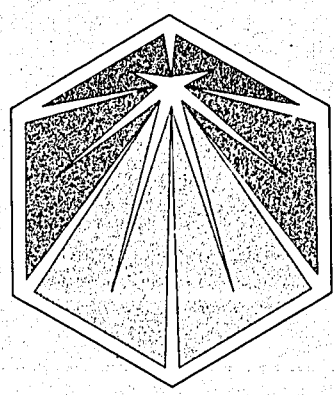
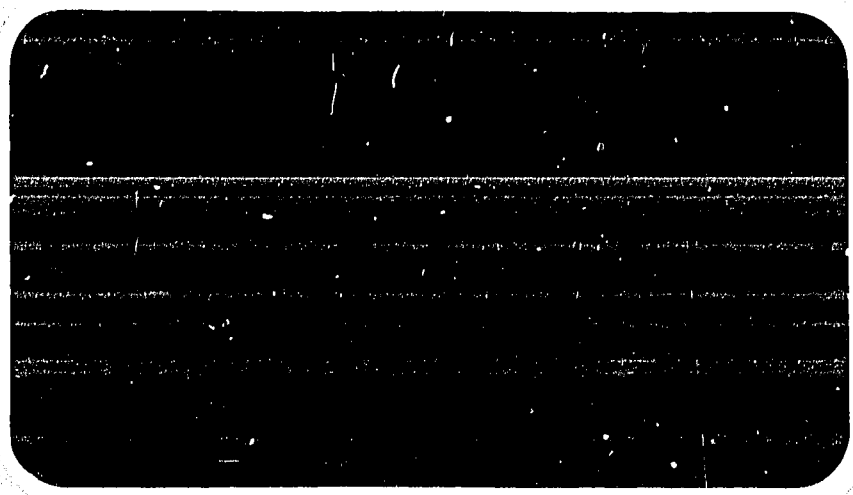


BR8714491

Ministério da Aeronáutica
Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento
Centro Técnico Aeroespacial



-016/86

OTIMIZAÇÃO DO REATOR REGENERADOR BINÁRIO
VI - UM PROJETO ACEITÁVEL DE REATOR
REGENERADOR BINÁRIO

Artur F. Dias
Yuji Ishiguro

RELATÓRIO DE PESQUISA ^{LCTA} IEAv-016/86 (Maio-86)

RESUMO

Foi desenvolvido um reator regenerador binário que atinge, razoavelmente bem, as características desejadas. São relatados o projeto e suas características.

Os modelos anteriores mostraram várias complicações provenientes da introdução do combustível $^{233}\text{U}/\text{Th}$ no núcleo de um LMFBR, quando comparados àqueles que utilizam somente combustível plutônio/urânio.

Neste novo modelo, o núcleo é maior para atingir-se maiores razões de regeneração e intervalos de recarregamentos mais longos. O número de feixes de combustíveis é aumentado para acomodar um maior número de feixes de controle, requerido para compensar as perdas de reatividades e controlar as oscilações das densidades de potência. Conseqüentemente, os inventários dos combustíveis são maiores. Altas queimas de combustíveis são atingidas sem muitas complicações no esquema de recarregamento, e as densidades de potência podem ser mantidas razoavelmente constantes durante um ciclo operacional. Baixas reatividades de vazios no sódio reduzem o potencial de acidentes graves e pode ser realizada uma utilização razoavelmente eficiente do tório.

ABSTRACT

A binary breeder reactor that achieves desired characteristics reasonably well has been developed. Its design and characteristics are reported.

Previous models showed several complications that result from introduction of $^{233}\text{U}/\text{Th}$ fuel in the core of a LMFBR, compared to purely Pu/U fueled ones. In this new model, the core is made larger to achieve higher breeding ratios and longer refueling intervals, the number of fuel assemblies is increased to accommodate a larger number of control rod assemblies required to compensate for reactivity losses and to control oscillations of the power densities, and, consequently, the fuel inventories are higher. High fuel burnups are achieved without too much complications in the refueling schedule and the power densities can be maintained reasonably constant over an operational cycle. Low sodium void reactivity reduce the potential for severe accidents and a reasonably efficient utilization of thorium can be realized.

1. INTRODUÇÃO

Os modelos anteriores do reator regenerador binário mostraram várias complicações provenientes da introdução de combustíveis $^{233}\text{U}/\text{Th}$ no núcleo de um LMFBR, comparado aos LMFBRs equivalentes carregados com plutônio/urânio /1,2,3,4,5,6,7,8/. As características neutrônicas dos combustíveis $^{233}\text{U}/\text{Th}$ são mais pobres do que as dos combustíveis plutônio/urânio; o β do ^{233}U é menor do que os β s dos ^{239}Pu e ^{241}Pu nas energias altas; a seção de choque de fissão do ^{233}U é maior do que a do ^{239}Pu e as fissões rápidas do Th são muito menores do que as do ^{238}U . Conseqüentemente, as razões de conversão e de regeneração nas zonas carregadas com $^{233}\text{U}/\text{Th}$ são menores do que nas zonas equivalentes carregadas com plutônio/urânio. A taxa de perda de reatividade devido a queima do combustível é maior, e o intervalo entre recarregamentos, para um dado número de barras de controle, precisa ser mais curto. O acúmulo de ^{233}Pa , de meia-vida de 27 dias, também resulta numa grande perda de reatividade durante os primeiros meses de operação. A maior taxa de fissão do ^{233}U , juntamente com o acúmulo de Pa, resultam num abaixamento das densidades de potência nas zonas carregadas com U/Th, relativamente às zonas zonas carregadas com plutônio/urânio.

Soluções para estes problemas foram investigadas /8/ num núcleo maior com o objetivo de melhorar a razão de conversão e com um maior número de feixes no núcleo, para acomodar um número maior de feixes de barras de controle, requeridos para compensar a grande perda de reatividade e controlar as oscilações das densidades de potência. Consideramos o conseqüente aumento dos inventários físséis como um compromisso necessário.

