

ANÁLISE DE SISTEMAS DE CONTROLE PARA ADAPTAÇÃO EM TEMPO REAL DE MODELO PARCIAL DE USINA NUCLEAR A DADOS EXPERIMENTAIS

Fernando Pontes Araújo
ferparaujo@gmail.com

Resumo. Este trabalho baseia-se no experimento PKL-III B3.1, realizado pelo consórcio KWU/Siemens a fim de obter dados sobre situações de acidente em usinas nucleares. De posse dos resultados, implementou-se um modelo computacional no programa de simulação GRS ATHLET com a finalidade de reproduzir os dados obtidos empiricamente, objetivo não completamente atingido devido a desvios significativos, principalmente nas vizinhanças de transientes. O escopo do trabalho é, utilizando os dados obtidos experimentalmente como referência, desenvolver e analisar sistemas de controle que atuem junto ao programa de simulação, aumentando sua fidelidade.

Palavras chave. controle, energia nuclear, simulação

1. Introdução

Utilizando o programa GRS ATHLET, a equipe do Institute for Safety and Reliability (localizado em Garching, distrito adjacente a Munique, Alemanha) implementou um modelo da instalação experimental PKL-III, uma usina nuclear experimental, com o objetivo de reproduzir os resultados do experimento PKL-III B3.1, realizado e tabelado pelo consórcio KWU/Siemens na década de 1990.

Por se tratar de um programa em renovação (o código se encontra desatualizado), os resultados se desviavam continuamente dos observados experimentalmente, sobretudo para longos intervalos de tempo e na ocorrência de transientes. Tais desvios comprometem a validade das simulações. Foi proposta, então, a utilização de algoritmos adicionais de controle, externos ao programa, para correção das simulações, com base nos dados experimentais já disponíveis, ou seja, utilizando-os como referência.

No contexto de uma simulação de projeto maior e mais complicado, Kerner; Schaefer; Liu (2008) [1] mostraram que a aplicação de algoritmos de controle e otimização apresenta, para o modelo completo de uma usina nuclear, problemas inerentes difíceis de resolver. Assim sendo, o escopo deste trabalho é melhorar a simulação a partir de modelo parcial, para depois analisar e comparar os diferentes métodos utilizados.

2. Objetivo

O controle realizado a partir de exemplo pronto, através do qual uma comparação direta entre resultados numéricos e empíricos é possível, não é de aplicação prática imediata: claro, numa usina real em situação de emergência não se dispõe de tabelas que descrevem exatamente o está por acontecer, já que acidentes jamais são simulados em instalações não-experimentais por razões óbvias de segurança.

O objetivo maior deste trabalho é aumentar a compreensão sobre o programa ATHLET e suas falhas, a fim de se efetuar correções no futuro. O escopo é a melhoria das curvas de pressão x tempo obtidas para o gerador de vapor intacto (a ser explicado mais adiante):

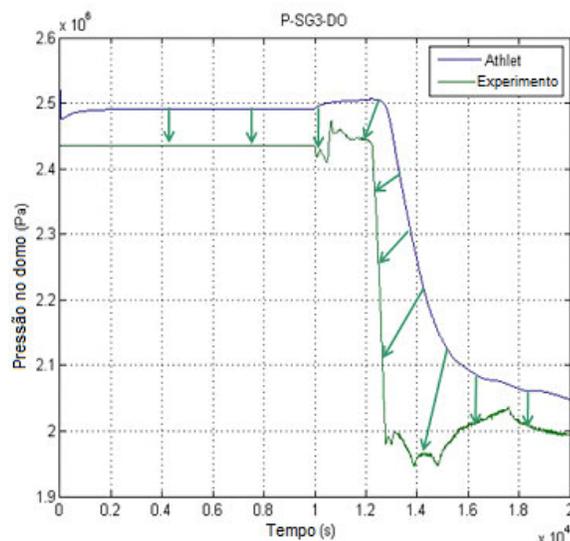


Figura 1: Comparação entre simulação e experimento

3. O experimento PKL

PKL é a sigla, em alemão, para Funcionamento de Ciclo Primário (tradução livre de *Primär-Kreis-Lauf*). Este experimento utilizou-se, na prática, de um modelo em escala reduzida do reator de água pressurizada presente na instalação Phillippsburg II, Alemanha, de 4 ciclos e 1300MW, no qual apenas o ciclo primário e partes essenciais do secundário (sem o condensador e a turbina) são modelados. O consórcio KWU/Siemens foi responsável pela construção, condução e documentação de todos os testes.



