

Modelos Dinâmicos Simplificados de Gerador de Vapor como Ferramenta de Ensino

(Simplified Steam Generator Dynamic Models as a Teaching Tool)

Lamartine Guimarães^{*,**} e Pio Torre Flores^{**}

** CTA/IEAv/EAN-R*

Caixa Postal 6044

12231-970, S.J. Campos, SP, Brasil

e-mail: guimarae@ieav.cta.br

*** Universidade Braz Cubas*

Departamento de Computação

Mogi das Cruzes, SP

Recebido 3 de novembro, 1997

Este trabalho tem por objetivo apresentar dois modelos simplificados que descrevem a dinâmica de funcionamento de geradores de vapor do tipo tubo em “U” (U-Tube Steam Generators - UTSG). Este tipo de gerador de vapor é comumente utilizado em usinas nucleares do tipo de água pressurizada (“Pressurized Water Reactors - PWR”). As usinas nucleares de Angra são do tipo PWR e utilizam este tipo de gerador de vapor. Estes modelos são apresentados dentro do contexto de um curso de Fenômenos de Transporte. As equações finais são passadas aos alunos, afim de que, desenvolvam um programa de computador capaz de simular a dinâmica do gerador de vapor. É apresentado ao final do trabalho outras maneiras de utilização dos modelos desenvolvidos que irão depender das necessidades dos cursos. Até o momento tem-se utilizado o programa MATLAB como o ambiente ideal para se desenvolver de forma rápida e eficiente os modelos dinâmicos de geradores de vapor.

This work presents two simplified models that describe the dynamics of a U-Tube Steam Generator - UTSG. This kind of steam generator is used in a nuclear power plant of the type Pressurized Water Reactor - PWR. The ANGRA nuclear power plant is a PWR and uses a UTSG as part of its steam generation cycle. These Models are presented in a context of a Transport Phenomena course. The final equations are presented to the students and they are required to develop a computational program to simulate the dynamics of the UTSG. Other approaches might be used depending on course requirements. Some are suggested at the end of this work. Up to the moment the MATLAB program is used as a proper environment to fast and efficiently develop this kind of applications.

Introdução

Os geradores de vapor são componentes muito importantes dos sistemas nucleares geradores de potência. É função do gerador de vapor produzir o vapor que movimentará a turbina do reator gerando energia elétrica. Também, é função do gerador de vapor servir de fronteira separadora entre a água do circuito primário, que refrigera o núcleo do reator, e a água do circuito secundário, a qual por mudança de fase gera o vapor para

a turbina. Esta função de fronteira separadora é de especial importância pois contém, em circuito fechado, a água do circuito primário que, por passar dentro do núcleo, é irradiada e contém elementos radioativos.

Um especial interesse existe nos geradores de vapor do tipo tubo em “U”, conhecidos na literatura internacional como “U-Tube Steam Generator - UTSG”. Este interesse especial vem do fato que os UTSGs são utilizados em reatores de água pressurizada, “Pressurized Water Reactor - PWR”. Esta é a linha de reatores ado-

tada no Brasil. Os dois reatores Brasileiros: Angra I (em operação) e Angra II (em construção) utilizam este tipo de gerador de vapor. É apenas natural que a menção deste fato faça com que seja despertado a curiosidade dos alunos em aprender como se comportam estas máquinas, que ajudam a produzir a energia elétrica que ilumina suas casas, escritórios e escolas.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira. Uma seção com uma descrição do UTSG, incluindo um esquema ilustrativo. Uma seção descrevendo o modelo do UTSG de três variáveis. Uma seção que descreve o modelo do UTSG de cinco variáveis. Uma seção de resultados e sugestões de como utilizar os modelos. Uma seção de conclusões. São incluídos dois Apêndices com cópias detalhadas dos programas MATLAB [7] que simulam o UTSG.

O gerador de vapor UTSG

A Fig. 1 apresenta um diagrama esquemático do gerador de vapor UTSG. O nome deste equipamento vem do fato que ele possui um conjunto de tubos metálicos no formato de um U invertido, que na Fig. 1 é representado por (2).

Para se entender o papel que desempenha um UTSG é necessário que se tenha uma idéia de como a energia é gerada e transportada dentro do reator até ser transformada em energia elétrica. Está fora do escopo deste trabalho uma descrição detalhada de um reator nuclear do tipo PWR. Descrições deste tipo podem ser obtidas em diversas referências [2, 3, 6]. Será fornecido, no entanto, uma descrição resumida para que se possa entender qual a real importância do UTSG dentro de uma usina nuclear, nosso real objetivo.

Em uma usina nuclear do tipo PWR calor é gerado no núcleo do reator através do processo de fissão nuclear auto-sustentado. Este calor é produzido devido a perda da energia cinética dos produtos de fissão, após a reação nuclear, na colisão com átomos da rede cristalina do combustível. Este calor se propaga por condução até a superfície do elemento combustível. O elemento combustível está sendo banhado por uma vazão de água unidirecional. Desta forma o calor gerado no elemento combustível é então retirado pelo processo de convecção forçada. Em geral a diferença de temperatura da água de refrigeração, entre a entrada e a saída do núcleo, é de 30°C. A usina nuclear PWR é composta de três circuitos de água interconectados, contados a partir da fonte quente (núcleo do reator) até a fonte fria (o meio ambiente, em geral, um rio, lago ou o mar). Dois destes

circuitos são fechados e o terceiro é aberto. O gerador de vapor UTSG está localizado exatamente entre o primeiro e o segundo circuito fechado de uma usina PWR. Por uma questão de consistência de nomenclatura o primeiro circuito é chamado de primário, o segundo circuito é chamado de secundário e o terceiro não tem nome específico. A água do circuito primário deixa o núcleo do reator e através de tubulações (também chamada de perna quente) chega até a entrada indicada por (1), na Fig. 1. A partir daí, a água do primário penetra em uma série de tubos metálicos com a forma de U invertido, mostrado na Fig. 1 com o número (2). A água do primário irá primeiro subir na direção da curva do U e então descer pelo outro lado saindo onde na Fig. 1 está o número (3). A água dentro dos tubos metálicos irá por um processo de convecção ceder calor aos tubos metálicos. À partir do ponto (3) a água do primário, com temperatura mais baixa (em torno de 30°C) segue por tubulações (perna fria), através da bomba do circuito primário, de volta para o núcleo do reator e todo o processo será então repetido. Uma observação deve ser feita sobre a água do circuito primário, em nenhum momento ocorre o processo de fervura. Em outras palavras, na água do primário não há mudanças de fase. Fisicamente, a temperatura da água do primário é sempre mantida abaixo da temperatura de saturação para a pressão existente no primário (em torno de 15 MPa). Esta situação é conhecida como sub-resfriamento.