Intervalos suficientemente longos entre carregamentos são possíveis no modelo aqui considerado, para atingir-se o limite de queima atual que é de 80 - 100 MWD/kg (isótopos pesados), num esquema de recarregamento sem maiores complicações, com um excesso inicial de reatividades compatível com a capacidade do sistema de controle. Como nos modelos anteriores, as reatividades de vazios no sódio são muito menores do que nos LMFBRs carregados com plutônio/urânio, e as razões de regeneração são razoavelmente altas. Os envoltórios podem ser carregados com urânio ou tório permitindo uma flexibilidade no gerenciamento do combustível de tal forma que a regeneração pode ser selecionada tanto no ciclo do tório como no do urânio.

Os tempos de residência para o limite de queima relatados acima, são de 800 - 1000 dias de plena potência (DPP) para os feixes de $^{233}\text{U}/\text{Th}$, e de 1100 - 1400 DPP para os feixes de urânio/plutônio. Estes tempos são mais longos do que em muitos dos projetos atuais de LMFBRs e são devidos a grande dimensão do núcleo e as altas densidades dos combustíveis metálicos. O modo de recarregamento terá de ser algo diferente dos padrões atuais, isto é, recarregamentos a dois lotes. No nosso reator o número de lotes terá de ser diferente nas zonas interna e externa, para obtermos queimas similares nas duas zonas. Um esquema possível consiste de recarregamentos a dois e três lotes nas zonas interna e externa, respectivamente, com 400

dias de operação por ciclo. O reator considerado aqui é para ser usado na etapa final do esquema de desenvolvimento do RRR que propusemos para o Brasil /3/, quando a utilização extensiva dos grandes RRRs se tornar necessária, para garantir o suprimento de energia elétrica suficiente para a industrialização e melhoramento geral do padrão de vida. A época da introdução da primeira unidade deste reator deveria ser pelo menos daqui a uns 30 - 40 anos, e como esperamos muitos avanços nas tecnologias de reator e do ciclo de combustível, durante este tempo, nosso projeto atual poderá estar obsoleto. O projeto e as características do reator discutidos neste relatório mostram o que pode ser feito com as tecnologias do momento no melhoramento das características de segurança dos LMFBRs e na utilização do tório.

Embora algumas complicações e imperfeições ainda permaneçam, consideramos este reator como razoável e aceitável. Se os avanços tecnológicos tornarem este projeto obsoleto, os futuros reatores deverão ser mais seguros e mais eficientes na utilização dos recursos naturais.

Na próxima seção é especificado o reator e na seção 3 são discutidos brevemente os métodos de análise. A seção 4 sumaria as características do reator.

2. CONFIGURAÇÃO E CONTROLE DO REATOR

A configuração física do reator é mostrada na Figura 1 e as especificações na Tabela 1. A zona interna do núcleo contém 198 feixes de combustível de $^{233}\text{U/Th}$ e 19 feixes de controle. A zona externa do núcleo contém 222 feixes de combustível de plutônio/urânio e 12 feixes de controle adicionais, localizados entre as duas zonas do núcleo. O envoltório radial consiste de 270 feixes hexagonais carregados com o combustível fértil tório. Os feixes dos envoltórios axiais mantêm a mesma estrutura e material fértil dos respectivos núcleos. Os feixes do envoltório radial são de um projeto independente, com uma fração de volume do combustível relativamente maior do que a dos feixes do núcleo.

Os 12 feixes de controle externos são usados para propósitos de segurança e de limites de desligamento do reator. A compensação da queima e controle do reator são feitos pelos 19 feixes de controle da zona interna. Tanto os feixes de controle interno como os externos poderão ser usados, eventualmente, para controle e segurança do reator. A compensação da queima e o controle do reator são feitos mantendo a distribuição da densidade de potência plana, sem oscilações durante a queima.

3. MÉTODOS DE CÁLCULOS

Os cálculos foram realizados usando os códigos EXPANDA-CITATION. Foi utilizada a geometria cilíndrica unidimensional (EXPANDA) na geração das seções de choque para a subsequente utilização nas geometrias cilíndrica e triangular bidimensionais (CITATION).