Figura 2: Usina nuclear de Phillippsburg, Alemanha

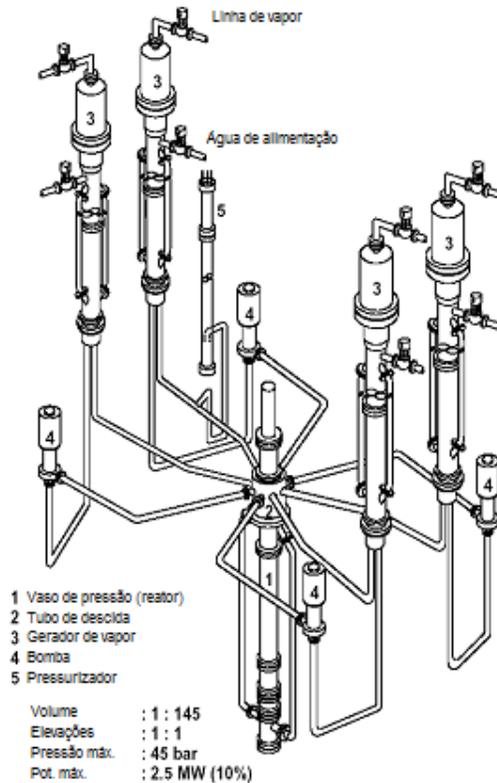


Figura 3: Esquema da instalação PKL

Os dois primeiros experimentos da série, PKL-I e PKL-II, tinham como objetivo estudar acidentes de perda de líquido refrigerante de pequenas ou grandes proporções (em inglês: *small/large break loss-of-coolant accident*, ou LOCA) e ocorreram no período de 1977 a 1986. Já o terceiro experimento da série, de 1986 a 1999, cujos dados foram utilizados neste trabalho, foi mais abrangente e teve como objetivo a análise termo-hidráulica dos ciclos primário e secundário, com ou sem perda de líquido refrigerante, e a conseqüente investigação de transientes.

Os transientes numa usina nuclear se caracterizam por mudanças repentinas e bruscas na potência gerada, resultantes de mudanças de outras variáveis como por exemplo a pressão do vapor d'água nos geradores de vapor, abertura/fechamento de válvulas/registros ou variação de vazão de água de alimentação (também no gerador de vapor).

3.1. O experimento PKL-III B3.1

O experimento PKL-III B3.1 consistiu especificamente na verificação da possibilidade de se desligar o reator apenas por meio do fluxo natural de líquido refrigerante (no caso, água) em apenas um dos geradores de vapor, após falha e posterior isolamento do outro.