No lado do circuito secundário a água entra no UTSG na posição (4) como indicada na Fig. 1. A água do secundário é então conduzida pelo anel distribuidor (6), o qual possui diversos furos na sua parte inferior e espirra água para baixo. O caminho seguido pela água do secundário é o indicado pelas setas da Fig. 1. Note que a água do secundário desce por uma região anular até a parte inferior do UTSG, onde então, sofre um desvio de 180° em seu caminho, e passa a subir no meio da região dos tubos em U invertido. O calor que foi depositado nos tubos metálicos pela água do primário é agora retirado pela água do secundário, que entra no UTSG em condição subresfriada, permanecendo nesta condição até entrar em contato com os tubos metálicos. Sua temperatura é elevada até a condição de saturação, entrando então em processo de fervura. Em geral, o processo de fervura começa entre 1/3 a 2/3 da altura da perna do U invertido contado de baixo para cima. Esta posição depende entre outras coisas da situação de potência na qual a usina se encontra. Também, em geral, a percentagem de vapor saturado em massa no topo da região de tubos metálicos é de 20% (em regime

estacionário). A partir daí, a mistura água/vapor saturada passa por uma série de estruturas, as quais não estão detalhadas na Fig. 1, que tem a finalidade de separar a água do vapor. A parte água é retornada e misturada com a água que entra vindo de (6). A parte de vapor prossegue até sair em (8), sendo conduzida por tubulações até a turbina.

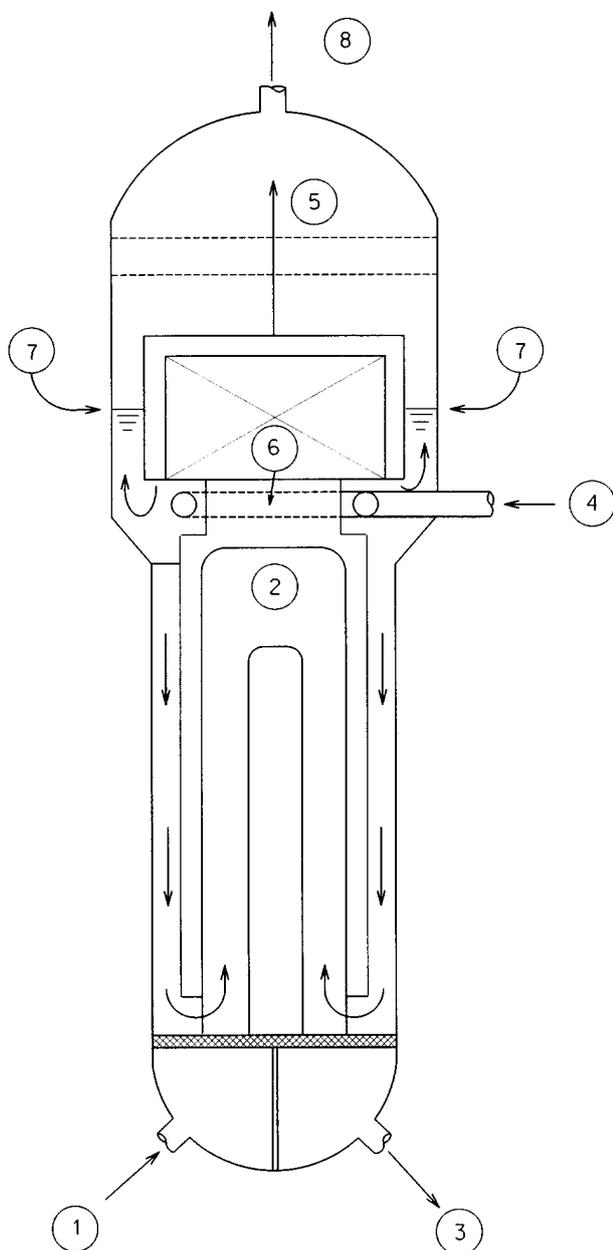


Figura 1. Diagrama esquemático simplificado de um gerador de vapor do tipo tubo em "U". Na gravura a numeração tem o seguinte significado: (1) - entrada da água do primário vinda do núcleo do reator, (2) conjunto de tubos metálicos no formato de U invertido, (3) saída da água do primário para retorno ao núcleo do reator, (4) entrada da água de alimentação vinda do condensador, (5) vapor após passar através dos secadores/separadores, (6) anel distribuidor da água de alimentação, (7) nível de água e (8) saída de vapor de alta qualidade, indo para a turbina.

Na turbina expansões sucessivas do vapor transformam parte de sua energia térmica para energia cinética de rotação do eixo da turbina. O eixo da turbina está conectado mecanicamente ao eixo de um gerador elétrico, que por sua vez gera energia elétrica. Ao sair da turbina, o vapor é condensado, aquecido e comprimido. Após o que, ele é retornado ao UTSG, e o processo começa de novo. A condensação do vapor ocorre em um equipamento chamado condensador, e é feita pelo processo de troca térmica com um terceiro fluido. Em geral este fluido é água proveniente de uma fonte externa do tipo um rio, um lago ou o mar (caso de Angra).

Um fato é preciso ser deixado bem claro. Tanto no processo de troca térmica ocorrido no UTSG, quanto no ocorrido no condensador, os fluidos envolvidos não se misturam. Os tubos são usados exatamente para esta finalidade. A cada parada planejada da usina estes tubos são inspecionados e caso seja detectado falha nestes tubos, os mesmos são vedados.

É interessante ressaltar o fato que uma usina PWR é uma máquina térmica com um ciclo térmico próprio. O ciclo térmico que ocorre em uma usina PWR pode ser colocado, de forma simplificada, em um diagrama Pv e neste caso se parece bastante com o ciclo de Rankine. Uma vez que a usina PWR segue um ciclo térmico, sua eficiência está limitada pela 2ª Lei da Termodinâmica. No caso de uma usina PWR a eficiência é de aproximadamente 1/3. Quando se diz que a usina de Angra I produz 650 MW. Este número está relacionado com potência elétrica, o real valor de potência gerada no núcleo é três vezes maior, ou seja, 1950 MW. Em geral a potência fornecida de qualquer usina nuclear é sempre a potência elétrica, pois esta é a que nos fornece energia útil.

Com a descrição fornecida acima fica entendido, de forma geral, o processo de geração e transporte de energia em uma usina nuclear do tipo PWR. Novamente, ressalta-se que os modelos desenvolvidos aqui são todos do ponto de vista do UTSG.