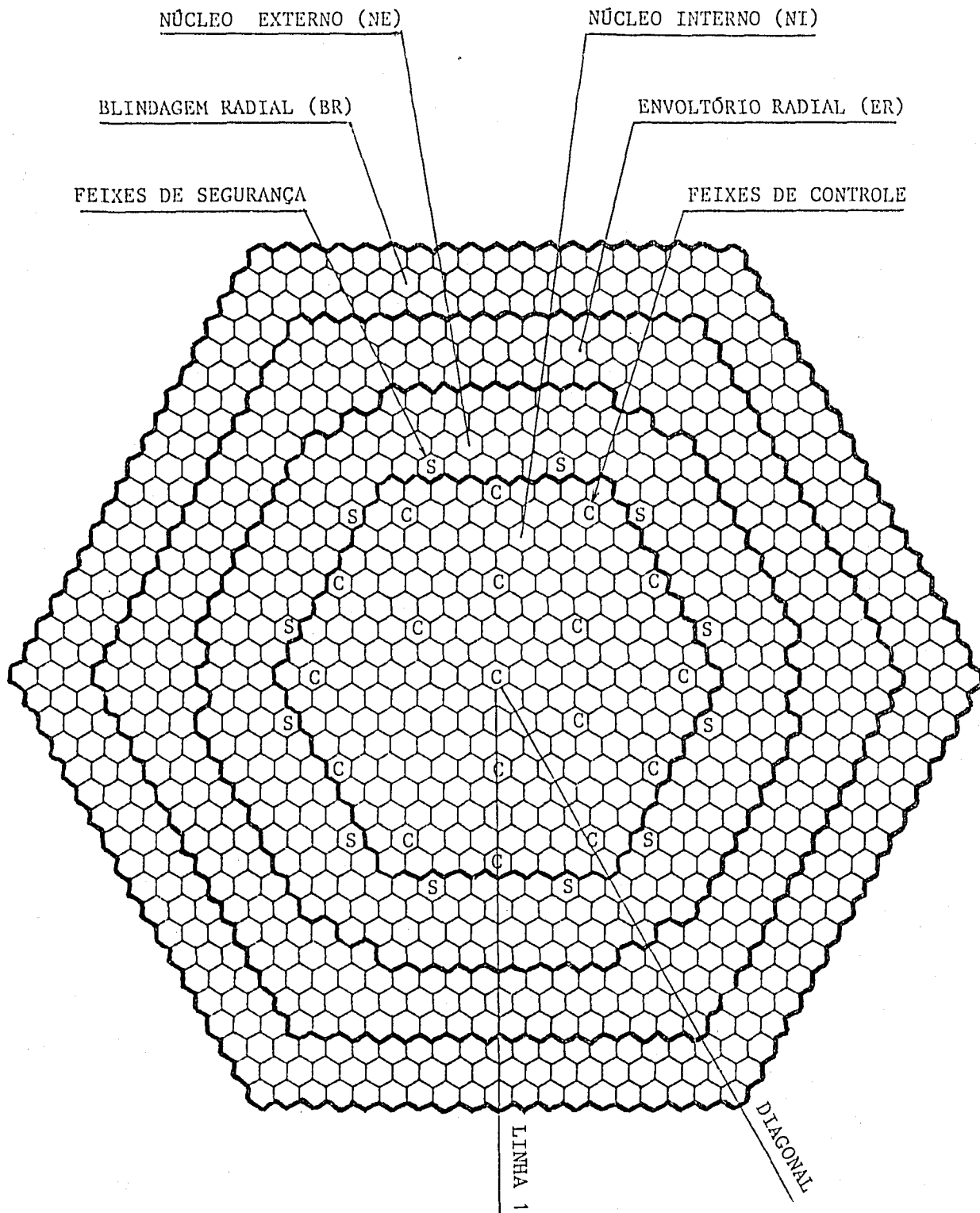


Figura 1: Disposição física dos feixes no reator.

Tabela 1: Características de projeto

| | |
|--|---|
| Potência | 2740 Mw |
| Altura do núcleo | 90 cm |
| Espessura do envoltório axial | 40 cm |
| Câmara de gás | 90 cm |
| <u>Número de feixes</u> | |
| Núcleo Interno (comb.) | 198 |
| Núcleo Externo (comb.) | 222 |
| Feixes de controle | 31 |
| Envoltório radial (3 anéis) | 270 |
| <u>Material combustível</u> | |
| Núcleo Interno | $^{233}\text{U}/^{232}\text{Th}$ (metálico) |
| Núcleo Externo | 80 v/o Pu/U - 20 v/o Zr |
| Composição isotópica (%) de $^{239}\text{Pu}/^{240}\text{Pu}/^{241}\text{Pu}/^{242}\text{Pu}$ | 61/26/10/3 |
| <u>Frações de volume (%)</u> | |
| <u>Núcleo</u> | |
| Combustível | 41 |
| Estrutura | 21 |
| Sódio | 38 |
| <u>Envoltório radial</u> | |
| Combustível | 52,8 |
| Estrutura | 17,7 |
| Sódio | 29,9 |
| <u>Blindagem</u> | |
| Estrutura | 70,5 |
| Sódio | 29,5 |
| <u>Feixes de controle</u> | |
| Estrutura | 16,26 |
| Sódio | 47,04 |
| B_4C | 36,70 |

Tabela 1: (Continuação)

| | |
|--|-----------|
| <u>Razão entre as massas específicas efetiva e teórica</u> | |
| Núcleo interno | 0,80 |
| Núcleo externo | 0,75 |
| Envoltório axial interno | 0,90 |
| Envoltório axial externo | 0,80 |
| Envoltório radial | 0,90 |
| <u>Feixe de combustível-núcleo</u> | |
| Passo | 140 mm |
| Número de varetas | 169 |
| Espessura da parede do duto | 3,5 mm |
| Espaço entre feixes | 6,0 mm |
| Diâmetro da vareta (d) | 8,0 mm |
| Passo da vareta (p) | 9,5 mm |
| Espessura da camisa | 0,38 mm |
| p/d | 1,1875 mm |
| <u>Feixe-Envoltório-Blindagem</u> | |
| (o duto é igual ao do núcleo) | |
| Número de varetas | 91 |
| Passo da vareta | 12,9 mm |
| Diâmetro da vareta | 12,0 mm |
| Espessura da camisa | 0,4 mm |
| <u>Feixe de controle</u> | |
| (o duto é igual ao do núcleo) | |
| Diâmetro externo do duto interno | 120 mm |
| Espessura do duto interno | 2 mm |
| Número de varetas | 31 |
| Diâmetro da vareta | 17 mm |
| Espessura da camisa | 0,5 mm |
| Passo da vareta | 18 mm |

Os cálculos na geometria cilíndrica (RZ) foram feitos para análises de características globais.

Os enriquecimentos de cada zona de combustível foram determinados mantendo aproximadamente iguais os picos das densidades de potência das duas zonas do núcleo. Os feixes de controle nas posições especificadas inseridos no início do ciclo, tiveram os enriquecimentos de ^{10}B ajustados de modo que no final do ciclo a distribuição de potência ainda se mantivesse plana.

Cálculos na geometria triangular (Figura 2) foram feitos para que as variações das densidades de potência por feixe pudessem ser observadas.

