

1 Introdução

1.1. Aspectos Gerais

A indústria de geração elétrica de fonte nuclear baseia-se em princípios de segurança, para que não haja risco significativo de acidentes com liberação de radioatividade para o meio ambiente e a população em geral. A base normativa utiliza critérios de projeto para assegurar a estabilidade, estanqueidade e operabilidade dos sistemas necessários à garantia de:

- desligamento seguro e manutenção da subcriticalidade do reator;
- capacidade de remoção do calor residual;
- confinamento da radioatividade.

Em uma instalação nuclear 95% do inventário de elementos radioativos se encontra no núcleo do reator. Os 5% restantes estão em quase sua totalidade localizados na piscina de elementos combustíveis já utilizados e, assim, praticamente não há radioatividade fora do prédio do reator. Portanto, o principal meio de proteção, considerando o conceito de defesa em profundidade, é a utilização de várias barreiras para assegurar o confinamento da radioatividade. A Figura 1.1 mostra as barreiras utilizadas em usinas do tipo PWR, como as brasileiras.

Variadas condições de projeto são pré-estabelecidas em uma instalação nuclear, de modo a considerar situações específicas em operação normal ou em condições com falhas postuladas de sistemas. Acidentes internos e externos também são postulados, inclusive eventos naturais extremos. Em todos os casos devem ser alcançados todos os objetivos de segurança.

Assim, muitos outros sistemas existem em uma instalação nuclear, considerados essenciais para a segurança, além daqueles necessários à geração térmica e elétrica. Os conceitos de redundância, diversidade e de separação física são utilizados no projeto de sistemas de proteção e remoção de calor, de sistemas para mitigação das consequências de acidentes, bem como de sistemas elétricos e

de instrumentação e controle. Considerando que usualmente existem várias redundâncias desses sistemas, pode-se dizer que em uma instalação nuclear centenas de sistemas têm que ser projetados e mantidos de acordo com critérios de projeto muito rígidos.

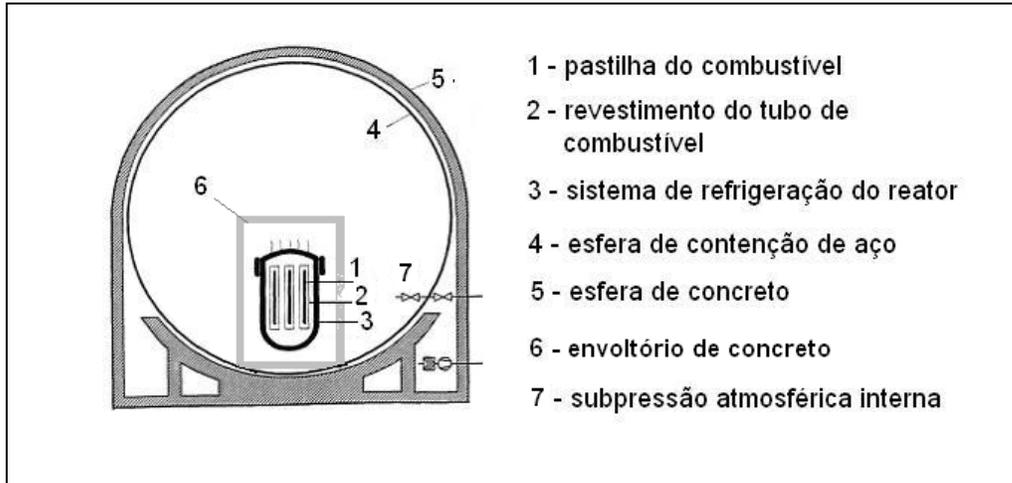


Figura 1.1 - Visão esquemática das barreiras de proteção de uma Usina PWR
 (fonte: ETN)

Mesmo após a construção, a necessidade de manutenção e de modernização dos sistemas força uma permanente vigilância no que diz respeito à atualização da técnica de projeto e manutenção. Além disso, a Indústria Nuclear prevê uma Revisão Periódica de Segurança a cada 10 anos, onde os critérios de projeto e de segurança podem ser revistos e atualizados.