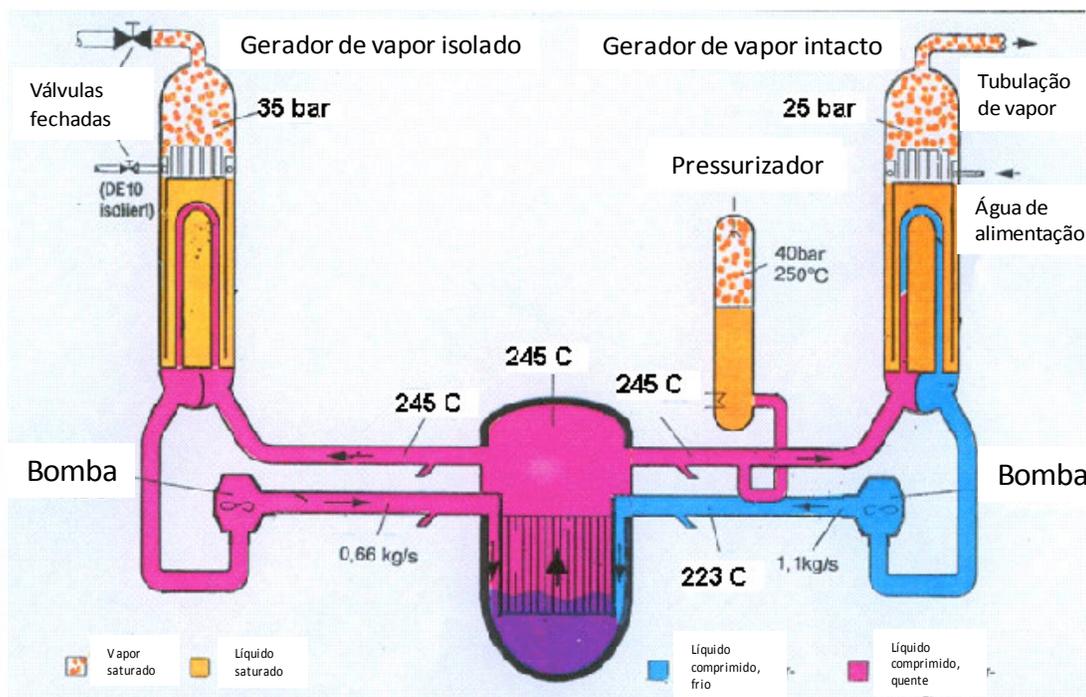


Figura 4: PKL-III B3.1, esquema da instalação

A instalação, representada na figura acima, é composta de um ciclo primário simplificado acoplado a dois geradores de vapor, um deles isolado, ou seja, com a saída de vapor e entrada de água de alimentação fechadas devido a algum tipo de acidente ou mal-funcionamento do mesmo ou dos circuitos de alimentação associados.

4. Ambiente de desenvolvimento e simulação

4.1. ATHLET

O ATHLET (Analysis of THERmal-hydraulics of LEaks and Transients, análise termo-hidráulica de vazamentos e transientes, em tradução livre) é um software de simulação desenvolvido pela GRS, Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit mbh, empresa sediada em Garching, Alemanha. Dotado de diversos módulos, o programa possibilita a introdução de modelos de instalações nucleares a fim de realizar simulações de comportamento dinâmico.

4.2. MATLAB

Conhecida ferramenta matemática e de programação, o MATLAB foi utilizado para introduzir os sistemas de controle nas simulações, graças à possibilidade de realimentação de parâmetros do ATHLET.

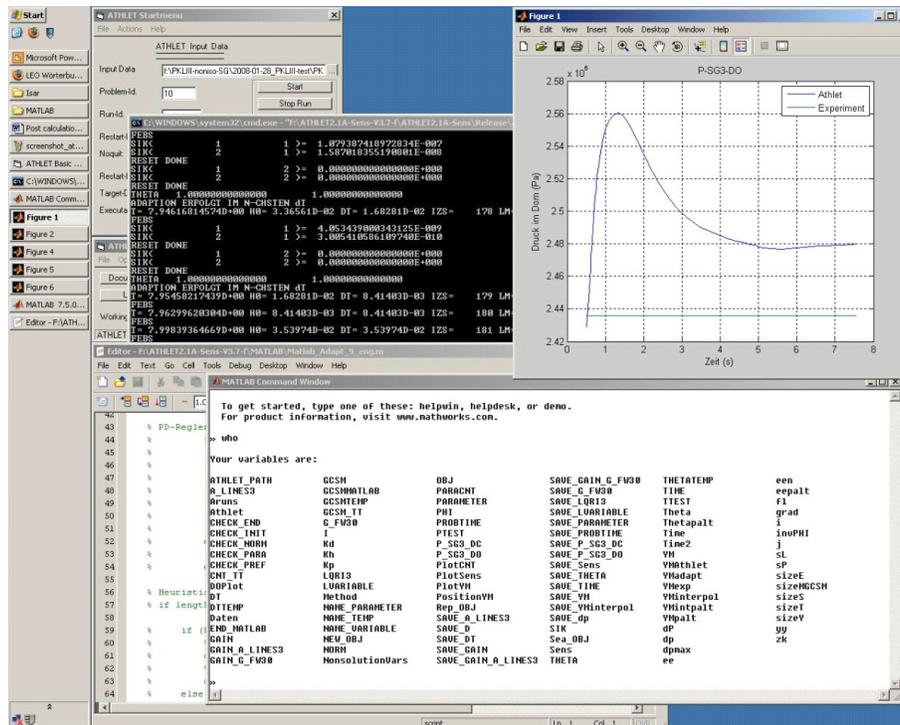


Figura 5. ATHLET rodando em conjunto com MATLAB

4.3. Funcionamento da interface ATHLET-MATLAB

O ATHLET e o MATLAB foram, num primeiro momento, acoplados através de um arquivo de texto. A cada passo de simulação, existe a opção de gerar um arquivo de texto com todos os parâmetros calculados para o instante de tempo em questão. Este mesmo arquivo é lido no início de cada passo, afim de obter as informações necessárias para o próximo cálculo. Um código em FORTRAN tomava o arquivo, o renomeava e tornava os parâmetros disponíveis ao usuário no MATLAB. Depois de feitas as modificações desejadas, o arquivo era então novamente renomeado e os parâmetros modificados, lidos pelo ATHLET e levados em conta para o cálculo do próximo passo.

