

COMISSÃO NACIONAL
DE ENERGIA NUCLEAR



INSTITUTO DE
ENGENHARIA NUCLEAR

ESTUDO NEUTRÔNICO E DE DESEMPENHO DE COMBUSTÍVEL
PARA O REATOR SUPER PHÉNIX 2

POR

JOSÉ LUIZ BATISTA
CARLOS ALBERTO CURI RENKE

CAIXA POSTAL 68550
CIDADE UNIVERSITÁRIA - ILHA DO FUNDÃO
CEP 21945

RIO DE JANEIRO
BRASIL

GOVERNO DO BRASIL

ESTUDO NEUTRÔNICO E DE
DESEMPENHO DE COMBUSTÍVEL
PARA O REATOR SUPER PHÉNIX 2

por

José Luiz Batista
Carlos Alberto Curi Renke

IEN - Caixa Postal 68550
Cidade Universitária - Ilha do Fundão
CEP 21945 - Rio de Janeiro
RJ - Brasil

ESTUDO NEUTRÔNICO E DE
DESEMPENHO DE COMBUSTÍVEL
PARA O REATOR SUPER PHÉNIX 2

por

José Luiz Batista

Carlos Alberto Curi Renke

RESUMO

Nesta publicação apresenta-se, inicialmente, com vistas a uma análise neutrônica, uma descrição detalhada do reator Super Phénix 2, que foi adotado como reator de referência. A seguir mostra-se uma metodologia de cálculo apropriada para um estudo neutrônico deste tipo de reator. Com esta metodologia efetuou-se os cálculos celulares e do reator para os combustíveis do tipo óxido misto UO_2 - PuO_2 e nitreto misto UN-PuN. Compara-se finalmente o desempenho desses dois combustíveis para este reator de referência.

Palavras-Chaves: neutrônica de reatores a nêutrons rápidos, combustível nitreto.

NEUTRONIC STUDY USING
OXYDE AND NITRIDE FUELS
FOR THE SUPER PHÉNIX 2 REACTOR

by

José Luiz Batista
Carlos Alberto Curi Renke

ABSTRACT

This report presents a neutronic analysis and a description of the Super Phénix 2 reactor, taken as reference. We present the methodology and results for cell and global reactor calculations for oxide (UO_2 - PuO_2) and nitride (UN-PuN) fuels. To conclude we compare the performance of oxide and nitride fuels for the reference reactor.

Keywords: neutronics of fast breeder reactors, nitride fuel.

SUMÁRIO

	página
1 - INTRODUÇÃO	1
2 - DESCRIÇÃO GERAL DOS REATORES DO TIPO A NÊUTRONS RÁPIDOS	1
3 - DESCRIÇÃO DO NÚCLEO DE REFERÊNCIA	2
3.1 Introdução	2
3.2 Descrição	3
Parâmetros de referência	
Parâmetros de funcionamento do núcleo	
Antireatividade das barras de controle	
Conjunto combustível	
Características hidráulicas do conjunto combustível	
Conjunto fértil radial	
3.3 Modificações para um núcleo óxido, pastilha vazada.	8
3.4 Modificações para um núcleo nitreto, pastilha plena.	8
4 - MÉTODO DE CÁLCULO	14
5 - RESULTADOS	22
5.1 Cálculos celulares	22
5.2 Cálculos do reator	23
Reatividade	
Ganho de regeneração	
Potência	
D.P.A.	
6 - A CAPTURA DO NITROGÊNIO	28
7 - CONCLUSÕES	33
REFERÊNCIAS	34
APÊNDICE A	36
A.1 - Correção axial	36
A.2 - Potência linear	36
A.3 - DPA	36
A.4 - Resultados do cálculos celulares	37
A.5 - Resultados dos cálculos do reator	40
RELAÇÃO DE TABELAS	
Tabela 3.1. Regiões do núcleo SPX2, composições a frio	9
Tabela 4.1. Opção para o programa HETARED (resolução das equações com fontes)	15

	página
Tabela 4.2. Parâmetros do combustível	16
Tabela 4.3. Corpos e porcentagens isotópicas (em peso) de cada meio óxido (a 20 °C)	16
Tabela 4.4. Corpos e porcentagens isotópicas (em peso) de cada meio nitreto (a 20 °C)	17
Tabela 4.5. Corpos e porcentagens isotópicas (em peso) de cada meio não combustível e não fértil (a 20 °C)	18
Tabela 4.6. Corpos e porcentagens isotópicas (em peso) de cada meio não combustível e não fértil (a 20 °C)	19
Tabela 5.1. Cálculos celulares	25
Tabela 5.2. Reatividade	25
Tabela 5.3. Fluxo máximo	26
Tabela 5.4. Ganho de regeneração	26
Tabela 5.5. Potências lineares	27
Tabela 5.6. Deslocamentos por átomo (DPA)	27
Tabela 5.7. Massa de plutônio em Kg (núcleo + cobertura fértil radial)	27
Tabela 6.1. Taxas de reação (em %) para células com 15,586% de enriquecimento volumétrico	29
Tabela 6.2. Resultados dos cálculos, programa DEUXD3 e UND3, núcleo nitreto perturbado	30
Tabela A.1. Resultados dos cálculos celulares	37
Tabela A.2. Resultados dos cálculos celulares	38
Tabela A.3. Resultados dos cálculos celulares	39
Tabela A.4. Resultados dos cálculos, programa DEUXD3 e UND3, núcleo óxido com pastilha plena	40
Tabela A.5. Resultados dos cálculos, programa DEUXD3 e UND3, núcleo óxido com pastilha vazada	41
Tabela A.6. Resultados dos cálculos, programa DEUXD3 e UND3, núcleo nitreto com pastilha plena	42
Tabela A.7. Massa em Kg para o núcleo óxido com pastilha plena	43
Tabela A.8. Massa em Kg para o núcleo óxido com pastilha vazada	44
Tabela A.9. Massa em Kg para o núcleo nitreto com pastilha plena	45

RELAÇÃO DE FIGURAS

Figura 3.1. Bloco do reator Super Phénix 2	10
Figura 3.2. Super Phénix 2 (SPX2), núcleo combustível	11
Figura 3.3. Super Phénix 2 (SPX2), núcleo	12
Figura 3.4. Super Phénix 2 (SPX2), conjunto combustível	13
Figura 4.1. Diagrama de cálculo	20
Figura 4.2. Núcleo do reator SPX2, a quente (para o programa DEUXD3)	21
Figura 4.3. Núcleo do reator SPX2, a quente (para o programa UND3)	22
Figura 6.1. Reatividade do núcleo nitreto	32

1. INTRODUÇÃO

Esta nota é inteiramente baseada no trabalho apresentado na Escola Nacional Superior de Física, Instituto Nacional Politécnico de Grenoble e no Centro de Estudos Nucleares de Cadarache, França em 1986 [1], cujo objetivo principal é o de efetuar uma comparação dos desempenhos dos combustíveis óxido e nitreto para um reator de referência a nêutrons rápidos francês, Super Phénix 2, também chamado SPX2.

Inicialmente é apresentado uma descrição sumária do núcleo de referência e do sistema de cálculo neutrônico utilizado. A seguir são comparados os resultados mais significativos obtidos para os núcleos óxidos (combustível a pastilha compacta e vazada) e um núcleo a combustível nitreto (pastilha plena).

2. DESCRIÇÃO GERAL DOS REATORES A NÊUTRONS RÁPIDOS [2]

O Japão, a Alemanha, os Estados Unidos com reatores experimentais, o Reino Unido, a Rússia com centrais tipo protótipo e a França com uma central regeneradora comercial, mostra que a família de reatores regeneradores a nêutrons rápidos esta na maior parte dos países, em via de desenvolvimento.

Na França o ramo de reatores a nêutrons rápidos começou a ser estudado a partir de 1957.

Peguenos reatores de estudos (Harmonie, Masurca e Cabri) e o primeiro reator experimental, Rapsodie, de 24 MWth e depois com 40 MWth serviram de principais suportes ao programa de reatores a nêutrons rápidos.

O Rapsodie, construído com uma concepção de sistema de refrigeração a circuito fechado foi colocado em serviço em Cadarache em 1966. Em 1973 a central Phénix de 560 Mwth foi implantada em Marcoule, seguida da central Super Phénix de 3000 MWth, em Creys Malville, que entrou em criticalidade em 1985. Estas duas últimas utilizando como concepção o sistema de refrigeração tipo integrado, onde o conjunto bombas primárias e trocadores intermediários são confinados dentro do reator.

Atualmente, a França procura tornar a família dos reatores regeneradores competitiva quanto ao custo do KWh, em comparação a outras famílias de centrais nucleares comerciais, fazendo um esforço sobre os custos de investimento do vaso do reator e do ciclo do combustível.

Assim os estudos relativos ao núcleo do reator se orientam sobre a pesquisa de um núcleo dito em "frequência 1", ou seja, um núcleo no qual todos os conjuntos combustíveis são carregados e descarregados simultaneamente.

As vantagens resultantes são notadamente sobre os custos de estocagem intermediária necessária, simplificação dos aparelhos de manutenção, a não necessidade de colocação em equilíbrio do núcleo e paradas menos frequentes do reator.

O objetivo desta nota é então demonstrar a possibilidade de tais núcleos, seja de núcleos capazes de funcionar longos períodos sem aporte de reatividade, com os núcleos a combustível nitreto que parecem poder satisfazer a esta condição. Um tal tipo de núcleo é então especialmente estudado neste trabalho.

3. DESCRIÇÃO DO NÚCLEO DE REFERÊNCIA |3|4|5|

3.1. Introdução.

A figura 3.1 mostra o bloco do reator Super Phénix 2 (SPX2), tipo integrado. O núcleo e os circuitos de sódio (trocadores de calor intermediários e bombas primárias) estão contidos em um cilindro chamado vaso principal, e o mesmo contido em um segundo vaso de segurança em aço inoxidável.

Para os nossos cálculos, utilizamos o núcleo do reator SPX2 conforme a figura 3.2, e que pode ser dividido em 15 diferentes regiões (figura 3.3 e tabela 3.1)

As duas primeiras regiões combustíveis, núcleo interno (CO1) e núcleo externo (CO2), contém, respectivamente 208 e 180 conjuntos de elementos combustíveis, cada um formado de 271 elementos combustíveis (figura 3.4).

Abaixo do elementos combustíveis encontram-se sucessivamente a cobertura axial inferior (CAI) fértil em UO_2 empobrecido e uma região (VEI) que contém as câmaras de expansão inferiores destinadas a receber os produtos de fissão gasosos.

Acima dos elementos combustíveis encontram-se as regiões que contém as câmaras de expansão superior (PNS), cuja função é de atenuar o fluxo neutrônico sobre as estruturas internas superiores do vaso.