Nas últimas décadas a evolução do conhecimento científico e da técnica tem sido considerável, e isso tem possibilitado grandes avanços nas metodologias para a análise de sistemas de instalações nucleares.

Entre as hipóteses de eventos naturais considerados nos critérios de projeto estão os terremotos, e, deste modo, os sistemas necessários para garantir a segurança devem ser projetados para resistir e manter a operabilidade durante e após eventos sísmicos postulados. O presente trabalho se encontra no contexto da análise sísmica para garantir a segurança desses sistemas.

Nas análises de dinâmica estrutural, todos os sistemas, que de uma forma geral recebem a excitação sísmica através da estrutura civil do prédio, são chamados de sistemas secundários (SS). A estrutura civil em si forma o sistema principal (SP).

Atualmente há uma tendência da utilização de métodos de projeto que considerem um risco global uniforme para a instalação nuclear, tendo cada sistema o seu risco definido de acordo com a importância da sua função para a segurança da instalação. A definição de um sismo de projeto específico para o sítio da instalação, definido por um espectro de resposta de projeto com base em ameaça uniforme, UHRS, é uma recomendação das atuais normas, e já se propõe um espectro de resposta de projeto de risco uniforme, URRS, para as novas instalações, [NUREG/CR-6728 - 2001], [ASCE / SEI 43-05 - 2005], [US NRC-RG 1.208 – 2007].

1.2. Pesquisas anteriores no DEC

A ELETRONUCLEAR, ETN, é proprietária e responsável pela operação, manutenção e geração elétrica de fonte nuclear das Usinas Angra1 e Angra2, bem como pelo projeto de novas usinas nucleares no Brasil. Após a construção de Angra2 e com vistas a Angra3, desde 1997, a ELETRONUCLEAR firmou um convênio com a PUC-Rio, buscando se manter no estado-da-arte do conhecimento em engenharia civil, no que tange à dinâmica das estruturas.

Dentro do convênio, o Departamento de Engenharia Civil, DEC, na área de Instabilidade e Análise Dinâmica, criou uma linha de pesquisa e vem aprofundando o estudo de respostas sísmicas de sistemas secundários, SS, principalmente para a definição de espectros de resposta de projeto de sistemas mecânicos e de tubulações, que formam uma parcela significativa dos SS em uma instalação nuclear.

Atualmente, a análise sísmica de muitos desses sistemas secundários utiliza a técnica de análise modal espectral, para a qual houve grandes avanços nos últimos decênios. Muitos dos avanços vêm sendo alcançados dentro da linha de pesquisa do DEC com a publicação de vários trabalhos nesta área.

Entre outros resultados relevantes, os trabalhos da linha de pesquisa já permitem concluir como avanços para a análise modal espectral:

- a possibilidade de utilizar técnicas para considerar o efeito de acoplamento entre os SS e o SP;
- a importância da consideração dos movimentos relativos entre os diversos apoios do SS no SP;
- a influência de efeitos de não linearidade física, de temperatura e de pressão interna no sistema secundário, permitindo a utilização de fatores de transposição entre os espectros elásticos e inelásticos;
- a conveniência de uma análise probabilística, onde a excitação de projeto dos SS se correlaciona a uma probabilidade uniforme em toda a faixa de frequências de interesse.

Também se pode concluir a validação da utilização da ferramenta *SASSI*, [Manual Teórico, 1999], que utiliza metodologia no domínio da frequência, para a

análise dinâmica dos sistemas principal e secundários. São apontadas vantagens em utilizar o programa *SASSI*, não apenas porque permite uma melhor representação das propriedades dinâmicas envolvidas, inclusive do amortecimento, como também por utilizar de modo mais eficiente os recursos computacionais.