Tal interface era totalmente funcional, porém muito lenta: o ato de escrever e acessar arquivos no disco rígido fazia com que mesmo códigos muito simples do MATLAB tornassem uma simulação demorada demais. Assim, o princípio foi mantido, porém ao invés de arquivos de texto no disco rígido, foi trabalhado um método de manipulação de memória RAM, definitivamente mais veloz.

5. Metodologia de trabalho

5.1. Modelo utilizado

Para desenvolvimento do sistema de controle foi tomado apenas o gerador de vapor intacto (ou seja, não isolado):

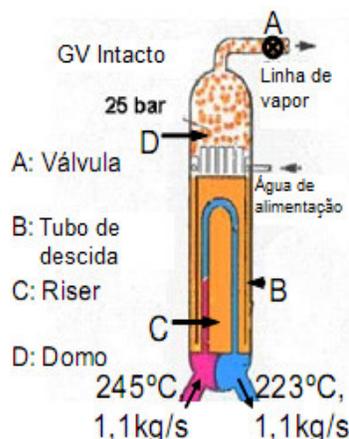


Figura 6: Gerador de vapor intacto

A água do primário, vinda do reator, entra por baixo, à esquerda (vermelho), troca calor com a água de alimentação presente no gerador de vapor e é encaminhada de volta ao reator, embaixo, à direita (azul). A água de alimentação entra no gerador de vapor pela parte superior do mesmo, seguindo por uma tubulação lateral (tubo de descida ou downcomer, B) até a base. O vapor produzido sobe pelo riser (tubo de subida) (C), passa pelo domo (D) e segue para a turbina depois de passar pelo registro de controle (A).

Observando-se apenas este gerador de vapor e as variações de pressão que nele ocorrem durante o processo de desligamento do reator, obtém-se uma representação fiel do atual estado do reator: a temperatura do núcleo influi diretamente a quantidade de vapor produzida, por conseguinte as pressões medidas no domo (D) e tubo de descida (B). Por isso, todos os algoritmos de controle foram desenvolvidos comparando valores reais (ou seja, experimentais) de pressão com valores simulados, sempre para o mesmo gerador de vapor isolado. Esclarecendo de outra forma: o objetivo deste trabalho é fazer com que as curvas de pressão x tempo simuladas sejam tão próximas quanto possível das curvas experimentalmente determinadas quando da execução do teste PKL-III B3.1.

5.2. Parâmetros utilizados para composição dos sistemas de controle

Os parâmetros utilizados para composição dos sistemas de controle foram os seguintes:

- Abertura do registro de controle de vazão do vapor (aberto/fechado, um número entre 0, totalmente fechado, e 1, totalmente aberta), CSA (cross-section area);
- Vazão mássica de água de alimentação, SPW (do alemão *Speisewassermassenstrom*) (kg/s),

que são os dois parâmetros mais sensíveis para modular a pressão, de acordo com Kerner; Schaefer; Liu (2008) [1].

Variáveis a serem adaptadas:

- Pressão da água no tubo de descida, (Pa);
- Pressão do vapor no domo, (Pa).

5.3. Implementação dos algoritmos de controle

Pela própria arquitetura do ATHLET, parâmetros não podem ser diretamente alterados. Não é possível tomar, por exemplo, a vazão mássica de água de alimentação do gerador de vapor e simplesmente substituí-la por outro valor.

Para introduzir um sistema de controle na simulação deve-se alterar o parâmetro THETA, um vetor de tamanho igual ao número de parâmetros modificáveis (no caso deste trabalho, apenas 2). Cada elemento do vetor tem relação direta com um parâmetro: ao início de cada passo da simulação, os valores correntes de cada parâmetro são multiplicados pelos termos correspondentes de THETA.

