



**ANÁLISE DE ACIDENTES DE CRITICALIDADE NO REATOR DE
POTÊNCIA ZERO DO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**

Mário Roberto Granziera

DISSERTAÇÃO E TESE - IEA 063

JULHO/1978

CONSELHO DELIBERATIVO

MEMBROS

Klaus Reinach – Presidente
Roberto D'Utra Vaz
Helcio Modesto da Costa
Ivano Humbert Marchesi
Admar Cervellini

PARTICIPANTES

Regina Elisabets Azevedo Beretta
Flávio Gori

SUPERINTENDENTE

Rômulo Ribeiro Pieroni

**ANÁLISE DE ACIDENTES DE CRITICALIDADE NO REATOR DE
POTÊNCIA ZERO DO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA**

Mário Roberto Granziera

**Dissertação para obtenção do Título de "Mestre em
Engenharia" – Orientador Prof. Dr. Roberto Y. Hukal.
Apresentada e defendida em 09 de setembro de 1976,
na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.**

APROVADA PARA PUBLICAÇÃO EM JUNHO/1977

Série DISSERTAÇÃO E TESE IEA

Nota: A redação, ortografia e conceitos são de responsabilidade dos autores.

ÍNDICE

	Página
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Situando a Análise de Acidentes.	1
2 – DESCRIÇÃO DO REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO IEA	5
2.1 – Finalidades do RPZ	5
2.2 – Descrição da Instalação	5
2.3 – Características de Segurança Peculiares ao RPZ	6
2.4 – Descrição Mecânica do Reator	6
2.5 – O Reator de Referência	7
2.6 – Instrumentação e Controle: Sistema de Segurança do Reator	7
2.7 – Reatividade	8
2.8 – Início de Operação	9
3 – OS ACIDENTES CONSIDERADOS	17
3.1 – Aspectos Gerais	17
3.2 – As Sequências de Eventos	17
4 – O MODELO TEÓRICO	19
4.1 – A Cinética do Reator	19
4.2 – A Distribuição de Temperaturas no Combustível	26
4.2.1 – Balanço Térmico no Combustível	26
4.2.2 – Balanço Térmico no Espaço entre o Combustível e o Encamisamento e no Último Anel do Combustível	28
4.2.3 – Balanço Térmico no Encamisamento	29
4.3 – A Função $\delta K(t)$ e a Simulação da Instrumentação do Reator	31
5 – RESULTADOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	31
5.1 – Dados de Entrada	31
5.2 – Resultados	37
5.3 – Conclusões	37
5.4 – Recomendações	42
APÊNDICE A – O PROGRAMA ACDNTE	53

	Página
APÊNDICE B – TESTES DO PROGRAMA ACDNTE	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

LISTA DE SÍMBOLOS USADOS NESTE TRABALHO

A_j	– definido no texto
B_j	– definido no texto
BWR	– (Boiling Water Reactor) reator no qual o refrigerante é a água leve em ebulição
C_c	– calor específico do material do encamisamento
$C_i(t)$	– Concentração do i -ésimo precursor de nêutrons atrasados
$C_i(0)$	– Concentração inicial do i -ésimo precursor de nêutrons atrasados
C_u	– calor específico do material do combustível
e_c	– espessura da folga entre o combustível e o encamisamento
e_G	– espessura do encamisamento
F_c	– definido no texto
F_G	– definido no texto
F_u	– definido no texto
GCFR	– (Gas Cooled Fast Reactor) reator rápido refrigerado a gás
h	– intervalo de tempo para uma iteração numérica
h_c	– coeficiente de película do ar em convecção natural
H	– comprimento da barra absorvedora
R	– raio do combustível
R_j	– definido no texto
RPZ	– Reator de Potência Zero
S	– fonte de nêutrons
S_i	– Seqüência de Eventos i
S_j	– definido no texto
SAE	– Sistema de Ação de Emergência
SAI	– Sistema de Aquisição de Informações
STR	– Sistema Térmico-Rápido
t	– tempo

T_j^θ	– Temperatura do elemento j no instante θ
x	– posição da barra absorvedora
β	– fração de nêutrons atrasados: $\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$
β_i	– fração de nêutrons atrasados do grupo i
β_{ef}	– fração de nêutrons atrasados efetiva
$\delta K(t)$	– excesso de reatividade: $K(t) = K(t) - 1$
ΔU	– variação da energia interna
λ_i	– constante de decaimento do i -ésimo grupo de nêutrons atrasados
ρ_b	– reatividade da barra absorvedora parcialmente inserida
ρ_{bmax}	– reatividade da barra absorvedora totalmente inserida
HTGR	– (High Temperature Gas – cooled Reactor) reator de alta temperatura refrigerado a gás e moderado por grafita.
$K(t)$	– coeficiente de multiplicação de nêutrons do reator
K_G	– Condutividade térmica do material de enchimento da folga entre o combustível e o encamisamento
K_u	– Condutividade térmica do material do combustível
ℓ_p	– vida média de nêutrons prontos
m_c	– massa do encamisamento
m_j	– massa do i -ésimo anel do combustível
$n(t)$	– potência do reator
$n(0)$	– potência inicial do reator
PWR	– (Pressurized Water Reactor) – reator no qual o refrigerante e a água leve na fase líquida
$q'''(t)$	– densidade de potência do reator
q_c	– calor trocado por condução
q_e	– calor conduzido para dentro do elemento considerado
q_g	– calor gerado no elemento considerado
q_s	– calor conduzido para fora do elemento considerado
QSL	– definido no texto
ρ_c	– densidade do encamisamento

ρ_u — densidade do combustível

$\omega_j(t)$ — definido no texto

$\Omega(t)$ — definido no texto

ANÁLISE DE ACIDENTES DE CRITICALIDADE NO REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA

Mário Roberto Granziera

1 – INTRODUÇÃO

Durante o desenvolvimento do projeto do Reator de Potência Zero surgiu a necessidade de se elaborar a análise de acidentes deste reator, tarefa que nos foi atribuída. Logo na primeira abordagem do problema deparamos com uma decisão que influenciou profundamente o desenrolar deste trabalho. Por ser esta a primeira vez que se faria este trabalho no País, não encontramos aqui nenhum procedimento já estabelecido e principalmente nenhum instrumento de cálculo já desenvolvido para esta análise. Assim, as opções encontradas foram a de se importar um programa de computação já provado no exterior ou de escrever este programa aqui com recursos próprios. Escolhemos a segunda opção, apesar das vantagens e comodidade que um programa pronto traria, acompanhando uma filosofia geral do projeto RPZ de "não importar o que puder ser feito satisfatoriamente aqui".

Desta forma, o estudo do modelo teórico e o desenvolvimento do programa de computação para a solução do problema cresceram em importância neste trabalho, chegando a superar em número de horas trabalhadas à própria análise de acidentes.

A solução da equação de cinética de reatores foi baseada principalmente nos trabalhos de Keepin⁽¹¹⁾, com os quais comparamos os resultados por nós obtidos em alguns casos de inserções de reatividade. Ainda como teste do programa desenvolvido, fizemos a comparação dos resultados gerados para um caso da análise de acidentes do reator PWR de Angra dos Reis, que é mostrado no Apêndice B.

Finalmente, gostaríamos de salientar que em determinados pontos deste trabalho nos afastamos da linguagem comum aos trabalhos científicos desta espécie para adotarmos uma linguagem característica de um relatório de análise de segurança. Não nos preocupamos em evitá-la por ser este relatório a finalidade última deste trabalho.

1.1 – Situando a Análise de Acidentes

A energia nuclear é atualmente motivo de sérias controvérsias e manifestações de temores em todo mundo. Seu aparecimento, como uma arma de imenso potencial de destruição, que alterou profundamente os conceitos de guerra e segurança, chocou brutalmente a humanidade com os lamentáveis episódios de Hiroshima e Nagasaki, o que sem dúvida contribuiu acentuatamente para este estado de ânimo atual.

A par de sua desastrosa entrada em cena, a energia nuclear traz em si perigos reais que alimentam estes temores por seu potencial de liberar enormes quantidades de energia concentrada em pequenos volumes e principalmente pela produção de materiais radioativos em grande escala, materiais estes capazes de produzir doenças e morte em organismos vivos.

Por outro lado, esta energia quando controlada traz benefícios à humanidade, situando-se atualmente como única fonte provada de energia capaz de substituir as fontes convencionais usadas atualmente e com uma perspectiva de esgotamento num prazo não muito longo.

Neste cenário surgiu o reator nuclear, o equipamento destinado a produzir energia de forma controlada sem provocar a ocorrência de danos ao homem e ao meio ambiente. Este cenário fez com que seu aparecimento fosse acompanhado de uma preocupação com a segurança inusitada na história da engenharia. Os reatores são construídos com sistemas redundantes de contenção, capazes de resistir aos impactos de acidentes tanto internos como externos. Da mesma forma, seus dispositivos de desligamento são também redundantes, para garantir que a falha de um deles não comprometa a segurança do reator.

Mas, a grande inovação introduzida em termos filosóficos no campo da tecnologia foi o relatório de análise de segurança. Este relatório apresenta publicamente a descrição detalhada de toda a central, desde sua localização, incluindo estudos sísmicos, meteorológicos e demográficos até os dispositivos de segurança e proteção da usina. Este relatório é analisado pela autoridade governamental que só autorizará o funcionamento da usina quando estiver convencida que esta não causará riscos apreciáveis à população, a seus operadores ou ao meio ambiente. Em países como a Alemanha, França e Estados Unidos este relatório é colocado à disposição do público, seguido de uma audiência pública na qual qualquer pessoa pode formular perguntas e objeções, e caso esta pessoa não se sinta satisfeita com as respostas a suas perguntas, poderá acionar legalmente os construtores do reator visando impedir seu funcionamento.

Apresentando resumidamente, e de maneira geral, o que é um relatório de análise de segurança de um reator nuclear podemos dizer que ele se inicia pela análise de localização, onde são descritas as características do local onde será construído o reator. Esta análise inclui o estudo da estabilidade geológica do terreno, movimento de ar e condições de dispersão de poluentes no local, precipitações de chuvas e o movimento da água subterrânea e a distribuição da população nas redondezas. A seguir, é descrito o reator, suas características neutrônicas, mecânicas e termohidráulicas, seus materiais, equipamentos auxiliares e seu desempenho esperado. Num outro capítulo são mostradas as instalações, prédios, sistemas de ventilação, refrigeração, tratamento de materiais radioativos e sistemas de contenção. Vem a seguir a descrição da instrumentação e controle, isto é, dos equipamentos de aquisição de informações do estado do reator e dos mecanismos de ação sobre o mesmo. Vem ainda acompanhado de um programa de início de operação e troca de combustível e, finalizando, o relatório trata da análise de acidentes.

A análise de acidentes deve estudar o comportamento do reator em condições normais de funcionamento. Dentre estas condições a maior ênfase é dada aos casos de aumento da potência do reator ou perda da capacidade de refrigeração do mesmo, condições estas que acarretam um aumento de temperatura e tensões, que por sua vez poderiam levar os componentes do reator a trabalhar fora de seus parâmetros de projeto.

O ponto mais controverso da análise de acidentes se situa na severidade da condição anormal considerada. Até hoje esta, análise se vale do conceito de "Acidente Máximo Crível", isto é, a condição postulada mais desfavorável que se crê possa ocorrer no reator. Este conceito traz em si uma subjetividade que gera a pergunta "Até onde um acidente é crível ou não?". O chamado "Relatório Rasmussen"⁽¹⁹⁾, trouxe uma grande contribuição para a sistematização desta questão. Nele, o problema é analisado em termos de risco, i.e., considerando o dano causado por um acidente e sua probabilidade de ocorrência. A par de suas conclusões, altamente favoráveis à energia nuclear, onde demonstra que o risco individual de morte por um acidente numa central nuclear se situa muito abaixo dos riscos normalmente encontrados na vida cotidiana como, por exemplo, viajando de automóvel ou avião, este relatório tem a virtude de colocar o problema da aceitação dos riscos de uma central nuclear em termos objetivos. A pergunta que se segue, "Qual seria um risco aceitável?", é facilmente respondida, considerando-se que se aceita "a priori" o risco proveniente dos fenômenos naturais e, então, um risco que seja uma ou duas ordens de grandeza inferior a este deve ser aceitável.

Apresentamos nas Figuras 1.1 e 1.2, retiradas do relatório WASH 1400⁽¹⁹⁾, a comparação entre os riscos de acidentes centrais nucleares considerando a existência de 100 reatores e os riscos de outros eventos, naturais e causados pelo homem. Embora estes dados tenham sido obtidos para reatores de potência de água leve (PWR's e BWR's), que são substancialmente diferentes do Reator de Potência

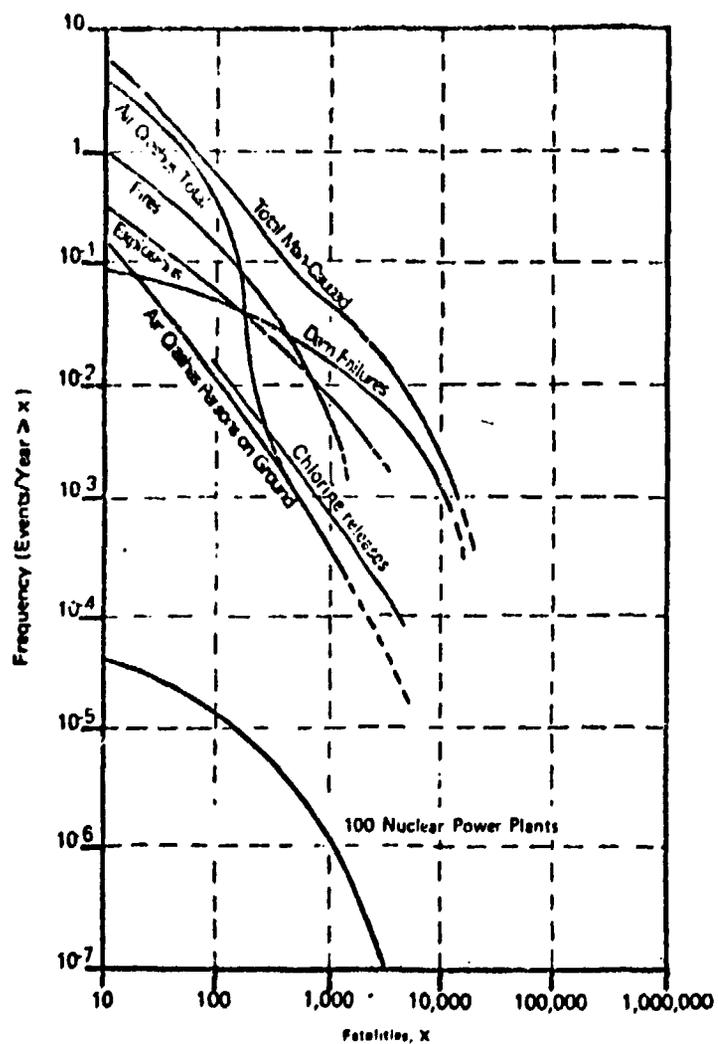


Figura 1.1 – Frequência de Mortes Causadas por Eventos Provocados pelo Homem (Retirada do Relatório WASH 1400).

- Notas:**
- 1 – Mortes devidas a acidentes automobilísticos não são mostrados porque estes dados não são disponíveis. Acidentes automobilísticos causam cerca de 50.000 mortes por ano nos EUA. No Brasil (1975), este número é de 20.000 mortes por ano.
 - 2 – Incertezas para acidentes nucleares são estimadas representativamente por fatores 1/4 e 4 na magnitude das conseqüências e por fatores de 1/5 e 5 nas probabilidades.
 - 3 – Para ocorrências naturais provocadas pelo homem a incerteza na probabilidade das conseqüências de maior magnitude representativamente por fatores de 1/20 e 5. Menores magnitudes são acompanhadas de menores incertezas.

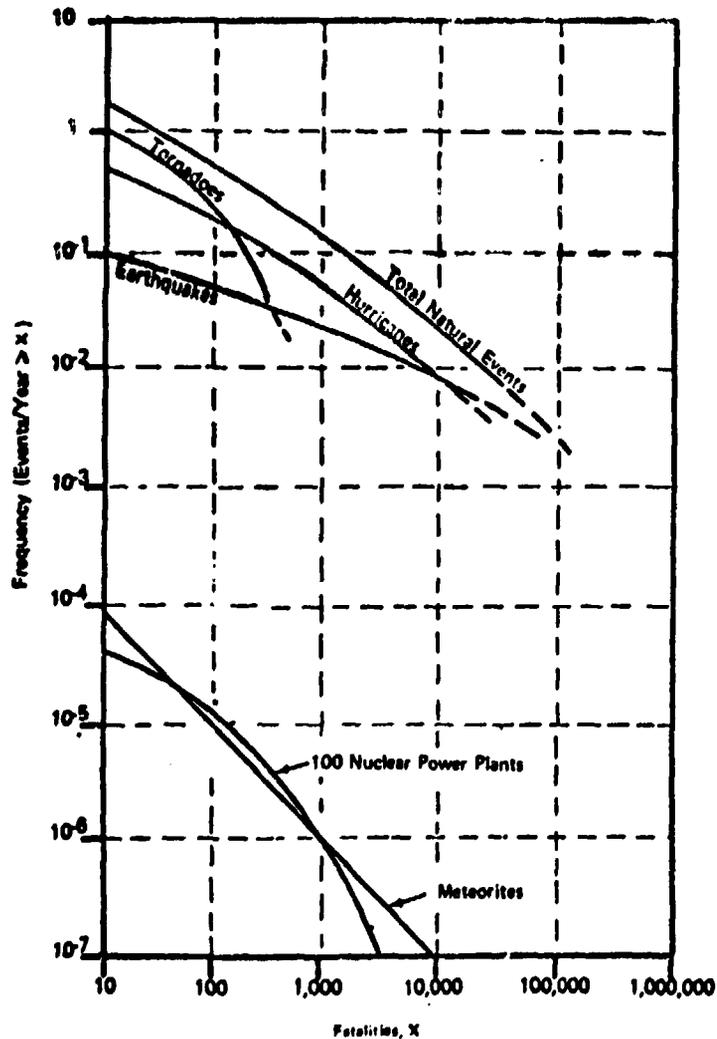


Figura 1.2 - Frequência de Mortes Provocadas por Eventos Naturais (Retirada do Relatório WASH 1400).

- Notas: 1 - Para ocorrências naturais e provocadas pelo homem a incerteza na probabilidade das conseqüências de maior magnitude é estimada representativamente por fatores de $1/20$ e 5 . Menores magnitudes tem menos incertezas.
- 2 - Incertezas para acidentes nucleares são estimadas representativamente por fatores de $1/4$ e 4 na magnitude das conseqüências e por fatores de $1/5$ e 5 nas probabilidades.

Zero, objeto de nosso estudo, estas conclusões situam de maneira objetiva, os riscos de centrais nucleares num quadro mais geral.

Os números de mortes apresentados nas Figuras 1.1 e 1.2 são as previsões de ocorrência num curto período de tempo após um hipotético acidente. Embora em acidentes nucleares exista a possibilidade de doenças que provocariam morte a longo prazo, estes dados não foram considerados devido a impossibilidade de se obter os dados correspondentes para os acidentes não nucleares.

2 – DESCRIÇÃO DO REATOR DE POTÊNCIA ZERO DO IEA

2.1 – Finalidades do RPZ

O Reator de Potência Zero, RPZ, tem basicamente duas finalidades: a formação de pessoal e a investigação dos parâmetros neutrônicos dos reatores moderados por grafita e regeneradores. Embora sua concepção tenha sido feita tendo em mente o estudos dos reatores do tipo HTGR e GCFR, a extrema flexibilidade de sua configuração permite o estudo de praticamente todo tipo de reator. Devido a suas dimensões, o RPZ possibilita a simulação de regiões dos reatores investigados em escala real, o que o torna um poderoso instrumento de pesquisa. Refs.^(5,16).

2.2 – Descrição da Instalação

O RPZ, dadas suas características e finalidades exige instalações especiais, tanto para o reator propriamente dito como para todo o equipamento e pessoal associados. O projeto destas instalações foi precedido de uma extensa pesquisa envolvendo diversos prédios de mesma finalidade.

Estas instalações serão localizadas na área do IEA, na Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira, a oeste do laboratório de Térmica de Reatores, ligado a este através do edifício comum de entrada principal, segundo mostra a planta de localização, Figura 2.1. Esta localização, próxima a regiões de alta densidade demográfica, veio a influir marcadamente nos requisitos de segurança do projeto, exigindo critérios bastante severos comparados aos de instalações semelhantes.

A célula do reator, batizada no projeto com o nome de "Setor 5", é um edifício cilíndrico, de 17 m de diâmetro e 12 m de altura, construído com paredes de concreto armado de 1,20 m de espessura que tem a função de resistir a explosão e servir de blindagem biológica. Este prédio foi projetado para resistir a uma pressão interna de até 2,4 atm, Figura 2.2.

Envolvendo completamente a célula do reator, a um metro de distância da parede externa da mesma, existe uma estrutura metálica revestida com chapas de aço soldadas de 3/16 polegadas de espessura. Esta membrana tem a função de impedir que vazamentos de produtos gasosos da célula do reator que podem eventualmente estar contaminados por materiais radioativos, atinjam a atmosfera exterior. O ar contido no volume compreendido entre a parede externa da célula do reator e a parede interna da membrana é mantido durante todo o tempo a uma pressão de 5 mm de Hg abaixo da pressão atmosférica. Desta forma, os eventuais vazamentos desta membrana serão de fora para dentro, e assim, assegura-se que o ar contaminado não atingirá o meio ambiente.

Os acessos à célula são todos feitos através de antecâmaras com pelo menos duas portas interbloqueadas, i.e., portas que não podem estar abertas simultaneamente. Todas estas portas estão ligadas ao sistema de sinalização do reator e aos circuitos de segurança. O reator não pode ser colocado em funcionamento se uma destas portas estiver aberta e será desligado automaticamente se uma porta for aberta durante sua operação.