Dentro do núcleo interno encontram-se 6 conjuntos de controle, e entre os núcleos interno e externo 18 conjuntos de controle, compondo o sistema de controle principal (CPA), que tem por função a compensação das variações de reatividade devidas aos efeitos de temperatura, de potência, de utilização do combustível e para assegurar a parada do reator. Estes conjuntos se decompõem em três regiões: barras absorvedoras (ABSCPA), seguidores de barras (SUIVCPA) e pés dos seguidores (PIEDCPA).

No núcleo interno encontram-se igualmente 9 conjuntos de controle (CAU) cuja única função é de assegurar a parada de urgência do reator que, associadas ao sistema CPA, aportam uma reserva de antireatividade necessária para colocar o reator em um estado seguro, caso seja necessário. Estes conjuntos de controle se decompõem em 4 regiões de barras absorvedoras (ABSCAU1 e ABSCAU2), seguidores de barras (SUIVCAU) e pés dos seguidores de barras (PIEDCAU).

Sobre o contorno radial do núcleo temos 78 conjuntos, cada um formado de 169 elementos férteis com pastilhas de UO_2 empobrecido, compondo a cobertura radial externa (CRE). A seguir temos os conjuntos de elementos que compõem a proteção neutrônica lateral (PNL), previstos para ficarem nesta posição durante toda a vida útil da central.

3.2. Descrição.

Obs: Todas as dimensões dadas são à temperatura de 20 °C.

Parâmetros de referência

- potência térmica	3600 Mwt
- potência elétrica:	1500 MWe
- número de conjuntos de elementos combustíveis:	388
- número de conjuntos de elementos férteis radiais:	78
- número de conjuntos de controle:	
sistema de controle principal (CPA)	24
sistema de parada complementar (CAU)	9
- conceito do núcleo: homogêneo a duas zonas de enriquecimento	
- tipo de achatamento: achatamento dos DPA	
- enriquecimento volumétrico do dois núcleos:	
núcleo interno	15,586 %
núcleo externo	20,745 %
- enriquecimento médio:	17,970 %

Parâmetros de funcionamento do núcleo

- taxa de combustão máxima:	1475000 MWd/t
- tempo de estadia do combustível:	1400 depp
- frequência de carregamento-descarregamento:	4
- duração do ciclo em equilíbrio:	350 depn
- queda de reatividade por ciclo:	2600 pcm
- potência linear máxima nominal:	480 W/cm
- temperatura nominal do encamisamento:	< 650 °C
- taxa máxima de danos de dimensionamento:	220 DPA
- temperatura do sódio a entrada do núcleo:	395 °C
- temperatura do sódio na saída do núcleo:	547,5 °C
- vazão do sódio:	18749 Kg/s
- perda de carga:	5 bars
- volume do núcleo:	14,9 m ³

Antireatividade das barras de controle

- antireatividade dos CPA:	9780 pcm
- antireatividade dos CAU:	2060 pcm
- antireatividade dos (CPA + CAU):	11040 pcm

Conjunto combustível

elemento combustível (CO1 e CO2)

- material combustível:	óxido misto UO ₂ /PuO ₂
- densidade prática do UO ₂ :	10,457 g/cm ³
- densidade prática do PuO ₂ :	10,9443 g/cm ³
- composição atômica ²³⁵ U/urânio:	0,46 %
- plutônio vindo do retratamento dos combustíveis PWR franceses	
- composição em massa ²³⁸ Pu/plutônio:	1,69 %
- composição em massa ²³⁹ Pu/plutônio:	57,95 %
- composição em massa ²⁴⁰ Pu/plutônio:	22,34 %
- composição em massa ²⁴¹ Pu/plutônio:	11,36 %
- composição em massa ²⁴² Pu/plutônio:	5,45 %
- composição em massa ²⁴¹ Am/plutônio:	1,21 %
- porosidade do óxido misto:	95,5 %
- diâmetro externo das pastilhas combustíveis:	0,714 cm
- número de elementos combustíveis por conjunto:	271
- material dos encamisamentos:	aço 316 Ti
- diâmetro interno dos encamisamentos:	0,737 cm
- espessura dos encamisamentos:	0,0565 cm
- diâmetro externo dos encamisamentos:	0,850 cm
- jogo diametral entre pastilhas e encamisamento:	0,023 cm
- material dos filetes espaçadores:	aço 316 Ti
- diâmetro dos filetes espaçadores:	0,14 cm
- passo do enrolamento dos filetes espaçadores:	18,0 cm
- jogo entre elementos:	0,01 cm
- material dos tubos hexagonais:	aço 316 Ti
- distância interna entre os planos do tubo hexagonal:	16,74 cm
- espessura do tubo hexagonal:	0,49 cm
- distância externa entre os planos do tubo hexagonal:	17,72 cm
- jogo entre conjuntos:	0,74 cm
- passo da rede de conjuntos:	18,46 cm
- altura da coluna físsil:	120 cm

cobertura axial inferior (CAI)

- material fértil:	óxido misto UO ₂
- densidade prática do UO ₂ :	10,7311 g/cm ³
- composição atômica ²³⁵ U/urânio:	0,25 %
- diâmetro da pastilha:	0,707 cm

- jogo diametral pastilha/encamisamento: 0,030 cm
- altura da coluna: 30 cm

vaso de expansão (VEI e VES)

- altura do vaso de expansão inferior: 90 cm
- altura do vaso de expansão superior: 41 cm

proteção neutrônica superior (PNS)

- número de elementos: 19
- comprimento dos elementos: 73,5 cm
- altura do vaso de expansão da proteção: 31,5 cm
- diâmetro interno dos encamisamentos: 0,314 cm
- diâmetro externo dos encamisamentos: 0,339 cm
- diâmetro dos filetes espaçadores: 0,285 cm
- passo do enrolamento dos filetes espaçadores: 50,0 cm
- jogo entre elementos: 0,01 cm
- altura da coluna absorvedora de B_4C : 35,5 cm
- diâmetro das pastilhas de B_4C : 0,297 cm
- distância interna entre os planos do tubo hexagonal: 16,74 cm
- espessura do tubo hexagonal: 0,49 cm
- distância externa entre os planos do tubo hexagonal: 17,72 cm
- jogo entre conjuntos: 0,74 cm
- passo da rede de conjuntos: 18,46 cm

cabeça do conjunto

- comprimento da cabeça: 38,4 cm
- diâmetro externo da cabeça: 0,339 cm

pé do conjunto

- comprimento do pé: 60,0 cm
- diâmetro interno da moradia do pino terminal: 8,80 cm

Características hidráulicas do conjunto combustível

- perda de carga total do conjunto: 4,80 bars

feixe combustível

- comprimento do feixe: 291,0 cm
- vazão em sódio (conjunto que possui mais vazão): 46,4 Kg/s
- velocidade média do sódio no feixe: 6,6 ms

- seção de passagem do sódio:	8864 mm ²
- perímetro molhado:	9028 mm
- diâmetro hidráulico:	3,75 mm
- perda de carga linear por feixe:	3,48 bars

feixe (proteção neutrônica superior + cabeça do conjunto)

- comprimento do feixe:	134,0 cm
- velocidade média do sódio no feixe:	8,0 m/s
- seção de passagem do sódio:	7010 mm ²
- perímetro molhado:	2804 mm
- diâmetro hidráulico:	10,0 mm
- perda de carga linear por feixe:	0,60 bars

pé do conjunto

- comprimento do feixe:	60,0 cm
- velocidade média do sódio no feixe:	4,7 m/s
- seção de passagem do sódio:	6082 mm ²
- perímetro molhado:	276 mm
- diâmetro hidráulico:	88,0 mm
- perda de carga linear por feixe:	0,60 bars

Conjunto fértil radial

- material fértil:	óxido misto UO ₂
- densidade prática do UO ₂ :	10,7311 g/cm ³
- composição atômica ²³⁵ U/urânio:	0,25 %
- diâmetro da pastilha:	1,015 cm
- número de elementos combustíveis por conjunto:	169
- material dos encamisamentos:	aço 316 Ti
- diâmetro interno dos encamisamentos:	1,045 cm
- espessura dos encamisamentos:	0,0575 cm
- diâmetro externo dos encamisamentos:	1,160 cm
- jogo diametral entre pastilhas e encamisamento:	0,030 cm
- material dos filetes espaçadores:	aço 316 Ti
- diâmetro dos filetes espaçadores:	0,10 cm
- passo do enrolamento dos filetes espaçadores:	15,0 cm
- jogo entre elementos:	0,01 cm
- material dos tubos hexagonais:	aço 316 Ti

- distância interna entre os planos do tubo hexagonal: 16,74 cm
- espessura do tubo hexagonal: 0,49 cm
- distância externa entre os planos do tubo hexagonal: 17,72 cm
- jogo entre conjuntos: 0,74 cm
- passo da rede de conjuntos: 18,46 cm
- altura da coluna fértil: 151 cm

3.3. Modificações para um núcleo óxido, pastilha vazada.

- enriquecimento volumétrico do dois núcleos:
 - núcleo interno 17,05 %
 - núcleo externo 22,10 %
- enriquecimento médio: 19,39 %
- diâmetro do furo na pastilha combustível: 0,20 cm

3.4. Modificações para um núcleo nitrato, pastilha plena.

- densidade teórica do UN combustível: 14,32 g/cm³
- densidade teórica do PuN combustível: 14,25 g/cm³
- densidade prática do UN combustível: 11,901 g/cm³
- densidade prática do UN fértil: 12,212 g/cm³
- densidade prática do PuN combustível: 11,843 g/cm³
- enriquecimento volumétrico dos dois núcleos:
 - núcleo interno 14,30 %
 - núcleo externo 18,97 %
- enriquecimento médio: 16,47 %
- diâmetro do furo na pastilha combustível: 0,20 cm

Tabela 3.1. Regiões do núcleo SPX2, composições a frio.