Os modelos que serão apresentados aqui estão baseados no trabalho de Ali [1]. A finalidade do trabalho de Ali era estudar o comportamento dinâmico do UTSG utilizando modelos de diversas complexidades. Os modelos de três e cinco variáveis são apenas os dois iniciais. Um outro ponto relevante é que Ali linearizou todas as suas equações, o que era um processo comum de cálculo à mais de 10 anos atrás. A linearização utiliza teoria de perturbação de primeira ordem e era extremamente econômica do ponto de vista de custo com-

putacional. O advento e a contínua melhoria dos sistemas computacionais, somados ao desenvolvimento de programas, como MATLAB [7], que facilitam a solução de equações diferenciais ordinárias, eliminou a necessidade da linearização neste caso.

Modelo do UTSG de três variáveis

O modelo de três variáveis consiste em assumir que o UTSG é constituído de três regiões principais: a região do fluido primário, a região dos tubos metálicos e a região do fluido secundário. Este modelo pode ser representado esquematicamente pelo diagrama da Fig. 2. Nesta figura são mostradas três caixas ou nodos cada um representando uma região. Cada região contém uma variável de estado. Na região do primário a variável de estado é a temperatura da água, T_p . Na região dos tubos metálicos a variável de estado é a temperatura do metal, T_m . Na região do secundário a variável de estado é a pressão de saturação do vapor, P_s . Estas três variáveis são chamadas variáveis de estado, pois como veremos elas têm origem em equações diferenciais ordinárias. É interessante observar que do ponto de vista algébrico a vazão W_{sg} que representa a vazão de água que é transformada em vapor na região do secundário, é também uma variável. Contudo, não é chamada de variável de estado pois sua origem é de uma equação algébrica.

As suposições para a derivação deste modelo são as seguintes: as propriedades físicas da água do primário são constantes, a vazão de água do primário é constante (opção quase-estática), as propriedades físicas da mistura saturada água/vapor do secundário varia linearmente com a pressão de saturação dentro do intervalo de operação (4,1-6,9 MPa) do UTSG, a separação total do vapor e da água em volumes independentes e a água como sendo um fluido incompressível.

São quantidades de entrada do modelo a vazão de água do primário (W_p), a temperatura da água do primário vinda do núcleo (T_{pi}), a vazão do secundário (W_{fi}) e a entalpia da água de alimentação (calculada à partir da temperatura T_{fi}).

Para modelar a temperatura da água do primário é utilizado um balanço global de energia. Por balanço global entenda-se, integrado em todo o volume da região. Este balanço é representado por:

$$\begin{aligned} \frac{dT_p}{dt} = & - \left(\frac{W_p}{M_p} + \frac{U_{pm}A_{pm}}{M_p C_p} \right) T_{p...} \\ & + \frac{U_{pm}A_{pm}}{M_p C_p} T_m + \frac{W_p}{M_p} T_{pi} \end{aligned} \quad (1)$$

onde: M_p é a massa de água do primário contida no volume, U_{pm} é o coeficiente de transferência de calor entre a água do primário e os tubos metálicos, A_{pm} é a área de transferência de calor do primário para o tubo metálico, ou seja, área da superfície cilíndrica interna do tubo metálico vezes o número de tubos (no exemplo do UTSG aqui simulado este número vale 3388 tubos) e C_p é a capacidade calorífica específica da água do primário. Para representar a temperatura dos tubos metálicos, T_m , também utiliza-se um balanço global de energia.

$$\begin{aligned} \frac{dT_m}{dt} = & \frac{U_{pm}A_{pm}}{M_m C_m} T_{p...} \\ & - \left(\frac{U_{pm}A_{pm} + U_{ms}A_{ms}}{M_m C_m} \right) T_m + \frac{U_{ms}A_{ms}}{M_m C_m} T_s \end{aligned} \quad (2)$$

onde: M_m é a massa total dos tubos metálicos, U_{ms} é o coeficiente de transferência de calor entre os tubos metálicos e a mistura água/vapor do secundário, A_{ms} é a área de transferência de calor entre os tubos metálicos e o secundário, ou seja, a área externa do tubo metálico vezes o número de tubos, C_m é a capacidade calorífica específica do aço dos tubos metálicos, e T_s é a temperatura de saturação da mistura água/vapor do secundário.

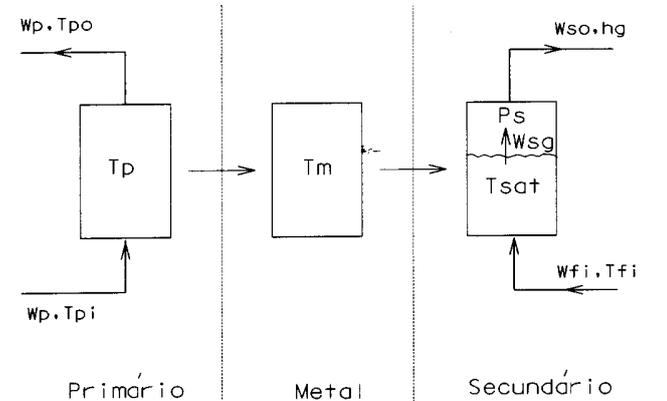


Figura 2. Diagrama esquemático mostrando o modelo do UTSG para três variáveis.

Para o lado do secundário o fluido (mistura água/vapor) não pode ser considerado incompressível. A suposição válida, para este volume, é a total separação da mistura água/vapor. Sendo que a vazão de vapor, W_{sg} , representa o vapor gerado à partir da ebulição da água. Desta forma um balanço global da massa de água, M_f , fornece:

$$\frac{dM_f}{dt} = W_{fi} - W_{sg} \quad (3)$$

Da mesma forma, um balanço global da massa de vapor, M_g , fornece:

$$\frac{dM_g}{dt} = W_{sg} - W_{so} \quad (4)$$

onde, W_{so} é a vazão de vapor que sai do UTSG para a turbina. Ainda com um balanço de volume total do lado secundário, tem-se:

$$\frac{d(M_f \nu_f + M_g \nu_g)}{dt} = 0 \quad (5)$$

onde, ν_f e ν_g representam, respectivamente, o volume específico da água saturada e do vapor saturado. De posse dos balanços em 3, 4 e 5, e de algum trabalho algébrico, que pode ser usado como exercício de casa, chega-se à seguinte equação:

$$a_{21} \frac{dP_s}{dt} + \nu_{fg} W_{sg} = \nu_g W_{so} - \nu_f W_{fi} \quad (6)$$

sendo que:

$$a_{21} = M_g \frac{d\nu_g}{dP} \quad (7)$$

Note que o subíndice f está associado à propriedade da água em estado saturado, e o subíndice g está associado à propriedade do vapor em estado saturado.