Como neste trabalho foram modificados apenas 2 parâmetros referentes ao gerador de intacto (abertura da válvula de escape CSA, fig. 1 letra A e vazão mássica de água de alimentação SPW), o vetor retornado pelo ATHLET sem modificações é sempre o seguinte:

$$THETA = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

A pressão no interior do gerador de vapor é proporcional aos parâmetros tomados. Para inserir modificações nos parâmetros a fim de regular a pressão, vale a seguinte relação entre CSA e THETA:

$$CSA_{t+1} = CSA_t \times THETA(1) \quad (2)$$

Assim, o valor de CSA é inserido no simulador e utilizado para efetuar o próximo passo de cálculos. Como CSA e SPW possuem limitações físicas:

$$CSA = 0,116 \text{ (aberto/fechado)} \quad (3)$$

$$SPW = 0,044 \text{ kg / s} \quad (4)$$

Determina-se os limites de variação de THETA:

$$0 < THETA(1) < 8,6207 \text{ (CSA)} \quad (5)$$

$$0 < THETA(2) < 2,2609 \text{ (SPW)} \quad (6)$$

6. Controladores desenvolvidos

6.1. Controlador Proporcional

Controlador simples, do tipo *black-box*.

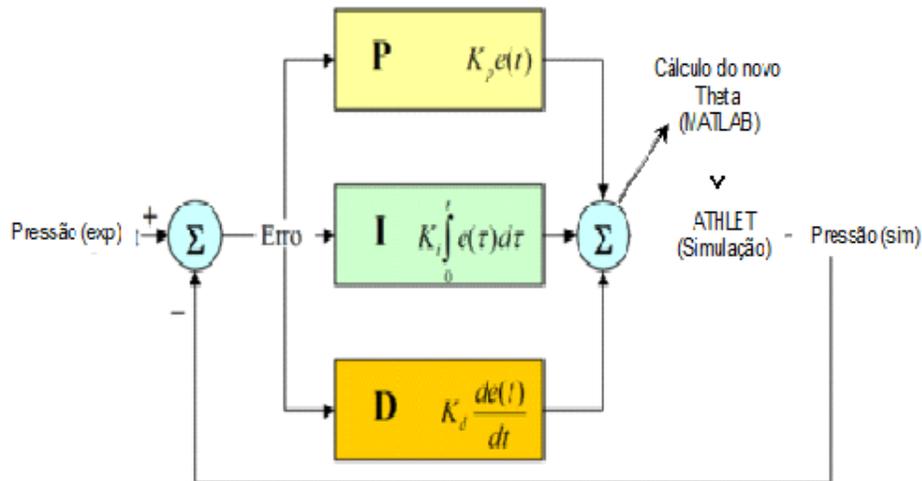


Figura 7: Diagrama de blocos de controlador PID

O valor experimental de pressão (no domo ou no tubo de descida) é comparado com o valor correspondente, simulado pelo ATHLET. O erro é calculado e utilizado para a determinação de um novo coeficiente THETA (em outras palavras: para modificar a abertura do registro, CSA, ou da vazão mássica, SPW), valor que será lido pelo ATHLET no cálculo do próximo passo numérico.

Embora o esquema da fig. 7 mostre um controlador PID, na prática foi utilizado apenas um controlador P. Testes preliminares confirmaram a efetividade de se utilizar apenas correção proporcional: controladores mais elaborados com correção integral e diferencial adicionavam complexidade à sintonia e não produziam resposta substancialmente melhor ou mais rápida. Como o controle realizado pelas rotinas em MATLAB não ocorre de forma direta (é realimentado no ATHLET para novos cálculos), existe amortecimento e adequação física da pressão resultante das alterações feitas em CSA e SPW, inerentes ao modelo matemático do ATHLET.

Foram realizadas primeiramente simulações adaptando apenas um parâmetro (CSA ou SPW), e depois adaptando ambos parâmetros ao mesmo tempo, cada um responsável por corrigir ou separadamente, porém. Caso contrário, as ações de controle seriam conflitantes.

Abaixo, exemplos de resultados para adaptação de dois parâmetros simultâneos (CSA modulando a pressão no tubo de descida, SPW modulando a pressão no domo), bem como a variação no tempo dos parâmetros de controle em si.