REGIÕES		COMPOSIÇÕES EM VOLUME
01	CO1	32,34% combustível + 24,5% aço + 36,34% sódio
02	CO2	32,34% combustível + 24,5% aço + 36,34% sódio
03	SUIVCPA	13% aço + 87% sódio
04	SUIVCAU	9,4% aço + 90,6% sódio
05	ABSCPA	25,7% B ₄ C (90% moléculas ¹⁰ B/Boro) + 25,9% aço + 8,4% sódio
06	ABSCPA	15% B ₄ C (90% moléculas ¹⁰ B/Boro) + 25,8% aço + 9,2% sódio
07	CRE	46,336% UO ₂ (empobrecido) + 21,765% aço + 29,12% sódio
08	PNL	70% aço + 30% sódio
09	ABSCAU1	14,4% B ₄ C (natural) + 12,4% aço + 73,2% sódio
10	CAI	36,767% UO ₂ (empobrecido) + 24,257% aço + 6,569% sódio
11	VEI	24% aço + 36,8% sódio
12	PIEDCPA	68,1% aço + 31,8% sódio
13	PIEDCAU	66% aço + 34% sódio
14	VES	27,9% aço + 39,2% sódio
15	PNS	50% B ₄ C (natural) + 16,6% aço + 32% sódio

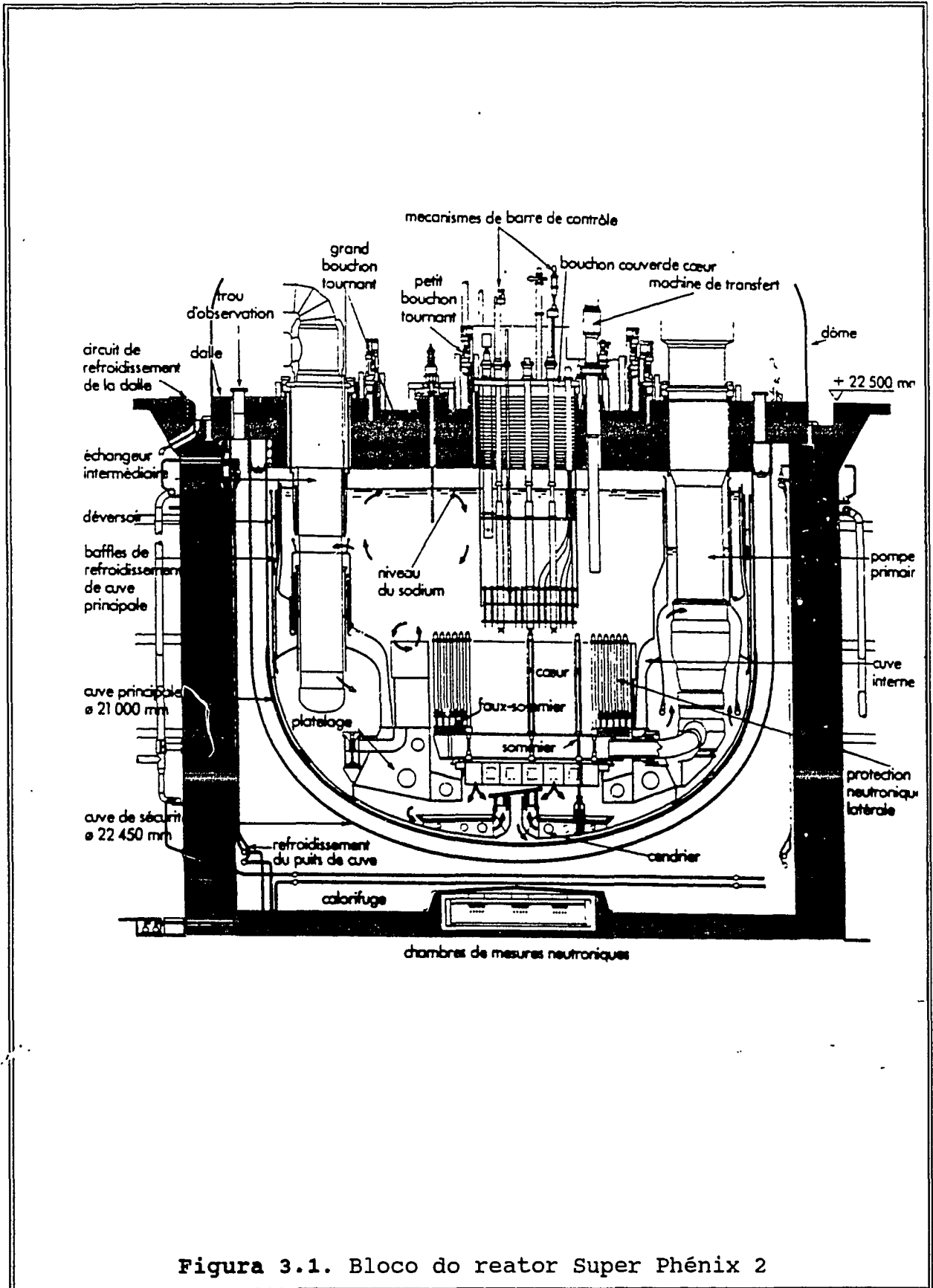
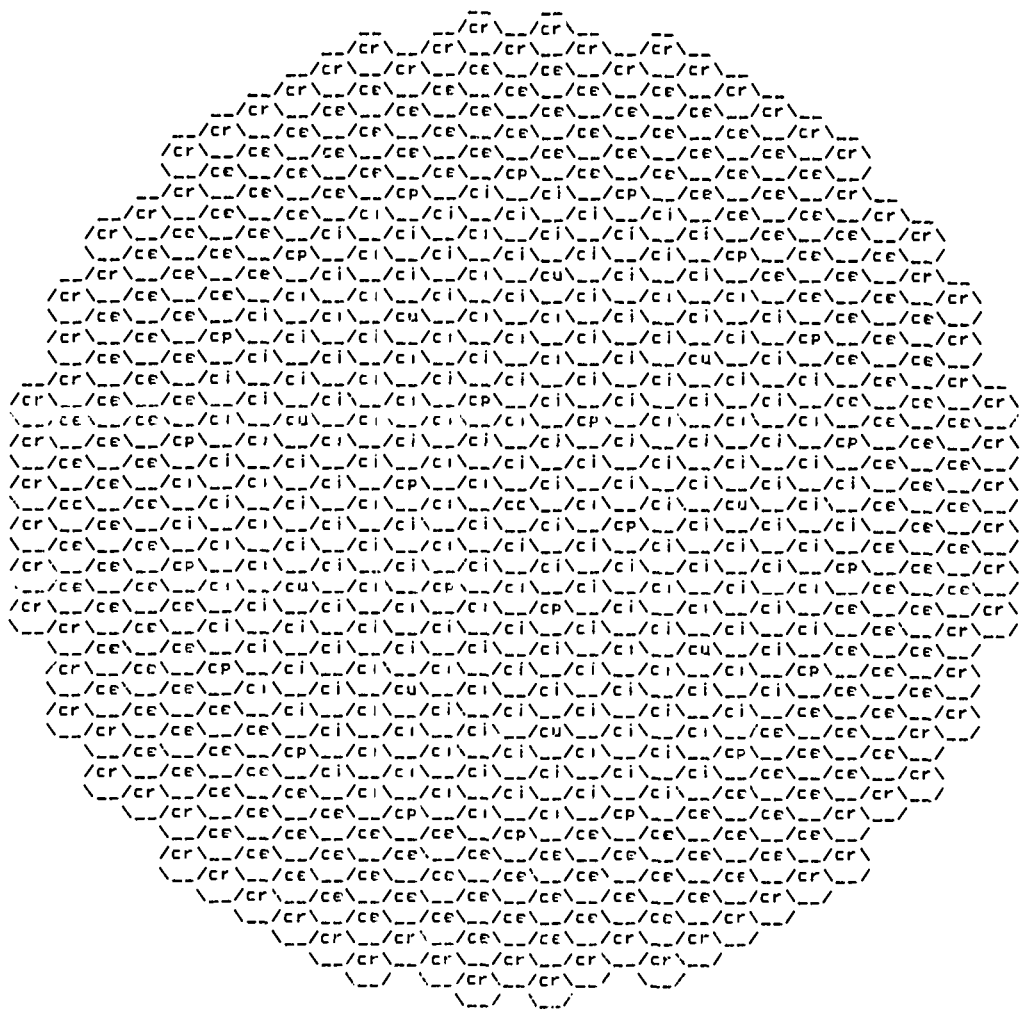
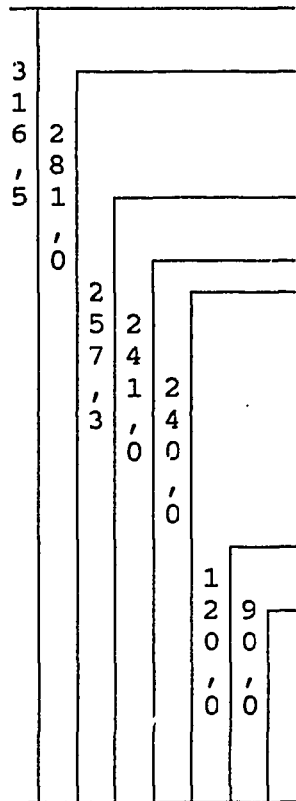


Figura 3.1. Bloco do reator Super Phénix 2



- cp - conjunto de elementos de controle principal (24)
- cu - conjuntos de elementos de parada complementar (9)
- ci - conjuntos de elementos combustíveis do núcleo interno (208)
- ce - conjuntos de elementos combustíveis do núcleo externo (180)
- cr - conjunto de elementos férteis da cobertura radial (78)

Figura 3.2. Super Phénix 2 (SPX2), núcleo combustível.



número de conjuntos ---->

pns	a	pns	a	pns	a	pns	pns	
ves	b	ves	b	ves	b	ves	ves	
	s		s		s			
col	c	col	c	col	c	co2	cre	pnl
	v		v		v			
cai	p	cai	p	cai	p	cai		
vei	i	vei	i	vei	i	vei	vei	
	e		e		e			
	d		d		d			
	c		c		c			
	p		p		p			
	a		a		a			

22,676	81,069	104,271	180	78	174
46,15					
51,898					
101,530					
105,611					
144,737					
150,465					
198,868					
216,508					
251,438					

Figura 3.3. Super Phénix 2 (SPX2), núcleo.