O balanço global de energia para a mistura de água/vapor é dado por:

$$\frac{d(M_f h_f + M_g h_g)}{dt} = U_{ms} A_{ms} (T_m - T_s) \dots + W_{fi} h_{fi} - W_{so} h_g \quad (8)$$

onde a letra "h" está relacionada com a entalpia específica ou da água (f) ou do vapor (g). Após alguma álgebra chega-se a seguinte equação.

$$a_{11} \frac{dP_s}{dt} + h_{fg} W_{sg} = b_1 \quad (9)$$

Onde:

$$a_{11} = M_g \frac{dh_g}{dP} + M_f \frac{dh_f}{dP} \quad (10)$$

e

$$b_1 = W_{fi} (h_{fi} - h_f) + U_{ms} A_{ms} (T_m - T_s) \quad (11)$$

Note que o que se deseja obter aqui são as funções explícitas da vazão de vapor saturado (W_{sg}) e da derivada temporal da pressão. Desta maneira as equações 6 e 9 formam um sistema linear que deve ser resolvido de tal forma a gerar as equações desejadas. Neste ponto há que se tomar certo cuidado e introduzir alguma forma de controle para o UTSG. Caso isto não seja feito as equações geradas apresentarão uma instabilidade degenerativa, em outras palavras, não se atinge

estado estacionário. A mais simples equação de controle que se pode utilizar é fazer a vazão de vapor proporcional á pressão de vapor.

$$W_{fi} = W_{so} = c_f P_s \quad (12)$$

A constante de proporcionalidade c_f é determinada por valores de vazão e pressão de projeto. Outras possibilidades seriam assumir que a vazão de vapor seria proporcional a raiz quadrada de uma diferença de pressão. Por exemplo, a pressão produzida entre a saída de vapor e um valor fixo que deve existir na cabeça de entrada da turbina. Contudo, esta opção é considerada sofisticada e deve ser deixada para cursos avançados de simulação ou sistema de controle. Note que em 12 também se faz a vazão de água de alimentação igual à vazão de vapor. Isto significa que se vai trabalhar com um modelo em circuito fechado. Obviamente, esta situação é mais próxima do caso real pois a vazão de água de alimentação responde a variações da vazão de vapor. Não há nenhuma necessidade de se utilizar o modelo de circuito fechado. A alternativa seria o modelo de circuito aberto onde a vazão de água de alimentação é deixada constante e nominal ao valor de projeto do UTSG. Aliás, esta pode ser mais uma variação para ser investigada pelos alunos. A equação de pressão fica então na seguinte forma.

$$\frac{dP_s}{dt} = \frac{\nu_{fg} U_{ms} A_{ms}}{\det} T_m \dots + \frac{(h_{fi} - h_g) \nu_{fg} c_f}{\det} P_s - \frac{\nu_{fg} U_{ms} A_{ms}}{\det} T_s \quad (13)$$

onde:

$$\det = a_{11} \nu_{fg} - a_{21} h_{fg} \quad (14)$$

E a equação da vazão de vapor saturado deixando o liquido saturado é dada por:

$$W_{sg} = \frac{a_{11} \nu_{fg} - a_{21} (h_{fi} - h_f)}{\det} c_f P_s \dots - \frac{a_{21} U_{ms} A_{ms}}{\det} (T_m - T_s) \quad (15)$$

Assim o conjunto das equações formado por 1, 2, 13 e 15 constituem o modelo do UTSG de três variáveis. Necessita-se agora relacionar a temperatura com a pressão de saturação. Dentro do intervalo de operação do UTSG (4,1-6,9 MPa) esta relação pode ser considerada linear [5] e dada por:

$$T_s = 11.7971 * P_s + 203.492 \quad (16)$$

Da mesma forma as propriedades da água e do vapor saturados podem ser calculados por interpolações lineares como função da pressão de saturação.

$$\nu_f = 3.30214e-5 * P_s + 1.12042e-3 \quad (17)$$

$$\nu_{fg} = -7.42732e-3 * P_s + 7.77162e-2 \quad (18)$$

$$h_f = 5.98107e4 * P_s + 8.49156e5 \quad (19)$$

$$h_{fg} = -6.94286e4 * P_s + 1.99036e6 \quad (20)$$

$$\nu_g = \nu_f + \nu_{fg} \quad (21)$$

$$h_g = h_f + h_{fg} \quad (22)$$

Uma sofisticação a mais seria utilizar rotinas de cálculo de propriedades da água e do vapor saturado para um intervalo de pressão maior que o utilizado. Novamente, aqui deixa-se este passo à frente, para cursos mais avançados. Contudo, neste caso sugere-se as rotinas de Garland [4]. Estas rotinas podem ser obtidas diretamente com os autores deste trabalho, sem ônus.

Os parâmetros constantes necessários à simulação do UTSG podem ser encontrados no próprio programa desenvolvido. Cópia do programa é acrescentada no Apêndice 1.

Modelo do UTSG de cinco variáveis

Para um simacionista atento, basta olhar para o diagrama da Fig. 2 para perceber que a geometria do UTSG não está bem representada. E que com pouco esforço pode se melhorar consideravelmente o modelo de três variáveis do UTSG. Uma representação esquemática desta melhoria é encontrada na Fig. 3. Obviamente, ao se introduzir esta melhoria é, também, necessário aumentar o número de variáveis de estado de três para cinco.

A idéia principal do modelo de cinco variáveis é melhor representar a geometria dos tubos em U invertidos. Dois nodos extras são então introduzidos, e a região do primário fica então representada da seguinte forma: um nodo que representa a água do primário indo de baixo para cima (referente à T_{p1}), um nodo que representa os tubos metálicos correspondentes a este lado (referente à T_{m1}), um nodo que representa a água do primário indo de cima para baixo (referente à T_{p2}) e um nodo que representa a parte equivalente dos tubos metálicos (referente a T_{m2}).

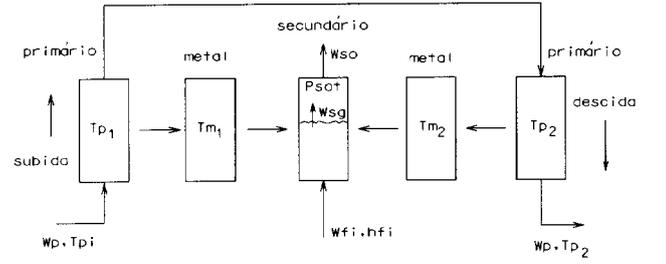


Figura 3. Diagrama esquemático mostrando o modelo do UTSG para cinco variáveis.