4. RESULTADOS

Para se obter uma perda de reatividade consistente com intervalos de recarregamentos mais longos, e queimas dos combustíveis economicamente mais vantajosas, a dimensão do núcleo e o inventário físsil tiveram de ser maiores. Para isso, o excesso inicial de reatividade foi de 11,17% para ser gasto num tempo de ~ 800 dias, conforme mostrado na Figura 3. O inventário dos combustíveis é mostrado na Tabela 2, juntamente com o autovalor, variação das massas, ganho de massa em todo o reator e queima média dos combustíveis, além das razões de conversão e de regeneração. As queimas médias dos combustíveis dos núcleos interno e externo são de ~ 81 e 60 MWD/kg, respectivamente. O gerenciamento do combustível, nas duas zonas do núcleo, deve ser analisado mais detalhadamente de tal forma que os índices de queima sejam compatíveis com os índices econômicos.

A regeneração no ciclo do tório é excelente e a do ciclo do plutônio satisfatória para o gerenciamento de combustível considerado. Neste reator, ficou melhor demonstrado a eficiente utilização do tório e da boa regeneração (crescente durante todo o ciclo) para os dois tipos de combustíveis. O material físsil inicial necessário, em torno de 3566 kg de ^{233}U , ^{239}Pu e ^{241}Pu , poderá não ser uma quantidade tão expressiva, no confronto entre as vantagens e desvantagens de reatores deste tipo e porte /5/.

Com respeito a reatividade de vazios no sódio (RVS), um dos principais parâmetros que regem a segurança inerente do reator, no núcleo interno situa-se bem abaixo de 1\$ ($\Delta k = +2,28 \times 10^{-3}$) no início do ciclo e ~1\$ no final. No núcleo externo atinge -2\$ ($\Delta k = +6,80 \times 10^{-3}$) no início do ciclo e um pouco mais no final do ciclo. Embora ainda positivos, (conforme Tabela 3), o reator é inerentemente muito mais seguro do que um LMFBR (Pu/U) equivalente. A RVS positiva, deste reator somada à formação de ^{232}U constitui, no momento, uma desvantagem desta concepção. Porém, acreditamos que, na época da introdução do reator, no futuro sistema energético, estas dificuldades sejam perfeitamente superáveis pelos avanços alcançados pela engenharia e tecnologia de reatores. A elaboração de um projeto onde a realimentação de reatividade devida aos efeitos Doppler, seja maior ou aproximadamente igual à excursão de reatividade devido a