As penetrações para os cabos elétricos obedecem a um rigoroso padrão de selagem. Para entrar na célula, os cabos passam por buracos com "prensa-cabos" em duas chapas de aço, uma em cada lado da parede de concreto.

Os dutos de ar condicionado são dotados de válvulas resistentes a fogo e a pressão de 2,4 atm, que são fechadas durante a operação do reator.

Assim assegura-se a completa estanqueidade da célula do reator, com pressões internas de 2,4 atm, durante a operação do reator. Ref.⁽¹⁶⁾.

2.3 – Características de Segurança Peculiares ao RPZ

O Reator de Potência Zero do IEA, como instrumento de pesquisa dos parâmetros neutrônicos dos reatores de potência, apresenta características que o diferenciam dos tipos mais comuns de reatores e que influenciam diretamente seu comportamento em face a possíveis acidentes. Duas características se destacam pela importância do papel que desempenham na segurança do reator.

A primeira é o fato de ser o RPZ um reator de pesquisas de grande flexibilidade. Isso faz com que seja esperado durante a vida do reator uma grande variedade de arranjos experimentais, ou em outras palavras, um grande número de composições e geometrias diferentes, o que leva a um aumento de probabilidade de sobrecarga do reator e que, por sua vez, vem exigir um maior cuidado na operação de carregamento do combustível e, também, aumentar a responsabilidade dos dispositivos que impedem que essa sobrecarga leve a um acidente de criticidade.

A segunda característica peculiar importante é a baixa potência para a qual o reator foi projetado, característica que lhe valeu seu nome. A sua potência operacional deverá se situar num valor abaixo de 1 kw por tempo indeterminado de operação contínua ou até 10 kw em curtos intervalos de tempo. Esta característica influencia a segurança do reator de duas maneiras. A primeira, relacionada com a refrigeração, advém da possibilidade de se operar o reator com coeficientes de troca de calor muito baixos sem que ocorram altas temperaturas no caroço. Isso possibilitou o reator ser projetado com refrigeração por convecção natural ao ar ambiente (que nunca falha) o que veio eliminar o mais sério problema de segurança de reatores, qual seja o da perda de refrigeração. A segunda influência da baixa potência se prende ao baixo número de fissões, ou baixo fluxo de nêutrons, e conseqüentemente baixa concentração de materiais radioativos presentes no reator. Isto faz com que a liberação destes materiais para o ambiente, num hipotético acidente não tenha características sequer comparáveis a de um reator de potência.

2.4 – Descrição Mecânica do Reator

O combustível nuclear e o moderador, que constituem o núcleo do reator, são montados sobre um conjunto mecânico denominado "cama e mesa".

Este conjunto "cama e mesa" é constituído basicamente de uma estrutura inferior (cama) de 7,0 m de comprimento e 2,65 m de largura e de duas "mesas" de 3,70 m de largura e 2,40 m de comprimento de cada uma. As mesas são montadas sobre a cama, sendo uma delas fixa e a outra móvel, na direção de maior dimensão da cama. A Figura 2.3 mostra uma visão em perspectiva do reator.

A função básica deste conjunto é possibilitar a aproximação ou separação entre as mesas. Este movimento é feito através de um conjunto de parafuso e porca suporte de esferas, acionado por um sistema de motores, embreagens e caixa de transmissão. O sistema acionador conta com três motores elétricos que funcionam na aproximação das mesas e um outro que trabalha durante a separação. O sistema conta ainda com um motor de separação de emergência acionado por ar comprimido, que entra em ação 0.5 segundos após o motor de separação elétrico ter sido solicitado e não respondido.

Cada mesa foi projetada para suportar uma carga de 80 toneladas sem comprometer seu desempenho mecânico. A precisão de reprodutibilidade geométrica durante o fechamento entre as mesas é de 0,02 mm Ref.⁽¹⁶⁾.

2.5 – O Reator de Referência

Dentre as diversas montagens possíveis de serem feitas no RPZ, o Sistema Térmico-Rápido, STR, foi eleito como referência para o projeto. Desta forma, o projeto (bem como a análise de acidentes) foi desenvolvido voltado para este Sistema Térmico-Rápido, sem contudo perder de vista a possibilidade de outras montagens.

O STR é constituído de um caroço térmico central cilíndrico, moderado por grafita, tendo como combustível urânio enriquecido em 10%, na forma de "pellets" de UO_2 encapsulados em tubos de alumínio.

Este caroço é cercado por um anel conversor de urânio enriquecido em 2% que tem a função de elevar a energia média dos nêutrons. Este, por sua vez, é cercado por uma camada de boro, na forma B_4C que tem a função de absorver os nêutrons de baixa energia. Este conjunto caroço térmico-conversor-filtro simula o caroço de um reator rápido, i.e., o espectro dos nêutrons que saem deste conjunto é semelhante ao espectro dos nêutrons que saem de um caroço rápido.

Circundando este conjunto, é colocado o envoltório de ThO_2 que é o objeto de estudos desta montagem. A Figura 2.4 mostra em esquemas as regiões do STR. Refs. (6,16).

2.6 – Instrumentação e Controle: Sistema de Segurança do Reator

O Sistema de Segurança do Reator é composto basicamente de dois subsistemas: o Sistema de Aquisição de Informações, SAI, e o Sistema de Ação de Emergência, SAE.

O Sistema de Aquisição de Informações tem a função de perceber uma eventual irregularidade na operação do reator e gerar um sinal elétrico que comanda o Sistema de Ação de Emergência. O SAI conta com quatro detetores de nível de potência independentes, que gerarão um sinal de emergência sempre que um deles detetar um nível de potência superior a um valor preestabelecido. Conta ainda com dois medidores de período do reator(*) que produzirão um sinal de emergência quando este período atingir um valor abaixo de 5 segundos. Ainda relacionados com medidas de potência, o sistema tem dois detetores de potência mínima, que impedem a entrada em operação do reator caso este apresente uma potência inicial abaixo de um valor pré-fixado. Estes detetores têm a função de evitar a operação do reator com os detetores mostrando leituras erradas.

No grupo dos instrumentos de medidas não diretamente relacionadas com a potência, o Sistema de Aquisição de Informações tem ainda dois medidores de gradiente de temperatura nos elementos de combustível do reator; um medidor de pressão e um medidor de temperatura na célula do reator, e um medidor de fluxo de nêutrons na célula, que geram o sinal de emergência se eventualmente suas leituras atingirem um valor acima de um limite pré-fixado.

Além disso, este sistema realiza medidas de auto-avaliação, i.e., medidas que asseguram o bom funcionamento do próprio sistema de segurança. Assim, o sinal de emergência será gerado quando houver:

- a) Alta tensão abaixo de um nível crítico em qualquer um dos oito detetores de nêutrons (que medem os parâmetros relacionados diretamente com a potência do reator);
- b) Baixa pressão no reservatório de ar comprimido que alimenta o motor de separação de emergência a ar;

(*) O Período T do reator é definido como $\frac{1}{T} = \frac{1}{P} \frac{dP}{dt}$ onde P é a potência do reator.

- c) Abertura de qualquer uma das quatro portas duplas de acesso à célula do reator;
- d) Abertura de qualquer uma das quatro válvulas que selam os dutos de ventilação que comunicam com a célula do reator;
- e) Desligamento dos cabos que alimentam as barras de segurança e controle.

O Sistema de Ação de Emergência, SAE, tem a função de desligar o reator no tempo mais curto possível quando receber um sinal de emergência gerado pelo Sistema de Aquisição de Informações. Para isso conta com o sistema acionador de barras de segurança e de controle, movidas por molas, e com o sistema de separação de emergência das mesas.

As barras de segurança, em número de pelo menos oito, sendo duas delas suficientes para desligar o reator, estão posicionadas fora do reator, comprimindo as molas de acionamento e presas nesta posição por eletroímãs. A falta de energia elétrica nestes eletroímãs disparará estas barras e, num tempo inferior a 0,5 segundos, elas estarão completamente inseridas.

O sistema de separação das mesas é projetado para agir também no caso de falta de energia elétrica: além de contar com o motor elétrico de retração, o sistema tem um motor de separação movido por ar. A ligação entre este motor e o reservatório de ar comprimido é feita através de uma válvula solenóide que fecha a linha quando se encontra energizada. Além disso, todas as embreagens dos motores elétricos, acionadas por eletricidade, abrem-se na falta de energia elétrica. Assim, garante-se que na falta de energia o motor a ar, e só este, acionará o movimento de separação da mesa móvel. Refs. ^(14,16).

A Figura 2.5 mostra a árvore de falha do sistema de segurança do reator.

2.7 – Reatividade

O Reator de Potência Zero do IEA pode ter sua reatividade alterada de três modos diferentes: pelo movimento de aproximação ou retração da mesa móvel do reator, pelo movimento de inserção ou retirada de barras absorvedoras e pelo efeito de temperatura do combustível.

Os efeitos de queima e de envenenamento do reator, embora presentes no RPZ, não foram considerados neste estudo uma vez que os tempos envolvidos para o aparecimento destes efeitos(*) são muito maiores quando comparados com o tempo de duração de um acidente de criticidade.

A reatividade da abertura entre as mesas foi obtida usando-se o programa de computação EXTERMINATOR, simulando a abertura entre as mesas por uma região absorvedora Ref. ⁽²⁰⁾.

A Figura 2.6 mostra a curva de reatividade em função da abertura obtida. Esta curva foi levantada através de quatro pontos, para uma abertura entre as mesas de: 0,0; 2,3; 4,6 e 6,9 cm.

O efeito de temperatura do combustível foi determinado calculando-se o reator com as seções de choque em diversas temperaturas. A Figura 2.7 mostra a curva da reatividade em função da temperatura(**). Esta curva foi levantada através de 3 pontos, para temperaturas de 20; 300 e 800°C.

Neste efeito, só foi considerada a temperatura do combustível, uma vez que a temperatura do moderador não se alterará sensivelmente durante um acidente, pois, o coeficiente de troca de calor entre o combustível e o moderador é muito baixo. Por outro lado, sendo negativo o efeito da temperatura do moderador na reatividade, qualquer erro cometido nesta hipótese será a favor da segurança.

(*) De ordem de meses para o efeito de queima e de ordem de dezenas de horas para o efeito de envenenamento, nas condições de alto fluxo ($> 10^{12}$ n.cm⁻².seg⁻¹) Ref. (13).

(**) A curva de reatividade versus temperatura entrou neste trabalho como um dado de projeto, tendo sido calculada pelo Sr. Horácio Nakata.

A reatividade das barras absorvedoras em função da inserção foi obtida teoricamente pela Teoria de Perturbação Ref. ⁽¹³⁾. A expressão é:

$$\rho_b = \rho_{bmax} \left[\frac{x}{H} - \frac{1}{2\pi} \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi x}{H} \right) \right]$$

O valor máximo da reatividade da barra (ρ_{bmax}) foi tomado como sendo 0,8\$(*). É norma adotar-se este valor menor que 1\$ para se evitar o estado de criticalidade pronta em casos hipotéticos de retirada acidental da barra.

2.8 – Infício da Operação

O processo de entrada em operação do reator se inicia com uma rotina de testes pré-operacionais que abrange a instrumentação eletrônica, mecanismos de acionamento de barras de controle e de segurança, mecanismos de acionamento da mesa móvel e instalações de ar condicionado.

A seguir, com a mesa móvel na posição de máxima abertura, (1,80m), inicia-se o carregamento do reator posicionando-se as barras de controle e de segurança. Só então começa-se a carregar o reator com os elementos de combustível, que é feito em etapas:

Primeiramente, o caroço é carregado com metade da massa crítica previamente calculada. Com esta massa, são realizadas medidas do fator de multiplicação (K_{ef}), com as barras de controle em duas posições, dentro e fora do reator e as mesas fechadas.

A partir dos dados obtidos, é feito um novo cálculo da massa crítica. A seguir o reator é carregado com uma massa de combustível aproximadamente igual a metade da diferença entre a nova massa crítica calculada e a massa já existente no reator. O procedimento anterior é repetido novamente. Finalmente, o reator é carregado com a quantidade de combustível necessária para se atingir a massa crítica.

Esta operação poderá ser prolongada, a critério do Supervisor do Reator, introduzindo-se etapas adicionais de metade da massa remanescente, sempre que este o julgar conveniente para a segurança do reator.

Uma vez carregado, pode-se dar infício à operação de aproximação das mesas. Previamente, porém, a célula é evacuada, todas suas portas são trancadas, e fecham-se as válvulas do sistema de ventilação que comunica a célula com o ar exterior. A fonte de nêutrons é introduzida no reator e se inicia a aproximação das mesas que é feita em três velocidades, de acordo com a posição da mesa móvel, que são mostradas na Tabela II.1.

Tabela II.1

Velocidades de Aproximação

Distância entre as Mesas (cm)	Velocidade (cm/min)
180 a 45	25
45 a 7,5	5
7,5 a 0,0	0,5
Separação de Emergência	75

(*) \$ = dollar. A reatividade de 1\$ é a reatividade igual a β_{ef} , fração de nêutrons atrasados efetiva.

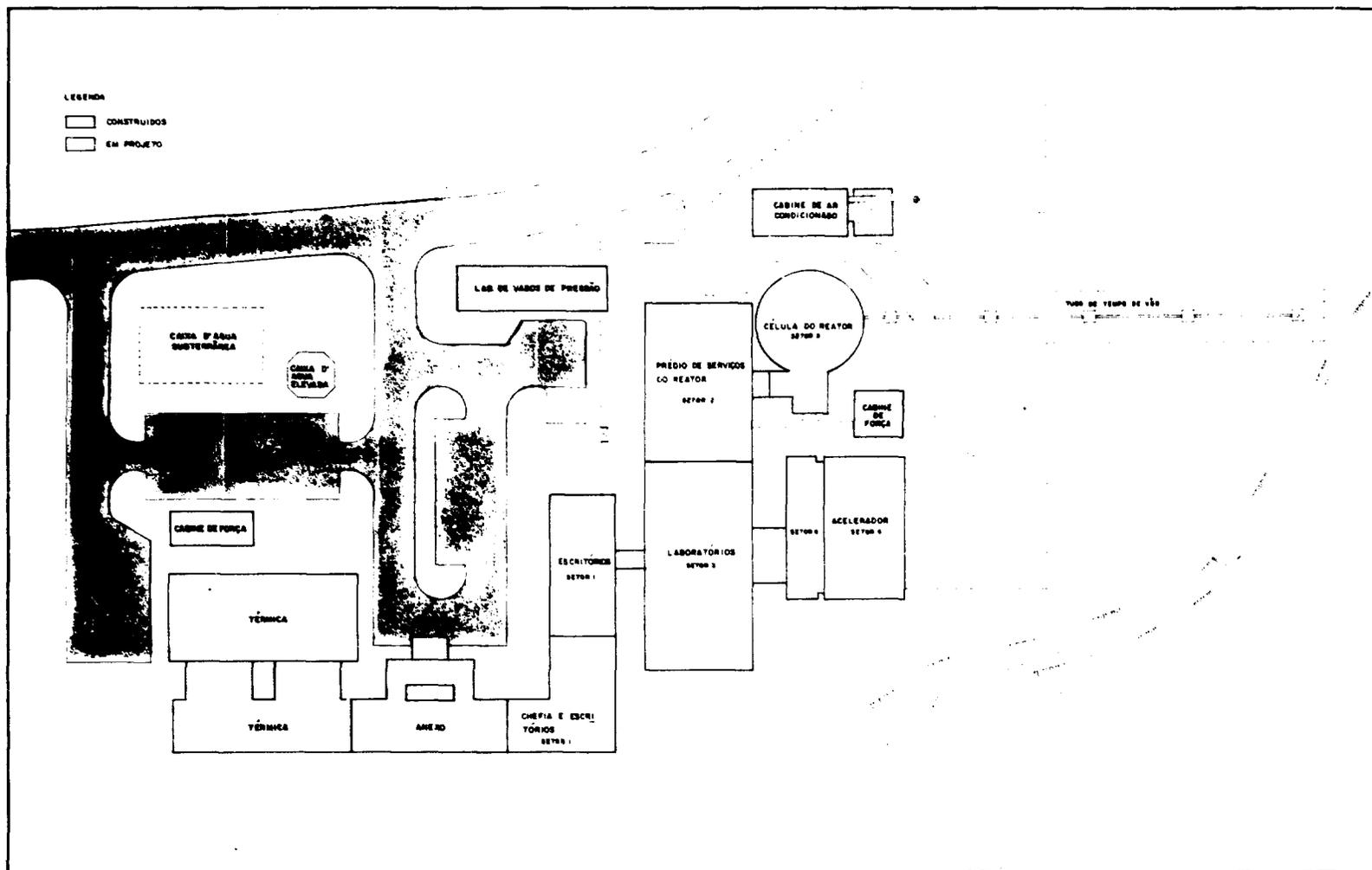


Figura 2.1 – Planta de Localização do Prédio do Reator de Potência Zero e Edifícios Anexos