Assim, o balanço global de energia para o lado da água do primário que sobe fica expresso da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{p1}}{dt} = & - \left(\frac{W_p}{M_{p1}} + \frac{U_{pm}A_{pm2}}{M_{p1}C_{p1}} \right) T_{p1} \dots \\ & + \frac{U_{pm}A_{pm1}}{M_{p1}C_{p1}} T_{m1} + \frac{W_p}{M_{p1}} T_{pi} \end{aligned} \quad (23)$$

O balanço global de energia para o lado da água do primário que desce é expresso da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{p2}}{dt} = & - \left(\frac{W_p}{M_{p2}} + \frac{U_{pm}A_{pm1}}{M_{p2}C_{p2}} \right) T_{p2} \dots \\ & + \frac{U_{pm}A_{pm2}}{M_{p2}C_{p2}} T_{m2} + \frac{W_p}{M_{p2}} T_{p1} \end{aligned} \quad (24)$$

Para os dois nodos metálicos os balanços globais de energia fornecem as seguintes relações:

$$\begin{aligned} \frac{dT_{m1}}{dt} = & \frac{U_{pm}A_{pm1}}{M_{m1}C_{m1}} T_{p1} \dots \\ & - \left(\frac{U_{pm}A_{pm1} + U_{ms}A_{ms1}}{M_{m1}C_{m1}} \right) T_{m1} + \frac{U_{ms}A_{ms1}}{M_{m1}C_{m1}} T_s \end{aligned} \quad (25)$$

e

$$\begin{aligned} \frac{dT_{m2}}{dt} = & \frac{U_{pm}A_{pm2}}{M_{m2}C_{m2}} T_{p2} \dots \\ & - \left(\frac{U_{pm}A_{pm2} + U_{ms}A_{ms2}}{M_{m2}C_{m2}} \right) T_{m2} + \frac{U_{ms}A_{ms2}}{M_{m2}C_{m2}} T_s \end{aligned} \quad (26)$$

Do ponto de vista dos balanços conservativos de energia e massa utilizados para o lado do secundário não há nenhuma alteração. Contudo, em vista da introdução de duas novas variáveis de estado, algumas alterações são necessárias nas equações finais. A equação 11 deve ser modificada da seguinte forma:

$$\begin{aligned} b_1 = & W_{fi}(h_{fi} - h_f) + U_{ms}A_{ms1}(T_{m1} - T_s) \dots \\ & + U_{ms}A_{ms2}(T_{m2}T_s) \end{aligned} \quad (27)$$

Da mesma forma a equação 13 deve ser alterada para tomar a forma:

$$\begin{aligned} \frac{dP_s}{dt} &= \frac{\nu_{fg}U_{ms}A_{ms1}}{\det}T_{m1} + \frac{\nu_{fg}U_{ms}A_{ms2}}{\det}T_{m2}\dots \\ &+ \frac{(h_{fi} - h_g)\nu_{fg}c_f}{\det}P_s \\ &- \left(\frac{\nu_{fg}U_{ms}A_{ms1}}{\det} + \frac{\nu_{fg}U_{ms}A_{ms2}}{\det} \right) T_s \end{aligned} \quad (28)$$

E a equação 15 também deve ser modificada, tornando-se:

$$\begin{aligned} W_{sg} &= \frac{(a_{11}\nu_{fg} - a_{21}(h_{fi} - h_f))}{\det}c_fP_s\dots \\ &+ \frac{a_{21}U_{ms}A_{ms1}}{\det}(T_{m1} - T_s)\dots \\ &- \frac{a_{21}U_{ms}A_{ms2}}{\det}(T_{m2} - T_s) \end{aligned} \quad (29)$$

As equações do modelo de cinco variáveis são, então, 23, 24, 25, 26, 28 e 29. Exceto pelas alterações nas equações de estado nada mais muda. As constantes do modelo e as propriedades da água e do vapor do secundário são calculadas da mesma forma.

Fica uma sugestão para cursos mais avançados a derivação detalhada das equações do modelo. É um excelente exercício de álgebra, do qual as respostas seriam as equações do modelo, apresentados acima.

Os parâmetros constantes necessários à simulação do UTSG podem ser encontrados na cópia do programa apresentado no Apêndice 2.

Sugestões de como usar os modelos e resultados obtidos

Dos modelos desenvolvidos pode-se obter resultados a partir de perturbação direta das quantidades de entrada, variações de parâmetros importantes, variações no parâmetro de controle e teste de outras concepções de controle. Isto para citar as mais diretas. O limite de aplicações está, na realidade, limitado pela imaginação do simulacionista.

Nos dois modelos as quantidades de entrada são a vazão da água do primário, a temperatura da água do primário e a entalpia (ou temperatura) da água de alimentação do secundário. Inicialmente, a vazão da água de alimentação do secundário foi considerada como quantidade de entrada. Contudo, com a suposição de circuito fechado no lado do secundário esta vazão torna-se uma quantidade de controle, dada por 12, e o parâmetro c_f , uma quantidade variável que pode ser relacionada com a abertura ou fechamento

de uma válvula. Desta forma, os transitórios fisicamente possíveis são os seguintes. Redução ou aumento no valor da temperatura de entrada da água do primário são causados por transitórios de potência do reator. Esta temperatura é função direta da potência gerada no reator. A Tabela 1 apresenta na sexta e sétima linhas respectivamente, os resultados para o modelo de três variáveis, a redução e o aumento (10%) na temperatura de entrada da água do primário. As Tabelas 2 e 3 mostram os mesmos resultados para o modelo de cinco variáveis. Note que este transitório, tanto em um caso, como no outro, é o que apresenta as maiores variações percentuais nas variáveis de estado. Quando comparados com os resultados do estado estacionário apresentados na primeira linha de todas as tabelas.

A vazão da água do primário só pode sofrer redução (10%). Esta vazão é função direta do funcionamento das bombas do primário, as quais atingem seu limite de vazão produzida à 100% de potência do reator. Os resultados para o modelo de três variáveis é apresentado na oitava linha da Tabela 1, para o modelo de três variáveis. Também, na oitava linha, as Tabelas 2 e 3 apresentam os resultados deste transitório para o modelo de cinco variáveis.

Tabela 1. Quadro contendo as variáveis de estado do modelo de três variáveis mostrando por linha os resultados: do estado estacionário, aumento e redução do parâmetro de controle, redução da entalpia da água de alimentação, redução e aumento da temperatura de entrada da água do primário e redução da vazão do primário.

	T _{pi} (°C)	T _{m1} (°C)	P (Mpa)	W _{sg} (kg/s)
SS	283.5313	274.6077	5.4992	441.27
1.1*c_f	281.9010	272.4553	5.2858	466.56
0.9*c_f	285.2962	276.9377	5.7302	413.83
0.9*h_n	282.6559	273.4519	5.3846	432.08
0.9*T_{pi}	260.3337	253.9532	3.8991	312.88
1.1*T_{pi}	306.8108	295.3705	7.1099	570.55
0.9*W_p	281.2843	272.6054	5.3440	428.82

Na entalpia da água de alimentação do secundário, considera-se mais relevante a redução (10%) desta quantidade. Esta afirmação está baseada no fato de que no balanço térmico da planta não existem fontes de calor e sim sumidouros. Entenda-se balanço térmico da planta como a composição dos efeitos térmicos causados pelos equipamentos: turbina, condensador, aquecedores e estágios de compressão de água, os quais não são modelados aqui. Este transitório é apresentado na

quinta linha das Tabelas 1 (modelo de três variáveis), 2 e 3 (modelo de cinco variáveis).