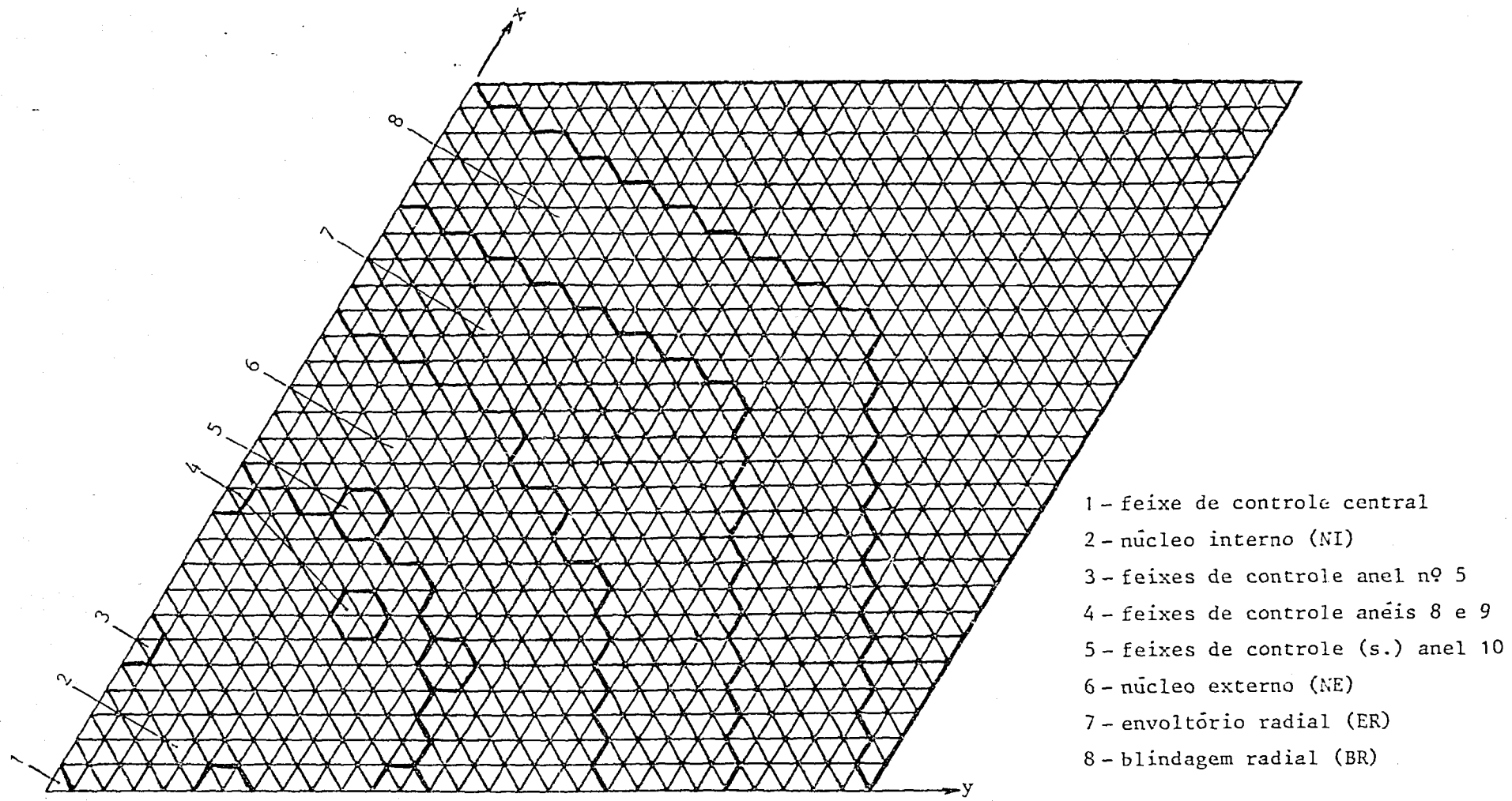


Figura 2: Geometria triangular (CITATION) e descrição das zonas

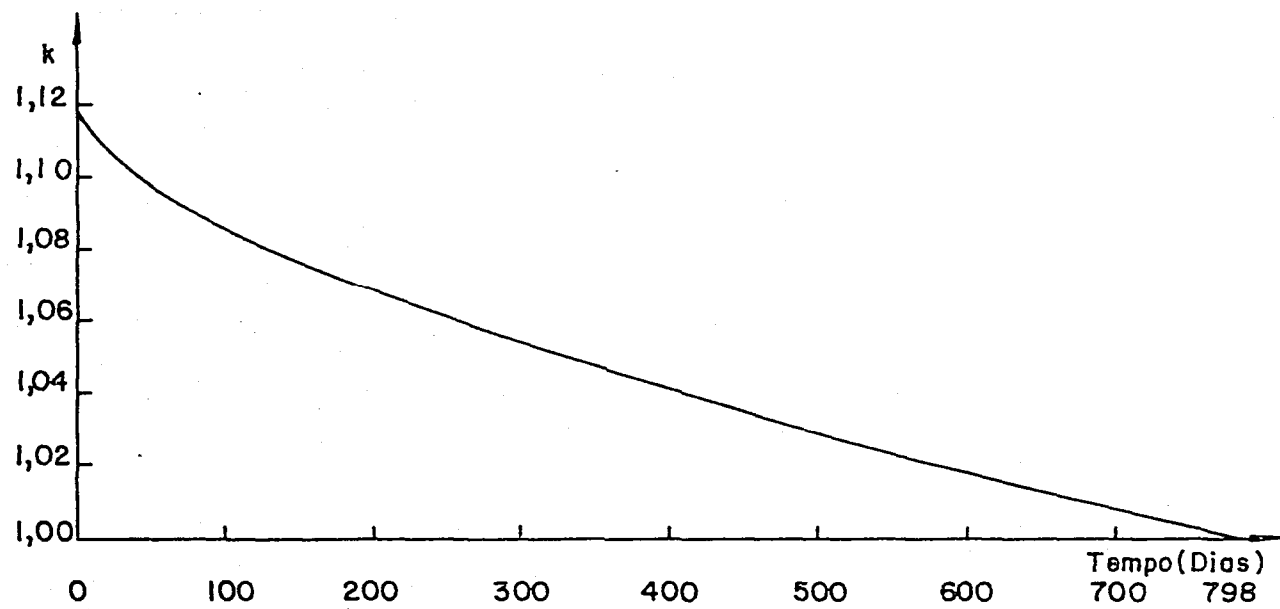


Figura 3: Fator de multiplicação x tempo de queima (dias).

Tabela 2: Inventário combustível (kg), variação e ganho das massas, queima média e razões de conversão e de regeneração.

| T(DIAS) | 0,0 | 100,0 | 300,0 | 500,0 | 700,0 | 798,07 |
|--|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| k | 1,11735 | 1,08567 | 1,05421 | 1,02902 | 1,00798 | 0,99979 |
| MASSA TOTAL DE FÍSSEIS | | | | | | |
| $^{233}\text{U} + \text{Pa}$ | 1693,66 | 1748,038 | 1865,202 | 1987,899 | 2114,567 | 2177,557 |
| $^{239+241}\text{Pu}$ | 1871,748 | 1877,102 | 1891,616 | 1910,852 | 1933,671 | 1945,877 |
| VARIAÇÃO DA MASSA (kg/dia), MÉDIA NO PASSO DE TEMPO | | | | | | |
| ^3U (NI) | | -0,6918 | -0,4904 | -0,4336 | -0,3819 | -0,3513 |
| ^{9+1}Pu (NE) | | -0,2793 | -0,2554 | -0,2295 | -0,2076 | -0,1940 |
| GANHO DE MASSA, REATOR TOTAL (kg) | | | | | | |
| $^3\text{U} + \text{Pa}$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{NI} \\ \text{EAI} \\ \text{ER} \end{array} \right.$ | | +54,3780 | 171,5420 | 294,2390 | 420,9070 | 483,8970 |
| ^{9+1}Pu $\left\{ \begin{array}{l} \text{NE} \\ \text{EAE} \end{array} \right.$ | | +5,3540 | +19,8680 | +39,1040 | +61,9230 | +74,1290 |
| QUEIMA (MWD/kg)* | | | | | | |
| NI | | 10,7796 | 32,0162 | 52,5714 | 72,2329 | 81,4677 |
| NE | | 8,5318 | 24,6210 | 39,4444 | 53,0341 | 59,2818 |
| RAZÃO DE CONVERSÃO E REGENERAÇÃO | | | | | | |
| NI | 0,62761 | 0,6517 | 0,6604 | 0,6635 | 0,6615 | 0,6589 |
| EAI | 0,2712 | 0,2836 | 0,2964 | 0,3107 | 0,3238 | 0,3298 |
| ER | 0,4252 | 0,4436 | 0,4363 | 0,4224 | 0,4101 | 0,4042 |
| TOTAL | 1,3240 | 1,3789 | 1,3931 | 1,3966 | 1,3954 | 1,3929 |
| NE | 0,7843 | 0,7873 | 0,7916 | 0,7931 | 0,7915 | 0,7896 |
| EAE | 0,2532 | 0,2577 | 0,2709 | 0,2873 | 0,3033 | 0,3111 |
| TOTAL | 1,0375 | 1,0450 | 1,0625 | 1,0804 | 1,0948 | 1,1007 |

* massa (em kg) de ($^{233}\text{U} + \text{Th}$) = 12289,66 kg

($^9\text{U} + ^1\text{Pu}$) = 15982,216

NI = núcleo interno, NE = núcleo externo, EAI = envoltório axial interno,
EAE = envoltório axial externo, ER = envoltório radial