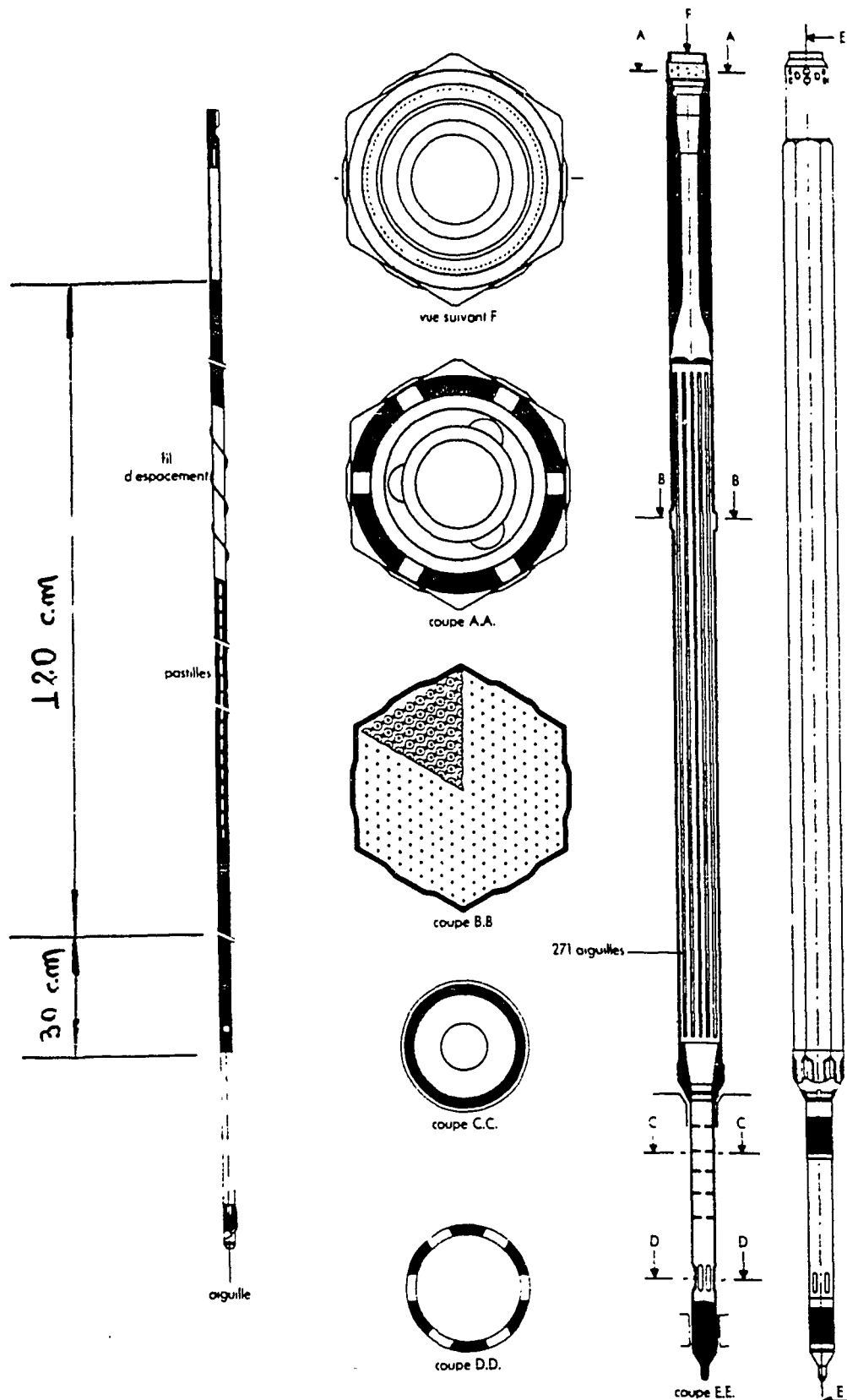


Figura 3.4. Super Phénix 2 (SPX2), conjunto combustível.

4. MÉTODO DE CÁLCULO

O diagrama da figura 4.1 esquematiza o procedimento de cálculo que foi utilizado para o núcleo de referência SPX2, modelizado a partir dos dados do capítulo 3, em geometria cilíndrica RZ, como indicado na figura 4.2.

Os cálculos celulares foram efetuados com o programa HETARED [9], a 25 grupos de energia, utilizando-se o formulário CARNAVAL-IV [6]. O núcleo do reator foi dividido em quinze diferentes meios como é mostrado na figura 4.2, e elaborado um programa de cálculo chamado UO2 [9], para fazer as correções sobre as dilatações geométricas e calcular o número de átomos por barn.cm, para os meios físséis e férteis, levando em conta o coeficiente de dilatação linear do sódio.

A tabela 4.1 descreve os valores da taxa de preenchimento e porosidade utilizados nos cálculos. [7|8|

Para os meios não físséis foi utilizado a opção de resolução da equação com fontes, onde são utilizados 25 valores de uma fonte exterior constituindo o termo de fuga (DPHI) do meio mais próximo, conforme tabela 4.2. As tabelas 4.3 a 4.5 apresentam as porcentagens isotópicas de cada meio.

Com as seções de choque obtidas através do programa HETARED foi feito o cálculo estático do reator, a duas dimensões em geometria RZ, a 25 grupos de energia. Para efetuar o cálculo inicial, os valores das concentrações que são dados de entrada do programa DEUXD3 [9] foram estabelecidos a partir da saída do HETARED, pelo programa COMAC [9].

O ciclo de evolução do reator foi calculado pelo código UND3 [10], em 25 grupos de energia, a uma dimensão, em geometria cilíndrica, conforme figura 4.3.

Ele foi subdividido em 5 etapas idênticas de 175 depp onde, durante o intervalo de tempo correspondente a cada etapa e com o ajuste do buckling axial (B_z^2) para o valor de $K_{efetivo}$ obtido no núcleo estático em duas dimensões, foi feito o cálculo dos

parâmetros K_{efetivo} , distribuição de fluxo, distribuição de potência, ganho de regeneração e DPA instantâneo.

As tabelas com os resultados globais obtidos pelos códigos HETARED, DEUXD3 e UND3, para os núcleos óxido e nitreto são apresentadas no apêndice A.

Tabela 4.1. Opção para o programa HETARED (resolução da equação com fontes).

MEIO	FONTE EXTERIOR COM DB ₂ O DO MEIO:
suivcpa	co1
suivcau2	co1
abscpa	co1
abscau2	co1
cre	co2
pnl	cre
abscau1	co1
cai	co1
vei	cai
piedcpa	co1
piedcau	co1
ves	co1
pns	ves

Tabela 4.2. Parâmetros do combustível.

COMBUSTÍVEL	TAXA DE PREENCHIMENTO (tp)	DENSIDADE DE PREENCHIMENTO (dpr)	POROSIDADE (p)	E ₁ /E ₂ %	E _{médio} %
óxido	0,93856	0,89632	0,955	15,586 20,745	17,98
óxido vazado	0,86492	0,8260	0,955	17,05 22,10	19,39
nitreto	0,93856	0,780	0,831	14,30 18,97	16,47

$$tp = (rep^2 - rip^2) / rig^2$$

p = densidade prática do combustível/dens. teórica do combust.

$$dpr = tp * p$$

rig = raio interno do revestimento

rep = raio externo da pastilha

rip = raio interno da pastilha

Tabela 4.3. Corpos e porcentagens isotópicas (em peso) de cada meio óxido (a. 20 °C).

combust.		fértil	combustível		combustível e fértil	
235U	0,40039	0,2176	238pu	1,48959	Fe 66,66	Na 100,0
238U	87,497	87,93284	239pu	51,1236	Cr 14,5912	
16O	11,84984	11,84956	240pu	19,7045	Ni 15,59065	
			241pu	10,0265	Si 0,29982	
			242pu	4,81135	Mo 1,19928	
			241Am	1,06476	Ti 0,42974	
			16O	11,86802	Cu 0,04997	
					C 0,07995	
					Mn 1,19928	

Tabela 4.4. Corpos e porcentagens isotópicas (em peso) de cada meio nitreto (a 20 °C).

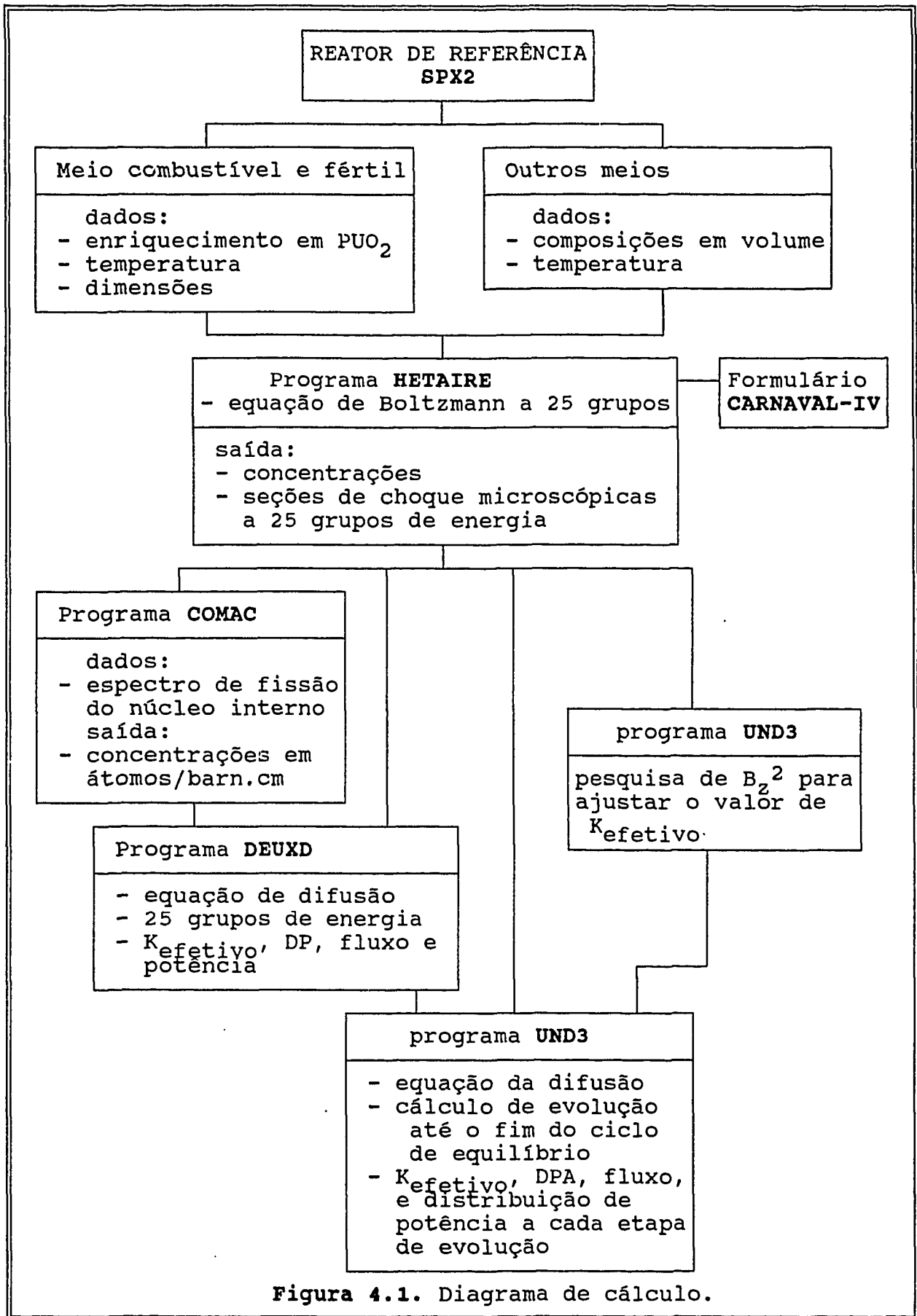
	combust.	fértil	combustível		combustível e fértil	
235U	0,42897	0,23313	238Pu	1,59524	Fe 66,66	Na 100,0
238U	94,0137	94,2096	239Pu	54,7494	Cr 14,5912	
16O	5,55733	5,55727	240Pu	21,10201	Ni 15,59065	
			241Pu	10,7376	Si 0,29982	
			242Pu	5,15258	Mo 1,19928	
			241Am	1,14028	Ti 0,42974	
			16O	5,52289	Cu 0,04997	
					C 0,07995	
					Mn 1,19928	

Tabela 4.5. Corpos e porcentagens isotópicas (em peso) de cada meio não combustível e não fértil (a 20 °C).