Aumento e redução (10%) no parâmetro de controle (cf da equação 12) permite observar como o UTSG responde a aberturas e fechamentos de válvulas de controle. Na Tabela 1 as linhas três e quatro apresentam os resultados para aumento e redução no valor de c_f , respectivamente, para o modelo de três variáveis. Nas mesmas linhas das tabelas 2 e 3 são apresentados os resultados para o modelo de cinco variáveis.

Tabela 2. Quadro contendo as temperaturas do modelo de cinco variáveis mostrando os resultados por linha: do estado estacionário, aumento e redução do parâmetro de controle, redução da entalpia da água de alimentação, redução e aumento da temperatura de entrada da água do primário e redução da vazão do primário.

	T_{p1} (°C)	T_{p2} (°C)	T_{m1} (°C)	T_{m2} (°C)
SS	292.2475	282.2662	279.9821	275.8742
1.1* c_f	291.0717	280.4776	278.0533	273.6931
0.9* c_f	293.5131	284.1914	282.0582	278.2217
0.9* h_{fi}	291.6161	281.3057	278.9463	274.7029
0.9* T_{pi}	266.5589	259.4187	257.7847	254.8460
1.1* T_{pi}	317.9992	305.2098	302.2831	297.0194
0.9* W_p	290.2954	279.8524	278.1315	273.8334

Tabela 3. Quadro contendo pressão e vazão evaporada do modelo de cinco variáveis mostrando os resultados por linha: do estado estacionário, aumento e redução do parâmetro de controle, redução da entalpia da água de alimentação, redução e aumento da temperatura de entrada da água do primário e redução da vazão do primário.

	P (Mpa)	W_{sg} (kg/s)
SS	5.7566	461.93
1.1* c_f	5.5485	489.75
0.9* c_f	5.9806	431.92
0.9* h_{fi}	5.6448	452.96
0.9* T_{pi}	4.0820	327.55
1.1* T_{pi}	7.4424	597.20
0.9* W_p	5.6057	449.82

Todos os valores e resultados apresentados aqui servem para fornecer ao estudante e/ou ao professor um padrão de comparação para saber se os modelos estão funcionando propriamente. Contudo, fica a mostrar o quanto estes modelos se comparam com o equipamento real. Ou seja, qual o nosso grau de fidelidade de reprodução da natureza real do UTSG. Isto pode ser verificado de uma maneira muito simples, comparando-se

o valor da vazão de vapor calculada para o estado estacionário nos dois modelos e o valor real [1]. O valor real é de 471 kg/s. No que para o modelo de três variáveis este valor é de 441.27, o que difere em torno de 6%. Já no modelo de cinco variáveis o valor de vazão obtido é de 461,92 kg/s, o que difere em torno de 2%. Este cálculo simples mostra que o modelo de cinco variáveis é mais próximo à realidade que o modelo de três variáveis.

A afirmação acima pode levar o estudante a questionar a validade de se desenvolver o modelo de três variáveis. Esta validade existe primeiro do ponto de vista didático. O modelo de três variáveis descreve uma fenomenologia mais simples, a matemática necessária é mais simples e apesar disto o resultado não é de todo ruim. O modelo de três variáveis mostra ao aluno que é mais fácil e seguro trabalhar inicialmente com soluções mais simples e deixar as soluções mais complexas para quando já se possui um certo grau de conhecimento do fenômeno. Este ponto deve ser reforçado pelo professor.

Em segundo existe o lado prático do modelo. Modelos são desenvolvidos com finalidades específicas, segundo especificações muitas vezes ditadas por pessoas que não sabem ou entendem de modelos. Contudo, o modelo pode, se bem feito, reduzir custos e descartar soluções erradas. Em alguns casos a tentativa de se complicar demais inicialmente um problema pode levar a custos muito altos. Tanto o físico, como o engenheiro precisa desenvolver esta intuição de praticidade para resolver o problema à contento e dentro do período estipulado (seja pela bolsa de pesquisa ou o projeto industrial). Este é outro ponto que deve ser explicitado pelo professor.

Existem outras maneiras de se tirar proveito dos modelos aqui apresentados. A partir deste ponto não mais será apresentado resultados, mas sim discutidas outras aplicações. A primeira possibilidade é introduzir outras concepções de controle. Note que a concepção utilizada neste trabalho é aquela representada por 12, onde a vazão de vapor é representada proporcional à pressão de vapor. Obviamente, esta suposição é válida somente dentro do intervalo de pressão apresentado anteriormente. Uma suposição mais realística é da vazão proporcional à raiz quadrada da diferença entre a pressão de vapor produzida pelo UTSG e a pressão constante existente na cabeça da turbina (no nosso caso este valor entra como condição de contorno). A constante de proporcionalidade continua ainda a representar a situação de uma válvula. É através desta

constante que mecanismos de controle podem ser representados.

A segunda possibilidade seria a variação de parâmetros importantes. Como exemplo, pode-se citar o coeficiente de transferência de calor. Este coeficiente é em geral valor ajustado ou provem de correlações obtidas em laboratório e obtidas a um custo considerável. Muitas destas correlações podem ser encontradas em artigos científicos, outras são proprietárias e não estão disponíveis na literatura aberta. O aluno pode ser estimulado a uma pesquisa de biblioteca para encontrar estas correlações e tentar melhorar o desempenho do resultado do seu modelo.

A terceira possibilidade envolve melhorar as perturbações realizadas nos dados de entrada e parâmetro de controle. Note que as perturbações realizadas são do tipo degrau, ou seja, muda-se de um valor para o outro através de uma discontinuidade. No entanto, as perturbações naturais são contínuas e possuem um tempo característico para ocorrerem. Ressalva-se, que esta melhoria implica em uma discussão teórica em sala de aula e um maior trabalho de álgebra. Há a necessidade de um maior tempo de discussão, que pode não existir caso o curso no qual este material é apresentado dure apenas um semestre.