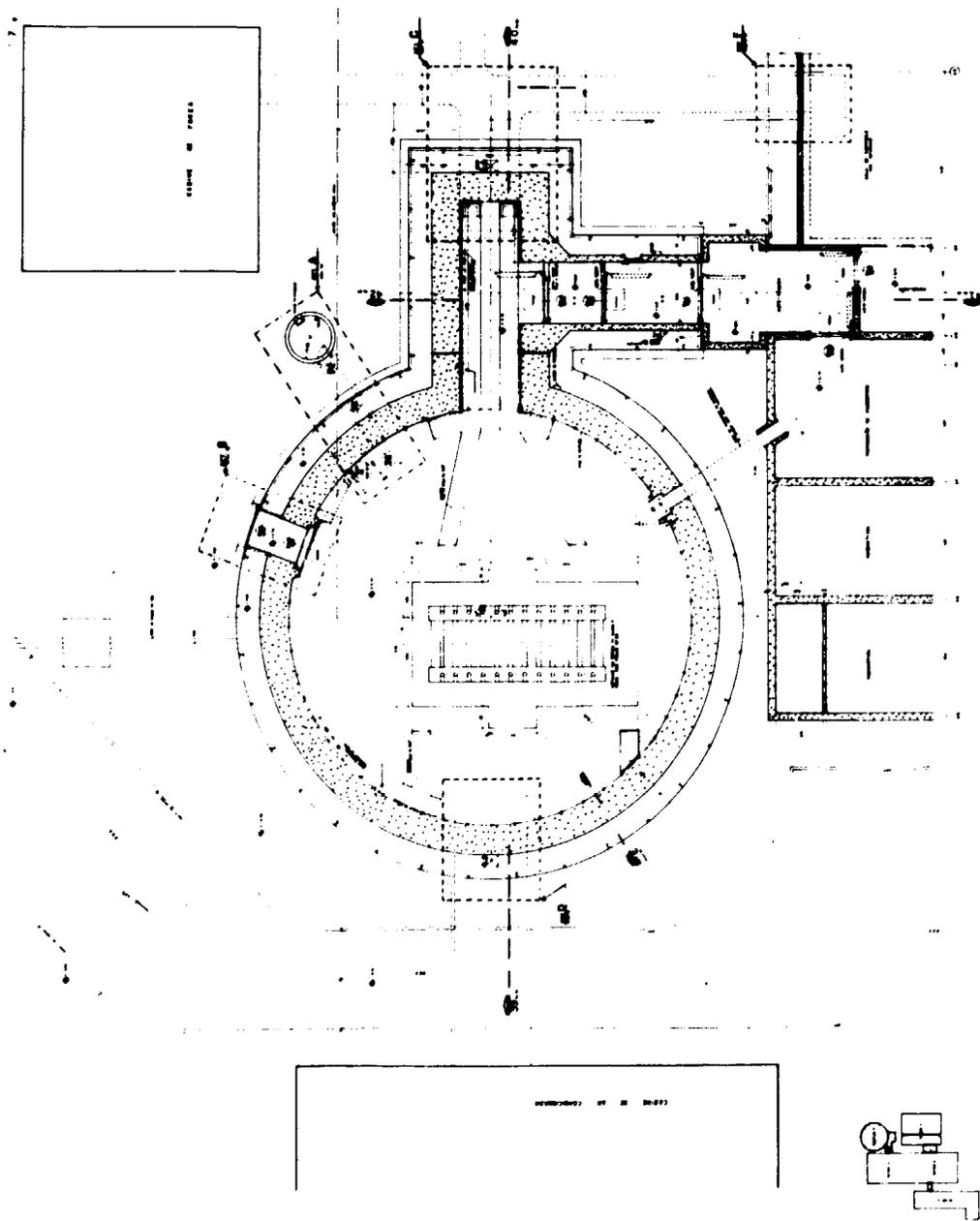


Figura 2.2 - Planta da Célula do Restor

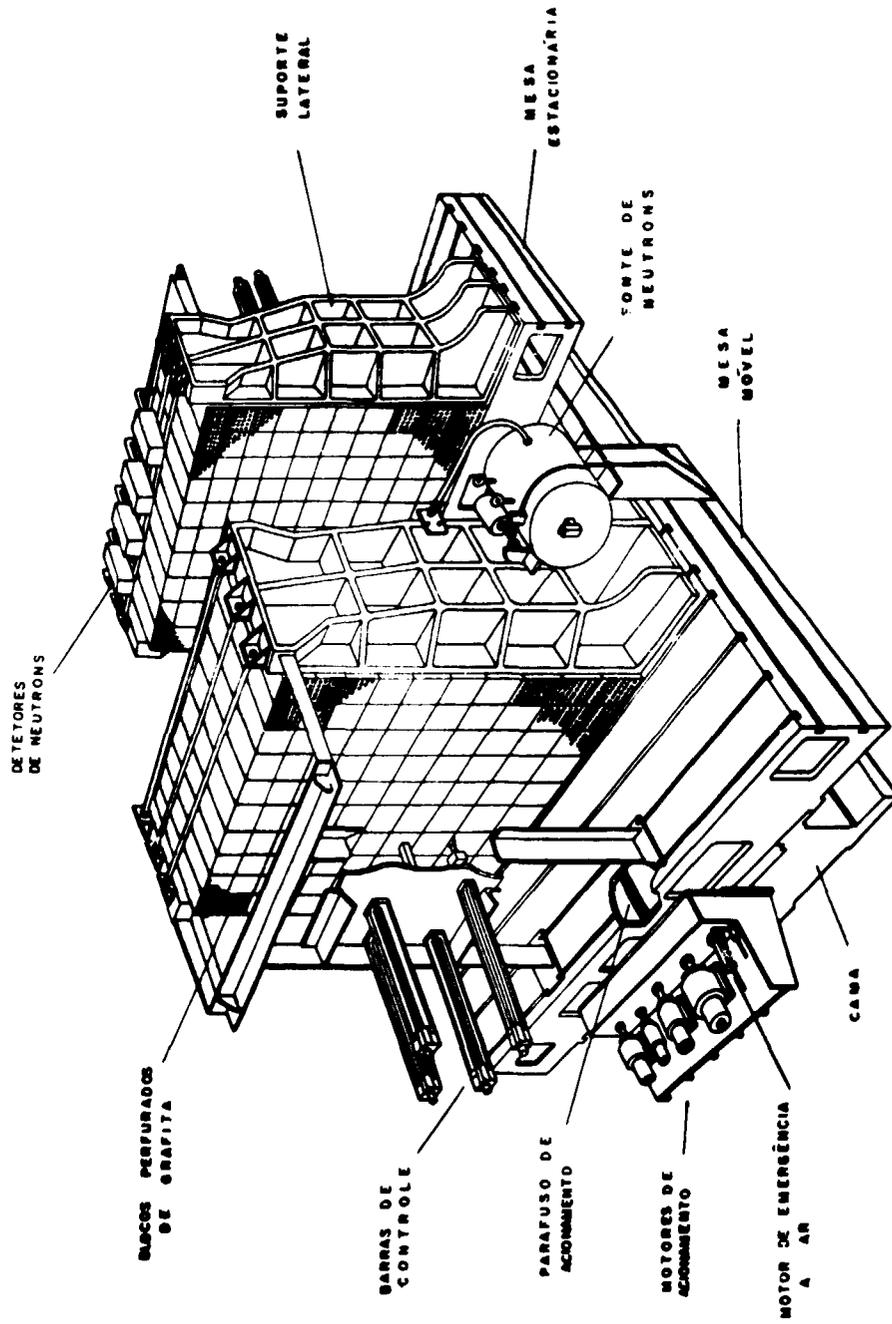


Figure 2.3 — Vista Geral do RRRZ

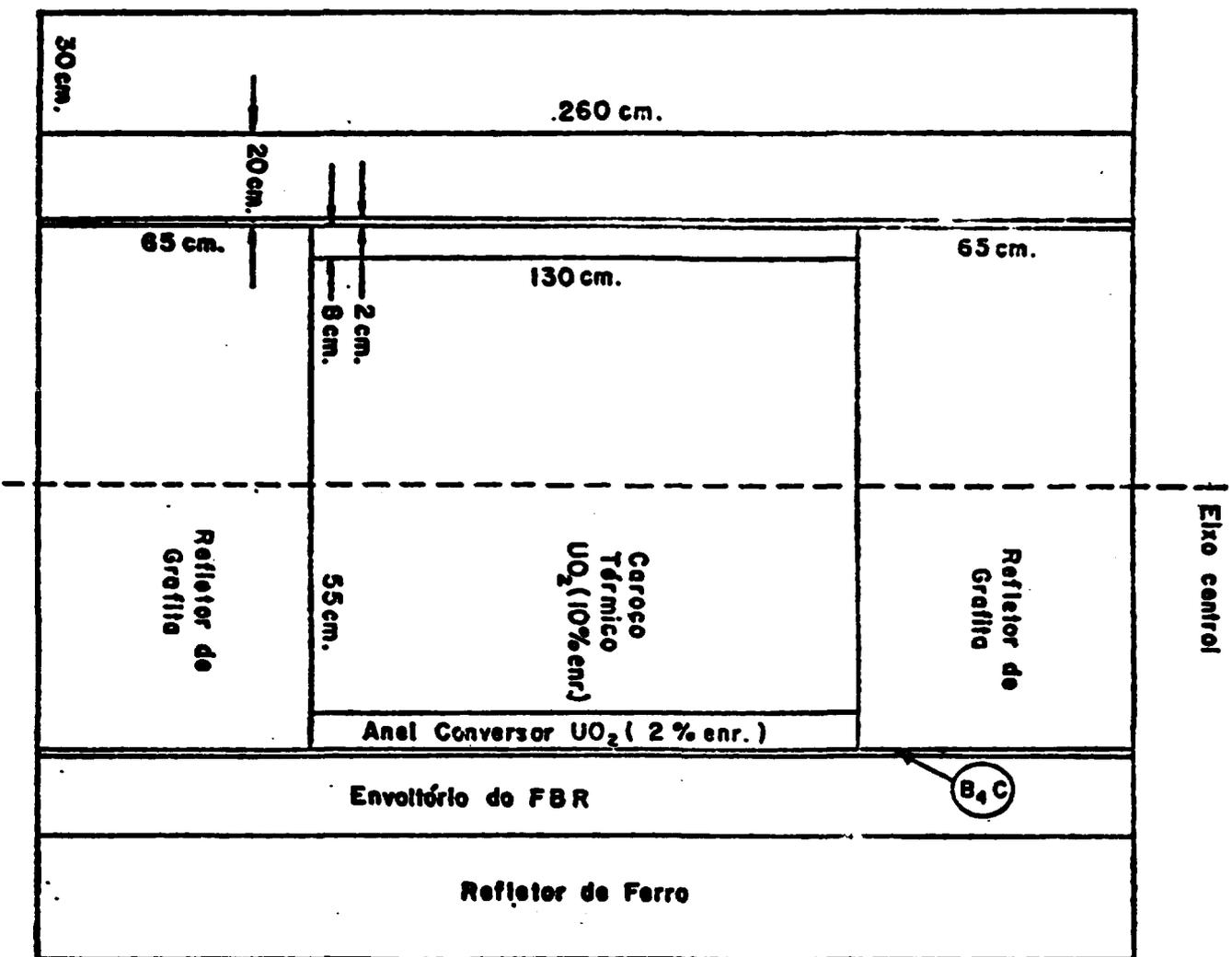


Figura 2.4 - Distribuição Esquemática num Plano Axial das Regiões do RPZ-STR

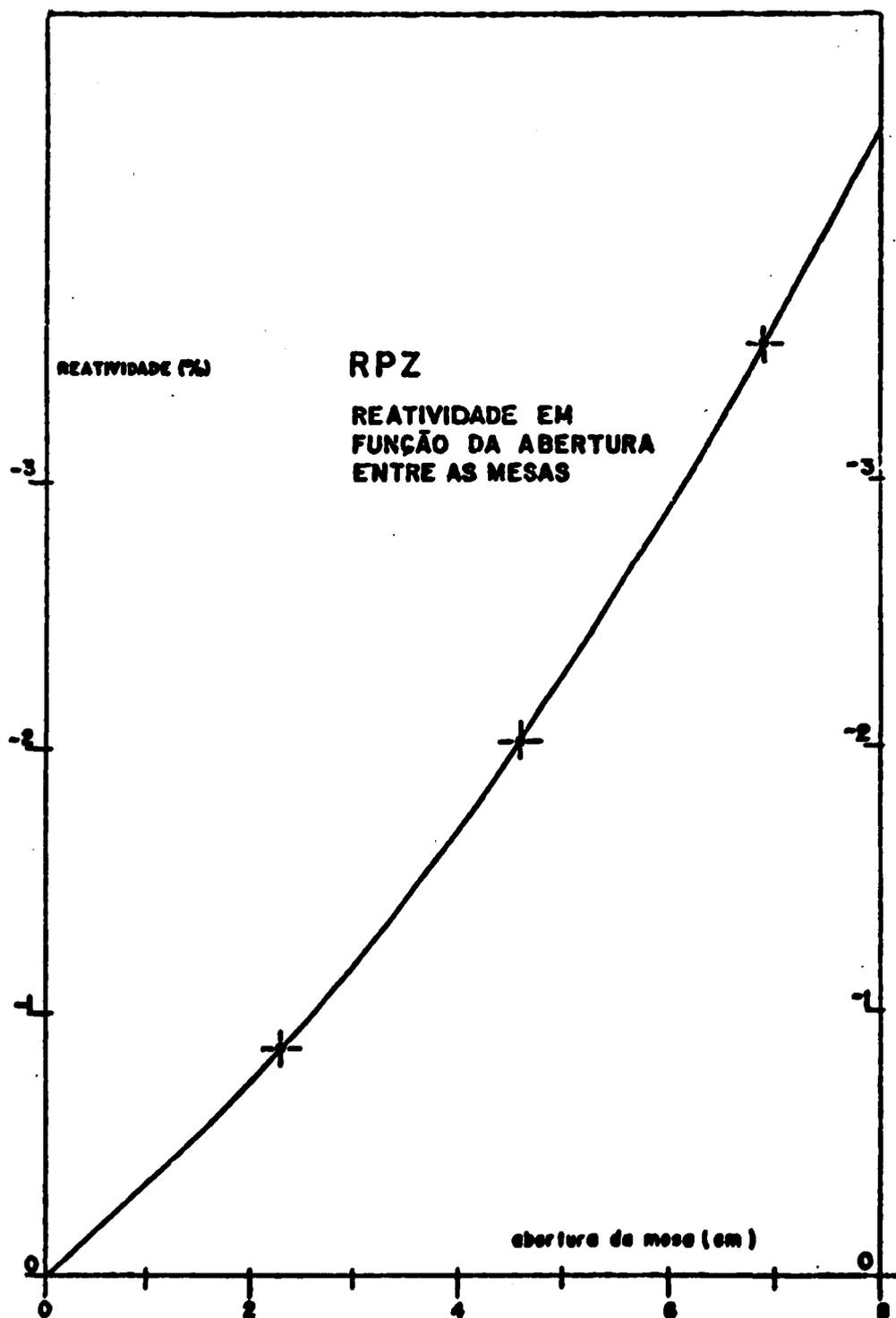


Figura 2.6 -- Reatividade do RPZ em função da Abertura entre as Mesas

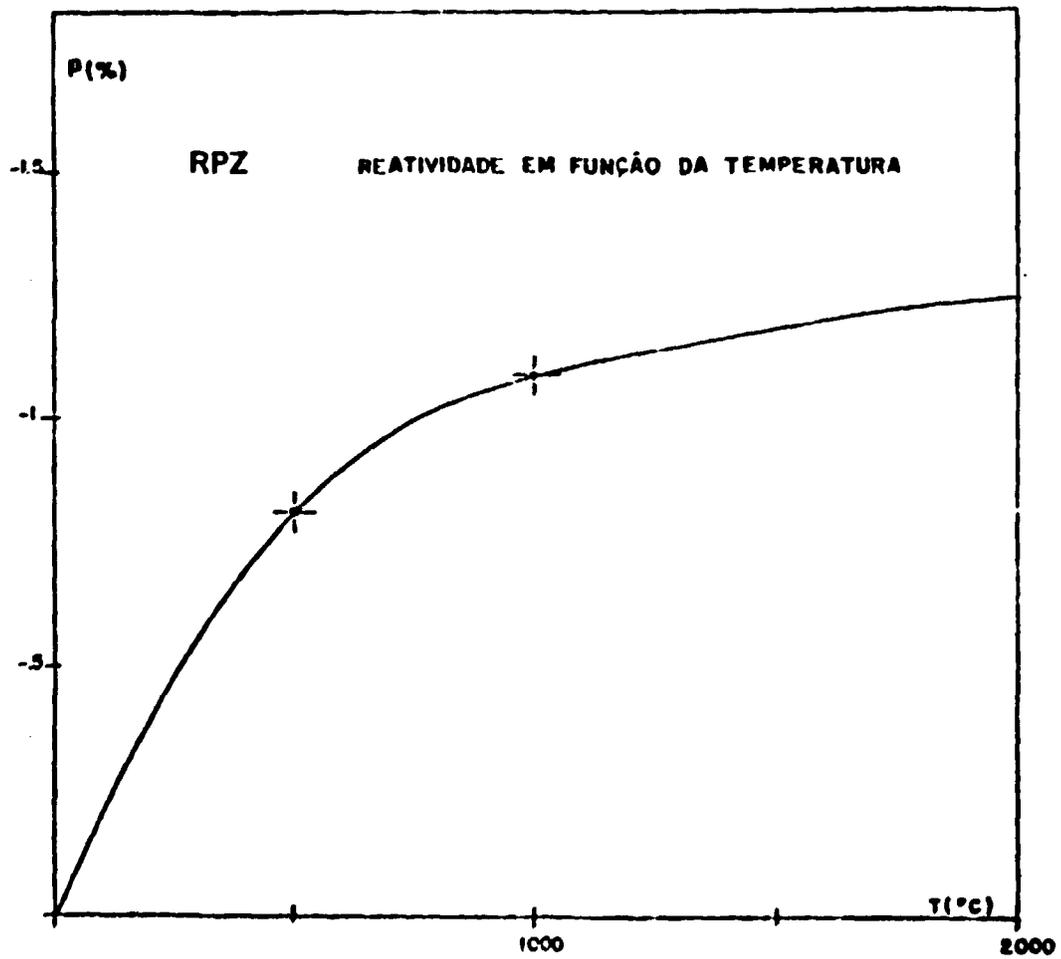


Figura 2.7 - Reatividade do RPZ em Função da Temperatura do Combustível

Quando as mesas estiverem juntas, inicia-se a retirada das barras de controle, uma de cada vez, manualmente, pelo Operador do Reator e o reator atinge a criticalidade. Ref.⁽¹⁶⁾.

3 – OS ACIDENTES CONSIDERADOS

3.1 – Aspectos Gerais

Como já foi observado na introdução, o Reator de Potência Zero foi projetado para ter a remoção do calor gerado durante sua operação feita por convecção natural ao ar ambiente e, conseqüentemente, fica afastada a possibilidade de ocorrência dos acidentes englobados na categoria “Acidentes de Perda de Refrigeração”.

Uma segunda categoria de acidentes, que não foi abordada neste estudo, tem o nome pouco explícito de “Acidentes Envolvendo Perigos Genéricos”, que engloba ocorrências de incêndios, inundações, terremotos e tempestades. A não inclusão desta categoria de acidentes neste trabalho não se prende absolutamente a um menosprezo de sua importância, mas sim ao fato de se tratar de um grupo de acidentes cuja análise é na sua maior parte não nuclear e, portanto, o foge ao escopo dos nossos objetivos primários.

Ainda, não está incluído aqui o estudo da Segurança Contra Sabotagem, cuja natureza também encontra-se fora das finalidades deste trabalho.

Foi mencionado na introdução o conceito de “Máximo Acidente Crível”, e suas limitações inerentes. Procuramos então, evitar este conceito, fazendo nossa análise não recair sobre um particular acidente, mas sim considerar todos os acidentes que reputamos logicamente possíveis, determinando suas conseqüências no que toca ao envolvimento do reator. Limitamo-nos a estabelecer as seqüências dos eventos em casos de acidentes e segui-las até o término dos mesmos quantificando os possíveis danos e/ou liberação de materiais radioativos. Desta forma, este estudo está intimamente ligado a outros dois trabalhos, já em andamento no IEA e que são a determinação das probabilidades de ocorrência das seqüências de eventos, Ref.⁽¹⁴⁾, e o estudo da dispersão de materiais radioativos na atmosfera, Ref.⁽²⁰⁾.

Os acidentes de criticalidade que analisaremos a seguir iniciam sempre por uma inesperada adição de reatividade. A operação ou falha dos dispositivos de segurança determina então a seqüência dos eventos que se sucedem a esta inserção de reatividade. A Figura 3.1 mostra a Árvore de Eventos para nossa análise, que a despeito de sua aparente simplicidade, tem se mostrado um poderoso instrumento na sistematização dos problemas de engenharia de segurança. Neste diagrama são colocados em seqüência os dispositivos de proteção do reator e, as possíveis respostas destes dispositivos, operação ou falha, geram os ramos da árvore que compõem todo espectro possível de acidentes.

É importante salientar que esta Árvore de Eventos é o principal elo de ligação entre este estudo e o trabalho citado anteriormente, determinação da probabilidade de ocorrência das seqüências de eventos. Ref.⁽¹⁴⁾. Já a ligação com o outro trabalho citado, o estudo da dispersão de materiais radioativos na atmosfera, Ref.⁽²⁰⁾, é feita através dos resultados obtidos aqui e, principalmente, da atividade dos produtos de fissão liberados nos acidentes.

3.2 – As Seqüências de Eventos

Seguindo a metodologia proposta na árvore de eventos, caminharemos através de seus ramos até atingirmos suas extremidades, determinando as Seqüências de Eventos Si

O tronco principal desta árvore, inicia-se com a criticalidade do reator. Como foi visto no Capítulo 2, a inserção de reatividade capaz de provocar este evento pode se dar pela retirada das barras de controle ou pela aproximação da mesa móvel do reator.

Para que ocorra a criticalidade durante o movimento da mesa do reator é preciso que este esteja sobrecarregado, pois a criticalidade normal é esperada ocorrer com as mesas completamente fechadas e com as barras de controle retiradas aproximadamente metade de seu comprimento. Com os cuidados, descritos no capítulo 2, para o carregamento do reator, pode-se supor que a reatividade do reator sobrecarregado não ultrapasse o valor de 0,8\$, valor este adotado para o evento inicial. A velocidade de aproximação da mesa móvel quando esta se encontra próxima do fechamento é de 0,5 cm/min como mostra a Tabela II.1. Finalmente, de posse da Curva de Reatividade em Função da Abertura, Figura 2.6, determinamos a velocidade de inserção de reatividade que é $4,5 \times 10^{-3}$ \$/seg. Por outro lado, como a mudança de velocidades de aproximação é comandada por circuitos elétricos, passíveis de falha, é possível ocorrer a aproximação final na velocidade intermediária, 5,0 cm/min e assim, consideramos o caso, também, de um evento inicial, com uma velocidade de inserção de $4,5 \times 10^{-2}$ \$/seg.

O movimento das barras de controle foi projetado de modo a que se tenha uma velocidade máxima de inserção de reatividade equivalente ao caso de fechamento das mesas, isto é, de $4,5 \times 10^{-3}$ \$/seg e, além disso, a reatividade de cada barra foi limitada em 0,8\$. Portanto o efeito de adição de reatividade por este mecanismo é em tudo semelhante ao do movimento da mesa móvel na velocidade de 0,5 cm/min.

Prosseguindo nossa caminhada ao longo da Árvore de Eventos encontramos a primeira subdivisão desta representando o comportamento dos detetores de nível de potência. Como estes detetores medem a potência indiretamente(*), existe a possibilidade de ocorrência de um erro de calibração e, conseqüentemente, a possibilidade de o reator funcionar acima da potência máxima permitida sem que o Sistema de Aquisição de Informações perceba isto. Estudos preliminares da operação de calibração nos indicam que a soma de todos os erros possíveis induzirão um fator de erro final na determinação da potência inferior a vinte. Assim, desdobramos o evento "detetor de potência opera" em quatro eventos, correspondentes à Potência máxima de 10 kw (sem erro de calibração), 50 kw, 100 kw e 200 kw.

A próxima subdivisão da Árvore de Eventos representa o comportamento dos detetores de período do reator. Aqui, o problema introduzido pela calibração dos detetores desaparece porque o período do reator é uma medida diferencial. De maneira geral, a medida da potência do reator prevalece sobre a do período, i.e., o limite de potência é atingido antes do limite de período, mas, para uma inserção de reatividade em taxas relativamente altas, pode ocorrer o inverso.

Já com os detetores de gradiente de temperatura isto não ocorre, havendo sempre o predomínio dos detetores de medidas neutrônicas, pois os efeitos térmicos têm um tempo de atraso de resposta muito maior comparado ao dos efeitos neutrônicos. Assim, o comportamento dos detetores de gradiente de temperatura só introduzem uma subdivisão na Árvore de Eventos no ramo da falha do detetor de potência e do detetor de período. Por outro lado, sendo este detetor de gradiente de temperatura o último nível do Sistema de Aquisição de Informações, sua falha nestas condições, implica que não ocorrerá o desligamento automático do reator, independentemente da disponibilidade ou não do Sistema de Ação de Emergência.

Até este ponto, vimos os principais dispositivos que compõem o Sistema de Aquisição de Informações. A seguir analisaremos os mecanismos de desligamento do reator, que compõem o Sistema de Ação de Emergência.

O primeiro deles, separação das mesas acionada por motor elétrico, tem na sua condição normal de operação um tempo de atraso de resposta ligeiramente inferior a 0,5 seg. Após um curto intervalo de tempo de aceleração (0,625 seg) a mesa móvel atinge a velocidade de 75 cm/min e anda nesta velocidade até atingir a separação máxima que é de 1,80m. A reatividade negativa no início da separação (até 7,0 cm de abertura entre as mesas) é inserida a uma velocidade média de 0,92 \$/seg.

(*) A potência é determinada a partir da medida do fluxo de nêutrons na periferia do reator, e a proporcionalidade entre este fluxo e a potência é obtida através de uma calibração no início de operação do reator.

A separação das mesas acionadas por motor a ar só introduz ramificações na Árvore de Eventos nos ramos correspondentes a falha da separação por motor elétrico, uma vez que o funcionamento deste já completa a função de separação. A entrada em operação do motor a ar é deliberadamente atrasada em 0,5 seg à espera do motor elétrico. A soma de todos os tempos de atraso desde que o sinal de emergência foi gerado até o início da separação dá um tempo total de atraso de resposta de aproximadamente 1,0 seg. Iniciada a separação, o movimento da mesa é em tudo, semelhante ao seu correspondente quando acionado por motor elétrico.

