

2 Ambientação das Análises de Sistemas Secundários

2.1. Tipos de Sistemas Secundários Típicos em uma PWR

Entre as centenas de sistemas que garantem a produção e a segurança nuclear, o mais importante é o sistema de refrigeração do núcleo do reator, RCL. Esse sistema funciona de forma fechada e transfere o calor produzido pela fissão nuclear para o sistema de vapor, que movimenta o conjunto da turbina e gerador elétrico. Os seus principais componentes são o vaso de pressão, RPV, os trocadores de calor principais, chamados de geradores de vapor, SG, as bombas de circulação, RCP, as tubulações que interligam estes componentes e o pressurizador.

A Figura 2.1 apresenta de forma esquemática o funcionamento de uma usina do tipo PWR, com destaque para o RCL e seus principais componentes no interior do edifício da contenção.

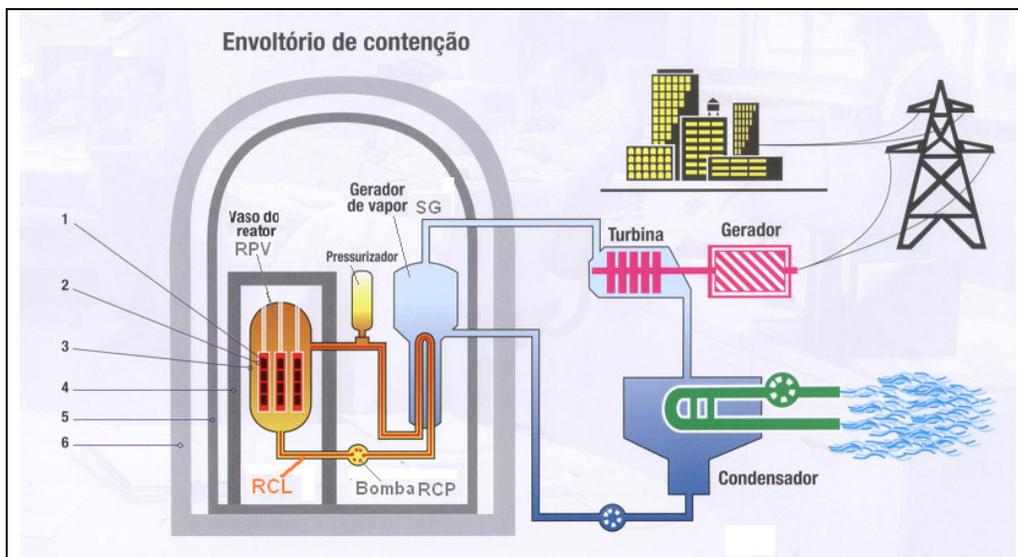


Figura 2.1 - Visão esquemática funcionamento de uma Usina PWR
(fonte: ETN)

Sendo o núcleo do reator parte integrante do sistema, torna-se necessário um tratamento especial para o RCL, que faz com que uma grande parcela do esforço de projeto da instalação nuclear se concentre nesse sistema. A especificidade do sistema também se manifesta em sua análise sísmica, sendo o único sistema da usina em que é utilizada a análise sísmica acoplada formal, de transiente dinâmico, onde os equipamentos, tubulações e suportes são modelados detalhadamente, incluindo até as não linearidades geométricas dos seus suportes, e o modelo do RCL é acoplado ao da estrutura civil do edifício do reator.

Muitos sistemas auxiliares são utilizados para garantir o bom funcionamento do RCL, garantindo o suprimento de água, substituição e purificação da água, para o monitoramento da química com finalidades diversas, como controlar a reatividade e inibir corrosão. Mesmo em operação normal, muitos outros sistemas são utilizados para garantir suprimento elétrico, refrigerar os componentes e para a remoção de calor quando o reator é desligado. Também existem sistemas de segurança, tais como sistemas de injeção de água borada e de resfriamento do núcleo, que são previstos para casos de emergência. Todos esses sistemas, subsistemas e componentes, bem como os seus suportes e estruturas de apoio, são dimensionados para resistirem ao sismo máximo previsto para o sítio da usina, designado como terremoto de desligamento seguro, SSE.

Mesmo estruturas e sistemas fora do edifício do reator, no caso de serem necessários para garantir o funcionamento de qualquer um dos sistemas de segurança, também são projetadas sísmicamente. Nesse caso se encontram as estruturas dos edifícios onde se localizam as salas de controle da instalação e muitas outras, tais como as tomadas d'água e os seus encaminhamentos até o núcleo do reator, bem como os encaminhamentos para a descarga dessa água de serviço.

Sendo assim, há uma enorme diversidade de estruturas, sistemas e componentes que, necessariamente, são dimensionados para resistirem ao terremoto de projeto.