A quarta e última possibilidade apresentada aqui é a melhoria do próprio modelo. Esta melhoria passa pela inclusão do fenômeno de re-circulação que ocorre dentro do UTSG no lado do secundário. Este fenômeno ocorre pois a mistura água/vapor que sai da região dos tubos (2 da Fig. 1) é separada na parte dos secadores (estrutura superior aos tubos metálicos). A parte vapor segue para fora do UTSG em direção à turbina. A parte água retorna à região anular marcada por setas na Fig. 1. Aqui vale a ressalva que a vazão real apresentada é na realidade a vazão de mistura que sai da região dos tubos. Isto implica que a vazão real de vapor que vai para a turbina é menor do que o valor apresentado anteriormente. Contudo, como o fenômeno de re-circulação não é incluído nos modelos aqui apresentados o valor usado é correto e mantém a consistência nos modelos.

Conclusões

Neste trabalho é apresentado dois modelos simplificados de um componente de um reator PWR. Este tipo de reator é similar ao reator de ANGRA. Estes modelos tem a finalidade de serem utilizados em disciplinas do tipo: mecânica dos fluidos, transferência de

calor, fenômenos de transporte e simulação numérica. Estas disciplinas podem fazer parte de cursos gerais de Engenharia, Física e Computação. No caso, destes modelos foram utilizados na disciplina de Fenômenos de Transporte dos cursos de Engenharia e Ciência da Computação na Universidade Braz Cubas.

A grande vantagem de se utilizar modelos do UTSG é a curiosidade que desperta nos alunos quando é dito que eles estarão utilizando modelos de uma máquina que é usada para produzir energia elétrica. Obviamente, há um certo receio por parte do aluno com a complexidade da tarefa à realizar. Contudo, como se pode ver, pelo exposto, o grau de complexidade pode ser na realidade imposto pelo professor ao ponto que requer derivação conduzida dos modelos, ou apenas a interpretação das equações finais e implementação em um programa ou ambiente computacional.

A afirmação anterior nos leva a ressaltar a vantagem de se desenvolver o programa em um ambiente como o MATLAB. Os recursos gráficos que são disponibilizados pelo ambiente MATLAB permitem aos alunos uma visualização imediata dos conceitos e comportamentos apresentados para o UTSG.

Como se pode ver, do ponto de vista de ensino, o exercício de derivação, desenvolvimento, implantação e teste dos modelos apresentados é extremamente completo fazendo com que o aluno use de recursos multidisciplinares.

Apêndices

Apêndice 1. Cópia do programa MATLAB contendo o modelo do UTSG de três variáveis.

O programa principal abaixo chama o integrador (ode45), e fornece o nome da rotina onde o sistema de equações ODE é encontrado. A função 'gv3fl' calcula externamente a vazão de vapor. A função 'lgrph32' executa a confecção dos gráficos desejados.

```

tp0=283.5313;
tm0=274.6077;
p0=5.4992;

%condições iniciais

t0=0.;
tend=100.;
y0=[tp0;tm0;p0];

%cálculos

tol=1.e-6;
```

```

trace=0;
[t,y]=ode45('gv3n',t0,tend,y0,tol,trace);
wsg=gv3fl(y); lgrph32;

```

Função gv3n:

```

function dy=gv3n(t,y)
% simulação de 3 variáveis de um gvtu

%parâmetros
upm=19871.8;
ap=4539.32;
cpp=5819.65;
mm=52100.;
cm=460.55;
mp=16356.72;
ums=25164.3;
as=5125.04;
vlf=43.4949;
vlg=90.6994;
dhfdp=5.98107e4;
dhgdp=-9.6179e3;
dnugdps=-7.39430e-3;

%fatores de variação
ft1=1.;
ft2=1.;
ft3=1.;
ft4=1.;

%dados de entrada
cf=80.2433*ft1;
hfi=9.6246e5*ft2;
tpi=311.4*ft3;
wp=4963.14*ft4;

%auxiliares
yf1 = wp/mp;
yf2 = upm*ap/(mp*cpp);
yf3 = upm*ap/(mm*cm);
yf4 = ums*as/(mm*cm);

ts = 11.7971*y(3) + 203.492;
nuf = 3.30214e-5*y(3) + 1.12042e-3;
nufg = -7.42732e-3*y(3) + 7.77162e-2;
hf = 5.98107e4*y(3) + 8.49156e5;
hfg = -6.94286e4*y(3) + 1.99036e6;
nug = nuf + nufg;
hg = hf + hfg;
a11 = vlf*dhfdp/nuf + vlg*dhgdp/nug;

```

```

a21 = vlg*dnugdps/nug;
det = a11*nufg - a21*hfg;
kf1 = nufg*ums*as/det;
kf2 = (hfi - hg)*nufg*cf/det;
kf3 = a21*ums*as/det;
kf4 = nufg*a11/det;
kf5 = (hfi - hf)*a21/det;
wsg = (kf4 - kf5)*cf*y(3) - kf3*(y(2) - ts);

%função derivada
dy = [-yf1+yf2      yf2      0.; ...
      yf3          -(yf3+yf4)  0.; ...
      0.           kf1         kf2]*y + ...
      [yf1*tpi; yf4*ts; -kf1*ts];

```

Função gv3fl

```

function wsg=gv3fl(y)
% simulação de gvtu vazão de vapor secundário

ums=25164.3;
as=5125.04;
vlf=43.4949;
vlg=90.6994;
dhfdp=5.98107e4;
dhgdp=-9.6179e3;
dnugdps=-7.39430e-3;

n=max(size(y(:,1)));
for j=1:n
ts = 11.7971*y(j,3) + 203.492;
nuf = 3.30214e-5*y(j,3) + 1.12042e-3;
nufg = -7.42732e-3*y(j,3) + 7.77162e-2;
hf = 5.98107e4*y(j,3) + 8.49156e5;
hfg = -6.94286e4*y(j,3) + 1.99036e6;
nug = nuf + nufg;
hg = hf + hfg;
a11 = vlf*dhfdp/nuf + vlg*dhgdp/nug;
a21 = vlg*dnugdps/nug;
det = a11*nufg - a21*hfg;

%fatores de variação
ft1=1.;
ft2=1.;
cf=80.2433*ft1;
hfi=9.6246e5*ft2;

kf3 = a21*ums*as/det;
kf4 = nufg*a11/det;
kf5 = (hfi - hf)*a21/det;

wsg(j) = (kf4 - kf5)*cf*y(j,3) - kf3*(y(j,2) - ts);

```

```
end
```

Função lgrph32

```
plot(t,y(:,1),'-',t,y(:,2),'-'),
title('Tp(solido), Tm(traco-ponto)'),
ylabel('Temperatura (Celcius)'),
xlabel('tempo (segundos)'),pause;

plot(t,y(:,3),'-'),title('Pressao da Agua do Secundario'),
ylabel('Pressao (MPa)'),xlabel('tempo (segundos)'),pause;

plot(t,wsg,'-'),title('Vazao de Vapor do Secundario'),
ylabel('Vazao (kg/s)'),xlabel('tempo (segundos)');
```