Finalmente, a inserção de barras de segurança, que é totalmente independente da separação das mesas, completa a Árvore de Eventos. O tempo de atraso para o início do movimento das barras é 0,15 seg., muito curto comparado ao do movimento da mesa. A reatividade negativa inserida por quatro barras é igual a 3,20\$, realizada em 0,5 seg, o que fornece uma velocidade média de inserção de reatividade negativa de 6,4 \$/seg, muito grande quando comparada ao correspondente provocada pela separação das mesas.

A análise desenvolvida até agora nos forneceu as seqüências de eventos, chamadas Si na Figura 3.1, que serão simuladas numericamente para determinarmos suas conseqüências. Entretanto, se analisarmos um pouco mais estas seqüências veremos que alguns grupos de seqüências de eventos produzem o mesmo efeito e podem, assim, ser analisadas em conjunto. Passaremos então a identificar estes grupos e, por isso, contamos com o auxílio da Figura 3.1.

As seqüências S6, S12, S18, S24 e S25 têm em comum o fato de não apresentarem nenhuma ação de desligamento.

Como foi frisado anteriormente, a velocidade de inserção de reatividade negativa das barras de segurança é grande e o tempo de atraso de resposta é curto, comparados com os respectivos efeitos na separação das mesas. Isto faz com que a ação das barras predomine sobre a do movimento da mesa. Então podemos reunir as seqüências: S1, S3, S5 num grupo, S7, S9, S11 em outro, S13, S15, S17 num terceiro e S19, S21, S23 num quarto grupo.

Estabelecidas assim as seqüências de eventos podemos passar agora a simulá-las numericamente e determinar suas conseqüências. Antes porém, descreveremos o trabalho teórico desenvolvido na construção do programa de computação que executará esta simulação.

4 – O MODELO TEÓRICO

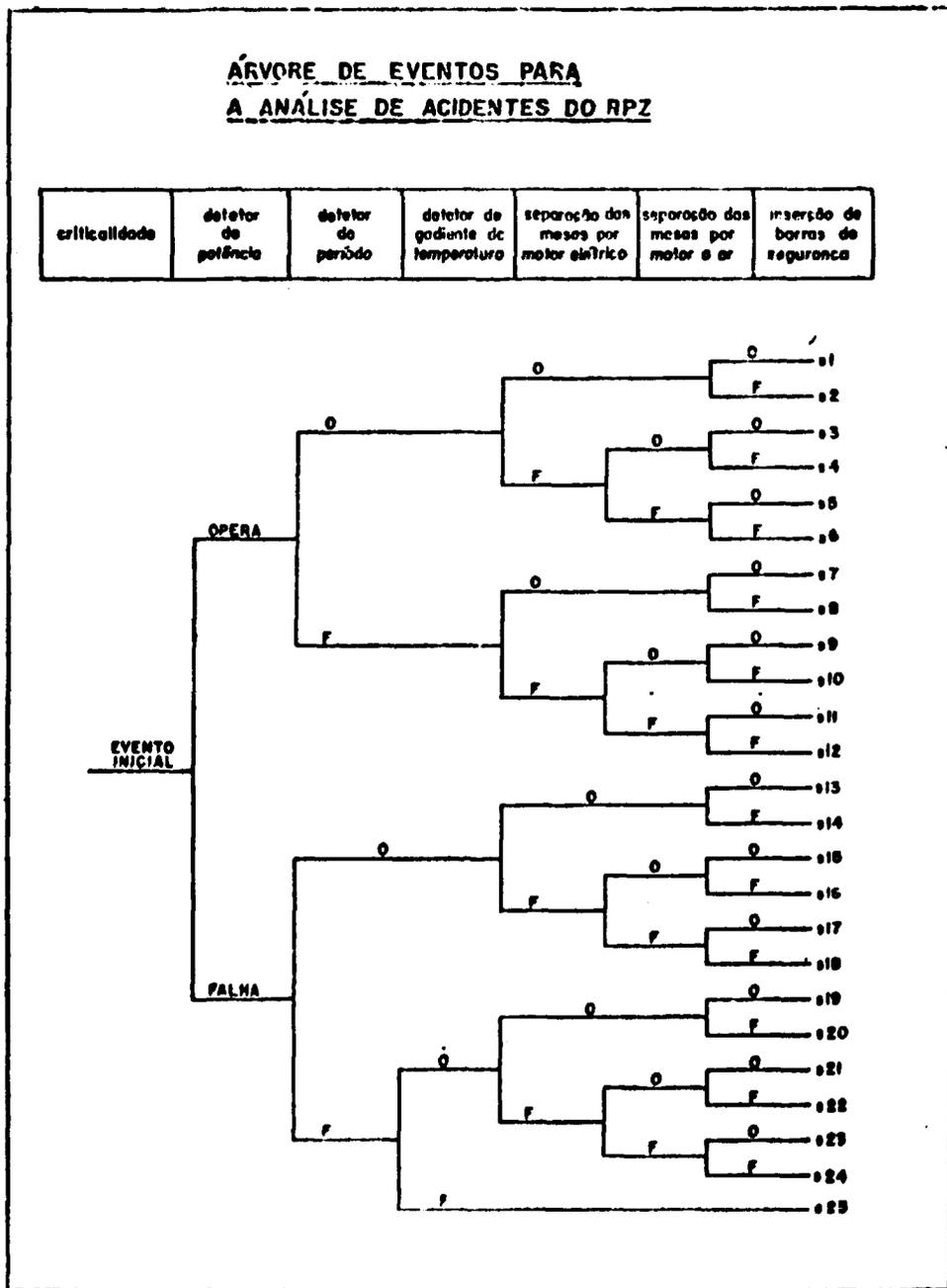
4.1 – A Cinética do Reator

Para descrever o comportamento neutrônico do reator durante um transiente de reatividade, usamos as equações zero-dimensionais de cinética de reatores:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{(1 - \beta) K(t) - 1}{\ell_p} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S(t) \quad (4.1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i k(t)}{\ell_p} n(t) - \lambda_i C_i(t), \quad i = 1, 6 \quad (4.2.1)$$

A principal limitação deste modelo advém do fato de não considerar as distorções espaciais do fluxo provocadas por variações não uniformes da reatividade. Sua escolha para o tratamento deste



problema se assenta numa solução de compromisso entre o custo de processamento e a qualidade dos dados obtidos. De fato, a inclusão de duas variáveis espaciais nas equações 4.1 e 4.2.i levaria a um aumento proibitivo no tempo de computação necessário para sua solução, bem como tornaria extremamente trabalhosa a formulação numérica do problema. Por outro lado, a análise teórica desse modelo nos indica que as limitações impostas pelas distorções espaciais do fluxo não introduzem erros capazes de invalidar os resultados obtidos. Finalmente, resultados práticos relatados nas Refs.^(10,11), vêm confirmar nossas suposições teóricas.

Para evitar um uso desnecessário do tempo de computação na solução das equações 4.1 e 4.2.i, aplicamos primeiramente um "tratamento" analítico, de modo a colocá-las numa forma mais conveniente para a solução numérica. Assim iniciamos por integrar as equações 4.2.i:

$$C_i(t) = \frac{\beta_i}{\ell_p} \int_0^t e^{-\lambda_i(t-t')} k(t') n(t') dt' + C_i(0) e^{-\lambda_i t} \quad i = 1,6 \quad (4.3.i)$$

e introduzimo-las na Eq. 4.1, resultando,

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{(1-\beta) K(t) - 1}{\ell_p} n(t) + \int_0^t \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{\ell_p} e^{-\lambda_i(t-t')} K(t') n(t') dt' \\ &+ S(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t} \end{aligned} \quad (4.4)$$

Fazemos agora, $\delta K(t) = K(t) - 1$, e a última expressão fica:

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{(1-\beta)}{\ell_p} \delta K(t) n(t) + \frac{\beta}{\ell_p} n(t) + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{\ell_p} \int_0^t e^{-\lambda_i(t-t')} \delta K(t') n(t') dt' + \\ &+ \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{\ell_p} \int_0^t e^{-\lambda_i(t-t')} n(t') dt' + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(0) e^{-\lambda_i t} + S(t) \end{aligned} \quad (4.5)$$

Integramos por partes o quarto termo do lado direito dessa equação, e agrupando os termos semelhantes, ficamos com:

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{(1-\beta)}{\ell_p} \delta K(t) n(t) + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{\ell_p} \int_0^t e^{-\lambda_i(t-t')} \delta K(t') n(t') dt' - \\ &- \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell_p} \int_0^t e^{-\lambda_i(t-t')} \frac{dn(t')}{dt'} dt' + \sum_{i=1}^6 e^{-\lambda_i t} \left[\lambda_i C_i(0) - \frac{\beta_i n(0)}{\ell_p} \right] + S(t) \end{aligned} \quad (4.6)$$

Aplicando-se a transformada de Laplace, temos:

$$\begin{aligned}
 s\mathcal{L}[n(t)] - n(0) &= \frac{1-\beta}{\ell_p} \mathcal{L}[\delta K(t) n(t)] + \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{\ell_p} \frac{1}{s+\lambda_i} \mathcal{L}[\delta K(t) n(t)] \\
 - \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell_p} \frac{1}{s+\lambda_i} [s\mathcal{L}[n(t)] - n(0)] &+ \sum_{i=1}^6 \mathcal{L}[e^{-\lambda_i t}] \left[\lambda_i C_i(0) - \frac{\beta_i n(0)}{\ell_p} \right] + \mathcal{L}[S(t)]
 \end{aligned} \tag{4.7}$$

Chamando:

$$G(s) = \frac{1}{s + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{\ell_p} \frac{s}{s+\lambda_i}} \tag{4.8}$$

e

$$H(s) = G(s) \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{\ell_p} \frac{1}{s+\lambda_i} \tag{4.9}$$

e rearranjando-se a Eq. 4.7, temos:

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}[n(t)] &= \frac{n(0)}{s} + \frac{(1-\beta)}{\ell_p} G(s) \mathcal{L}[\delta K(t) n(t)] + H(s) \mathcal{L}[\delta K(t) n(t)] \\
 + \sum_{i=1}^6 \left[\lambda_i C_i(0) - \frac{\beta_i n(0)}{\ell_p} \right] \mathcal{L}[e^{-\lambda_i t}] &+ \mathcal{L}[S(t)]
 \end{aligned} \tag{4.10}$$

Aplicamos, agora, a transformada inversa, resultando:

$$\begin{aligned}
 n(t) &= n(0) + \frac{1-\beta}{\ell_p} \mathcal{L}^{-1} [G(s) \mathcal{L}[\delta K(t) n(t)]] + \mathcal{L}^{-1} [H(s) \mathcal{L}[\delta K(t) n(t)]] \\
 + \mathcal{L}^{-1} \left[\left(\sum_{i=1}^6 \left(\lambda_i C_i(0) - \frac{\beta_i n(0)}{\ell_p} \right) \mathcal{L}[e^{-\lambda_i t}] + \mathcal{L}[S(t)] \right) G(s) \right]
 \end{aligned} \tag{4.11}$$

Para obtermos a transformada inversa das funções $G(s)$ e $H(s)$ consideramos as expansões:

$$G(s) = \frac{1}{s + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i s}{\rho_p (s + \lambda_i)}} = \sum_{j=1}^7 \frac{B_j}{s + S_j} \quad (4.12)$$

$$H(s) = \frac{\sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i \lambda_i}{\rho_p} \frac{1}{s + \lambda_i}}{s + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i s}{\rho_p (s + \lambda_i)}} = \sum_{j=1}^7 \frac{R_j}{s + S_j} \quad (4.13)$$

Para obtermos os coeficientes S_j , B_j , e R_j dessas expansões, inicialmente transformamos a função $G(s)$ no quociente de dois polinômios em s :

$$G(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \quad (4.12a)$$

onde

$$P(s) = \prod_{i=1}^6 (s + \lambda_i) \quad (4.12b)$$

$$Q(s) = sP(s) + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i s}{\rho_p} \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^6 (s + \lambda_j) \quad (4.12c)$$

Da Eq. 4.12 podemos identificar as funções:

$$G(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} = \sum_{j=1}^7 \frac{B_j}{s + S_j} = \frac{\sum_{j=1}^7 B_j \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^7 (s + S_k)}{\prod_{j=1}^7 (s + S_j)} \quad (4.12d)$$

E, assim, podemos também identificar:

$$Q(s) \equiv \prod_{j=1}^7 (s + S_j) \quad (4.12e)$$

$$P(s) = \sum_{j=1}^7 B_j \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^7 (s + S_k) \quad (4.12f)$$

E, então, concluímos que os coeficientes S_j são as raízes do polinômio $Q(s)$ com o sinal trocado.

Ainda, da Eq. 4.12e temos

$$Q'(s) = \frac{dQ(s)}{ds} = \sum_{j=1}^7 \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^7 (s + S_k) \quad (4.12g)$$

e ainda

$$Q'(-S_j) = \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^7 (S_k - S_j) \quad (4.12h)$$

Finalmente, da Eq. 4.12 vem

$$P(-S_j) = B_j \prod_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^7 (S_k - S_j) \quad (4.12i)$$

e, então,

$$B_j = \frac{P(-S_j)}{Q'(-S_j)} \quad (4.12j)$$

Procedendo da mesma forma com relação a função $H(s)$, i.e.

$$H(s) = \frac{P_H(s)}{Q(s)} \quad (4.13a)$$

Chegamos a

$$R_j = \frac{P_H(S_j)}{Q'(-S_j)} \quad (4.13b)$$

Assim, podemos obter a transformação inversa de $G(s)$ e $H(s)$ e a Eq. 4.11 fica:

$$n(t) = n(0) + \sum_{j=1}^7 A_j \int_0^t e^{-S_j(t-t')} \delta K(t') n(t') dt' + \Omega(t) \quad (4.14)$$

onde:

$$A_j = \frac{1-\beta}{\rho_p} R_j + R_j \quad (4.15)$$

$$\Omega(t) = \int_0^t \left[S(t') + \sum_{i=1}^6 \left(\lambda_i C_i(0) - \frac{\beta_i n(0)}{\rho_p} e^{-\lambda_i t'} \right) \sum_{j=1}^7 B_j e^{-S_j(t-t')} \right] dt' \quad (4.16)$$

Podemos simplificar a expressão de $\Omega(t)$, ficando com

$$\Omega(t) = \sum_{j=1}^7 B_j \int_0^t S(t') e^{-S_j(t-t')} dt' + \sum_{i=1}^6 \left(\lambda_i C_i(0) - \frac{\beta_i n(0)}{\rho_p} \right) \sum_{j=1}^7 B_j \frac{e^{-\lambda_i t} - e^{-S_j t}}{S_j - \lambda_i} \quad (4.17)$$

Neste modelo, fizemos uma simplificação adicional, supondo o termo de fonte $S(t) = \text{constante}$. Ainda, como o termo S_1 é sempre nulo temos:

$$\Omega(t) = S \left[B_1 t + \sum_{j=2}^7 \frac{B_j (1 - e^{-S_j t})}{S_j} \right] + \sum_{i=1}^6 \left(\lambda_i C_i(0) - \frac{\beta_i n(0)}{\rho_p} \right) \sum_{j=1}^7 B_j \frac{e^{-\lambda_i t} - e^{-S_j t}}{S_j - \lambda_i} \quad (4.18)$$

Voltando à Eq. 4.14, devemos efetuar a integração numérica para resolvê-la. Então:

$$n(t+h) = n(0) + \Omega(t+h) + \sum_{j=1}^7 A_j \int_0^{t+h} e^{-S_j(t+h-t')} \delta K(t') n(t') dt' \quad (4.19)$$

ou,

$$\begin{aligned} n(t+h) &= n(0) + (t+h) + \sum_{j=1}^7 A_j e^{-S_j h} \int_0^t e^{-S_j(t-t')} \delta K(t') n(t') dt' \\ &+ \sum_{j=1}^7 A_j \int_t^{t+h} e^{-S_j(t+h-t')} \delta K(t') n(t') dt' \end{aligned} \quad (4.20)$$

Usando a aproximação trapezoidal para a integral do último termo dessa equação, e chamando

$$\omega_j(t) = \int_0^t e^{-S_j(t-t')} \delta K(t') n(t') dt' \quad (4.21)$$

a Eq. 4.20 fica:

$$n(t+h) \cong n(0) + \Omega(t+h) + \sum_{j=1}^7 A_j e^{-S_j h} \omega_j(t) + \sum_{j=1}^7 A_j \frac{h}{2} [e^{-S_j h} \delta K(t) n(t) + \delta K(t+h) n(t+h)] \quad (4.22)$$

e, finalmente,

$$n(t+h) \cong \frac{n(0) + \Omega(t+h) + \sum_{i=1}^7 A_i e^{-S_i h} [\omega_i(t) + \delta K(t) n(t) h/2]}{1 - \sum_{j=1}^7 A_j \delta K(t+h) h/2} \quad (4.23)$$

A expressão de recorrência para $\omega_j(t)$ vem de:

$$\omega_j(t+h) = \int_0^{t+h} e^{-S_j(t+h-t')} \delta K(t') n(t') dt'$$

e simplificando-a ficamos com

$$\omega_j(t+h) = e^{-S_j h} \omega_j(t) + \frac{h}{2} [e^{-S_j h} \delta K(t) n(t) + \delta K(t+h) n(t+h)] \quad (4.24)$$

4.2 – A Distribuição de Temperaturas no Combustível

Na seção anterior, resolvemos a equação de cinética do reator e obtivemos a densidade de nêutrons no reator em regime transitório. A partir deste valor, obtemos a densidade de potência gerada no reator e, então, podemos obter um conjunto de equações que determinam a distribuição de temperaturas em um elemento de combustível do reator. A Figura 4.1 mostra esquematicamente as hipóteses feitas na obtenção da distribuição de temperaturas do combustível.

4.2.1 – Balanço Térmico no Combustível

O combustível é dividido em n anéis concêntricos de mesma espessura, igual a Δr , delimitando regiões nas quais a temperatura é considerada uniforme. Então podemos escrever:

Calor gerado no elemento j para $j = 1, n$

$$q_g = q'''(t) \pi [(j\Delta r)^2 - (j-1)^2 \Delta r^2] \quad (4.25)$$

$$q_g = q'''(t) \pi \Delta r^2 (2j - 1) \quad (4.26)$$

Calor conduzido através das fronteiras do elemento j , para $j = 2, n - 1$

$$q_c = K_u 2\pi j \Delta r \left(\frac{T_{j-1}^\theta - T_j^\theta}{\Delta r} \right) - K_u 2\pi(j+1) \Delta r \left(\frac{T_j^\theta - T_{j+1}^\theta}{\Delta r} \right) \quad (4.27)$$

$$q_c = 2\pi K_u [j T_{j-1}^\theta + (j+1) T_{j+1}^\theta - (2j+1) T_j^\theta] \quad (4.28)$$

Varição de energia interna no elemento j , $j = 1, n$

$$\Delta U = m_j C_u (T_j^{\theta+1} - T_j^\theta) \quad (4.29)$$

$$m_j = \rho_u \pi [j^2 \Delta r^2 - (j-1)^2 \Delta r^2] \quad (4.30)$$

$$\Delta U = \pi \rho_u C_u \Delta r^2 (2j-1) (T_j^{\theta+1} - T_j^\theta) \quad (4.31)$$

e, assim, podemos estabelecer o balanço térmico

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = Q_g + Q_c \quad (4.32)$$

$$\begin{aligned} \frac{\pi \rho_u C_u \Delta r^2 (2j-1)}{\Delta t} (T_j^{\theta+1} - T_j^\theta) &= q''' \pi \Delta r^2 (2j-1) + \\ &+ 2\pi K_u [j T_{j-1}^\theta + (j+1) T_{j+1}^\theta - (2j+1) T_j^\theta] \end{aligned} \quad (4.33)$$

Chamando-se de

$$F_u = \frac{K_u}{\rho_u C_u} \frac{\Delta t}{\Delta r^2} \quad (4.34)$$

rearranjamos a expressão 4.33 e temos

$$T_j^{\theta+1} = \frac{q''' \Delta r^2}{K_u} F_u + \left[1 - 2F_u \left(\frac{2j+1}{2j-1} \right) \right] T_j^\theta + \frac{2F_u}{2j-1} [j T_{j-1}^\theta + (j+1) T_{j+1}^\theta] \quad (4.35)$$

para $j = 2, n - 1$

para o elemento 1 a expressão para o calor conduzido fica:

$$q_c = 2 \pi \Delta r K_u \left(\frac{T_2^\theta - T_1^\theta}{\Delta r} \right) \quad (4.36)$$

e a expressão para o balanço térmico fica:

$$T_1^{\theta+1} = \frac{q''' \Delta r^2}{K_u} F_u + (1 - 2F_u) T_1^\theta + 2F_u T_2^\theta \quad (4.37)$$

Das equações 4.35 e 4.37 tiramos uma condição de convergência da solução numérica que é:

$$1 - 2F_u \left(\frac{2j+1}{2j-1} \right) > 0 \quad j = 2, n \quad (4.38a)$$

$$1 - 2F_u > 0 \quad (4.38b)$$

destas, a condição mais forte é a Eq. 4.38a, para $j = 2$; assim,

$$1 - \frac{10}{3} F_u > 0$$

ou

$$F_u < 0.3 \quad (4.39)$$

No programa ACDNTE foi incluído um teste do número F_u de modo a obedecer a condição expressa na Eq. 4.39. No caso dessa condição não ser obedecida, o programa calcula um novo intervalo de tempo Δt com apenas um algarismo diferente de zero e prossegue na solução do problema.