1.3. Objetivos

Considera-se que os estudos da linha de pesquisa, apresentados até o momento, são feitos em forma acadêmica, para modelos particulares e excitados apenas em um único plano, sendo necessário para a obtenção de espectros acoplados fazer um modelo de SS para cada frequência de análise, e ponderar FDEP intermediárias no caso de SS com múltiplos apoios no SP. Dessa forma as análises são demoradas, trabalhosas e de difícil relacionamento entre si.

O objetivo principal do presente trabalho é propor um roteiro, com uma nova formulação do acoplamento entre os SS e SP, para obter os Espectros de Resposta de Projeto de SS em geral e de sistemas mecânicos e de tubulações em particular, incluindo a influência do acoplamento e em base probabilística.

Esse roteiro utiliza a ferramenta *SASSI*, permite a consideração de muitos dos avanços já apontados, fundamenta-se nas conclusões das pesquisas até o momento, considerando seus aspectos fundamentais de forma consistente, permite um elevado grau de automatização e pode ser utilizado em situações gerais de cálculo.

A partir de ferramentas já existentes, fornecidas pelo próprio programa *SASSI* ou já desenvolvidas no âmbito da linha de pesquisa, além do roteiro de cálculo, este trabalho propõe um conjunto de programas que permite:

- considerar modelos tridimensionais e suas respostas superpostas para uma excitação genérica atuando em 3 direções ortogonais;
- representar os efeitos de acoplamento entre SS e SP,
- incluir a influência dos deslocamentos relativos entre os nós de apoio do sistema secundário no sistema principal;
- utilizar os fatores de transposição entre espectros elásticos e inelásticos;
- a análise probabilística para obter Espectros de Resposta Uniformemente Prováveis, acoplados ou não (ERUP, ERAUP);
- incluir interfaces para a utilização de seus resultados com outros programas de cálculo da ETN e com programas de utilização geral, como o *MS-EXCEL*.

1.4. Organização do Texto

No Capítulo 2 é apresentada uma descrição sumária de diferentes tipos de sistemas secundários em Usinas nucleoeletricas com reator a água pressurizada, tipo PWR, como as brasileiras, e uma breve descrição de como têm sido projetados para resistir a sismos, ressaltando para quais tipos de sistemas secundários a atual linha de pesquisa se aplica. Ainda neste capítulo é feita uma revisão dos principais tópicos apresentados nos estudos anteriores da linha de pesquisa de respostas sísmicas de SS, no DEC.

O modo de se considerarem os SP com o programa *SASSI* é apresentado no Capítulo 3, utilizando modelos simplificados dos prédios do reator de Angra1 e de Angra3.

Os espectros de resposta de projeto para sistemas secundários, considerando ou não os efeitos de acoplamento, e obtidos deterministicamente ou utilizando métodos probabilísticos são apresentados no Capítulo 4. Ainda nesse capítulo são apresentados fatores de transposição para espectros que incluem as influências de não linearidade física, da variação da pressão interna e da temperatura, bem como da intensidade da excitação, na forma dos espectros de projeto para SS específicos de tubulações.

O Capítulo 5 é reservado para a descrição do roteiro de análise proposto para a obtenção dos espectros de resposta de projeto de sistemas secundários.

Alguns exemplos de aplicação são apresentados no Capítulo 6, com situações típicas da Usina de Angra1.

No Capítulo 7 reúnem-se as conclusões principais e sugestões para o prosseguimento da pesquisa.

No Anexo 1 é aprofundado um estudo das características dinâmicas do modelo do SP utilizado para representar a estrutura civil do Reator no exemplo apresentado.

Os Anexos 2 a 6 apresentam os manuais de utilização dos programas elaborados no âmbito da linha de pesquisa, desenvolvidos ou modificados pelo presente estudo.

Finalmente, um glossário dos termos utilizados é apresentado no Anexo 7.