	suivcpa	abscpa	piedcpa	suivcau	abscau1	abscau2
densidade total do meio	1,86322	3,11483	5,73293	1,61033	2,03191	2,96399
Fe	37,09053	44,20283	63,14731	31,03110	32,45107	46,27288
Cr	8,11877	9,67558	13,82235	6,79241	7,10323	10,12870
Ni	8,67485	10,33829	14,76909	7,25764	7,58975	10,82244
Mo	0,66730	0,79525	1,13608	0,55828	0,58382	0,83249
Ti	0,23911	0,28496	0,40710	0,20005	0,20920	0,29831
Cu	0,02780	0,03313	0,04733	0,02326	0,02432	0,03469
Si	0,16682	0,19881	0,28402	0,13957	0,14595	0,20812
Mn	0,61169	0,72898	1,04114	0,51175	0,53517	0,76312
C	0,04448	4,38651	0,07574	0,03722	3,75245	2,71348
Na	44,35868	14,76166	5,26956	53,44869	34,23402	18,97440
¹⁰ B	-	13,00516	-	-	2,45178	7,97683
¹¹ B	-	1,58881	-	-	10,91923	0,97451

Tabela 4.6. Corpos e porcentagens isotópicas (em peso) de cada meio não combustível e não fértil (a 20 °C).

	piedcau	vei	ves	pns	pnl
densidade total do meio	5,58635	2,26355	2,59736	2,83281	5,86735
Fe	62,80576	56,36451	57,10255	31,15116	63,42207
Cr	13,74759	12,33766	12,49921	6,81869	13,88249
Ni	14,68920	13,18270	13,35532	7,28573	14,83335
Mo	1,12994	1,01405	1,02733	0,56044	1,14103
Ti	0,40489	0,36337	0,36813	0,20082	0,40887
Cu	0,04708	0,04225	0,04280	0,02335	0,04754
Si	0,28248	0,25351	0,25683	0,14011	0,28526
Mn	1,03578	0,92955	0,94172	0,51374	1,04594
C	0,07533	0,06760	0,06849	9,28325	0,07607
Na	5,78194	15,44478	14,33761	10,73138	4,85740
10B	-	-	-	6,10449	-
11B	-	-	-	27,18683	-



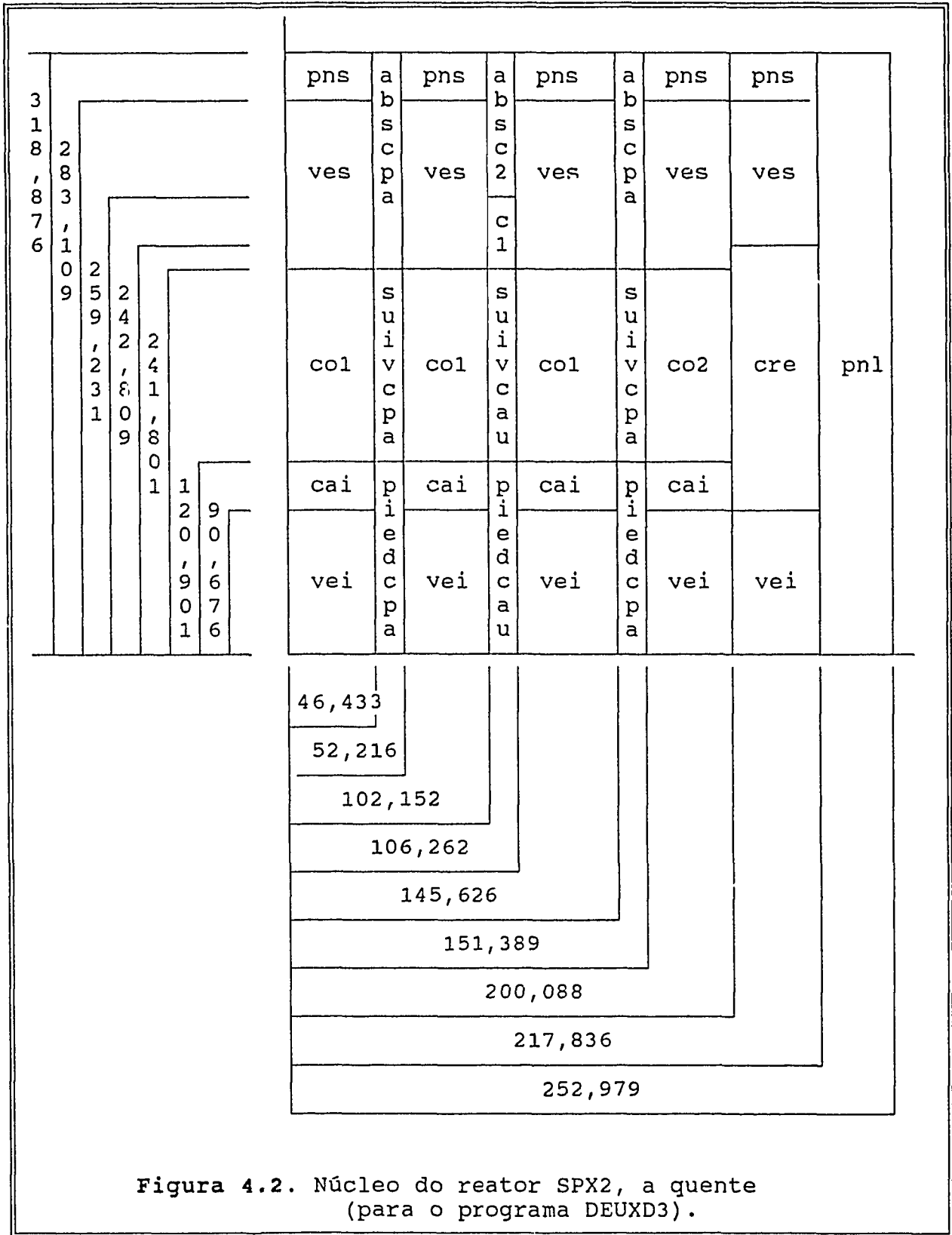
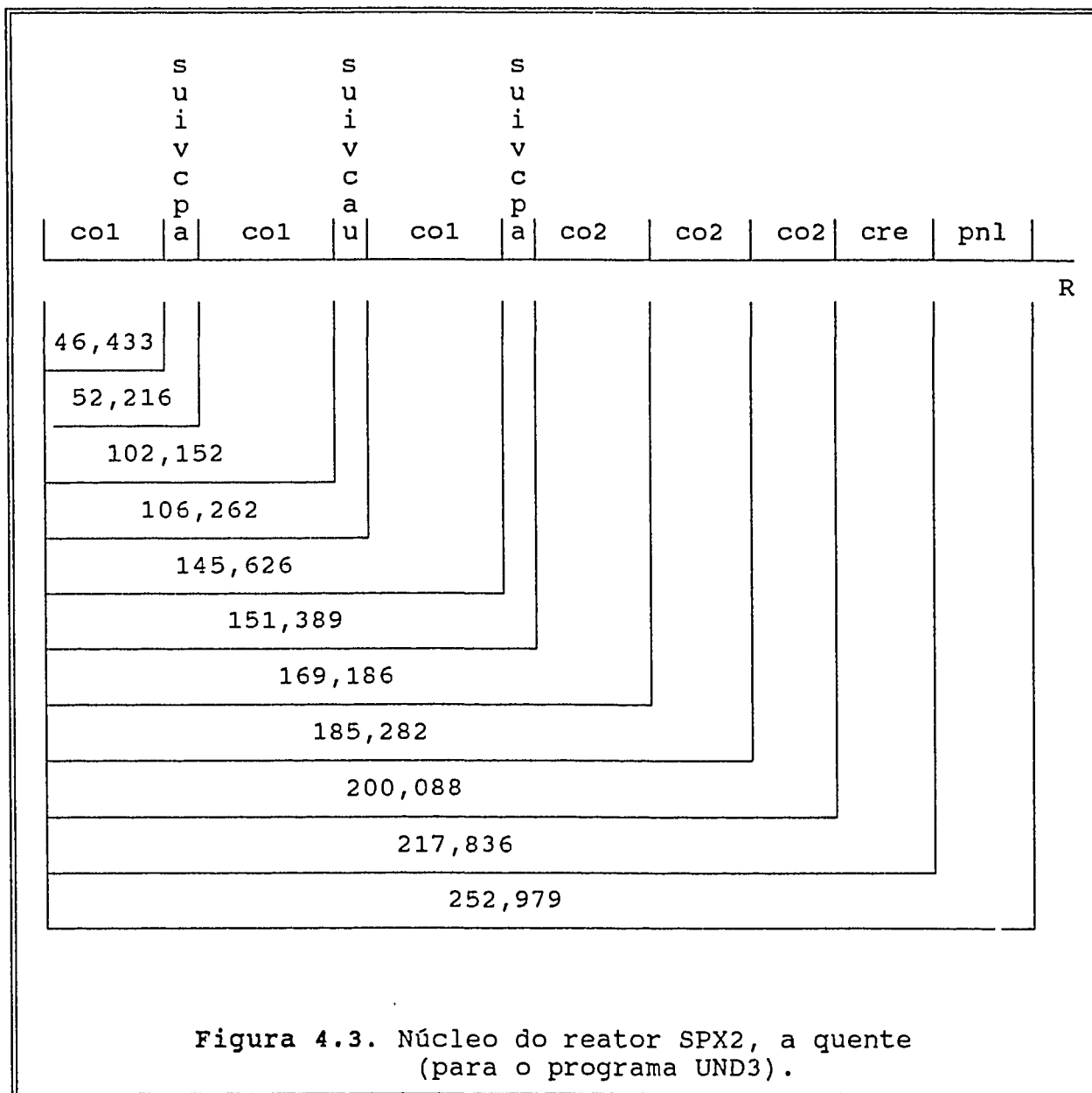


Figura 4.2. Núcleo do reator SPX2, a quente (para o programa DEUXD3).



5. RESULTADOS

5.1. Cálculos celulares.

A tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos para uma célula "óxido" em comparação a uma célula "nitreto".

Verifica-se que o espectro é mais duro para o combustível nitreto e que para um mesmo enriquecimento volumétrico obtém-se mais 16% de elementos pesados de ^{239}Pu para o combustível nitreto

em relação ao combustível óxido, o que nos dá uma reatividade mais elevada.

Ao compararmos as células óxido e nitreto com o mesmo número de átomos de plutônio, verifica-se que o ganho de regeneração externa é maior para o combustível óxido e que o ganho de regeneração interno é muito mais elevado para o combustível nitreto.

É então a conjugação de um enriquecimento menos acentuado com um ganho de regeneração interno maior que permitirá ao combustível nitreto, após algumas etapas de evolução do combustível, um mesmo nível de reatividade que o combustível óxido.

5.2. Cálculos do reator.

Três tipos de cálculo foram efetuados. Os dois primeiros sendo do núcleo, com o combustível óxido, com pastilha plena e pastilha vazada. No terceiro cálculo do núcleo utilizou-se o combustível com os mesmos parâmetros do núcleo óxido com pastilha plena.