Tabela 3: Reatividades de vazios no sódio e de Doppler

| TEMPO(DIAS) DISCRIMINAÇÃO | 0,0 | | 400,0 | | 798,07 | |
|------------------------------|---------|----------------|---------|----------------|---------|----------------|
| | k | $\Delta k(-3)$ | k | $\Delta k(-3)$ | k | $\Delta k(-3)$ |
| REFERÊNCIA | 1,00030 | ----- | 1,00063 | ----- | 0,99992 | ----- |
| NI-ESVAZIADO | 1,00258 | +2,28 | 1,00406 | +3,43 | 1,00353 | +3,61 |
| NE-ESVAZIADO | 1,00710 | +6,80 | 1,00841 | +7,78 | 1,00804 | +8,12 |
| NI-(DOPPLER) | 0,99972 | -0,58 | 0,99986 | -0,77 | 0,99893 | -0,99 |
| NE-(DOPPLER) | 0,99963 | -0,67 | 0,99998 | -0,65 | 0,99928 | -0,64 |

NI = Núcleo Interno; NE = Núcleo Externo

Nota: (-3) = 10^{-3}

vazios no sódio é muito difícil, com o combustível metálico, sem danificarmos os bons resultados de regeneração e a simplicidade geométrica do reator. Outro efeito importante que queríamos comprovar era o controle da oscilação da distribuição de potência. Este objetivo foi atingido pela consideração de feixes de controle de diferentes enriquecimentos nas posições indicadas na Figura 1. Desta forma, a retirada gradual e simultânea de todos os feixes de controle do núcleo interno mantiveram o nível de potência das zonas aproximadamente contantes (Tabela 4). As distribuições das densidades de potência apresentadas nas Figuras 4 e 5 foram obtidas dos cálculos triangulares, usando o CITATION, para os tempos de queima de 0,0, 400,0 e 798,0 dias.

Tabela 4: Densidade de potência média por zona (W/cm^3)

| TEMPO (DIAS) | 0 | 400,0 | 798,07 |
|----------------|---------|---------|---------|
| DISCRIMINAÇÃO | | | |
| Núcleo Interno | 451,492 | 452,036 | 450,799 |
| Núcleo Externo | 403,633 | 396,397 | 390,009 |

Na Figura 4 estão representadas as densidades de potência ao longo da linha radial que atravessa os feixes de controle dos anéis 1, 5 e 9 (representada pela linha 1 na Figura 1), e na Figura 5 as densidades ao longo da diagonal que passa pelo feixe de controle do anel no. 8 (representada pela linha diagonal - Figura 1).

Na Figura 6, apresentamos as densidades médias por feixe de combustível. Nota-se que próximo ao feixe de controle central, ocorre a maior variação da densidade de potência local (6,5%), devido a retirada do controle durante a queima. É notado também que as variações das densidades de potência, de um feixe para o outro adjacente, são maiores nos primeiros dias de operação e diminuem regularmente até o final do ciclo.

Finalmente, podemos dizer que, exceto as inevitáveis variações locais por causa do gerenciamento de controle, é perfeitamente possível manter constante o nível de potência das zonas durante a operação do reator.