4.2.2 – Balanço Térmico no Espaço entre o Combustível e o Encamisamento e no Último Anel do Combustível

Entre o combustível e o encamisamento, existe uma folga de 0.19 mm preenchida com ar. Esta folga, comparada com o raio do combustível é muito pequena, e assim, admitimos condução de calor unidimensional nesta região. Além disso, a densidade do gás que a preenche é cerca de 10^4 vezes menor que a densidade dos outros materiais envolvidos, justificando que se despreze sua capacidade térmica.

Assim, o balanço térmico para o n ésimo elemento do combustível fica:

calor conduzido do elemento $n - 1$ para o elemento n :

$$q_e = K_u 2\pi(n-1) \Delta r \left(\frac{T_{n-1}^\theta - T_n^\theta}{\Delta r} \right) \quad (4.40)$$

calor conduzido do elemento n para a folga:

$$q_s = K_G 2\pi R \left(\frac{T_n^\theta - T_{n+1}^\theta}{e_G} \right) \quad (4.41)$$

e, como as expressões para o calor gerado e a variação de energia interna já foram obtidas nas Eq. 4.26 e 4.31 respectivamente, podemos escrever o balanço térmico como:

$$\frac{\pi \rho_u C_u \Delta r^2}{\Delta t} (2n-1) (T_n^{\theta+1} - T_n^\theta) = q''' \pi \Delta r^2 (2n-1) + 2\pi K_u (n-1) (T_{n-1}^\theta - T_n^\theta) - \frac{2\pi K_G R}{e_G} (T_n^\theta - T_{n+1}^\theta) \quad (4.42)$$

rearranjando e isolando o termo $T_n^{\theta+1}$ ficamos:

$$T_n^{\theta+1} = T_n^\theta + \frac{q''' \Delta t}{\rho_u C_u} + 2F_u \left(\frac{n-1}{2n-1} \right) (T_{n-1}^\theta - T_n^\theta) - 2F_G (T_n^\theta - T_{n+1}^\theta) \quad (4.43)$$

onde

$$F_G = \frac{K_G R \Delta t}{e_G \Delta r^2 \rho_u C_u (2n-1)} \quad (4.44)$$

4.2.3 – Balanço Térmico no Encamisamento

No início deste trabalho, era nossa intenção dividir o encamisamento em anéis concêntricos como foi feito para o combustível. Entretanto, por ser a condutividade térmica do material que constitui o encamisamento muito maior que a condutividade térmica dos outros materiais envolvidos (a condutividade do alumínio é cerca de 100 vezes maior que a do Dióxido de Urânio), a queda de temperatura no encamisamento é muito pequena, o que matematicamente se traduz num número de Fourier muito alto. Isto levaria a um intervalo de tempo muito curto para se obedecer ao critério de convergência da solução numérica, com o conseqüente aumento do número de iterações.

Desta forma, concluímos que considerar a temperatura uniforme no encamisamento era a melhor solução. Os resultados dos testes de precisão vieram a dar sustento a esta conclusão, uma vez que a precisão obtida para o encamisamento foi da mesma ordem de grandeza da precisão para os outros pontos considerados.

O calor que entra no encamisamento é dado por:

$$q_e = K_G 2\pi R \left(\frac{T_n^\theta - T_{n+1}^\theta}{e_G} \right) \quad (4.45)$$

O calor que sai é dado por:

$$q_s = h_c 2\pi (R + e_G + e_c) (T_{n+1}^\theta - T_{n+2}^\theta) \quad (4.46)$$

A variação de energia interna será:

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = m_c C_c (T_{n+1}^\theta - T_{n+1}^\theta) \quad (4.47)$$

onde

$$m_c = \rho_c \pi [(R + e_G + e_c)^2 - (R + e_G)^2] \quad (4.48)$$

e, então,

$$\frac{\Delta U}{\Delta t} = \rho_c C_c 2\pi e_c (R + e_G + e_c/2) (T_{n+1}^{\theta+1} - T_{n+1}^\theta) \quad (4.49)$$

e o balanço térmico fica:

$$T_{n+1}^{\theta+1} = T_{n+1}^\theta + F_c (T_n^\theta - T_{n+1}^\theta) - Q_{SL} \quad (4.50)$$

onde

$$F_c = \frac{K_G \Delta t}{\rho_c C_c e_G e_c} \cdot \frac{R}{R + e_G + e_c/2} \quad (4.51)$$

$$Q_{SL} = \frac{h(T_{n+1}^\theta - T_{n+2}^\theta) \Delta t}{\rho_c C_c e_c} \cdot \frac{R + e_G + e_c}{R + e_G + e_c/2} \quad (4.52)$$

A temperatura T_{n+2} é a temperatura do ar e foi tomada constante e igual a 20°C. Isto se justifica pelo baixo coeficiente de película do ar em convecção natural, o que faz com que a influência do calor gerado sobre o ar ambiente seja muito pequena durante o tempo de transiente do reator.

4.3 – A Função $\delta K(t)$ e a Simulação da Instrumentação do Reator

Na solução das equações de cinética, Eqs. 4.1 e 4.2.i, tomamos o cuidado de não impor nenhuma restrição à função $\delta K(t)$, de modo a poder simular qualquer condição do reator. Assim, no programa ACDNTE, esta função, FUNCTION DK(T,IM), foi codificada separadamente do programa principal, de modo a facilitar a introdução de modificações na mesma.

Entretanto, procuramos estabelecer nesta função rotinas de cálculo que simulassem os efeitos de reatividade comuns à maioria dos reatores, com acesso por cartões de dados.

Desta forma, a FUNCTION DK, padrão do programa, pode simular a inserção ou retirada de barras absorvedoras por dois mecanismos. O efeito de temperatura na reatividade é simulado por um polinômio de 5º grau, sendo a temperatura do reator calculada no programa principal. O efeito da abertura entre as mesas do reator é simulado levando-se em conta o movimento da mesa móvel, inclusive em situações de transição, como aceleração, frenagem e reversão do movimento. Deve-se notar que a simulação de abertura de mesas, embora feita especificamente para representar o Reator de Potência Zero do IEA, pode servir para a análise de outros tipos de reatores, como por exemplo simulando uma concentração de boro no caroço de um reator.

Todos os efeitos não inerentes ao reator, i.e., provenientes de uma ação de controle, levam em conta o tempo de resolução ou atraso para esta ação.

Os medidores de potência, período e temperatura, que compõem a instrumentação de segurança do reator, são simulados por comandos que comparam estes valores aos máximos e mínimos pré-fixados para estes. Quando uma condição anormal é detetada, ou seja, quando a potência, período ou temperatura atingirem um valor fora da faixa normal de operação, estes comandos de comparação desencadeiam uma série de procedimentos que governam a função $\delta K(t)$, simulando as ações automáticas de emergência.

5 – RESULTADOS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De posse do programa de computação desenvolvido segundo o modelo teórico apresentado no capítulo anterior passamos agora a determinar as conseqüências das seqüências de eventos estabelecidas no capítulo 3. Dentre estas conseqüências, concentraremos nossa atenção na potência do reator, que determina todos os outros valores relevantes para esta análise. São eles: o calor liberado pelo reator, a quantidade de produtos de fissão formados durante o acidente, a temperatura do combustível e a temperatura do encamisamento.

5.1 – Dados de Entrada

Os dados de entrada comuns a todas as seqüências de eventos estão mostrados na Tabela V.1. As Tabelas V.2, V.3 e V.4 mostram os dados que caracterizam as seqüências individualmente. A ordem de apresentação dos dados adotada na Tabela V.1 foi a mesma da entrada destes no programa de computação (Ver Apêndice A).

A condutividade térmica do UO_2 , material do combustível, foi incorporada ao programa ACDNTE na forma de uma subrotina que calcula este valor em função da temperatura. A curva aproximada usada pelo programa neste cálculo é mostrada na Figura 5.1.

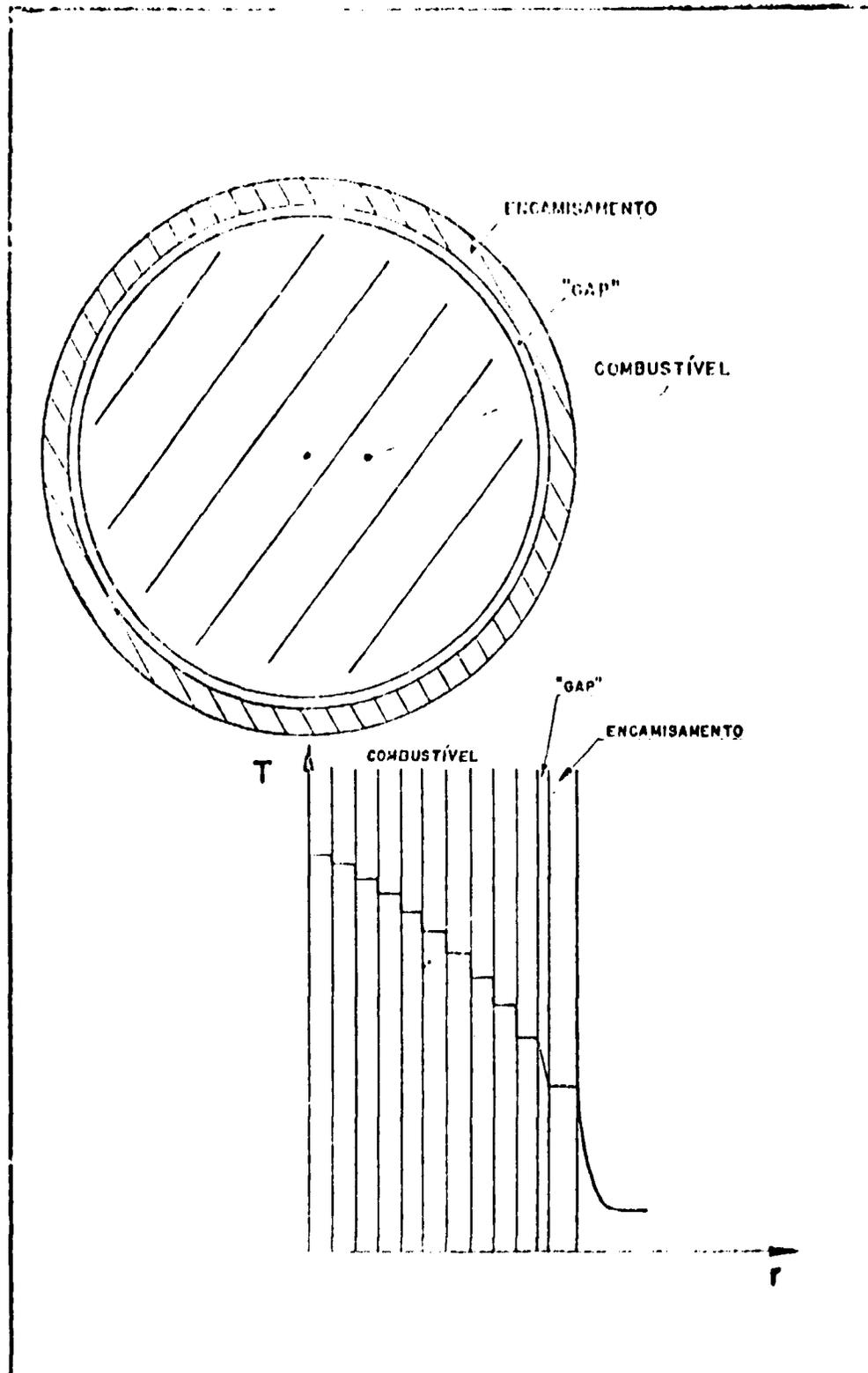


Figura 4.1 Esquema da Distribuição de Temperaturas no Elemento de Combustível do RPZ, conforme as Hipóteses Adotadas no Programa de Cálculo.

Tabela 5.1

Dados de Entrada para a Simulação das
Seqüências de Eventos

Constante de decaimento dos precursores de nêutrons atrasados, λ_i , (seg ⁻¹)		
i =	1	0,0124
	2	0,0305
	3	0,111
	4	0,301
	5	1,14
	6	3,01
Eficiência dos nêutrons atrasados, γ_i ,		
i =	1 até 6	1,0
Fração de Nêutrons atrasados β_i ,		
i =	1	0,000228
	2	0,001511
	3	0,001352
	4	0,002726
	5	0,000794
	6	0,000290
Fontes de nêutrons, S (Watt)		0,0
Eficiência dos nêutrons de fonte, γ_s		1,0
Vida Média de nêutrons prontos, λ_p (seg)		$1,9 \times 10^{-4}$
Potência inicial do reator (%)		10^3
Enriquecimento (%)		10
Coeficiente de relação entre a potência do reator e a densidade de potência no elemento de combustível mais quente (cm ⁻³)		$5,661 \times 10^{-5}$
Intervalo de tempo de iteração numérica (seg)		$5,0 \times 10^{-3}$
Raio do Combustível (cm)		0,5
Espessura da folga entre o combustível e o encamisamento (cm)		0,019
Espessura do encamisamento (cm)		0,062
Condutividade térmica do material de enchimento da folga entre o combustível e o encamisamento (W/cm ² °C)		0,00277
Condutividade térmica do encamisamento (W/cm ² °C)		2,27

continua

continuação

Produto calor específico x densidade do encamisamento (J/cm ³ °C)	2,61
Produto calor específico x densidade do combustível (J/cm ³ °C)	2,51
Coefficiente de película do ambiente (W/cm ² °C)	5,0 x 10 ⁻⁴
Número de subdivisão do combustível (para a solução numérica da equação de transferência de calor)	20
Temperatura Ambiente (°C)	20,0
Fator de pico para a média da temperatura do reator	0,45
Nível máximo de potência do reator	Tabela 5.2
Nível mínimo de período do reator (seg)	Tabela 5.2
Nível máximo de temperatura do reator (°C)	10 ⁵⁰ (→-)
Tempo de atraso até iniciar-se a frenagem da mesa (seg)	Tabela 5.3
Tempo de frenagem da mesa (seg)	Tabela 5.4
Tempo de atraso até iniciar-se a aceleração da mesa (seg)	0,0
Tempo de aceleração da mesa (seg)	0,625
Tempo de atraso até iniciar-se a inserção das barras de segurança	Tabela 5.3
Tempo de voo das barras de segurança (seg)	0,5
Tempo para o início do movimento das barras de segurança (seg)	10 ⁵⁰ (→-)
Tempo de movimento das barras de controle (seg)	0,0
Aceleração de frenagem da mesa (cm/seg ²)	1,67
Aceleração de retração da mesa (cm/seg ²)	2,0
Posição da mesa para criticalidade (cm)	1,57038
Velocidade de aproximação da mesa (cm/seg)	Tabela V.4
Comprimento da barra de segurança (cm)	100
Valor da barra de segurança (\$)	0,8
Valor da barra de controle (\$)	0,0
Coefficiente do polinômio que representa a reatividade em função da abertura das mesas (x em cm)	5,52 x 10 ⁻³

x⁰

continua

continuação

	x^1	$- 3,0528 \times 10^{-3}$
	x^2	$- 2,9438 \times 10^{-4}$
Coeficientes do polinômio que representa a posição da barra de segurança em função do tempo (t em segundos)		
	t^0	0,0
	t^1	1,0
Coeficientes do polinômio que representa a posição da barra de controle em função do tempo (t em segundos)		
		Todos nulos
Coeficientes do polinômio que representa a reatividade em função da temperatura do reator (T em °C)		
	T^0	$7,12896 \times 10^{-4}$
	T^1	$-2,3495 \times 10^{-5}$
	T^2	$1,6919 \times 10^{-8}$
	T^3	$-4,3382 \times 10^{-12}$
Número de iterações e intervalo de iterações entre as impressões de resultados.		
		200 e 10
		18000 e 200
		50000 e 200
		600 e 20
		3000 e 100
		3000 e 200

Tabela V.2

Níveis de Potência e Período que Geram o Sinal de Emergência,
Identificando as Seqüências de Eventos.

Seqüência de Eventos	Nível de Potência (Watt)	Nível de Período (seg)
S1 a S6	10^4	5
	5×10^4	5
	10^5	5
	2×10^5	5
S7 a S12	10^4	$10^{-50} (\rightarrow 0)$
	5×10^4	$10^{-50} (\rightarrow 0)$
	10^5	$10^{-50} (\rightarrow 0)$
	2×10^5	$10^{-50} (\rightarrow 0)$
S13 a S18	$10^{50} (\rightarrow \infty)$	5
S25	$10^{50} (\rightarrow \infty)$	$10^{-50} (\rightarrow 0)$

Tabela V.3

Tempos de Atraso da Resposta do Reator
Caracterizando as Seqüências de Eventos

Seqüência de Eventos	Tempo para o Início da Frenagem da Mesa (seg)	Tempo para o Início da inserção das Barras de Segurança (seg)
S1, S7, S13, S19	0,5	0,15
S3, S9, S15, S21	1,0	0,15
S5, S11, S17, S23	$10^{50} (\rightarrow \infty)$	0,15
S2, S8, S14, S20	0,5	$10^{50} (\rightarrow \infty)$
S4, S10, S16, S22	1,0	$10^{50} (\rightarrow \infty)$
S6, S12, S18, S24	$10^{50} (\rightarrow \infty)$	$10^{50} (\rightarrow \infty)$

Tabela V.4

Parâmetros Cinemáticos do Reator que Caracterizam as Velocidades de Aproximação da Mesa Móvel.

PARÂMETRO	Adição de Restividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-3}$ \$/seg	Adição de Restividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-2}$ \$/seg
Tempo de Frenagem (seg)	5×10^{-3}	5×10^{-2}
Velocidade de Aproximação (cm/min)	0,5	5,0

5.2 – Resultados

Sob o ponto de vista da segurança, o resultado final mais importante da análise de um acidente é a liberação de materiais radioativos para o meio ambiente. Para obtermos este dado determinamos primeiramente a energia liberada pelo reator no acidente, que é diretamente proporcional ao número de fissões ocorridos e, conseqüentemente, à quantidade de materiais radioativos formados. A seguir, determinamos a temperatura do encamisamento que influencia sua taxa de falhas, e a temperatura do combustível que rege a velocidade de difusão dos produtos de fissão.

Apresentamos a seguir os resultados para as seqüências de eventos mencionados no capítulo 3. Procuramos, sempre que possível, agrupá-los na forma de tabelas, de modo a termos uma melhor visualização e comparação dos dados obtidos. Da mesma forma, procuramos também reunir nas figuras os resultados que de alguma maneira se interrelacionem.

As Tabelas V.5 e V.6 apresentam a energia liberada e as atividades dos produtos de fissão 1 hora e 100 horas, após o acidente para as diversas seqüências de eventos, para uma taxa de inscrição de reatividade de $4,5 \times 10^{-3}$ \$/seg e $4,5 \times 10^{-2}$ \$/seg, respectivamente. As Tabelas V.7 e V.8 completam as informações fornecidas nas duas tabelas anteriores, apresentando a potência e as temperaturas do combustível e encamisamento máximas atingidas nas diversas seqüências de eventos.

Dois comentários se impõem à apresentação destas quatro tabelas:

A ausência de resultados, para as seqüências de eventos correspondentes aos ramos da árvore, desmembrados a partir do detetor de gradiente de temperaturas, se deve a uma falta de dados. No estágio atual do desenvolvimento do projeto, estes detetores não estão definidos quanto a localização dos medidores propriamente ditos ou dos valores máximos admissíveis, e assim, não haveria nenhum sentido em apresentar resultados para uma situação totalmente hipotética. De qualquer forma, as seqüências de eventos nesta linha apresentam conseqüências englobadas em outros ramos da árvore de eventos.

As atividades dos produtos de fissão mostradas nas Tabelas V.5 e V.6 foram calculadas partindo-se de um modelo de explosivo nuclear ao invés de um modelo de reator. A diferença entre os dois modelos se prende ao fato de que no reator as fissões ocorrem continuamente por um período de tempo relativamente longo, e os produtos de fissão são formados ao mesmo tempo que decaem, estabelecendo-se uma concentração de equilíbrio para os diversos radioisótopos presentes. No modelo de um explosivo, as fissões ocorrem quase que instantaneamente (o que, guardadas as devidas proporções e situações, é o caso dos acidentes aqui tratados), não havendo durante o transiente, tempo para o decaimento dos produtos de fissão. Decorre daí que, neste último modelo, a proporção de radioisótopos de meia-vida curta é absolutamente predominante, comparada à do modelo de reator e, assim, os produtos radioativos formados durante o transiente decaem mais rapidamente que os formados num intervalo de tempo longo.

As Tabelas V.5 a V.8 mostram os valores máximos de potência e temperaturas, e totais de energia e atividades produzidas. O comportamento dinâmico do reator durante os acidentes, isto é, a variação no tempo dos parâmetros que caracterizam estes eventos pode ser visto nas Figuras 5.2 a 5.9. Evitamos apresentar nestas figuras todas as seqüências de eventos estudadas, selecionando algumas delas, para que formassem um quadro representativo de todo espectro de acidentes possíveis. Procuramos também agrupar numa mesma figura as curvas representativas de eventos que apresentassem alguma causa em comum, visando facilitar a comparação entre as mesmas.