Como a frequência de carregamento-descarregamento do núcleo é 4, com uma duração de ciclo ao equilíbrio de 350 depp (dias equivalentes a plena potência), foi suposto que o início do ciclo de equilíbrio ICE (com 1/4 do núcleo a 0 depp + 1/4 do núcleo a 350 depp + 1/4 do núcleo a 700 depp + 1/4 do núcleo a 1050 depp), bem como o fim do ciclo de equilíbrio FCE (com 1/4 do núcleo a 350 depp + 1/4 do núcleo a 700 depp + 1/4 do núcleo a 1050 depp + 1/4 do núcleo a 1400 depp), corresponde a uma evolução do núcleo de início de 525 depp a 875 depp.

Reatividade. As tabelas 5.2 a 5.6 apresentam os valores obtidos e corrigidos do fator axial (apêndice A) para o início e fim de ciclo, para os três núcleos calculados.

Podemos observar através da tabela 5.2 que a perda de reatividade do núcleo óxido com pastilha plena, de 2611 pcm é comparável ao valor de 2600 pcm, dado como parâmetro de

funcionamento no capítulo 3.2, com uma reatividade suplementar em fim de ciclo de 2301 pcm.

Para o núcleo óxido com pastilha vazada com quase a mesma reatividade em fim de ciclo (2318 pcm), a perda em reatividade é maior (3273 pcm), dando um intervalo entre os dois núcleos óxidos de 662 pcm (+ 25%).

Para o núcleo nitreto, com 2282 pcm em fim de ciclo, sua forte densidade em átomos pesados e seu mais acentuado ganho de regeneração interna fazem diminuir a perda de reatividade para 1764 pcm.

Ganho de regeneração. Os ganhos de regeneração interna (Tabela 5.4) como havíamos previsto no capítulo 5.1, são maiores para o núcleo nitreto. O ganhos de regeneração externa na região fértil radial são equivalentes para os três núcleos.

Na tabela 5.7 observamos que a massa de plutônio para colocar em equilíbrio o reator é de -1% para o núcleo óxido com pastilha vazada e de + 6% para o núcleo nitreto em comparação ao núcleo óxido com pastilha plena.

Observe-se ainda que em fim de ciclo de equilíbrio um ganho apreciável em massa de plutônio para o núcleo nitreto em relação aos núcleos óxidos.

Potência. A tabela 5.5 mostra os valores das potências lineares (apêndice A), que são inferiores ao valor máximo de 480 w/cm dado no capítulo 3.3, bem como a equivalência da relação de potências em fim do ciclo de equilíbrio.

DPA. Finalmente, a Tabela 5.3 apresenta a diminuição do nível de fluxo para o núcleo nitreto em comparação aos núcleos óxidos (- 12% com o núcleo nitreto em relação ao núcleo óxido com pastilha plena), que faz diminuir os valores de DPA mostrados na Tabela 5.6, embora que em um nível mais acentuado (- 6% com núcleo nitreto, em relação ao núcleo óxido com pastilha plena), por causa do endurecimento do espectro.

Tabela 5.1. Cálculos celulares.

TIPO	ÓXIDO	ÓXIDO	NITRETO
enriquecimento volumétrico	15,586 %	15,586 %	13,4498 %
número de átomos de ^{239}Pu por barn.cm	$0,792217 \cdot 10^{-3}$	$0,918040 \cdot 10^{-3}$	$0,792214 \cdot 10^{-3}$
densidade de preenchimento real	0,89632	0,780	0,780
dureza do espectro	0,323562	0,383963	0,343142
% fissão	34,1	34,0	34,0
% captura	44,3	42,9	50,2
ganho regeneração interno	- 0,136	- 0,141	0,023
ganho regeneração externo	0,642	0,688	0,466
K_{efetivo}	1,27339	1,29767	1,18357
seção de choque de absorção do ^{16}O	$8,61981 \cdot 10^{-4}$	-	-
seção de choque de absorção do N	-	0,0264523	0,0245786

Tabela 5.2. Reatividade

PARÂMETROS	núcleo óxido pastilha plena		núcleo óxido pastilha vazada		núcleo nitreto pastilha plena	
	ice	fce	ice	fce	ice	fce
K_{efetivo}	1,051662	1,023548	1,059216	1,023726	1,042164	1,023353
reatividade	4912	2301	5591	2318	4046	2282
perda de reatividade	2611		3273		1764	

obs: ice = início do ciclo de equilíbrio
 dce = fim do ciclo de equilíbrio

Tabela 5.3. Fluxo máximo

PARÂMETROS	núcleo óxido pastilha plena		núcleo óxido pastilha vazada		núcleo nitreto pastilha plena	
	núcleo interno	núcleo externo	núcleo interno	núcleo externo	núcleo interno	núcleo externo
(fluxo máximo ao dce). 10^{15}	4,80669	4,58220	5,23243	4,64243	4,21196	4,04712
(fluxo máximo ao ice). 10^{15}	5,48386	4,55068	5,70384	4,70734	4,78421	3,98188

Tabela 5.4. Ganho de regeneração

PARÂMETROS	núcleo óxido pastilha plena		núcleo óxido pastilha vazada		núcleo nitreto pastilha plena	
	ice	fce	ice	fce	ice	fce
núcleo	- 0,2274	- 0,1894	- 0,2797	- 0,2340	- 0,1664	- 0,1417
cre	0,0886	0,0792	0,0900	0,0833	0,0892	0,0796
núcleo+cre	- 0,1387	- 0,1103	- 0,1897	- 0,1687	- 0,0773	- 0,0622

obs: cre = região fértil radial

Tabela 5.5. Potências lineares

PARÂMETROS	núcleo óxido pastilha plena		núcleo óxido pastilha vazada		núcleo nitreto pastilha plena	
	ice	fce	ice	fce	ice	fce
q_c^I	389	433	408	429	372	417
q_{max}^E	446	419	435	414	427	402
q_c^I/q_{max}^E	0,87	1,03	0,94	1,04	0,87	1,04
$q_{max}/q_{médio}$	1,218	1,189	1,194	1,188	1,218	1,194

obs: q_c^I = potência linear no centro do núcleo interno (W/cm).
 q_{max}^E = potência linear máxima no núcleo externo (W/cm).
 q_{max} = potência linear máxima no núcleo (W/cm).
 $q_{médio}$ = potência linear média no núcleo (W/cm).
 $q_{max}/q_{médio}$ = achatamento em potência radial.

Tabela 5.6. Deslocamentos por átomo (DPA)

PARÂMETROS	núcleo óxido pastilha plena		núcleo óxido pastilha vazada		núcleo nitreto pastilha plena	
	ice	fce	ice	fce	ice	fce
DPA	231	208	246	210	218	195

Tabela 5.7. Massa de plutônio em Kg (núcleo + cobertura fértil radial).

	núcleo óxido pastilha plena	núcleo óxido pastilha vazada	núcleo nitreto pastilha plena
0 depp	8665,8	8613,5	9197,1
dce	8663,9	8493,6	9283,3
fce	8682,7	8301,4	9348,8

6. A CAPTURA DO NITROGÊNIO

Na tabela 6.1 podemos notar a importância das capturas dos nuclídeos ^{238}U , ^{239}Pu , ^{240}Pu , Fe e Si para o combustível óxido e através da tabela 6.2 a importância dos mesmos nuclídeos com a inclusão do nitrogênio para o combustível nitreto.

O nitrogênio com uma seção de choque de captura 30 vezes maior que a do oxigênio (tabela 5.1) tem uma enorme influência sobre a variação da reatividade durante a evolução do reator.

Para verificar esta sensibilidade do nitrogênio e a sua influência no nosso cálculo, foram refeitos os cálculos de evolução com a seção de choque de captura do nitrogênio dividida pela metade. Os resultados obtidos para o núcleo nitreto assim calculado, foi chamado núcleo nitreto com captura modificada.

Na tabela 6.3 são mostrados os resultados globais obtidos para este cálculo. Na figura 6.1 apresenta-se a comparação das reatividades com a evolução (núcleo 0 depp a fce) para os núcleos nitreto e nitreto com captura modificada, onde verificamos a grande diferença de reatividade entre os dois núcleos.

Tabela 6.1. Taxas de reação (em %) para células com 15,586% de enriquecimento volumétrico.

nucl.	combust.	captura	fissão	Vfissão	absorção
^{238}U	óxido	29,52	4,47	12,62	33,99
	nitreto	27,26	4,98	14,29	32,25
^{239}Pu	óxido	6,13	20,94	61,25	27,08
	nitreto	5,15	20,51	60,14	25,66
^{240}Pu	óxido	2,31	1,60	4,97	3,91
	nitreto	1,98	1,80	5,58	3,78
Fe	óxido	1,32	-	-	1,32
	nitreto	1,04	-	-	1,04
Si	óxido	1,11	-	-	2,71
	nitreto	0,92	-	-	0,92
N	nitreto	3,50	-	-	3,50
Total	óxido	44,38	34,15	100,0	78,53
	nitreto	42,97	34,09	100,0	77,06

Tabela 6.2. Resultados dos cálculos, program DEUXD3 e UND3, núcleo nitreto perturbado.

programa usado	DEUXD3 (RZ)	UND3 evolução (R)					
depp	0	0	175	350	525	700	875
reat		8848	7661	6646	5704	4816	3968
B_z^2		0,00041613					
fmax ^I	4,15	3,29	3,27	3,25	3,39	3,62	3,84
fmax ^E	4,18	3,33	3,29	3,25	3,22	3,19	3,17
q^1		205	227	249	268	285	300
qmax ¹	345	271	268	264	268	285	300
qmax ²	433	318	327	315	304	295	287
$q^1/qmax^2$		0,64	0,69	0,79	0,88	0,97	1,05
qmax / qmédio	1,74	1,35	1,30	1,26	1,22	1,18	1,20
gri ^I	-0,0393						
gri ^E	-0,1841						
gri ^T	-0,2234	-0,2267	-0,2023	-0,1825	-0,1660	-0,1525	-0,1415
gre ^{CAI}	0,0934						
gre ^{CRE}	0,1170	0,1077	0,1007	0,0941	0,0883	0,0833	0,0788
grt	-0,1065	-0,1190	-0,1016	-0,0884	-0,0777	-0,0692	-0,0627
dpa ^I	0,160	0,127	0,127	0,128	0,135	0,145	0,153
dpa ^E	0,178	0,142	0,138	0,135	0,131	0,128	0,126

obs: depp = dias equivalente a plena potência (dias).
 reat = reatividade (pcm).
 B_z^2 = "buckling" axial (cm⁻²).
 fmax^I = fluxo máximo núcleo interno (nêutrons/cm².s).10¹⁵).
 fmax^E = fluxo máximo núcleo externo (nêutrons/cm².s).10¹⁵).
 q^1 = densid. potência no centro do núcleo interno (W/cm³).
 qmax¹ = densidade máxima de potência núcleo interno (W/cm³).
 qmax² = densidade máxima de potência núcleo externo (W/cm³).
 gri^I = ganho de regeneração interno núcleo interno.
 gri^E = ganho de regeneração interno núcleo externo.
 gri^I = ganho de regeneração interno núcleo interno.

gri^T = ganho de regeneração interno dos núcleos interno e externo.
 gre^{CAI} = ganho de regeneração externo da cobertura axial inferiora.
 gre^{CRE} = ganho de regeneração externo da cobertura radial externa.
 grt = ganho de regeneração total do reator.
 dpa^I = deslocamento por átomo núcleo interno (dpa/s). 10^{-5} .
 dpa^E = deslocamento por átomo núcleo externo (dpa/s). 10^{-5} .