Tempos { 0,0 dias
 400,0 dias
 798,07 dias

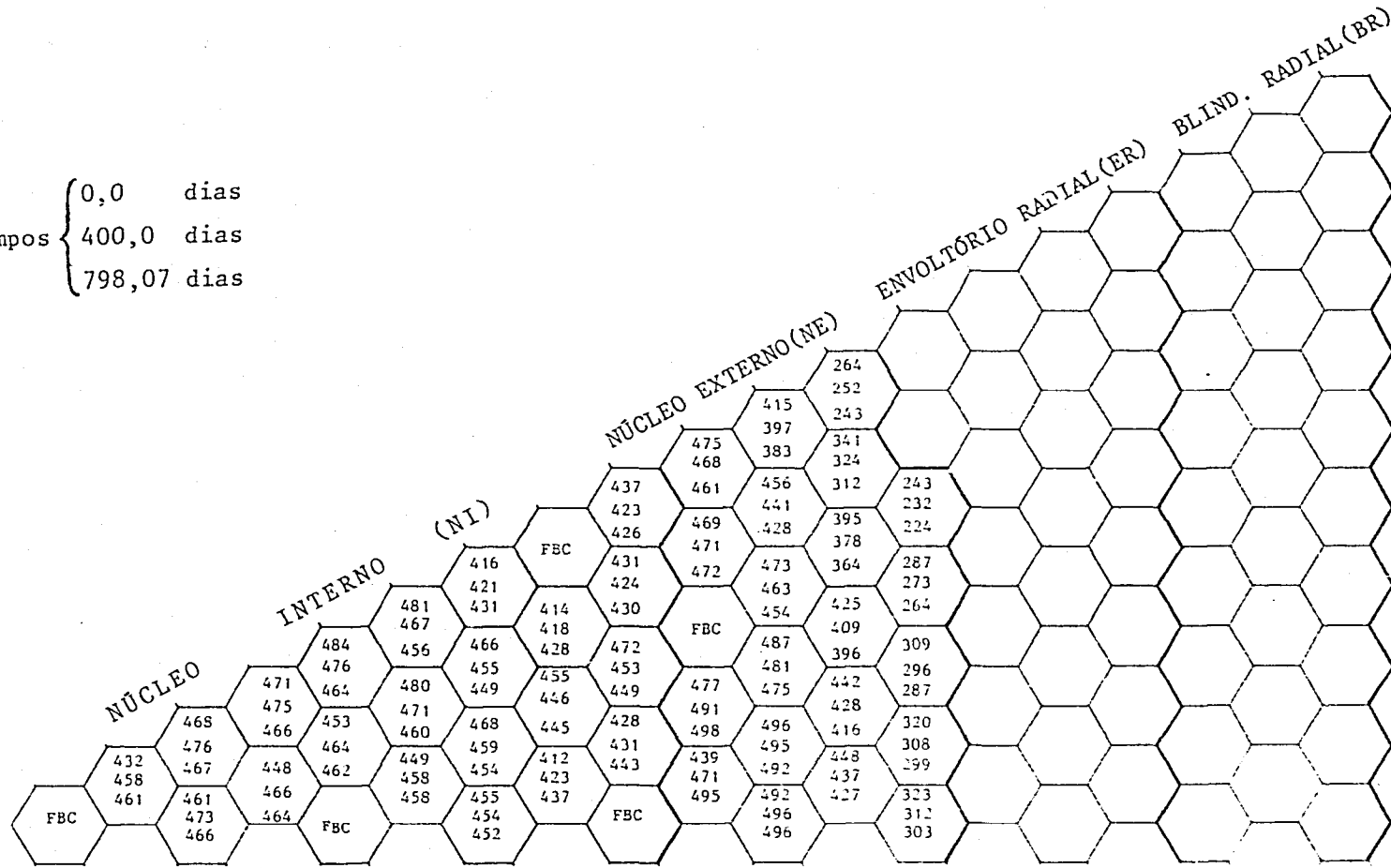


Figura 4: Distribuição da densidade de potência (W/cm³) por feixe nos tempos 0,400 e 798,07 dias.