Para tornar viável o projeto sísmico, normalmente são considerados diferentes critérios de projeto, dependendo do sistema e subsistema a ser analisado.

Muitas tubulações finas e seus suportes, que não tenham grande quantidade de energia embutida, são dimensionados por cargas de catálogo, obtidas de forma

conservadora pela experiência anterior para situações semelhantes, facilitando e barateando o projeto.

Outros equipamentos, normalmente rígidos, como bombas, equipamentos elétricos, etc., são especificados para terem suas frequências fundamentais altas, fora da faixa de amplificações sísmicas, e são projetados e testados apenas para as acelerações de corpo rígido a que serão submetidos.

Alguns equipamentos, muitas vezes existentes de forma repetida em diversos pontos da instalação nuclear, são projetados para resistir a uma envoltória de acelerações de pico de espectro, também tornando o projeto mais econômico, apesar de muitas vezes conservador, devido à praticidade de semelhança entre os componentes.

Porém, uma grande parcela de estruturas, sistemas e componentes é projetada especificamente para as solicitações sísmicas a que são sujeitas, obtidas para as posições específicas em que estão localizadas. Na grande maioria desses casos a estrutura, sistema ou componente, é analisada por uma análise modal espectral.

A grande facilidade desse tipo de análise é que o mesmo espectro de resposta, ER, no interior da estrutura civil, serve de excitação a diferentes subsistemas que estejam localizados na posição representada pelo espectro.

2.2. Considerações sobre o Espectro de Resposta e a Análise Modal Espectral

O espectro de resposta a uma excitação associa as respostas máximas de osciladores de um grau de liberdade, com frequência natural e amortecimento arbitrários, quando submetidos a essa excitação. Portanto, para a obtenção dos espectros de resposta nas várias posições onde estão localizados e apoiados os sistemas secundários, SS, é necessário o conhecimento do histórico de respostas da estrutura civil, SP, à excitação sísmica. Para isso existem dois tipos de solução:

- integração direta no tempo, onde é resolvido diretamente o sistema de matrizes de rigidez, massa e amortecimento do SP;
- análise modal no tempo, onde primeiro são extraídos os modos de vibração do SP e as acelerações finais são obtidas pela superposição das repostas modais no tempo.

Uma vez produzido o espectro de respostas representativo da excitação sísmica para a posição do SS a ser dimensionado, a análise modal espectral do SS é realizada através da superposição das respostas máximas de cada modo natural de vibração, calculada com os valores das ordenadas dos espectros de resposta correspondentes às frequências e amortecimentos modais.

Muito se tem escrito e houve grandes avanços no entendimento da obtenção dos espectros de resposta e da análise modal espectral nos últimos decênios. Inúmeros trabalhos têm sido propostos, com diferentes recomendações para a metodologia da superposição, escolha das frequências para as quais o espectro é calculado, formas de alargamentos e alisamentos dos espectros, etc.

Ainda assim, mesmo atualmente, esse assunto ainda traz controvérsias, e a comunidade internacional ainda tem questionamentos sobre alguns pontos da análise. Recentemente, VASILYEV (2007) apresentou questionamentos, entre outros com comentários em relação a:

- **amortecimento** – normas atuais apresentam o amortecimento variável de acordo com o nível de resposta [ASCE / SEI 43-05 – 2005], e portanto, induzindo a uma análise iterativa. Na prática ainda se utiliza apenas um único valor de amortecimento, menor para um terremoto de operação, OBE, (definido como tendo a metade das acelerações de um SSE na rocha no caso de Angra 1 e 2) do

que para um de desligamento seguro, SSE. Nas análises por integração direta, que além de possibilitar a representação de não linearidades, podem melhor representar o amortecimento do solo, é utilizado o amortecimento de Rayleigh, que, porém, é de difícil ajuste para toda a faixa de frequências. Nas análises modais, que utilizam os amortecimentos modais, bem representativos para cada modo de vibração, o amortecimento do solo não fica bem representado, podendo conduzir a resultados muito conservadores na produção dos espectros de resposta, uma vez que são adotadas limitações a estes amortecimentos modais.

- **frequências** – diferentes processos têm sido utilizados para a frequência de corte, tanto baseados no ERP, como nos espectros de resposta obtidos para os pontos da estrutura. Cabe ressaltar que uma escolha de frequência de corte muito alta pode levar a não conservadorismos, pois com as recomendadas superposições quadráticas, pode-se chegar a valores menores do que com as correções de modos rígidos. Também em relação às frequências para as quais o ER é produzido, com os modelos atuais, que atualmente podem ter centenas de modos de vibração até os 30Hz, e a recomendação das normas de se calcular o valor do espectro para as 75 frequências obrigatórias [NRC RG 1.122 – 1978], e mais todas as frequências modais, pode-se ter problemas práticos de execução.

