes externas dos tubos;

A condição de fluxo prescrito minimiza o tempo computacional ao não incluir os domínios associados ao metal das paredes dos tubos e ao vapor escoando internamente nos tubos, sem, entretanto, acarretar erros significativos aos resultados.

O fluxo de calor prescrito é calculado através do coeficiente global de transferência de calor, dado pelo inverso das resistências convectiva e radiativa no lado dos gases, condutiva na parede de aço e convectiva no lado do vapor, bem como pela temperatura média do vapor na secção de tubo do subdomínio. Na obtenção dos resultados preliminares da Figura 10, os valores dos coeficientes globais de transferência de calor e do fluxo de calor envolvido foram obtidos através da simulação do escoamento e troca de calor entre gases e vapor para um único tubo, utilizando-se um domínio computacional englobando o gás, o aço e o vapor.

$$U_G = \frac{Q}{A.(T_g - T_v)} \quad (4)$$

Onde U_G , Q , A , T_g e T_v , representam o coeficiente global de transferência de calor, a taxa de calor transferida pelos gases ao vapor, a área superficial externa do tubo e as temperaturas do gás e temperatura média do vapor, respectivamente.

6. Conclusões

Uma metodologia para análise do problema de transferência de calor em feixes tubulares é desenvolvida com o propósito de resolver problemas complexos de transferência de calor em feixes tubulares, onde o diâmetro dos tubos é significativamente menor do que a dimensão transversal de passagem dos gases, situação encontrada, por exemplo, no superaquecedor final de unidades geradoras de vapor. Na definição da caracterização de malha para os subdomínios computacionais, optou-se pelo tipo de malha hexaédrica, por resultar em menor número de elementos, minimizando o número de volumes utilizados para a discretização, bem como o tempo computacional para a solução do problema, tendo em vista as diferenças de escala geométrica entre tubos e área de escoamento dos gases de combustão.

Resultados preliminares relativos à definição e refino de malha apontam para o formato hexaédrico com dimensões de até 25mm em regiões afastadas dos tubos e de até 3,5 mm nas células adjacentes aos tubos. Trabalhos prosseguem no sentido de se obter as informações pertinentes ao domínio completo e a solução definitiva do problema de escoamento e transferência de calor entre gases de combustão e vapor superaquecido.

7. Agradecimentos

Os autores agradecem a ANEEL e a Tractebel Energia S/A pelo suporte financeiro.

8. Referências

- Launder and Spalding D.B, 1973, "The Numerical Computation of Turbulent Flows", Imperial College of Science and Technology, Department of Mechanical Engineering,;
- Lockwood, F.C., Shah, N.G., 1981, "A New Radiation Solution Method for Incorporation in General Combustion Prediction Procedures", 8th Symposium on Combustion, The Combustion Institute, pp.1405-1414;
- Nogueira, A.C.R, Bazzo, E., Felipe, L. et al., 2003, "Pesquisa Aplicada em Superaquecedores e Reaquecedores de Caldeiras Visando a Redução de Gradientes Térmicos Resultantes da Troca Irregular de Calor com os Gases de Combustão do Complexo Jorge Lacerda.", Projeto P&D ANEEL, Convênio TRACTEBEL/FEESC N° CMS.NAJL.01.11153, Relatório final, Florianópolis, 47 p.;
- Patankar S.V, 1975, "Numerical Prediction of Three-Dimensional Flows, Studies in convection";
- Reinaldo R.F., 2004, "Comportamento Térmico e Hidrodinâmico do Escoamento de Gases Através de Feixes Tubulares de Unidades Geradoras de Vapor", Tese de doutorado POSMEC/UFSC, Florianópolis-SC;
- Siegel, R., Howell, J. R., 1972, "Thermal Radiation Heat Transfer", McGraw-Hill Co.;

METHODOLOGY OF ANALYSIS FOR THE SOLUTION OF PROBLEMS RELATED TO STEAM GENERATORS TUBE BUNDLES

Antonio Carlos Ribeiro Nogueira

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
88.040-970 – Florianópolis - SC
nogueira@emc.ufsc.br

Edson Bazzo

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
88.040-970 – Florianópolis - SC
ebazzo@emc.ufsc.br

Luis Omar Suescún Armesto

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
88.040-970 – Florianópolis - SC
omar@labcet.ufsc.br

Luiz Felipe

Tractebel Energia S/A
Capivari de Baixo - SC
lfelippe@tractebelenergia.com.br

Abstract: The numerical simulation of steam generators units requires special care in defining the computational domain of interest, in order to solve the combustion, flow and heat transfer problems, taking into account the time and storage capacity compatible with available computational resources. In this paper, a methodology for heat transfer analysis in tube bundles at the final superheater gas side of a specific steam generator unit is proposed. The very complex problems, associated to longitudinal and transversal spacing, as well to the definition of the domains and sub-domains as required by typical loads was solved. It is also presented a mesh study in order to minimize the number of volumes required to solve the problem due to high differences related to geometry scale between small tube diameters and large gas flow areas. The hexahedral mesh showed to be the best choice, considering the number of elements and time computation for solving the problem.

Key Words: Thermal Generation, Steam Generation, Final Superheater, Tube Bundles.