5.3 – Conclusões

Analisando os resultados apresentados nas Tabelas V.5 e V.8, vemos que, para todas as seqüências de eventos onde, de alguma forma, ocorreu o desligamento do reator, a temperatura do encamisamento atingiu valores muito abaixo da temperatura para a qual ocorrem alterações sensíveis das

Tabela V.5

Energia Liberada e Atividade dos Produtos de Fissão para As Diversas Seqüências de Eventos (ver Figura 3.1), com Inserção de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-3}$ $\$/seg.$

Seqüência de Eventos	Energia Liberada (10^6 Joules)	Atividade dos Produtos de Fissão (Ci)	
		1 Hora Após o Acidente	100 Horas Após o Acidente
S1, S3, S5, S7, S9, S11 (Potência Máxima = 10^4 W)	0,206	4,33	0,088
S2, S8 (Potência Máxima = 10^4 W)	0,220	4,62	0,094
S4, S10 (Potência Máxima = 10^4 W)	0,227	4,77	0,097
S1, S3, S5, S7, S9, S11 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	0,698	14,7	0,299
S2, S8 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	0,772	16,2	0,330
S4, S10 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	0,804	16,9	0,344
S1, S3, S5, S7, S9, S11 (Potência Máxima = 10^5 W)	1,23	25,8	0,526
S2, S8 (Potência Máxima = 10^5 W)	1,38	29,0	0,591
S4, S8 (Potência Máxima = 10^5 W)	1,45	30,5	0,621
S1, S3, S5, S7, S9, S11 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	2,29	48,1	0,980
S2, S8 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	2,60	54,6	1,11
S4, S10 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	2,72	57,1	1,16
S6, S12, S18, S24 e S25	149	3129	63,8

Tabela V.6

Energia Liberada e Atividade dos Produtos de Fissão para As Diversas Sequências de Eventos (ver Figura 3.1), com Inserção de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-2}$ $\$/seg.$

Sequência de Eventos	Energia Liberada (10^6 Joules)	Atividade dos Produtos de Fissão (Ci)	
		1 Hora Após o Acidente	100 Horas Após o Acidente
S1, S3, S5 (Potência Máxima = 10^4 W)	0,0340	0,71	0,015
S2 (Potência Máxima = 10^4 W)	0,0480	1,01	0,021
S4 (Potência Máxima = 10^4 W)	0,670	1,41	0,029
S1, S3, S5 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	0,112	2,35	0,048
S2 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	0,230	4,83	0,098
S4 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	0,418	8,78	0,179
S1, S3, S5 (Potência Máxima = 10^5 W)	0,195	4,10	0,083
S2 (Potência Máxima = 10^5 W)	0,478	10,0	0,205
S4 (Potência Máxima = 10^5 W)	1,01	21,2	0,432
S1, S3, S5 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	0,348	7,31	0,149
S2 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	1,01	21,2	0,432
S4 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	2,38		
S7, S9, S11, S13, S15, S17	0,00770	50,0	1,02
S8, S14	0,00998	0,21	0,004
S10, S16	0,0114	0,24	0,005
S6, S12, S18 S24 e S25	89,2	1870	38

Tabela V.7

Potência, Temperatura do Combustível e Temperatura do Encamisamento
Atingidas nas Diversas Seqüências de Eventos, para uma Inserção
de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-3}$ $\$/seg.$

Seqüência de Eventos	Potência Máxima (W)	Temperatura Máxima do Combustível (°C)	Temperatura Máxima do Encamisamento (°C)
S1, S3, S5, S7, S9, S11 (Potência Máxima = 10^4 W)	$1,0 \times 10^4$	46,8	46,5
S2, S8 (Potência Máxima = 10^4 W)	$1,04 \times 10^4$	47,0	46,8
S4, S10 (Potência Máxima = 10^4 W)	$1,08 \times 10^4$	47,1	46,9
S1, S3, S5, S7, S9, S11 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	$5,09 \times 10^4$	55,0	54,5
S2, S8 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	$5,28 \times 10^4$	56,0	55,8
S4, S10 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	$5,55 \times 10^4$	56,6	56,3
S1, S3, S5, S7, S9, S11 (Potência Máxima = 10^5 W)	$1,02 \times 10^5$	64,2	63,5
S2, S8 (Potência Máxima = 10^5 W)	$1,06 \times 10^5$	66,3	66,0
S4, S8 (Potência Máxima = 10^5 W)	$1,12 \times 10^5$	67,4	67,1
S1, S3, S5, S7, S9, S11 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	$2,04 \times 10^5$	82,5	81,5
S2, S8 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	$2,12 \times 10^5$	87,0	86,5
S4, S10 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	$2,22 \times 10^5$	89,1	88,7
S6, S12, S18, S24, S25	$1,74 \times 10^6$	2120	Acima da Temperatura de fusão do encamisamento

Tabela V.8

Potência, Temperatura do Combustível e Temperatura do Encamisamento
Atingidas nas Diversas Sequências de Eventos, para uma Inserção
de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-2}$ $\$/seg.$

Sequência de Eventos	Potência Máxima (W)	Temperatura Máxima do Combustível (°C)	Temperatura Máxima do Encamisamento (°C)
S1, S3, S5 (Potência Máxima = 10^4 W)	$1,14 \times 10^4$	44,9	44,7
S2 (Potência Máxima = 10^4 W)	$2,02 \times 10^4$	45,1	45,0
S4 (Potência Máxima = 10^4 W)	$2,20 \times 10^4$	45,3	45,2
S1, S3, S5 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	$6,49 \times 10^4$	46,4	46,0
S2 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	$1,10 \times 10^5$	48,3	47,9
S4 (Potência Máxima = 5×10^4 W)	$2,30 \times 10^5$	51,7	51,1
S1, S3, S5 (Potência Máxima = 10^5 W)	$1,34 \times 10^5$	47,9	47,4
S2 (Potência Máxima = 10^5 W)	$2,70 \times 10^5$	52,7	52,2
S4 (Potência Máxima = 10^5 W)	$6,40 \times 10^5$	62,3	61,3
S1, S3, S5 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	$2,94 \times 10^5$	50,9	49,9
S2 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	$6,43 \times 10^5$	62,3	61,3
S4 (Potência Máxima = 2×10^5 W)	$1,85 \times 10^6$	87,0	84,6
S7, S9, S11, S13, S15, S17	$1,86 \times 10^3$	44,5	44,4
S8, S14	$2,02 \times 10^3$	44,6	44,4
S10, S16	$2,27 \times 10^3$	44,6	44,4
S6, S12, S18, S24 e S25	$2,96 \times 10^6$	1395	Acima da Temperatura de fusão

-- propriedades mecânicas do alumínio. Podemos concluir daí que nenhum destes acidentes comprometem esta barreira de segurança. Por outro lado, a atividade dos produtos de fissão formados nestes acidentes também se situou em valores muito baixos, o que nos leva a concluir que o escape destes materiais radioativos, devido à falha estatística do encamisamento, é desprezível, considerando-se que, por especificação de projeto, é esperada uma falha de encamisamento de menos de 0,1% dos elementos de combustível e ainda que a fração de produtos de fissão que conseguem escapar do combustível, difundindo-se através do UO_2 , é da ordem de 1%.

A conclusão final, decorrente de tudo o que foi dito acima é que o Sistema de Segurança do Reator executa, no seu funcionamento, integralmente a sua função. Cabe lembrar aqui que neste estudo, em nenhum momento nos preocupamos com as probabilidades de funcionamento ou falha do Sistema de Segurança do Reator ou de seus componentes. Fica, portanto, nesta conclusão, a ressalva de que a conclusão final sobre a segurança do RPZ só poderá ser dada quando for concluído o estudo de confiabilidade do Sistema de Segurança e determinadas as probabilidades de ocorrência das diversas seqüências de eventos.

5.4 – Recomendações

Podemos reunir as recomendações deste trabalho em dois grupos: as que são voltadas para o projeto do RPZ e sua análise de segurança e as relacionadas com o desenvolvimento do método calculacional para a análise de acidentes.

No primeiro grupo, identificamos três recomendações importantes:

A análise dos resultados nos mostra que os acidentes nos quais não ocorre o desligamento do reator durante um longo período de tempo (superiores a 10 minutos), provocam conseqüências muito sérias, inaceitáveis sob o ponto de vista de segurança. A fusão do encamisamento e a alta temperatura do combustível permitem a liberação de uma quantidade relativamente grande de radiação que terá como barreiras apenas o prédio do reator e a membrana de contenção. Além disso, a potência do reator entrará em oscilação de baixa frequência (3 picos por hora). Nesta oscilação, a potência cresce até um ponto em que o efeito de temperatura torna o reator subcrítico e, a potência passa a decrescer para depois do resfriamento tornar a crescer, e assim por diante. Na concepção atual do RPZ, não existe nenhum meio para interromper a oscilação da potência nesta categoria de acidentes a não ser através da injeção de venenos neutrônicos através do sistema de ventilação. Caso o estudo de confiabilidade do reator venha encontrar uma probabilidade não desprezível para este evento, o projeto do Sistema de Segurança do Reator deverá ser modificado, para incluir um dispositivo de proteção contra os acidentes dessa categoria.

A segunda recomendação, se refere a ação dos detetores de período do reator. Nos acidentes em que a reatividade é inserida à taxa mais baixa, $4,5 \times 10^{-3}$ β /seg, o período do reator não atinge, em nenhum caso, um valor abaixo de 5 segundos, limite para a qual é gerado o sinal de emergência. Resulta daí, que o detetor se revela inútil nestas circunstâncias. Sugerimos, para superar este problema, o aumento do limite de período para um valor superior a 10 seg., preferencialmente de 15 seg.

A terceira recomendação é um alerta para a validade dos resultados aqui obtidos. Estes resultados foram obtidos com os dados definidos até agora no projeto. Qualquer modificação introduzida no desenvolvimento do projeto que venha a alterar estes dados deverá ser acompanhada de um nova análise semelhante a esta.

Para escrevermos as recomendações relacionadas com o desenvolvimento do programa de computação empregado neste trabalho, iniciamos por lembrar que este programa foi escrito para resolver um problema específico, a análise de acidentes do Reator de Potência Zero do IEA. Desta forma, aspectos que não influenciaram esta análise, mas que para outros tipos de reatores podem ter uma influência importante, foram negligenciados. Seria interessante, como desenvolvimento do programa, a

Incorporação destes aspectos, para uma ampliação do campo de aplicação deste instrumento de cálculo. Tentaremos indicar alguns pontos nos quais o programa poderia ser ampliado, mas desde já tomamos a precaução de lembrar que só a necessidade de seu uso fornecerá a visão completa das modificações requeridas para sua aplicação.

As condições termodinâmicas do refrigerante, que têm um papel crucial na análise de acidentes dos reatores do tipo PWR, foram mantidas constantes na nossa análise, justificado pelo baixo coeficiente de película no processo de transferência de calor do RPZ.

Outro aspecto importantíssimo em reatores de potência é o calor de decaimento dos produtos de fissão que, para o RPZ, tem uma influência comparável a de uma lâmpada comum de iluminação.

A temperatura máxima atingida no caroço foi suficiente para que chegássemos as conclusões desta análise de acidente. Já para um caso no qual, a variação da temperatura do refrigerante desempenha um papel importante no decurso de um acidente, será necessário determinar-se a distribuição de temperaturas em todo reator.

Finalmente, como um método para se levantar outros pontos nos quais o programa poderia ser ampliado, sugerimos a reprodução da análise de acidentes já feita para algum outro reator (como, por exemplo, o reator PWR de Angra dos Reis), que forneceria também um padrão de comparação.

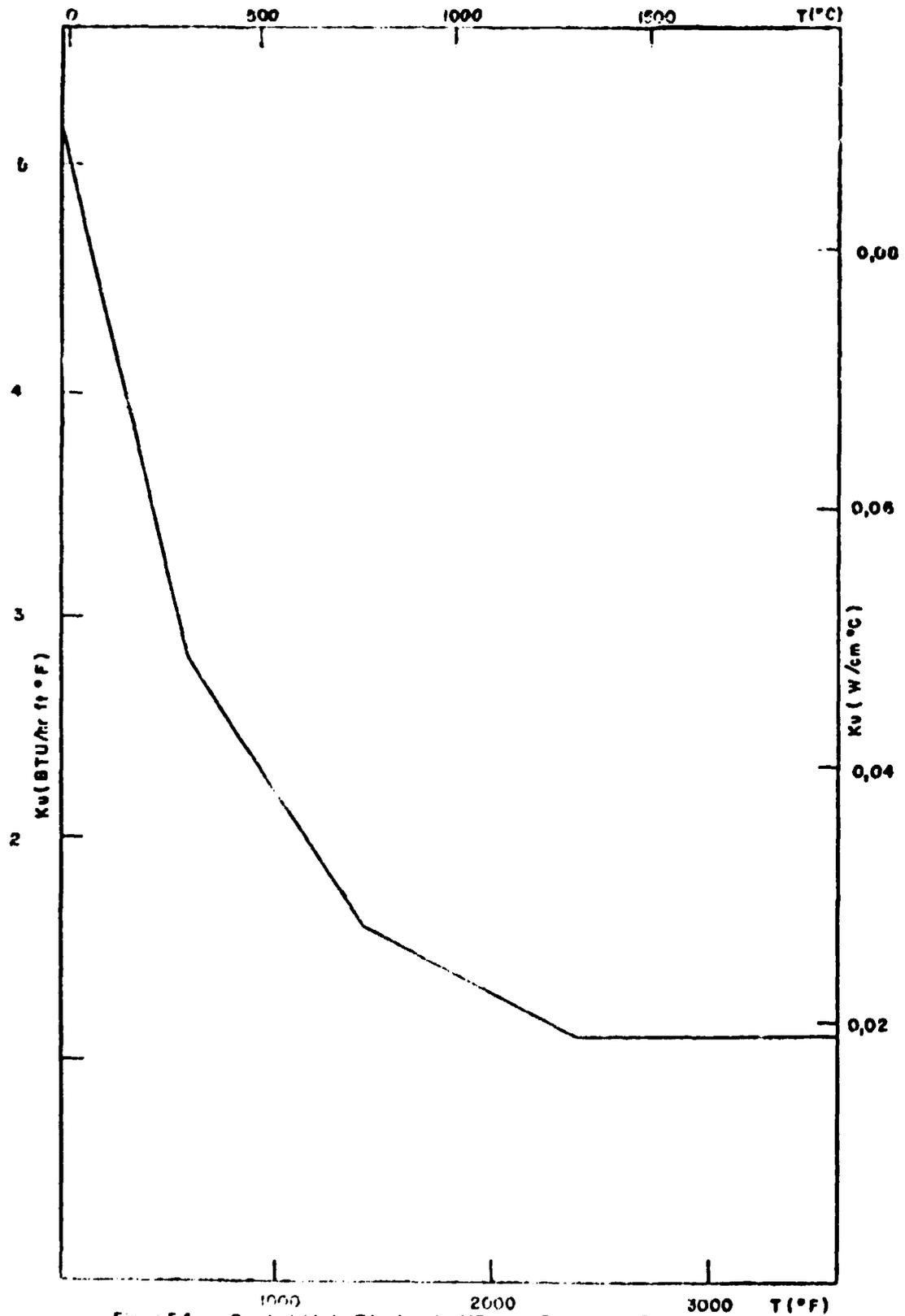


Figura 5.1 - Condutividade Térmica do UO₂ em Função da Temperatura

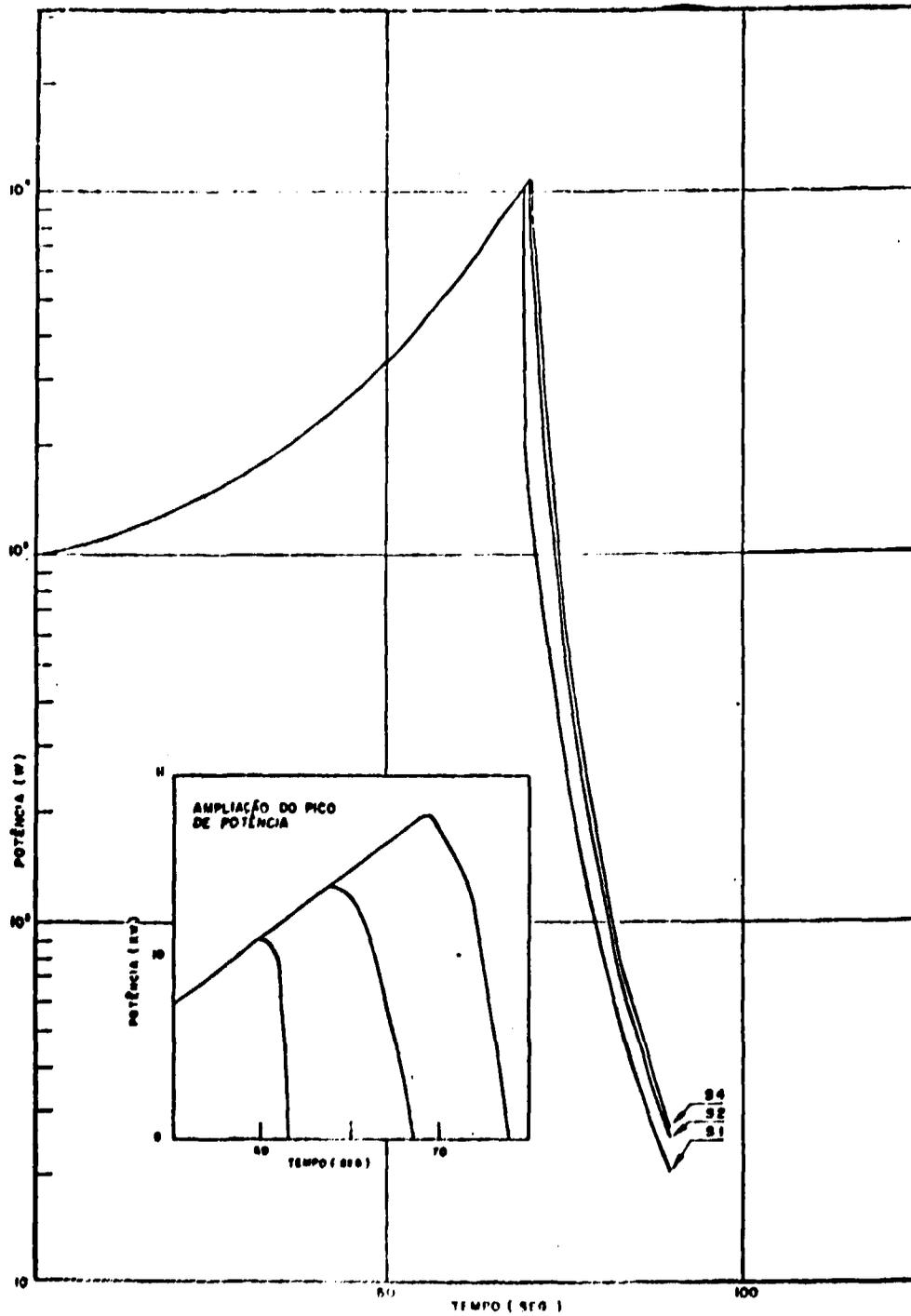


Figura 5.2 Potência do Reator em Função do Tempo para as Sequências de Eventos S1, S2 e S4, com Potência Limite = 10 KW e Adição de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-3} \text{ \$/seg.}$

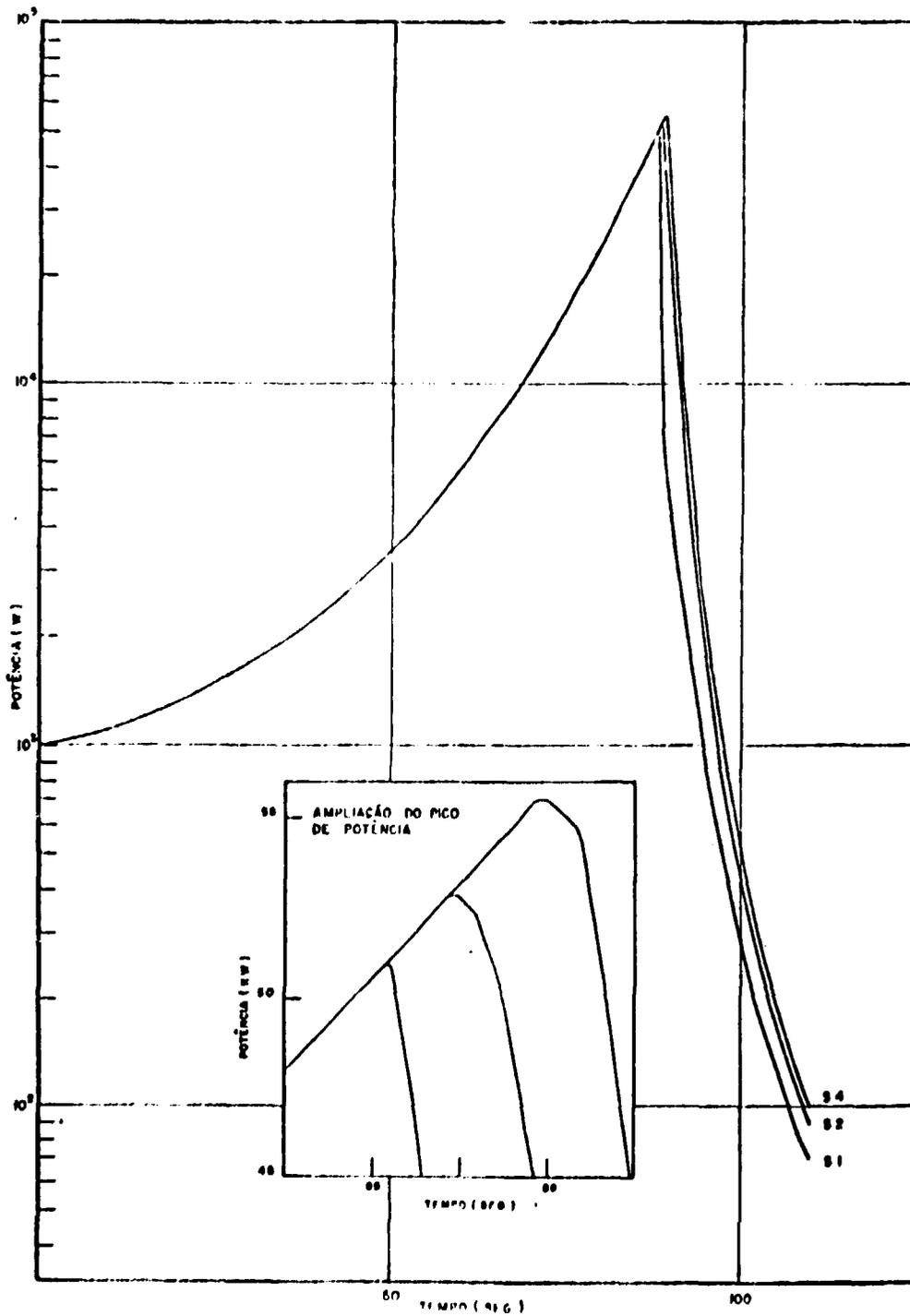


Figura 5.3 Potência do Reator em Função do Tempo para as Seqüências de Eventos S1, S2 e S4, com Potência Limite 50 KW e Adição de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-3}$ β /seg.