Apêndice 2. Cópia do programa MATLAB contendo o modelo do UTSG de cinco variáveis.

```
tp10=292.2475;
tp20=282.2662;
tm10=279.9821;
tm20=275.8742;
p0 =5.7566;

%condicoes iniciais

t0=0.;
tend=200.;
y0=[tp10;tp20;tm10;tm20;p0];

%calculos

tol=1.e-6;
trace=0;
[t,y]=ode45('gv5n',t0,tend,y0,tol,trace);
wsg=gv5fl(y);
lgrph52;
```

Função gv5n:

```
function dy=gv5n(t,y)
% simulacao de 5 variaveis de um gvtu

%parametros

upm=19871.8;
ap1=2269.66;
ap2=2269.66;
cpp=5819.65;
mm1=26050.2;
mm2=26050.2;
```

```
cm=460.55;
mp1=8178.36;
mp2=8178.36;
ums=25164.3;
as1=2562.52;
as2=2562.52;
vlf=43.4949;
vlg=90.6994;
dhfdp=5.98107e4;
dhgdp=-9.6179e3;
dnugd=-7.39430e-3;

%fatores de variacao

ft1=1.;
ft2=1.;
ft3=1.;
ft4=1.;

%dados de entrada

cf=80.2433*ft1;
hfi=9.6246e5*ft2;
tpi=311.4*ft3;
wp=4963.14*ft4;

%auxiliares

fp1 = wp/mp1;
fp2 = upm*ap1/(mp1*cpp);
fp3 = wp/mp2;
fp4 = upm*ap2/(mp2*cpp);
fm1 = upm*ap1/(mm1*cm);
fm2 = ums*as1/(mm1*cm);
fm3 = upm*ap2/(mm2*cm);
fm4 = ums*as2/(mm2*cm);

ts = 11.7971*y(5) + 203.492;
nuf = 3.30214e-5*y(5) + 1.12042e-3;
nufg =-7.42732e-3*y(5) + 7.77162e-2;
hf = 5.98107e4*y(5) + 8.49156e5;
hfg =-6.94286e4*y(5) + 1.99036e6;
nug = nuf + nufg; hg = hf + hfg;
a11 = vlf*dhfdp/nuf + vlg*dhgdp/nug;
a21 = vlg*dnugd/nug;
det = a11*nufg - a21*hfg;
fs1 = nufg*ums*as1/det;
fs2 = nufg*ums*as2/det;
fs3 = (hfi - hg)*nufg*cf/det;

%funcao derivada
```

```

dy = [-(fp1+fp2)    0.    fp2    0.    0.; ...
      fp3    -(fp3+fp4)    0.    fp4    0.; ...
      fm1    0.    -(fm1+fm2)    0.    0.; ...
      0.    fm3    0.    -(fm3+fm4)    0.; ...
      0.    0.    fs1    fs2    fs3]*y + ...
      [fp1*tpi; 0.; fm2*ts; fm4*ts; -(fs1+fs2)*ts];

```

Função gv5fl:

```

function wsg=gv5fl(y)
% simulacao de gvtu vazao de vapor secundario

```

```

ums=25164.3;
as1=2562.52;
as2=2562.52;
vlf=43.4949;
vlg=90.6994;
dhfdp=5.98107e4;
dhgdp=-9.6179e3;
dnugd=-7.39430e-3;

n=max(size(y(:,1)));
for j=1:n
ts = 11.7971*y(j,5) + 203.492;
nuf = 3.30214e-5*y(j,5) + 1.12042e-3;
nufg = -7.42732e-3*y(j,5) + 7.77162e-2;
hf = 5.98107e4*y(j,5) + 8.49156e5;
hfg = -6.94286e4*y(j,5) + 1.99036e6;
nug = nuf + nufg;
hg = hf + hfg;
a11 = vlf*dhfdp/nuf + vlg*dhgdp/nug;
a21 = vlg*dnugd/nug;
det = a11*nufg - a21*hfg;

```

```

ft1=1.;
ft2=1.;
cf=80.2433*ft1;
hfi=9.6246e5*ft2;

kf1 = a21*ums*as1/det;
kf2 = a21*ums*as2/det;
kf3 = nufg*a11/det;
kf4 = (hfi - hf)*a21/det;

wsg(j) = (kf3 - kf4)*cf*y(j,5) - ...

```

```

kf1*(y(j,3) - ts) - ...

```

```

kf2*(y(j,4) - ts);
end

```

Função lgrph52:

```

plot(t,y(:,1),'-',t,y(:,2),'-',t,y(:,3),'-',t,y(:,4),'-'),
title('Tp1(solido), Tp2(traco longo), Tm1(traco curto),
Tm2(traco-ponto)'),
ylabel('Temperatura (Celcius)'),
xlabel('tempo (segundos)'),pause;

```

```

plot(t,y(:,5),'-'), title('Pressao da Agua do Secun-
dario'),
ylabel('Pressao (MPa)'),xlabel('tempo (segun-
dos)'),pause;

```

```

plot(t,wsg,'-'),title('Vazao de Vapor do Secundario'),
ylabel('Vazao (kg/s)'),xlabel('tempo (segundos)');

```

Agradecimentos

Os autores agradecem à FAPESP pela ajuda concedida através do contrato 1995/6608-0.

Referências

1. Ali, M. R. A., *Lumped Parameter, State Variable Dynamic Models for U-Tube Recirculation Type Nuclear Steam Generator*, PhD Dissertation, The University of Tennessee, Knoxville, Tn, USA, 1976.
2. EL-WAKIL, M. M., *Nuclear Energy Conversion*, American Nuclear Society, 555 North Kesington Av., La Grange Park, Illinois 60525, Usa, 1982.
3. ETHERINGTON, H., *Nuclear Engineering Handbook*, McGraw-Hill Book Company, 1958.
4. GARLAND, WM. J., *Water and Steam Properties - V1.03*, Department of Engineering Physics, McMaster University, 1280 Main St. W., Hamilton, Ontario, Canada, 18S 4m1, 1991.
5. HAAR, L., GALLAGER, J. S., KELL, G. S., *Steam Tables Thermodynamic and Transport Properties and Computer Programs for Vapor and Liquid States of Water in SI Units*, Hemisphere Publishing Corporation, New York, 1984.
6. RUST, J. H., *Nuclear Power Plant Engineering*, S. W. Holland Company, P. O. Box 250254, Atlanta GA, 30325, USA, 1979.
7. The Math Works Inc., *The Student Edition of MATLAB, The Ultimate Computing Environment for Technical Education*, PRENTICE HALL, Englewood Cliffs, NJ 07632, 1995.