- **envoltória de casos** – as normas recomendam estudos paramétricos para as situações de projeto, com a variação das propriedades características do solo, de diferentes excitações sísmicas, superposição de posições nodais, bem como diferentes formas de alargamentos, alisamentos, etc. Ao se considerarem diferentes tipos de envoltórias e/ou médias, chega-se a espectros de resposta que podem se diferenciar em mais de 30%, para a mesma estrutura, excitação e posição.

Assim, VASILYEV (2007) conclui que, mesmo seguindo as recomendações das normas, ainda é possível uma grande variação na obtenção dos espectros de resposta. O assunto ainda merece estudo, carece de contribuições para uniformizar a obtenção dos ER, e, enquanto ainda não houver uma base normativa mais fechada, deve ser tratado com discernimento na prática de projeto.

2.3.

Linha de Pesquisa de Respostas Sísmicas de Sistemas Secundários

2.3.1.

Sistema Secundário Simplificado Acoplado

OJEDA (1998) estuda a resposta de espectros acoplados de um sistema secundário simplificado (SSS) de tubulação, típico de uma usina nuclear. Como sistema principal (SP), utiliza um modelo bi-dimensional representativo do prédio do reator de Angra 3. Com o programa *ANSYS* e a técnica de análise de superposição modal no domínio do tempo, compara a influência para o dimensionamento do sistema secundário:

- da utilização de espectros acoplados ou não;
- dos deslocamentos relativos entre os apoios do SS no SP;
- das diferentes formulações para a combinação dos modos em uma análise modal espectral;
- dos modos rígidos, IMR.

OJEDA (1998) apresenta um interessante resumo das várias formas de combinação de modos e de como considerar a análise modal espectral com excitação múltipla, MPRS, nos apoios do sistema secundário, seguindo proposta de DER KIUREGHIAN (1991).

Analisa o SS no domínio do tempo, com a integração direta dos históricos de deslocamentos e também com uma análise por superposição modal espectral. Após a comparação dos esforços internos e deslocamentos, calculados no SSS, mostra a conveniência de se considerarem espectros acoplados para o projeto. Conclui pela importância de se considerar a influência dos deslocamentos relativos entre os pontos de suporte do SSS, mostrando que não é suficiente apenas envolver os espectros nestes pontos. Também conclui que devem ser consideradas a Combinação Quadrática Completa dos modos, CQC, e a Influência dos Modos Rígidos, IMR, para o dimensionamento dos sistemas secundários.

2.3.2. Sistema Secundário de 1GL Acoplado

Ainda em 1998 VALVERDE (1998) apresenta um estudo paralelo e complementar ao de OJEDA (1998), com o mesmo modelo para o SP, porém com o sistema secundário representado por um sistema de apenas 1GL. Faz um breve histórico dos métodos de análise e projeto para sistemas de tubulação utilizados no decorrer do século XX e apresenta um estudo de sensibilidade para sistemas massa-mola com 2GL, com a finalidade de caracterizar a influência do acoplamento nas respostas de sistemas secundários.

Em sua análise, VALVERDE (1998) compara as respostas do SS em termos de espectros de aceleração, para um ou vários pontos de apoio do SS no SP, fazendo a análise do SS desacoplado ou acoplado.

Nas análises com vários pontos de apoio, compara resultados para um espectro envoltório dos pontos de apoio com os que consideram excitação múltipla, MPRS.

Conclui pela necessidade de utilização de espectros acoplados para o dimensionamento do SS. Mostra a importância da consideração das rotinas MPRS caso não se tenha disponibilidade dos espectros obtidos considerando o deslocamento relativo entre os apoios do SS.

2.3.3. Análise no Domínio da Frequência

Paralelamente às análises anteriormente descritas, que utilizam o programa ANSYS e são no domínio do tempo, um processo alternativo de análise no domínio da frequência, com a utilização do programa SASSI, é proposto por SAMPAIO (1999).

SAMPAIO (1999) descreve a análise no domínio da frequência, a sequência de utilização dos módulos do programa SASSI e apresenta um estudo de sensibilidade com um modelo de 1GL com uma massa sobre uma haste engastada em uma base quadrada, variando:

- frequência natural da haste;
- espessura da base;
- rigidez do terreno;

e comparando os resultados e avaliando o amortecimento em cada caso.

Estuda a possibilidade de emprego do programa *SASSI* para análise no domínio da frequência do mesmo SP utilizado nos estudos anteriores. Obtém as funções de impedância e as respostas em termos de deslocamentos, acelerações, esforços internos e de espectros de resposta desacoplados.

Estuda os requisitos de potência do sismo de projeto e a influência para a resposta dos sistemas estruturais (SP e SS) da utilização de um ou mais de um acelerograma [NRC NUREG 0800 - 1996].