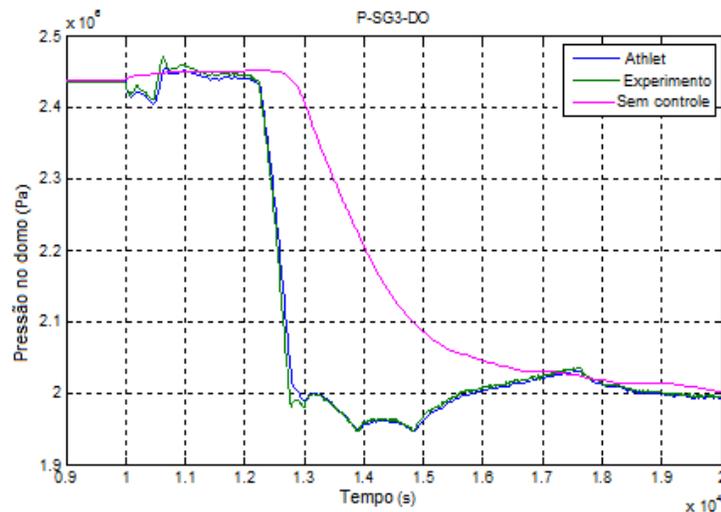


Figura 8: Pressão no domo (Pa) x tempo (s), controlador P, 2 parâmetros simultâneos – comparação

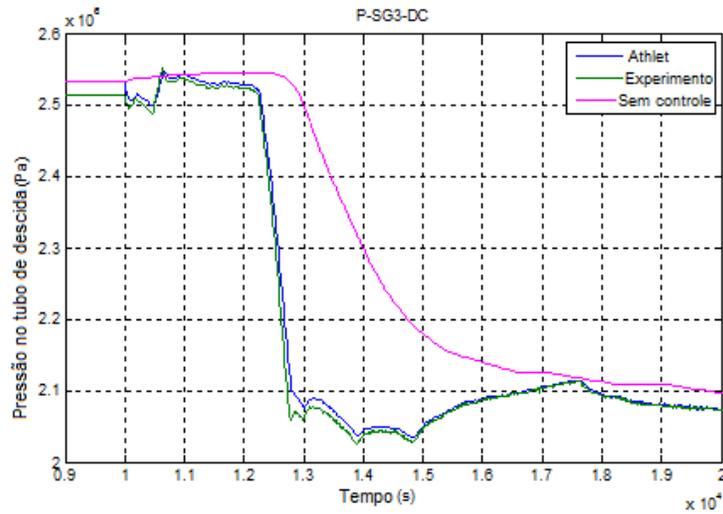


Figura 9: Pressão no tubo de descida (Pa) x tempo (s), controlador P, 2 parâmetros simultâneos – comparação

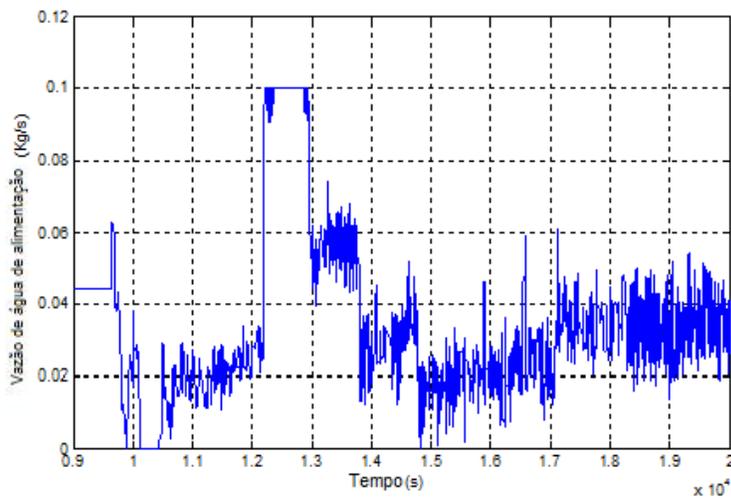


Figura 10: Vazão de água de alimentação (kg/s) x tempo (s), controlador P, 2 parâmetros simultâneos