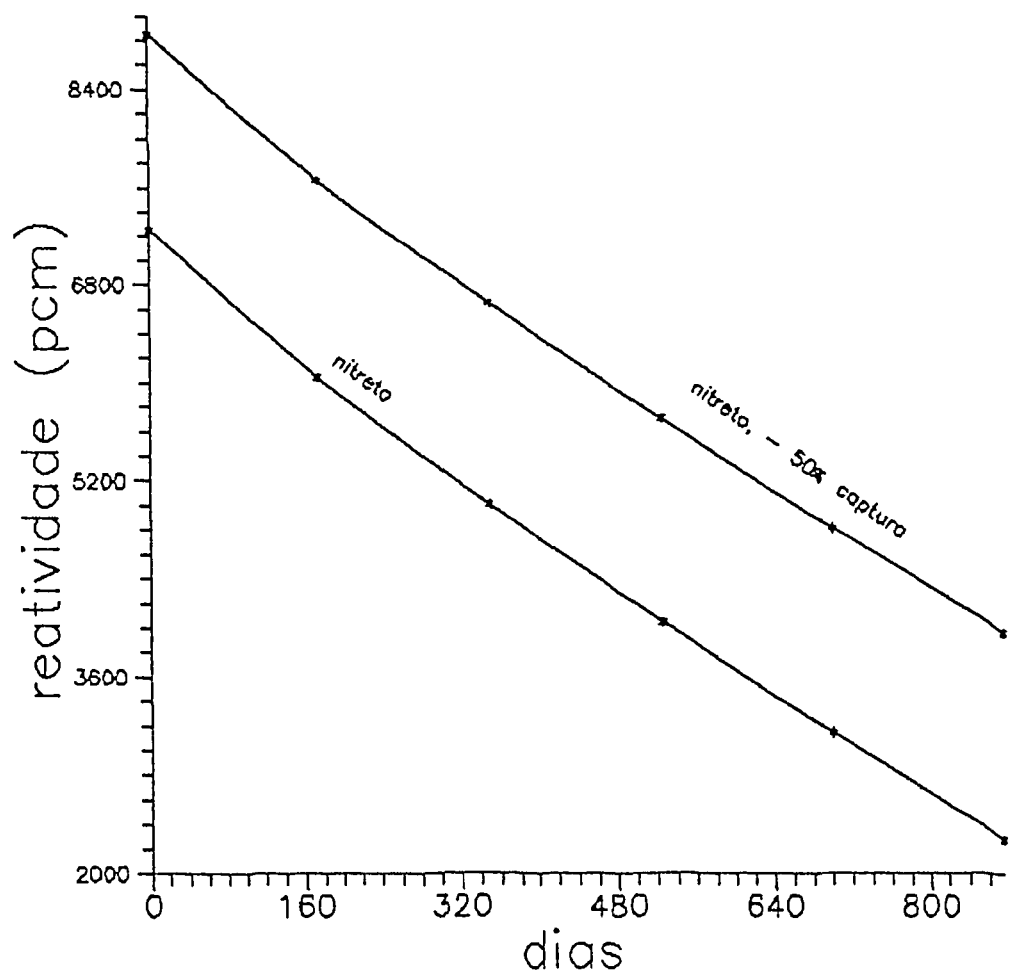


Figura 6.1. Reatividade do núcleo nitreto.

7. CONCLUSÕES

De acordo com o que foi apresentado nesta nota constata-se que comparando-se um reator de mesma geometria e mesma reatividade em fim de ciclo de equilíbrio, obtemos um ganho apreciável sobre a perda de reatividade do núcleo a combustível nitreto em relação aos núcleos óxidos.

Quanto aos parâmetros: ganho de regeneração, DPA, e achatamento de potência, não é observado nenhuma modificação acentuada, concluindo-se que a utilização do combustível nitreto não acarreta problemas neutrônicos.

Adicionalmente pode-se notar que a variação das seções de choque de captura do nitrogênio provocam uma grande variação sobre os resultados dos cálculos, o que torna necessário um estudo minucioso do nitrogênio no formulário de cálculo CARNAVAL e incita a se verificar a possibilidade do enriquecimento do nitrogênio em ^{15}N .

REFERÊNCIAS

- [1] Étude neutronique du réacteur SPX2 avec les combustibles oxyde et nitrure. J.L. Batista, C. Giacometti. Note technique CEA SPCI/LCSC/86/325, Centre de Études Nucléaires de Cadarache, France, 10.10.86.

- [2] Physique des réacteurs à neutrons rapides. J.Y. Barre. Rapport DRE/SPNR/77/010/JYB/BLF, Centre de Études Nucléaires de Cadarache, France, 07.02.77.

- [3] Projet 1500 (état de l'avant projet - Revision des fiches de recherche e développement 1500 de DRNR/SPCI). DRNR/SPCI/85.12/149 BS/MB, Centre de Études Nucléaires de Cadarache - France, 18.06.86

- [4] SPX2; fiche matériel de l'assemblage fertile. H. Freslon. Rapport NOVATOME - APD4 3870, France, (23.01.86).

- [5] C.R. de réunion d'avancement des études coeur assemblages. Rapport NOVATOME, EF/GG/PK.86/242, 03.03.86, France.

- [6] Formulaire CARNAVAL pour la filière à neutrons rapides. M. Desprets, M. Khairallah, M. Chaudat. DRNR/SEDC/SPNR/LPR/78/5032, Centre de Études Nucléaires de Cadarache, France, 20,04.78.

- [7] Comparaison des perfomances de divers matériaux combustibles utilisables dans les RNR. Projet de génie atomique INSTN, Centre de Études Nucléaires de Cadarache, France, juin 1984.

- [8] Étude paramétrique d'un réacteur à combustible nitrure. D. Bouscavet, D. Chantelou. Eletricité de France, direction des études e recherche. France, 25.08.84.

- [9] CORA 1N, ensemble des programmes neutroniques "PROJET".
Notices d'utilisation. C. Giacometti - R. Taix - D. Riou,
DRNR/SEDC/SPNR/LPR/80/5190/CG/BLF, Centre d'Études Nucleaires
de Cadarache - France, 15.10.80.
- [10] Code 1D3, version L1, code de diffusion à une dimension.
J.C. Cabrillat, J.M. Vandeborre,
DRNR/SEDC/SPNR/81/6128/JCC/F.Ext, Centre d'Études Nucleaires
de Cadarache - France, 09.10.81.
- [11] Elaboration d'une méthode simplifiée de calcul neutronique
des réacteurs de la filière rapide. A. Zaetta. Thèse
présentée à l'Université de Paris Sud.

APÊNDICE A

A.1. Correção axial.

$$\text{fator axial} = \frac{\text{fluxo, potência ou dpa a 0 depp, a duas dimensões}}{\text{valor do fluxo, potência ou DPA, a uma dimensão}}$$

A.2. Potência linear. |11|

$$q' = \frac{S}{n \cdot fa \cdot q'''}$$

- q' = densidade linear de potência (W/cm).
 S = área ocupada pelo conjunto de elementos combustíveis (cm²).
 n = número de elementos por conjunto combustível.
 q''' = densidade de potência (W/cm³).

A.3. DPA.

$$DPA = dpa^m \cdot t_e$$

- DPA = deslocamento total por átomo.
 dpa^m = deslocamento por átomo instantâneo a meia vida do núcleo.
 t_e = tempo de estadia do combustível (segundos).

A.4. Resultados dos cálculos celulares.

Tabela A.1. Resultados dos cálculos celulares.

TIPO	ÓXIDO	ÓXIDO	ÓXIDO
enriquecimento volumétrico	15,586 %	17,979 %	20,745 %
número de átomos de ^{239}Pu por barn.cm	$0,792217 \cdot 10^{-3}$	$0,913850 \cdot 10^{-3}$	$1,05444 \cdot 10^{-3}$
densidade de preenchimento real	0,89632	0,89632	0,89632
ganho regeneração interno	- 0,136536	- 0,280212	- 0,402838
ganho regeneração externo	0,641779	0,843411	1,02177
dureza do espectro	0,323562	0,358953	0,398994
seção de choque de captura do ^{238}U	0,279711	0,263932	0,248529
seção de choque de fissão do ^{239}Pu	1,77013	1,73399	1,70334
Seção de choque de absorção do oxigênio	$8,61981 \cdot 10^{-4}$	$9,49469 \cdot 10^{-4}$	$1,04823 \cdot 10^{-3}$
% captura	44,3	37,7	31,9
% fissão	34,1	34,0	33,9
% fugas	21,66	28,3	34,2
K_{efetivo}	1,27339	1,39259	1,51707

Tabela A.2. Resultados dos cálculos celulares.

TIPO	NITRETO	NITRETO	NITRETO
enriquecimento volumétrico	13,4498 %	14,300 %	15,114 %
número de átomos de ^{239}Pu por barn.cm	$0,792214 \cdot 10^{-3}$	$0,842293 \cdot 10^{-3}$	$0,89023910^{-3}$
densidade de preenchimento real	0,780	0,780	0,780
ganho regeneração interno	0,0230179	- 0,0483493	- 0,108996
ganho regeneração externo	0,466021	0,561668	0,643882
dureza do espectro	0,343142	0,359507	0,375028
seção de choque de captura do ^{238}U	0,257936	0,252272	0,247192
seção de choque de fissão do ^{239}Pu	1,75707	1,74350	1,73195
seção de choque de absorção nitrogênio	0,0245786	0,0253335	0,0260447
% captura	50,2	47,1	44,3
% fissão	34,0	34,0	34,1
% fugas	15,7	18,9	21,6
K_{efetivo}	1,18357	1,23031	1,27341

Tabela A.3. Resultados dos cálculos celulares.

TIPO	NITRETO	NITRETO	NITRETO
enriquecimento volumétrico	15,586 %	16,466 %	18,970 %
número de átomos de ^{239}Pu por barn.cm	$0,918040 \cdot 10^{-3}$	$0,969873 \cdot 10^{-3}$	$1,11736910^{-3}$
densidade de preenchimento real	0,780	0,780	0,780
ganho regeneração interno	- 0,141169	- 0,196049	- 0,323084
ganho regeneração externo	0,687900	0,763642	0,942799
dureza do espectro	0,383963	0,400507	0,446808
seção de choque de captura do ^{238}U	0,244387	0,239412	0,226814
Seção de choque de fissão do ^{239}Pu	1,72583	1,71542	1,69169
Seção de choque de absorção nitrogênio	0,0264523	0,0272030	0,0292801
% captura	42,9	40,4	34,6
% fissão	34,0	34,0	33,9
% fugas	23,1	25,6	31,5
K_{efetivo}	1,29767	1,34156	1,39551

A.5. Resultados dos cálculos do reator.