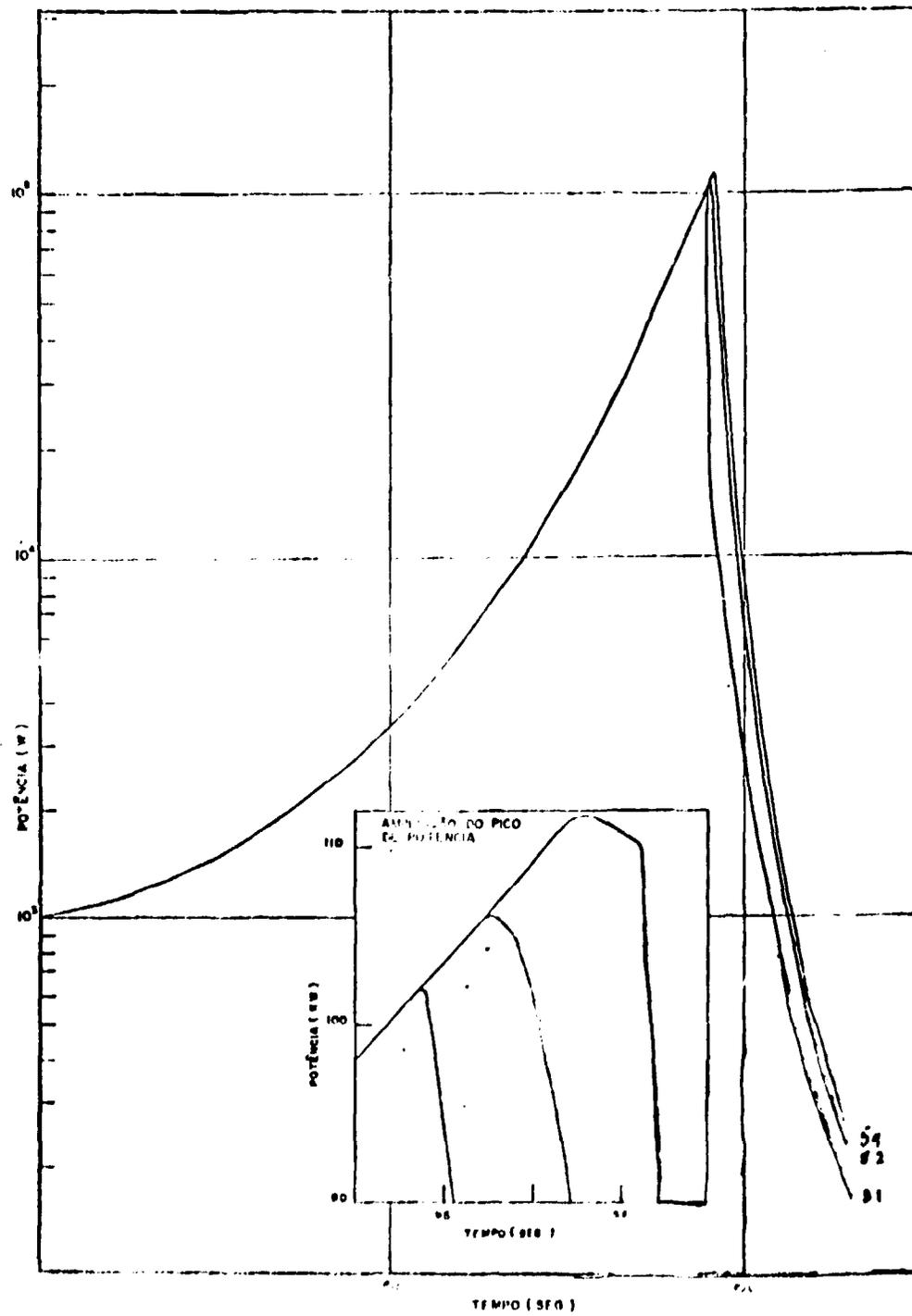


Figura 5.4 - Potência do Reator em Função do Tempo para as Sequências de Eventos S1, S2 e S4, com Potência Limite = 100 KW e Adição de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-3}$ β /seg.

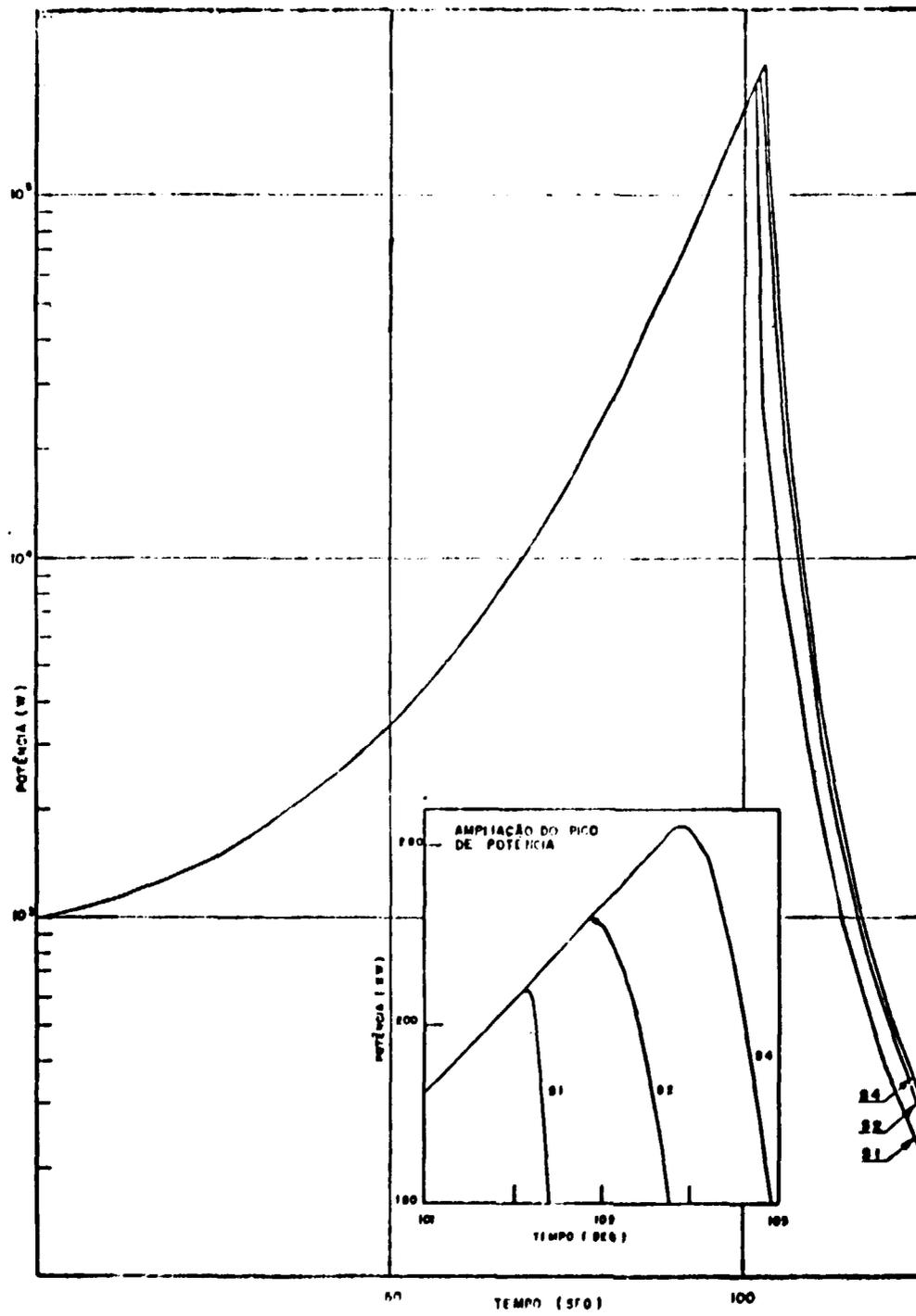


Figura 5.5 -- Potência do Reator em Função do Tempo para as Seqüências de Eventos S1, S2 e S4, com Potência Limite = 200 KW e Adição de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-3} \text{ } \$/\text{seg.}$

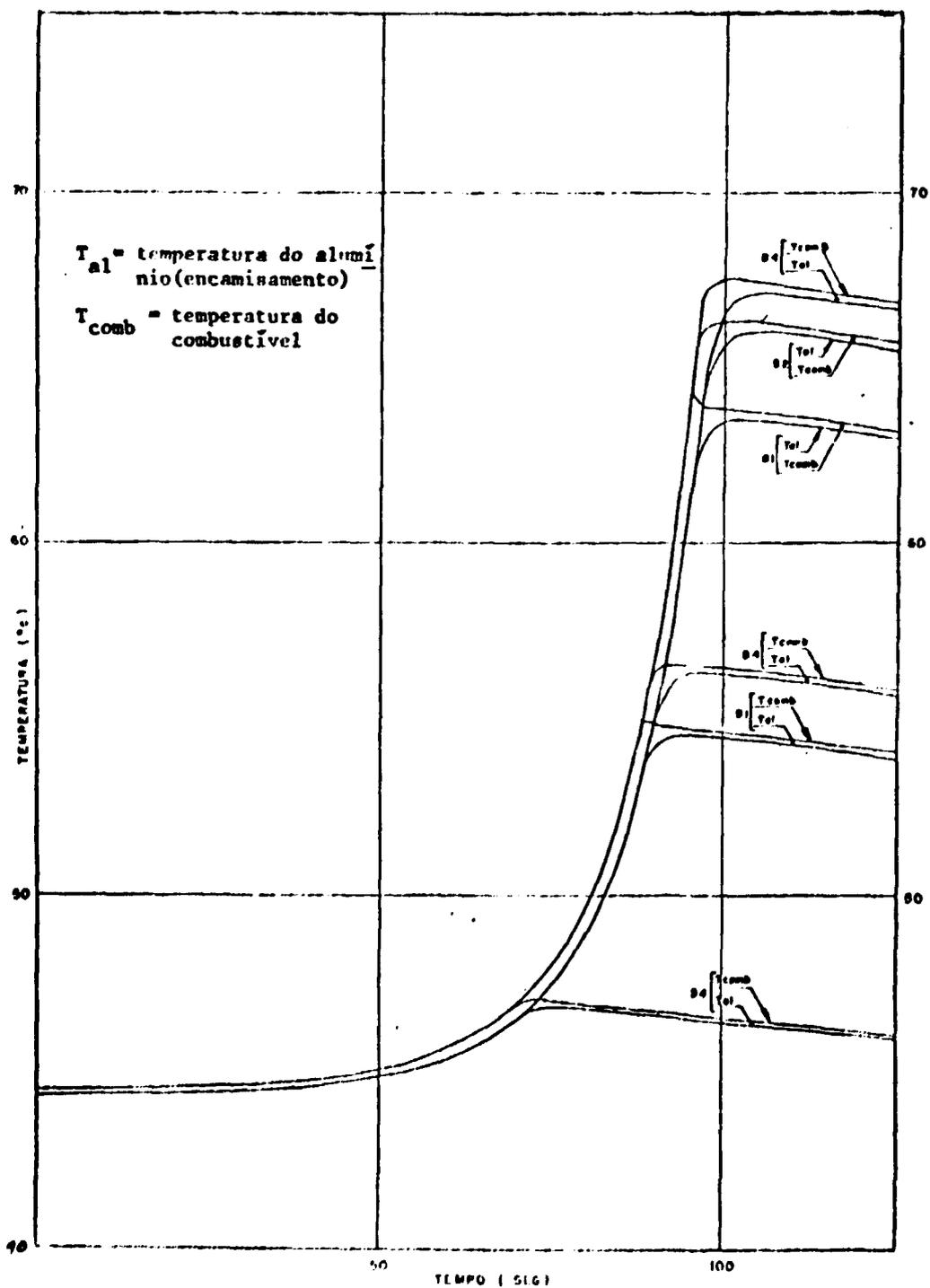


Figura 5.6 -- Temperaturas do Elemento de Combustível em Função do Tempo para Adição de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-2}$ $\$/seg$. As seis Curvas Superiores são para a Potência Limite = 200 KW. As quatro Intermediárias são para Potência Limite = 100 KW e as duas Inferiores para Potência Limite = 10 KW.

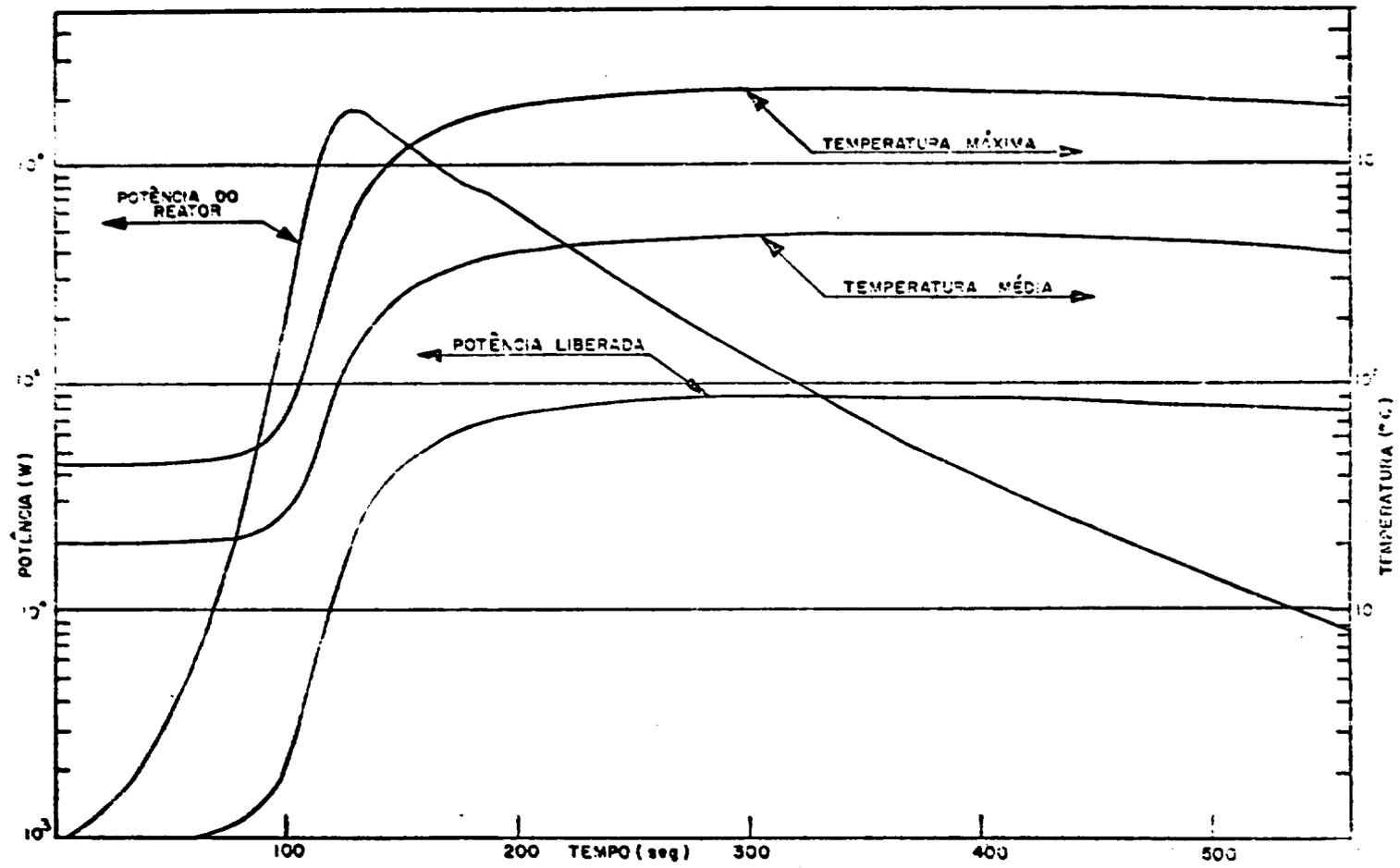


Figura 5.7 - Potência e Temperaturas do Reator para a Seqüência de Eventos S25, com Adição de 0,8\$ de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-3}$ \$/seg

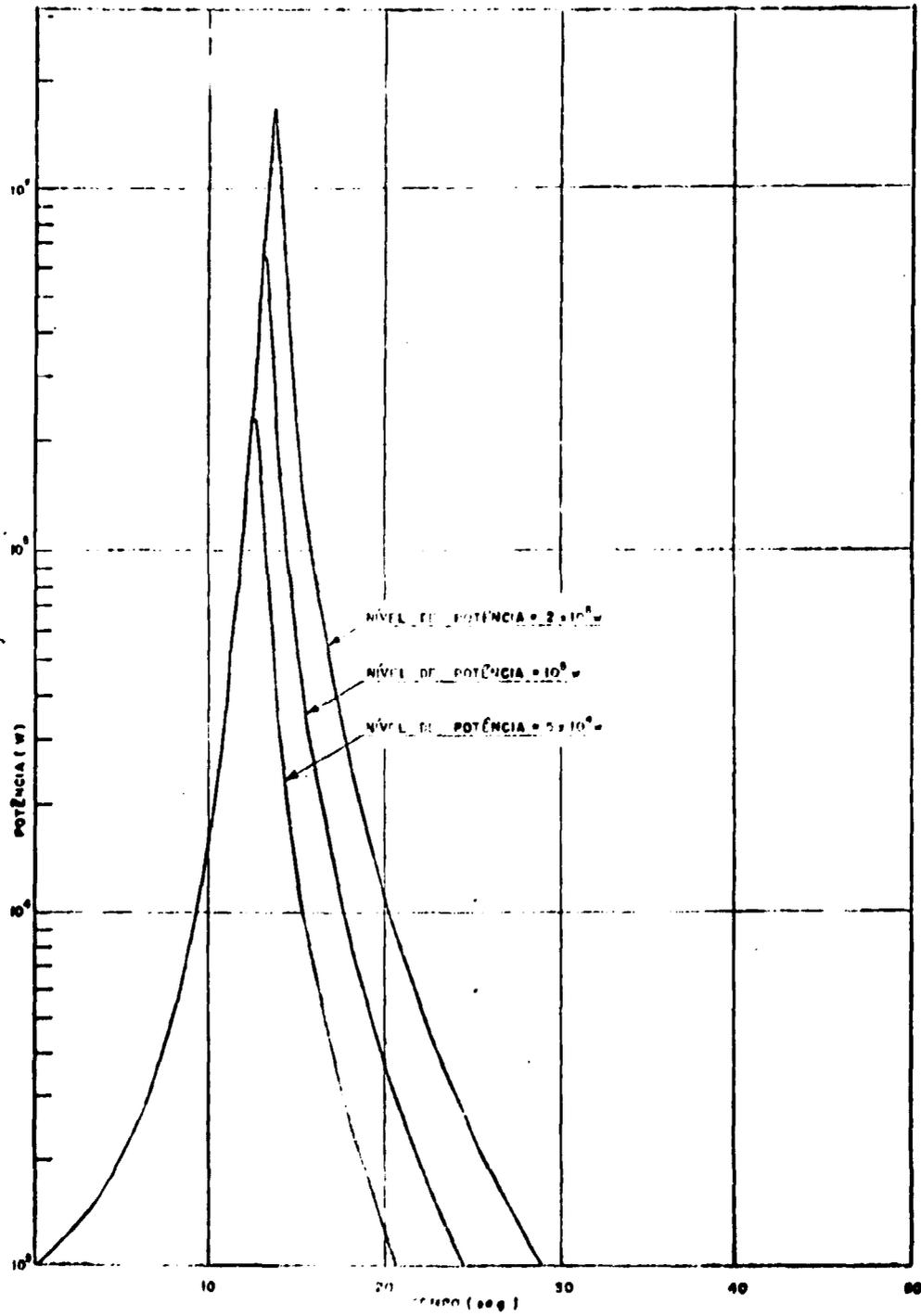


Figura 5.8 - Potência do Reator para a Sequência de Eventos S4 com Limite de Potência = 200 KW, 100 KW e 50 KW e Adição de Restividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-2}$ $\$/seg.$

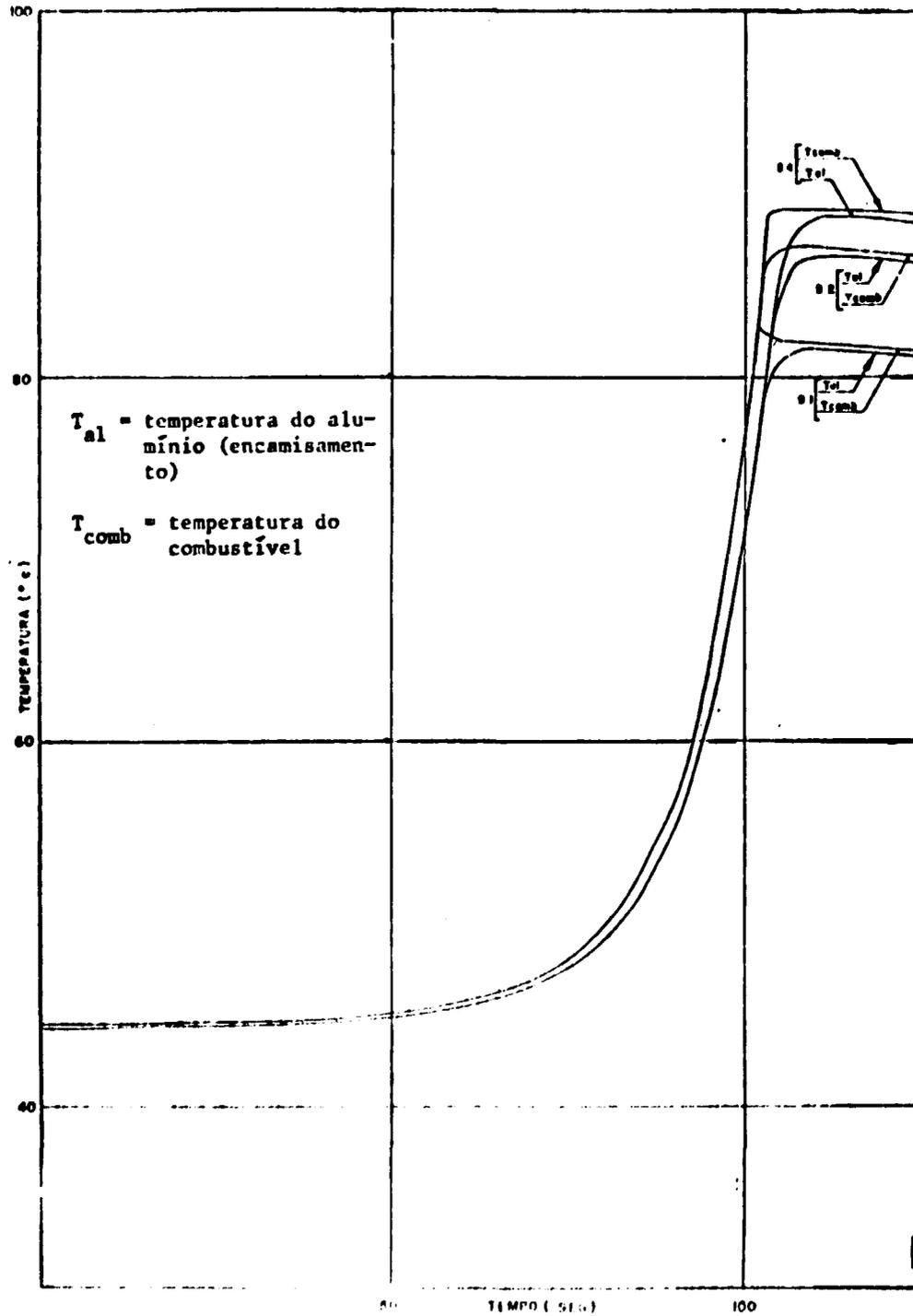


Figura 5.9 - Temperaturas do Elemento de Combustível em Função do Tempo para Adição de Reatividade à Taxa de $4,5 \times 10^{-2}$ $\$/seg$ e Potência Limite = 200 KW.