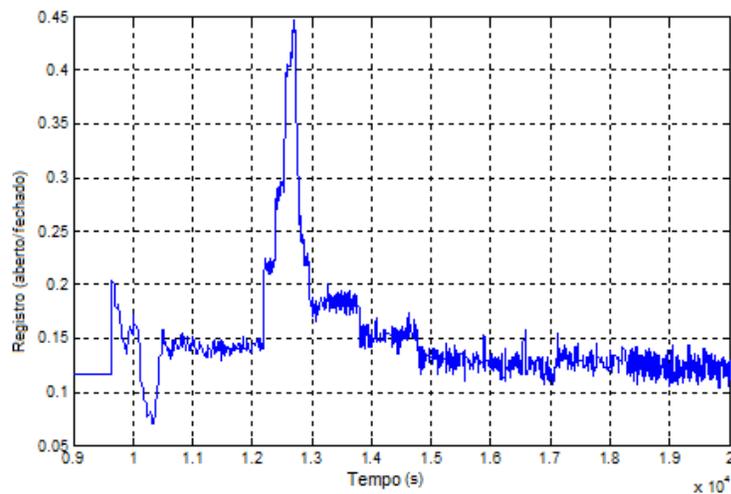


Figura 11: Abertura do registro CSA (aberto/fechado) x tempo (s), controlador P, 2 parâmetros simultâneos

6.2. Controlador Heurístico

Controlador que implementa a seguinte regra de controle, introduzida por Kerner; Schaefer; Liu (2008) [1]:

$$\frac{d^2(\text{pressão})}{dt^2} > 0 \Rightarrow CSA \downarrow$$

$$\frac{d^2(\text{pressão})}{dt^2} < 0 \Rightarrow CSA \uparrow$$

$$\frac{d^2(\text{pressão})}{dt^2} = 0 \Rightarrow CSA \rightarrow$$

(7)

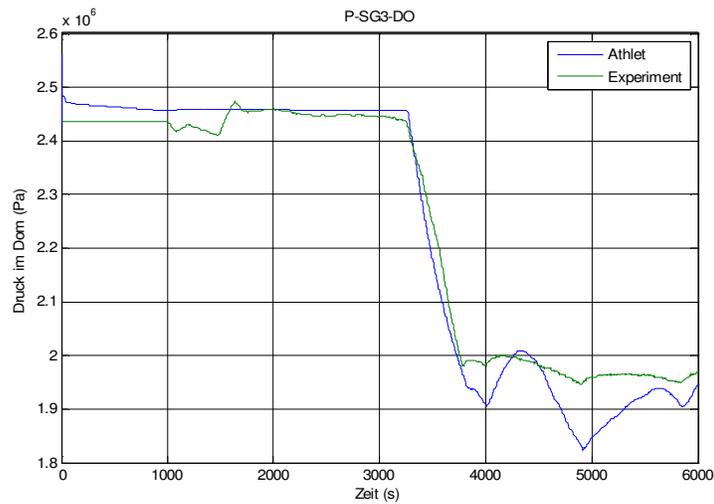


Figura 12. Pressão no domo (Pa) x tempo (s), controle heurístico

6.3. Detecção do transiente

O fenômeno mais significativo no experimento PKLIII B3.1 é o aparecimento do transiente. A repentina e grande variação de pressão e potência da instalação (no instante ~12000s) não é detectada pelo software ATHLET com precisão, causando discrepância ainda maior nas vizinhanças do transiente.

Assim, foi desenvolvido um método para tal detecção, com os seguintes resultados:

- Tempo de ocorrência do transiente: 12246s
- Pressão correspondente: 2.419 MPa
- Atraso da detecção: 28s (7 passos, 4s por passo de cálculo)

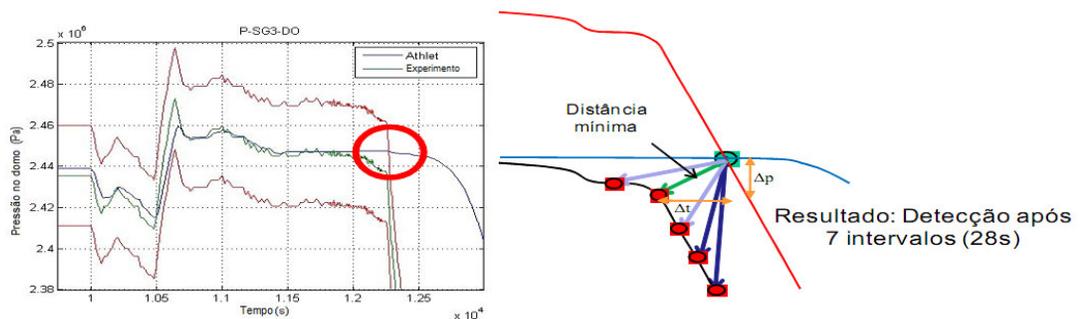


Figura 13. Esquema ilustrativo da detecção de transiente

7. Conclusões

Embora de natureza bastante simples, os controladores do tipo black-box foram de efetividade muito maior que a esperada. A aproximação obtida foi igual ou melhor que as mostradas por Kerner; Schaefer; Liu (2008) [1], obtidas por métodos avançados de análise de sensibilidade de parâmetros.