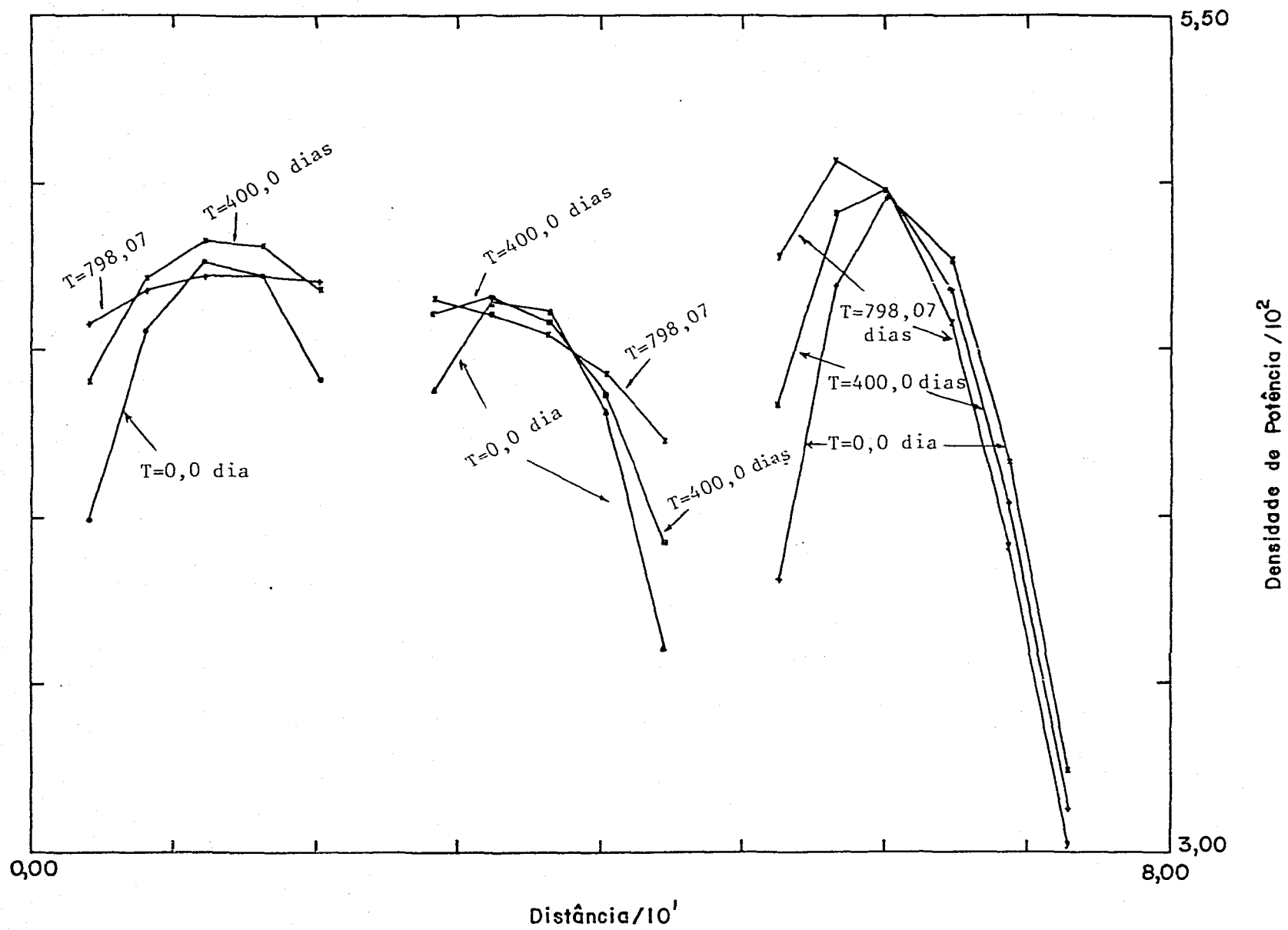


Figura 5: Distribuição da densidade de potência radial - Linha 1-

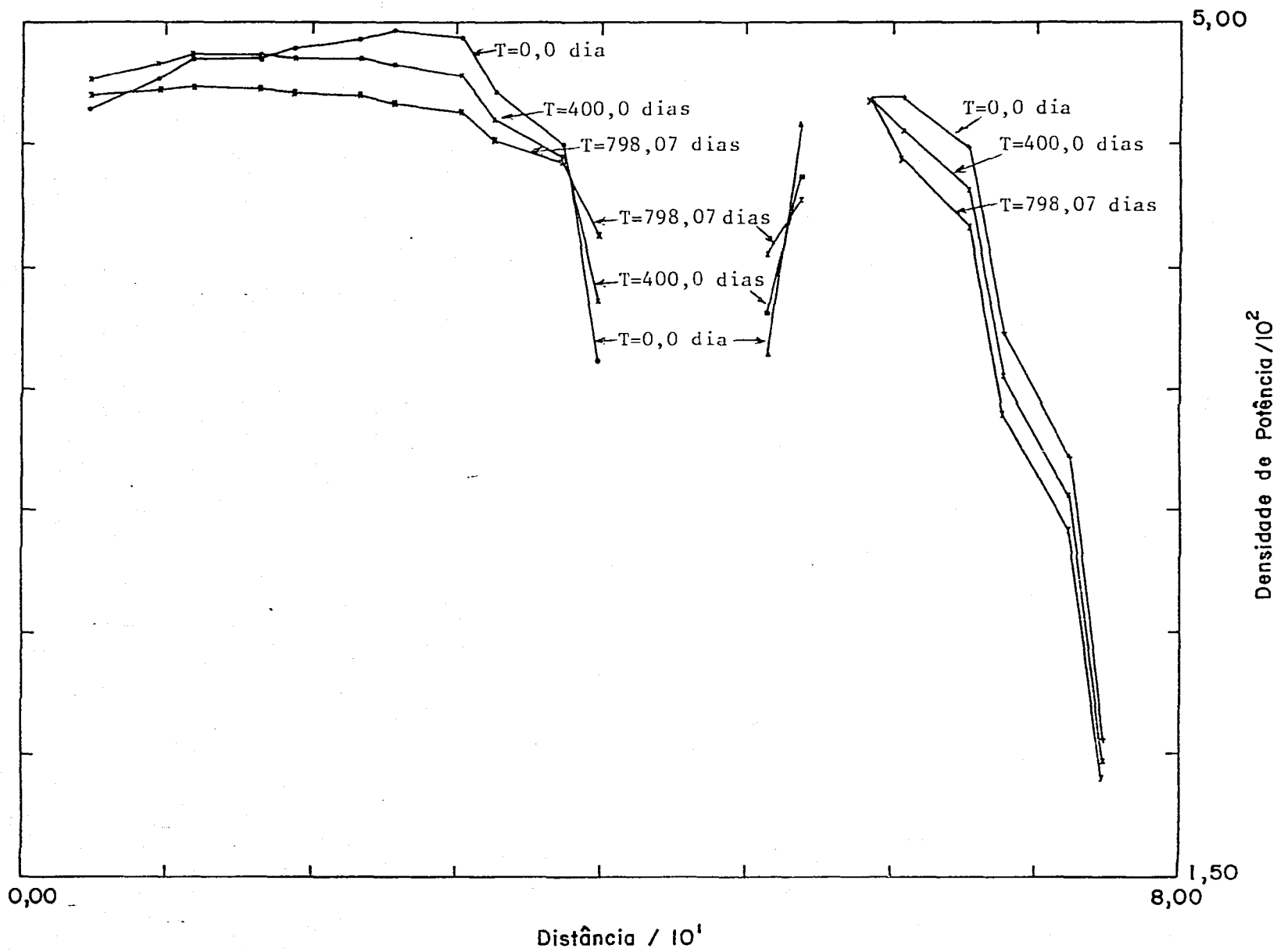


Figura 6: Distribuição da densidade de potência radial - Linha diagonal.

5. CONCLUSÃO

São atingidos os principais objetivos relativamente a eficiente utilização do tório, boa regeneração em ambos os ciclos e segurança inerente muito melhor do que um LMFBR (Pu/U) equivalente. O aumento do inventário fissil pode não ser tão expressivo frente as vantagens obtidas.

As reatividades de vazios no sódio ainda positivas nas zonas de importância e os problemas associados à formação de ^{232}U podem ser perfeitamente superados pelos inevitáveis avanços da engenharia e tecnologia.

Contudo, nossa quase imposição de projeto de elaborarmos uma concepção na qual as incursões de reatividades de Doppler e de vazios no sódio devem, pelo menos se anularem, ainda continua.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. J.A. Nascimento, A.F. Dias e Y. Ishiguro, "Projeto do Reator Regenerador Binário e Segurança Inerente", Nota Técnica, IEAv/NT-024/83.
2. A.F. Dias, J.A. Nascimento e Y. Ishiguro, "Características de Queima de Reatores Regeneradores Binário", Nota Técnica, IEAv/NT-025/83.
3. Y. Ishiguro, A.F. Dias e J.A. Nascimento, "Binary Breeder Reactor an Option for Brazilian Energy Future", Nota Técnica, IEAv/NT-012/84.
4. J.A. Nascimento, A.F. Dias e Y. Ishiguro, "Otimização do Reator Regenerador Binário I - Reatividades de Vazios no Sódio e Efeito Doppler em um Novo Modelo", Nota Técnica, IEAv/NT-005/85.
5. A.F. Dias, J.A. Nascimento e Y. Ishiguro, "Otimização do Reator Regenerador Binário II - Embasamento Preliminar para Análise de Controle e Gerenciamento do Combustível", Nota Técnica, IEAv/NT-006/85.
6. J.A. Nascimento, A.F. Dias e Y. Ishiguro, "Otimização do Reator Regenerador Binário III - Influência da Altura do Núcleo na Reatividade de Vazios no Sódio", Relatório de Pesquisa, IEAv/RP-017/85.
7. A.F. Dias e Y. Ishiguro, "Otimização do Reator Regenerador Binário IV - Concepção de Combustível Misto na Parte Central do Núcleo", Relatório de Pesquisa, IEAv/RP-010/86.

8. A.F. Dias e Y. Ishiguro, "Otimização do Reator Regenerador Binário V - Reatores Regeneradores Binários com Duas e Quatro Zonas e um LMFBR (Pu/U) Convencional de Duas Zonas", Relatório de Pesquisa, IEAv/RP-014/86.