APÊNDICE A

O PROGRAMA ACDNTE

O programa ACDNTE encontra-se gravado em linguagem de máquina no disco ID0014 do Centro de Processamento de Dados do IEA. Para usá-lo nesta forma, os seguintes cartões de Controle são necessários:

- C1 - cartão JOB
C2 - continuação do cartão JOB

Os parâmetros deste cartão (tempo de CPU, tempo de sistema, número de linhas impressas) dependem acentuadamente do problema considerado. A título de ilustração damos abaixo estes parâmetros para um caso típico:

- tempo de simulação = 100 seg
- intervalo de tempo de iteração = 5×10^{-3} seg
- nº de divisões do elemento de combustível = 10
- intervalo de tempo para impressão de resultados = .5 seg
- tempo de CPU = 4 min
- nº de linhas = 2000
- tempo de sistema = 5 min

- C3 - // EXEC PGM = A,REGION = 100K
C4 - // STEPLIB DD DSN = EN.MRGRAN.ACDNT3(A),UNIT = (mesmo cartão) 3330,VOL = SER = ID0014,DISP = SHR
C5 - // GO.FT05F001 DD DDNAME = SYSIN
C6 - // GO.FT06F001 DD SYOUT = A
C7 - // GO.SYSIN DD *

Seguem-se os cartões de dados:

- D1 - (6F10.8) AL(I), I = 1,6

Neste cartão são colocadas as constantes de decaimento dos precursores de nêutrons atrasados (λ_i)

- D2 - (6F10.8) G(I), I = 1,6

Neste cartão são codificadas as eficiências dos grupos de nêutrons atrasados. No caso destes valores já estarem embutidos nos valores β_i , deve-se colocar 1. nas 6 posições.

- D3 - (6F10.8) BETA(I) I = 1,6

BETA(I) é a fração de nêutrons atrasados do grupo I

- D4 - (6E12.6)

FONTE = fonte de nêutrons (WATT)
GS = eficiência dos nêutrons de fonte
V = vida média de nêutrons prontos (SEG)
XNO = Potência inicial do reator (WATT)
ENRIQ = Enriquecimento do combustível

54

CQ = coeficiente que relaciona a potência do reator com a densidade de potência no elemento de combustível (cm^{-3})

$$q''' = \text{CQ. Potência}$$

D5 – (E12.6)

H = intervalo de tempo de iteração.(seg)

D6 – (8F10.6)

R = raio do elemento de combustível (cm)
EG = espessura da folga entre o combustível e o encamisamento (cm)
EC = espessura do encamisamento (cm)
CONG = condutividade térmica da folga ($\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$)
CONC = condutividade térmica do encamisamento ($\text{W}/\text{cm}^\circ\text{C}$)
ROCPC = calor específico x densidade do encamisamento ($\text{J}/\text{cm}^3^\circ\text{C}$)
ROCPCU = calor específico x densidade do combustível ($\text{J}/\text{cm}^3^\circ\text{C}$)
CONVEC = coeficiente de película ($\text{W}/\text{cm}^2^\circ\text{C}$)

D7 – (I2, F10.6, E12.6)

L = número de divisões do combustível
TAMB = Temperatura ambiente ($^\circ\text{C}$)
CPMU = Este coeficiente relaciona a temperatura média do combustível que será usada para cálculo do efeito Doppler, com a temperatura média do elemento de combustível mais quente:

$$T_{\text{Doppler}} = \text{CPMU} * (\text{TM} - \text{TAMB}) + \text{TAMB}$$

D8 – (3E12.6)

XNBSET = Nível de potência máximo do reator (WATT) (quando a potência do reator atinge este nível, é gerado o sinal de SCRAM)
PERSET = Nível de período mínimo do reator(SEG) (quando o período do reator atinge este nível, é gerado o sinal de SCRAM)
TEMSET = Nível de temperatura máximo do elemento de combustível considerado ($^\circ\text{C}$) (quando esta temperatura é atingida, é gerado o sinal de SCRAM)

D9 – (8E10.4) TRESP(I), I = 1,8 (SEG)

TRESP(1) = Tempo de atraso entre a geração do sinal de SCRAM e o início de frenagem da mesa móvel.
TRESP(2) = Tempo de frenagem da mesa móvel
TRESP(3) = Tempo de atraso entre o instante em que a mesa móvel para e o início da retração desta.
TRESP(4) = Tempo de duração da aceleração da mesa móvel
TRESP(5) = Tempo de atraso entre a geração do sinal de SCRAM e o início de inserção das barras de segurança
TRESP(6) = Tempo de inserção das barras de segurança
TRESP(7) = Tempo contado a partir do instante zero para início de movimento das barras de controle
TRESP(8) = Tempo de movimento das barras de controle

D10 - (6E12.6)

ACEL1 = aceleração de frenagem da mesa móvel (cm/seg²)
 ACEL2 = aceleração de retração da mesa móvel (cm/seg²)
 XO = posição inicial da mesa móvel (cm)
 VMESA = velocidade de aproximação da mesa móvel (cm/seg)
 COMP = comprimento da barra de segurança (cm)
 ROBT = valor (reatividade) da barra de segurança totalmente inserida.

D11 - (E12.6)

ROBCT = valor (reatividade) da barra de controle totalmente inserida.

D12 - (6E12.6) CRO(I), I = 1,6 (cm⁻⁽ⁱ⁻¹⁾)

coeficientes da curva $\rho(x)$, x = posição da mesa móvel. A curva é representada por um polinômio de 5a. ordem. Os coeficientes estão alinhados no sentido de menor para maior ordem do polinômio.

D13 - (6E12.6) CBA(I), I = 1,6 (seg⁻⁽ⁱ⁻¹⁾)

coeficientes da curva $y(t)$ = posição da barra de segurança em função do tempo. Os mesmos comentários do cartão anterior se aplicam a este.

D14 - (6E12.6) CBC(I), I = 1,6 (seg⁻⁽ⁱ⁻¹⁾)

O mesmo que o cartão anterior, com relação a barra de controle.

D15 - (6E12.6) CTE(I), I = 1,6 ((°C)⁻⁽ⁱ⁻¹⁾)

coeficientes da curva $\rho(T)$ = reatividade em função da temperatura.

D16 - (8I10) NA(I), I = 1,8

D17 - (8I10) NB(I), I = 1,8

Os NA(I) são os números de iterações desejadas. A divisão em 8 valores possibilita a mudança de escala de impressão dos resultados pelos números NB(I). Assim, por exemplo,

NA(1) = 1000
 NB(1) = 10

significa que o programa fará 1000 iterações, imprimindo os resultados de 10 em 10 iterações.

Os três primeiros valores de NA(I) e NB(I) são reservados para iterações antes de ser gerado o sinal de SCRAM. Assim que for gerado o sinal de SCRAM, o número de iterações e a escala de impressão será governada pelos 5 últimos NA(I) e NB(I).

Os NA(I) e NB(I) são sequenciais dentro dos grupos (antes do SCRAM e depois do SCRAM), isto é, completadas as NA(1) iterações, o programa passará a executar as NA(2) iterações. Se ao completar as NA(3) iterações não for gerado o sinal de SCRAM, a execução do programa é terminada.

APÊNDICE B

TESTES DO PROGRAMA ACDNTE

O Programa ACDNTE é composto basicamente quatro blocos de cálculo, a saber, a solução das equações de cinética do reator, a solução da equação de transferência de calor em regime transitório, a simulação da função reatividade do reator e a simulação do controle automático.

Os primeiros testes realizados com o programa ACDNTE concentraram-se exclusivamente na solução das equações de cinética do reator. Calculamos o comportamento do fluxo neutrônico do reator para diversos casos de inserção de reatividade e comparamos os resultados com as soluções correspondentes obtidas por Keepin, Ref.⁽¹¹⁾. Os resultados deste autor foram apresentados na forma de gráficos, e as soluções do programa ACDNTE ajustaram-se perfeitamente a estas curvas.

Concluímos que os erros de nossa solução são menores que a precisão dos gráficos apresentados na obra citada. Estes gráficos podem ser encontrados nas Figuras 9.1, pág. 290, 9.2, pág. 292 e 9.4, pág. 294 desta referência.

A segunda série de testes realizada recaiu sobre a solução da equação de transferência de calor. O procedimento adotado para este teste foi o de calcular o aquecimento de um elemento de combustível com uma densidade de potência constante no tempo e comparar a distribuição de temperatura após um tempo longo com a distribuição estática de temperaturas. Este procedimento, embora não fornecendo uma medida exata dos erros de nosso modelo, foi adotado porque dentre os testes que poderíamos realizar foi o que apresentou uma visualização mais direta e fácil. Os valores dos erros encontrados dependem evidentemente do número de subdivisões do combustível usado na solução numérica. Para 20 subdivisões o valor do erro obtido foi ligeiramente superior a 1%.

Finalmente, o último teste envolveu o programa completo e foi feito calculando-se um caso da análise de acidentes do reator PWR de Angra dos Reis. O caso considerado foi o da Retirada Incontrolada de um Conjunto de Barras de Controle em Plena Potência, introduzindo-se reatividade a uma taxa de $8,2 \Delta K/seg$. A descrição deste acidente e seus resultados podem ser encontrados na Ref.⁽¹⁸⁾, seção 14.2.1. Os dados de entrada usados no programa estão mostrados na Tabela B1, e o resultado na Figura B.1.

A discrepância encontrada na região de baixa potência, após o desligamento do reator foi por nós interpretada como sendo devida ao calor de decaimento que não é considerado no programa ACDNTE.

Este calor, que é da ordem de 3 a 4% da potência do reator antes do desligamento, desempenha um papel importantíssimo na análise de acidentes de reatores de potência, que trabalham a potência térmica da ordem de milhares de Megawatts. Já para o RPZ o papel do calor de decaimento pode ser negligenciado, uma vez que a potência inicial do reator é muito baixa.

Tabela B1

Dados de Entrada para o Teste do Programa ACDNTE,
para o Acidente de Retirada Incontrolada de uma
Barra de Controle, com uma Taxa de Inserção de
Reatividade de $8,2 \times 10^{-4} \Delta K/\text{seg}$ a Plena Potência

Constante de decaimento dos precursores de nêutrons atrasados, λ_i , (seg ⁻¹)		
i =	1	0,0124
	2	0,0305
	3	0,111
	4	0,301
	5	1,14
	6	3,01
Eficiência dos nêutrons atrasados, γ_i ,		
i =	1,6	1,0
Fração de Nêutrons atrasados β_i ,		
i =	1	0,0002475
	2	0,0016425
	3	0,0014700
	4	0,0029625
	5	0,0008625
	6	0,0003150
Fontes de nêutrons, S (Watt)		0,0
Eficiência dos nêutrons de fonte, γ_s		1,0
Vida Média de nêutrons prontos, ℓ_p (seg.)		$1,7 \times 10^{-5}$
Potência inicial do reator (%)		100
Enriquecimento (%)		2,5
Coeficiente de relação entre a potência do reator e a densidade de potência no elemento de combustível mais quente (cm ⁻³)		4,9614
Intervalo de tempo de iteração numérica (seg)		$5,0 \times 10^{-3}$
Raio do Combustível (cm)		0,4625
Espessura da folga entre o combustível e o encamisamento (cm)		0,0093
Espessura do encamisamento (cm)		0,0617
Condutividade térmica do material de enchimento da folga entre o combustível e o encamisamento (W/cm ^{°C})		0,00277
Condutividade térmica do encamisamento (W/cm ^{°C})		0,1731

continua

continuação

Produto calor específico x densidade do encamisamento ($J/cm^3^{\circ}C$)	2,23
Produto calor específico x densidade do combustível ($J/cm^3^{\circ}C$)	2,51
Coefficiente de película do ambiente ($W/cm^2^{\circ}C$)	4,165
Número de subdivisão do combustível (para a solução numérica da equação de transferência de calor)	20
Temperatura Ambiente ($^{\circ}C$)	307,7
Fator de pico para média da temperatura do reator	0,5
Nível máximo de potência do reator	118%
Nível mínimo de período do reator (seg)	10^{-50}
Nível máximo de temperatura do reator ($^{\circ}C$)	10^{50}
Tempo de atraso até iniciar-se a frenagem da mesa (seg)	0,5
Tempo de frenagem da mesa (seg)	0,0
Tempo de atraso até iniciar-se a aceleração da mesa (seg)	0,0
Tempo de aceleração da mesa (seg)	10^{-2}
Tempo de atraso até iniciar-se a inserção das barras de segurança (seg)	0,5
Tempo de voo das barras de segurança (seg)	2,0
Tempo para o início do movimento das barras de segurança (seg)	0,0
Tempo de movimento das barras de controle (seg)	0,0
Aceleração de frenagens da mesa (cm/seg^2)	0,0
Aceleração de retração da mesa (cm/seg^2)	0,0
Posição da mesa para criticalidade (cm)	20,0
Velocidade de aproximação da mesa (cm/seg)	-1,0
Comprimento da barra de segurança (cm)	383,0
Valor da barra de segurança (\$)	-4,61
Valor da barra de controle (\$)	0,0
Coefficiente do polinômio que representa a reatividade em função da abertura das mesas (x em cm)	x^0
	$1,64 \times 10^{-2}$

continua

continuação

	x^1	$-8,2 \times 10^{-4}$
	x^2	
Coeficientes do polinômio que representa a posição da barra de segurança em função do tempo (t em segundos)		
	t^0	0,0
	t^1	0,0
	t^2	0,25
Coeficientes do polinômio que representa a posição da barra de controle em função do tempo (t em segundos)		
		Todos nulos
Coeficientes do polinômio que representa a reatividade função da temperatura do reator (T em °C)		
	T^0	$2,885 \times 10^{-2}$
	T^1	$-3,0 \times 10^{-5}$
	T^2	0,0
Número de iterações e intervalo de iterações entre as impressões de resultados		
		1000 e 20
		1000 e 20
		2000 e 20
		2000 e 20
		2000 e 20

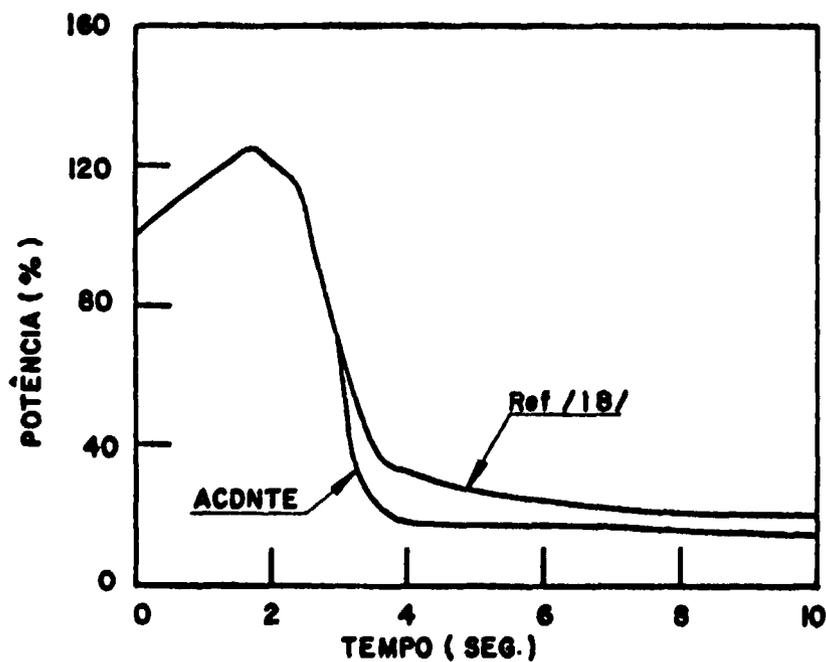


Figura B1 - Potência do Reator para a Retirada Incontrolada de um Conjunto de Barras de Controle em Plena Potência, Introduzindo Reatividade à Taxa de $8,2 \times 10^{-4} \Delta K/\text{seg.}$

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AKAZU, Z. et alii. *Mathematical methods in nuclear reactor dynamics*. New York, Academic Press, 1971.
2. BOGENSBERGER, H. G. et alii. *Analysis of SEFOR experimental*. Karlsruhe, Kernforschungszentrum, 1975. (KFK-2095).
3. CURSO preparatório de Energia Nuclear [Elaborado para Furnas Centrais Elétricas por NUS Corporation, Rockville, Maryland, 1976].
4. EL-WAKIL, M. M. *Nuclear heat transport*. London, International Textbook, 1971.
5. FERREIRA, A. C. A. *Projeto do caroço do reator de potência zero do Instituto de Energia Atômica*. São Paulo, 1974. [Dissertação de mestrado].
6. GUTIERREZ RODRIGUES, V. *Viabilidade neutrônica de um conjunto crítico térmico-rápido destinado ao estudo de envoltórios de reatores rápidos*. São Paulo, 1976. [Dissertação de mestrado].
7. HEHL, M. E. *Sistema de programação FORTRAN-IV G-H*. São Paulo, McGraw-Hill, 1972.
8. HILDEBRAND, F. B. *Advanced calculus for applications*. Englewood Cliffs, N. J., Prentice-Hall, 1962.
9. JAKOB, M. *Heat transfer*. New York, Wiley, 1963.
10. KATO, W. Y. et alii. *Final safety analysis report on the use of plutonium in ZPR-6 and ZPR-9*. Argonne, Ill., Argonne National Laboratory, Feb. 1970. (ANL-7442).
11. KEEPIN, G. R. *Physics of nuclear kinetics*. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1965.
12. KREITH, F. *Princípios da transmissão de calor*. São Paulo, E. Blücher, 1969.
13. LAMARSH, J. R. *Nuclear reactor theory*. Reading, Mass., Addison-Wesley, 1966.
14. PELUSO, M. A. V. et alii. *Sistema de instrumentação e controle do reator de potência zero do IEA*. São Paulo, Instituto de Energia Atômica, set. 1974. (IEA-Inf-32).
15. PELUSO, M. A. V. [Comunicação pessoal].
16. PIERONI, R. R. et alii. *Relatório do projeto do reator de potência zero do IEA*. [A ser publicado].
17. POUND, D. C. et alii. *Hazards report for modified HTGR critical facility*. San Diego, Calif., General Atomic, John Jay Hopkins Laboratory, Nov. 1965. (GA-6452, rev.).
18. PRELIMINAR facility description and safety analysis report: Usina Nuclear de Angra, Unidade nº 1. Rio de Janeiro, Furnas Centrais Elétricas S. A., s.d.
19. [RASMUSSEN, N. C.]. *Reactor safety study: an assessment of accident risks in U. S. commercial nuclear power plants*. Washington, D. C., U. S. Nuclear Regulatory Commission, Oct. 1975. (WASH-1400).
20. REIS FILHO, P. E. G. *O efeito da abertura transversal na reatividade de unidades críticas*. São Paulo, 1975. [Dissertação de mestrado].

21. SANTINA, M. D. [Comunicação pessoal].
22. STACEY JR, W. M. *Space-time nuclear reactor kinetics*. New York, Academic Press, 1969.
23. WEAST, R. C. *Handbook of chemistry and physics*. 53. ed. Cleveland, Ohio, The Chemical Rubber Co., 1973.



INSTITUTO DE ENERGIA ATÔMICA
Caixa Postal, 11049 – Pinheiros
CEP 05508
01000 – São Paulo – SP

Telefone: 211-6011
Endereço Telegráfico – IEATOMICA
Telex – 011-23592 IENA BR