Ainda nesse trabalho obtém espectros de resposta para sistemas acoplados com 1GL, seguindo a metodologia proposta por VALVERDE (1998) e chega às seguintes conclusões:

- comprova a necessidade do critério de densidade espectral mínima para a utilização de um único sismo de projeto.
- verifica a importância da forma suave da densidade espectral de potência;
- valida a utilização do programa *SASSI*, comprovando uma boa concordância entre as respostas no domínio da frequência com as obtidas anteriormente no domínio do tempo;
- verifica que a formulação do amortecimento é consistente e representativa com o emprego do programa *SASSI*;
- confirma a metodologia proposta por Valverde para as respostas acopladas e mostra que, nesse aspecto, há vantagens significativas em utilizar o *SASSI*;
- mostra a necessidade de uma boa escolha das frequências de análise para o programa *SASSI*, principalmente para os casos de análise de respostas acopladas.

Ao final de seu trabalho SAMPAIO (1999) propõe estender o estudo para a obtenção das respostas do sistema secundário no domínio da frequência.

2.3.4. Espectros de Resposta Uniformemente Prováveis

ALMEIDA (2002) introduz a análise probabilística na linha de pesquisa de respostas de sistemas secundários. Considera o sismo de excitação como um processo randômico gaussiano fracamente estacionário e ergódico, cujo espaço amostral pode ser representado por uma Função Densidade de Espectro de Potência, FDEP. Utiliza a formulação da metodologia da 1ª ultrapassagem

proposta por VANMARKE (1975) e estuda o compromisso probabilístico entre as ordenadas do espectro de projeto.

A partir de uma análise no domínio da frequência, propõe uma metodologia para obter diretamente o Espectro de Resposta Uniformemente Provável desacoplado, ERUP, e/ou acoplado, ERAUP. Os valores das ordenadas desses espectros representam uma barreira com igual probabilidade de não serem ultrapassados pela resposta de um sistema de IGL excitado por um movimento randômico estacionário, representado pela FDEP utilizada.

2.3.5. Consideração de Não-Linearidades Físicas no SS

SAMPAIO (2003) prossegue o estudo para obtenção de espectros de resposta de projeto para SS submetidos a cargas sísmicas, acrescentando a consideração de comportamento inelástico do material.

Estuda o mesmo SS de OJEDA (1998) em um estudo paramétrico onde são variados:

- fator de escoamento, C , que representa uma redução da resistência devida aos efeitos de inelasticidade do material do SS;
- intensidade da excitação; e
- nível de amortecimento.

Nesse estudo apresenta e considera os efeitos de catraqueamento no SS.

Propõe um fator de ductilidade global, formulado em termos de trabalho externo realizado sobre o sistema secundário e obtém espectros de ductilidade e de resposta. Conclui pela possibilidade de utilização de fatores de transposição para a obtenção de espectros que consideram os efeitos de não-linearidade a partir dos espectros elásticos.

Propõe uma metodologia para a obtenção de espectros de resposta com a inclusão dos efeitos de acoplamento entre os SS e SP. Essa metodologia possibilita o emprego da análise probabilística proposta por Almeida (2002) e inclui os efeitos de deslocamentos relativos entre os pontos de apoio do SS, pela consideração das médias ponderadas das densidades espectrais de cada ponto de apoio.

Conclui que a multiplicidade e variedade dos SS recomendam a utilização de uma metodologia de projeto adequada às suas condições e a conveniência de se levar em consideração, desde o projeto, as particularidades dos sistemas secundários, especialmente quanto ao acoplamento dos sistemas e das características inelásticas do SS.

Conclui também que, apesar da dificuldade de utilização, o programa *SASSI* é adequado para a obtenção dos espectros de projeto para SS.

Propõe a extensão do estudo, principalmente na variação das relações entre as propriedades dos materiais e as condições de utilização do SS (tubulação, suportes, temperatura, pressão interna, etc.)

2.3.6.

Efeitos de Não-Linearidades, de Temperatura e Pressão

Prosseguindo com as sugestões propostas por SAMPAIO (2003), GOMES (2005) apresenta um estudo sobre a influência das cargas estáticas nos elementos do SS, devidas à pressão interna e temperatura, causando um estado de tensões prévio, nas relações do espectro de resposta elásticas e inelásticas.

Entre os aspectos estudados, estão:

- comportamento não linear do material nos elementos de tubo do SS e dos seus suportes no SP;
- efeitos do acoplamento entre SS e SP;
- inclusão do amortecimento nos SP e SS e influência nas respostas;
- influência nos espectros de resposta da presença prévia de cargas estáticas nos elementos estruturais do SS, decorrentes de pressão interna e temperatura.

São comparados os espectros de resposta obtidos com e sem acoplamento e espectros médios aproximados para a resposta inelástica acoplada do SS também são propostos, a partir da utilização de fatores de transposição obtidos para diversos fatores de ductilidade e fatores de escoamento.