Outra vantagem do sistema de controle proporcional mostrado neste trabalho é a baixo requisito computacional em comparação a outras soluções: quanto mais condicionais presentes numa rotina, mais tempo ela levará para ser calculada, o que pode ser decisivo quando não se dispões de clusters de alto desempenho dedicados exclusivamente à simulação, como era o caso.

A implementação de tais controladores, porém, não consistiu tarefa tão trivial: grande parte do período de trabalho foi despendido aprendendo e estudando o funcionamento do software ATHLET, bem como compreendendo fisicamente os fenômenos por ele simulados.

Se o controlador P foi um sucesso não esperado, pode-se dizer exatamente o contrário do controlador heurístico. Apesar de a regra de controle implementada ser bastante simples, a sintonia do controlador se mostrou muito delicada, não podendo ser atingida em tempo hábil para realização das outras tarefas previstas para o trabalho, o que foi decepcionante.

Muito tempo foi despendido, também, em busca de soluções mais satisfatórias para o controlador heurístico. Sua importância, porém, foi relativizada pelos orientadores do trabalho, já que esta parte consiste majoritariamente na verificação de resultados obtidos por Kerner; Schaefer; Liu (2008) [1].

Este trabalho, juntamente com o desenvolvido por Ceuca (2008) [2], é parte constituinte de uma frente de trabalho com o objetivo de somar melhorias ao software ATHLET, que, se utilizado sem correções, apresenta resultados inconclusivos para análises de segurança de usinas nucleares.

Em suma, foi experiência muito interessante desenvolver um trabalho em conjunto com um instituto alemão, e desafio muito grande o regime de trabalho independente exigido, aliado ao caráter específico do trabalho.

Para o futuro, pode-se refinar o controlador proporcional por meio da utilização de controladores proporcionais múltiplos, ou seja, utilizando-se uma matriz de correção ao invés de apenas um coeficiente; controladores PD e PID também poderiam ajudar a reduzir o erro das simulações.

O método de detecção de transiente desenvolvido também não é ótimo, principalmente devido à necessidade de reduzir a ação de controle antes do transiente para facilitar e melhorar a precisão de detecção.

Todas estas melhorias encontram-se em desenvolvimento no ISaR, em Munique, pelo aluno Chen Kan Wu (Technische Universität München).

8. Referências

- Kerner, Alexander; Schaefer, Anselm; Liu, Xiaojing. Entwicklung eines Simulators mit automatischer Anpassung des Simulationsmodells an Messdatenreihen. Relatório parcial. Institute for Safety and Reliability (ISaR)/ Technische Universität München, 2008.
- Ceuca, Sabin. Untersuchung von Identifikationsmethoden zur Anpassung des Teilsimulationsmodells "Reaktorkern". Tese de mestrado. Institute for Safety and Reliability (ISaR)/ Technische Universität München, 2008.
- GRS, ATHLET Mod. 2.1 Cycle A, Models and Methods. Gesellschaft für Anlagen- und Reaktorsicherheit (GRS) mbH, 2006.
- Siemens-KWU, Especificação de testes, Teste PKL III B 3.1. Abfahren der Anlage im Naturumlauf mit einem isolierten Dampferzeuger und einen Abfahrgradienten der noch einen Umlauf im isolierten Dampferzeuger ermöglicht, 1989.
- Ogata, Katsuhiko. Engenharia de Controle Moderno. Prentice Hall, 2003.

9. Direitos autorais

ANALYSIS OF CONTROL SYSTEMS FOR ONLINE ADAPTATION OF NUCLEAR POWER PLANT PARTIAL MODEL TO EXPERIMENTAL DATA

Fernando Pontes Araújo

ferparaujo@gmail.com

Abstract. This report is based on the PKL-III B3.1 experiment, done by the KWU/Siemens consortium to obtain data on accident situations in nuclear power plants. With this data, a computational model was implemented on GRS ATHLET simulation software, aiming to reproduce the empirically obtained results, objective that was not entirely achieved due to significant error in simulation specially around transients. The scope of this report is to develop and analyze, using the experimental data as reference, control systems that act in conjunction with the simulation software, this way improving it's fidelity.

Keywords. control ,nuclear energy, simulation