Tabela A.4. Resultados dos cálculos, programa DEUXD3 e UND3, núcleo óxido com pastilha plena.

programa usado	DEUXD3 (RZ)	UND3 evolução (R)					
depp	0	0	175	350	525	700	875
reat	9527	9529	7828	6323	4912	3577	2301
B_z^2		0,00041969					
fmax ^I	4,64524	3,52853	3,51976	3,50651	3,65117	3,92946	4,16555
fmax ^E	4,71016	3,58782	3,54516	3,51011	3,49035	3,47517	3,46634
q^1		197,529	222,569	245,539	265,392	282,197	295,560
qmax ¹	362,298	272,742	268,203	263,977	265,392	282,197	295,560
qmax ²	457,596	344,468	329,517	316,212	304,670	294,697	286,220
$q^1/qmax^2$		0,573	0,675	0,776	0,871	0,957	1,033
qmax / qmédio	1,764	1,363	1,308	1,260	1,218	1,182	1,189
gri ^I	-0,0823						
gri ^E	-0,2270						
gri ^T	-0,3093	-0,3156	-0,2809	-0,2520	-0,2274	-0,2066	-0,1894
gre ^{CAI}	0,0991						
gre ^{CRE}	0,1174	0,1084	0,1012	0,0945	0,0885	0,0835	0,0792
grt	-0,1919	-0,2072	-0,1798	-0,1575	-0,1387	-0,1231	-0,1103
dpa ^I	0,16694	0,12684	0,12634	0,12715	0,13474	0,14500	0,15363
dpa ^E	0,18804	0,14345	0,13991	0,13646	0,13345	0,13091	0,12888

Tabela A.5. Resultados dos cálculos, programa DEUXD3 e UND3, núcleo óxido com pastilha vazada.

programa usado	DEUXD3 (RZ)	UND3 evolução (R)					
depp	0	0	175	350	525	700	875
reat	11038	11041	9104	7315	5591	3927	2318
B_z^2		0,00041190					
fmax ^I	4,54985	3,47709	3,54287	3,78212	3,99873	4,19094	4,35899
fmax ^E	4,54369	3,47528	3,50450	3,52748	3,55082	3,57506	3,60045
q^1		245,197	258,410	270,445	280,500	288,585	294,826
qmax ¹	351,319	265,970	262,816	270,445	280,500	288,585	294,826
qmax ²	432,299	327,297	316,790	307,140	298,558	290,958	284,244
$q^1/qmax^2$		0,749	0,816	0,880	0,940	0,992	1,037
qmax / qmédio	1,666	1,293	1,257	1,223	1,194	1,168	1,188
gri ^I	-0,1365						
gri ^E	-0,2320						
gri ^T	-0,3685	-0,3751	-0,3391	-0,3076	-0,2797	-0,2552	-0,2340
gre ^{CAI}	0,0978						
gre ^{CRE}	0,1106	0,1019	0,0978	0,0937	0,0900	0,0865	0,0833
grt	-0,2580	-0,2732	-0,2413	-0,2139	-0,1897	-0,1687	-0,1507
dpa ^I	0,16836	0,12804	0,13165	0,14028	0,14804	0,15486	0,16075
dpa ^E	0,17796	0,13647	0,13569	0,13474	0,13395	0,13344	0,13314

Tabela A.6. Resultados dos cálculos, programa DEUXD3 e UND3, núcleo nitreto com pastilha plena.

programa usado	DEUXD3 (RZ)	UND3 evolução (R)					
depp	0	0	175	350	525	700	875
reat	7253	7252	6041	5002	4046	3143	2282
B_z^2		0,0004154					
fmax ^I	4,14915	3,29484	3,27484	3,24947	3,34472	3,58653	3,79914
fmax ^E	4,18764	3,33204	3,28944	3,25302	3,22023	3,19163	3,16832
q^1		201,670	224,039	245,706	265,439	282,830	297,618
qmax ¹	345,545	271,952	268,159	264,394	265,439	282,830	297,618
qmax ²	433,535	341,156	327,906	315,769	304,974	295,487	287,243
$q^1/qmax^2$		0,591	0,683	0,778	0,870	0,957	1,036
qmax / qmédio	1,743	1,350	1,302	1,258	1,218	1,183	1,194
gri ^I	-0,0392						
gri ^E	-0,1850						
gri ^T	-0,2242	-0,2275	-0,2029	-0,1830	-0,1664	-0,1528	-0,1417
gre ^{CAI}	0,0936						
gre ^{CRE}	0,1181	0,1087	0,1017	0,0950	0,0892	0,0840	0,0796
grt	-0,1062	-0,1188	-0,1013	-0,0880	-0,0773	-0,0688	-0,0622
dpa ^I	0,16019	0,12723	0,12669	0,12716	0,13345	0,14316	0,15167
dpa ^E	0,17853	0,14237	0,13865	0,13489	0,13150	0,12862	0,12635

Tabela A.7. Massa em Kg para o núcleo óxido com pastilha plena.

	0 depp			ice			fce		
	NI	NE	CRE	NI	NE	CRE	NI	NE	CRE
²³⁵ U	95,7	77,8	37,6	66,0	57,1	31,8	50,2	46,7	28,6
²³⁶ U	-	-	-	6,7	4,5	1,5	9,8	6,6	2,3
²³⁸ U	20983	17048	15200	19979	16350	14922	19265	15911	14743
²³⁸ Pu	68,8	79,3	-	68,8	79,3	-	68,8	79,3	-
²³⁹ Pu	2362	2721	-	2415	2544	241,9	2423	2447	378
²⁴⁰ Pu	910,5	1049	-	989,4	1100	6,4	1043	1127	15,9
²⁴¹ Pu	463,3	533,6	-	339,0	401,2	0,1	284,6	343,1	0,4
²⁴² Pu	222,3	256,1	-	203,5	255,2	-	219,9	251,6	-
²⁴¹ Am	49,2	56,7	-	49,2	56,7	-	49,2	56,7	-
²³⁹ Np	-	-	-	5,8	3,7	1,6	6,0	3,6	1,6
PF	-	-	-	484,7	460,7	16,8	832,7	736,6	34,9

Tabela A.8. Massa em Kg para o núcleo óxido com pastilha vazada.

	0 depp			ice			fce		
	NI	NE	CRE	NI	NE	CRE	NI	NE	CRE
235U	86,7	70,4	37,6	58,1	52,3	32,0	43,4	42,7	28,7
236U	-	-	-	6,4	4,0	1,4	9,3	5,9	2,2
238U	19001	15442	15200	18018	14831	14932	17334	14427	14749
238Pu	69,4	77,8	-	69,4	77,8	-	69,4	77,8	-
239Pu	2381	2671	-	2356	2467	234,0	2322	2351	374
240Pu	917,9	1029	-	998,3	1078	6,0	1049	1103	15,5
241Pu	467,0	523,8	-	335,6	396,8	0,1	280,7	338,5	0,4
242Pu	224,1	251,4	-	224,9	250,7	-	220,7	247,2	-
241Am	49,6	55,6	-	49,6	55,6	-	49,6	55,6	-
239Np	-	-	-	5,6	3,3	1,6	5,7	3,3	1,6
PF	-	-	-	515,4	429,8	16,0	870,0	697,9	34,3

Tabela A.9. Massa em Kg para o núcleo nitreto com pastilha plena.

	0 depp			ice			fce		
	NI	NE	CRE	NI	NE	CRE	NI	NE	CRE
235U	118,5	97,0	45,9	85,9	74,3	39,8	67,9	62,7	36,5
236U	-	-	-	7,1	4,8	1,5	10,7	7,1	2,3
238U	25973	21252	18533	24920	20517	18254	24176	20061	18078
238Pu	73,2	84,0	-	73,2	84,0	-	73,2	84,0	-
239Pu	2512	2883	-	2630	2765	243,7	2680	2698	381
240Pu	968,0	1111	-	1029	1147	5,2	1072	1166	12,8
241Pu	492,6	565,5	-	368,0	434,5	-	309,9	374,3	0,3
242Pu	236,4	271,3	-	235,4	268,4	-	231,2	264,2	-
241Am	52,3	60,0	-	52,3	60,0	-	52,3	60,0	-
239Np	-	-	-	5,9	3,8	1,6	6,1	3,6	1,5
PF	-	-	-	488,7	458,7	16,9	839,6	733,8	34,0

- obs: depp = dias equivalente a plena potência (dias).
 reat = reatividade (pcm).
 B_z^2 = "buckling" axial (cm^{-2}).
 $f_{\text{max}}^{\text{I}}$ = fluxo máximo núcleo interno (nêutrons/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$). 10^{15}).
 $f_{\text{max}}^{\text{E}}$ = fluxo máximo núcleo externo (nêutrons/ $\text{cm}^2 \cdot \text{s}$). 10^{15}).
 q^1 = densid. potência no centro do núcleo interno (W/cm^3).
 q_{max}^1 = densidade máxima de potência núcleo interno (W/cm^3).
 q_{max}^2 = densidade máxima de potência núcleo externo (W/cm^3).
 g_{ri}^{I} = ganho de regeneração interno núcleo interno.
 g_{ri}^{E} = ganho de regeneração interno núcleo externo.
 g_{ri}^{I} = ganho de regeneração interno núcleo interno.
 g_{ri}^{T} = ganho de regeneração interno dos núcleos interno e externo.
 $g_{\text{re}}^{\text{CAI}}$ = ganho de regeneração externo da cobertura axial inferiora.
 $g_{\text{re}}^{\text{CRE}}$ = ganho de regeneração externo da cobertura radial externa.
 g_{rt} = ganho de regeneração total do reator.
 dpa^{I} = deslocamento por átomo núcleo interno (dpa/s). 10^{-5} .
 dpa^{E} = deslocamento por átomo núcleo externo (dpa/s). 10^{-5} .
 depp = dias equivalentes a plena potência.
 ice = início do ciclo de equilíbrio.
 fce = fim do ciclo de equilíbrio.
 NI = núcleo interno.
 NE = núcleo externo.
 cre = cobertura fértil axial.
 PF = produtos de fissão.

LEITORES INTERESSADOS NESTA PUBLICAÇÃO

FAVOR ENCAMINHAR SEUS PEDIDOS PARA

IEN - BIBLIOTECA

INSTITUTO DE ENGENHARIA NUCLEAR

CAIXA POSTAL 68550

CEP 21945 - RIO DE JANEIRO

RJ, BRASIL