

**MINISTÉRIO DA DEFESA
EXÉRCITO BRASILEIRO
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA NUCLEAR**

DANIEL CUNHA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO VETOR ISOTÓPICO DO PLUTÔNIO NA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO
INTERIOR DE UM HIPOTÉTICO EXPLOSIVO VISANDO À ANÁLISE PARA A
NÃO PROLIFERAÇÃO NUCLEAR**

Rio de Janeiro

2014

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

DANIEL CUNHA DA SILVA

**INFLUÊNCIA DO VETOR ISOTÓPICO DO PLUTÔNIO NA DISTRIBUIÇÃO DE
TEMPERATURA NO INTERIOR DE UM HIPOTÉTICO EXPLOSIVO VISANDO À
ANÁLISE PARA A NÃO PROLIFERAÇÃO NUCLEAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Prof. Dalton Ellery Girão Barroso – D.C.

Prof. Claudio Luiz de Oliveira– Ph.D.

Rio de Janeiro

2014

C 2014

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

Praça General Tibúrcio, 80 – Praia Vermelha

Rio de Janeiro – RJ CEP: 22290-270

Este exemplar é de propriedade do Instituto Militar de Engenharia, que poderá incluí-lo em base de dados, armazenar em computador, microfilmар ou adotar qualquer forma de arquivamento.

É permitida a menção, reprodução parcial ou integral e a transmissão entre bibliotecas deste trabalho, sem modificação de seu texto, em qualquer meio que esteja ou venha a ser fixado, para pesquisa acadêmica, comentários e citações, desde que sem finalidade comercial e que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos expressos neste trabalho são de responsabilidade do(s) autor(es) e do(s) orientador(es).

539.722	Silva, Daniel Cunha da
S586i	Influência do vetor isotópico de plutônio na distribuição de temperatura no interior de um hipotético explosivo visando à análise para a não proliferação nuclear / Daniel Cunha da Silva, orientado por Barroso, Dalton Ellery Girão e Oliveira, Claudio Luiz de – Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014.
	120p. : il
	Dissertação (mestrado) – Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2014.
	1. Curso de Engenharia Nuclear – teses e dissertações. 2. Vetor isotópico. 2. Energia nuclear I. Barroso, Dalton Ellery Girão. II. Oliveira, Cláudio Luiz de. III. Título. IV. Instituto Militar de Engenharia.

INSTITUTO MILITAR DE ENGENHARIA

DANIEL CUNHA DA SILVA

**A INFLUÊNCIA DO VETOR ISOTÓPICO DO PLUTÔNIO NA DISTRIBUIÇÃO DE
TEMPERATURA NO INTERIOR DE UM HIPOTÉTICO EXPLOSIVO VISANDO À
ANÁLISE PARA A NÃO PROLIFERAÇÃO NUCLEAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Nuclear do Instituto Militar de Engenharia, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciências em Engenharia Nuclear.

Orientadores: Prof. Dalton Ellery Girão Barroso – D.C.

Prof. Claudio Luiz de Oliveira – Ph.D.

Aprovada em 21 de Agosto de 2014, pela seguinte Banca Examinadora:

Prof. Dalton Ellery Girão Barroso – D.C. do IME– Presidente

Prof. Claudio Luiz de Oliveira – Ph.D. do IME

Prof. Wilson Freitas Rebello da Silva Junior – D.C. da UERJ

Prof. Sergio de Oliveira Vellozo – D.C. do IME

Prof. Ronaldo Glicério Cabral – Ph.D. do IME

Maj. João Claudio Batista Fiel – D.C. do IME

Rio de Janeiro

2014

Aos meus pais Manuel e Nelcy, exemplos de perseverança.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus em suas diversas formas de se apresentar e nos apoiar durante essa etapa chamada vida.

Agradeço aos meus pais, Manuel e Nelcy pelo apoio e amor em todos os momentos. Cada um de seus atos foi uma oportunidade que eu tive para crescer e me tornar o que sou.

Aos professores pelo tempo e paciência a mim dedicados e pelo espírito crítico o qual espero, pelo menos em parte, ter adquirido.

Aos meus queridos amigos, que me apoiaram e torceram pela realização desta etapa, em especial Aline, Célio, Gabriel, Josimar e minha irmã Michele.

Ao Instituto Militar de Engenharia, pela oportunidade.

À CAPES, pelo apoio financeiro.

Agradeço especialmente aos professores Claudio e Dalton pela orientação e a compreensão pela perda do meu saudoso irmão Marcelo, que foram imprescindíveis para realização deste trabalho.

“Quando você vê algo que é tecnicamente apetecível você vai em frente e fá-lo, e apenas discute o que fazer com isso após ter alcançado o sucesso técnico. Foi assim que aconteceu com a bomba atômica.”

JULIUS ROBERT OPPENHEIMER

SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES	8
LISTA DE TABELAS	15
1. INTRODUÇÃO	18
2. CRITICALIDADE	21
2.1 A Equação de Transporte de Nêutrons.....	21
2.1.1 O Código de Transporte ANISN.....	22
2.2 Composições isotópicas do plutônio	23
2.3 Configuração do Hipotético Explosivo Nuclear.....	26
3. ANÁLISE TÉRMICA	29
3.1 Equação da Condutividade Térmica	29
3.1.1 Solução Analítica.....	30
3.1.2 Solução Numérica	31
3.2 Condições de Contorno.....	33
3.2.1 Convecção Natural.....	33
3.2.2 Radiação Térmica.....	35
3.2.3 O Processo Iterativo do Cálculo de <i>TS</i>	38
3.3 O Programa ATNA.....	44
3.4 A Temperatura no Interior da Fat Man.....	47
4. RESULTADOS E CONCLUSÕES	50
4.1 Resultados Numéricos da Distribuição de Temperatura no Interior dos Hipotéticos Explosivos Nucleares.....	51
4.1.1 Composição Isotópica <i>Weapon-Grade</i>	52
4.1.2 Composição Isotópica PWR 33MW-d/kg.....	60
4.1.3 Composição Isotópica HWR 7500MW-d/t.....	68
4.1.4 Composição Isotópica FBR-Blanket.....	76
4.2 Conclusões Finais	84
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	86
6. APÊNDICES	87
6.1 Código do Programa ATNA	88
6.2 Arquivos de Entrada do Programa ATNA.....	105
6.3 Arquivo de Saída do Programa ATNA	106

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIG. 1.1 Configuração básica de um explosivo nuclear de implosão.	19
FIG. 2.1 Configuração do Hipotético Explosivo Nuclear.	26
FIG. 3.1 Partição do intervalo $[0,R]$	31
FIG. 3.2 Inclusão dos pontos intermediários à família de índices.....	31
FIG. 3.3 Detalhe da partição refinada.	32
FIG. 3.4 Gráfico $hc, r \times \Delta T$, para uma superfície esférica de aço polido com um raio de 21 cm e temperatura ambiente de 20°C.....	39
FIG. 3.5 Gráfico $f(\Delta T) \times \Delta T$, função auxiliar $f(\Delta T)$	40
FIG. 3.6 Gráfico $f(\Delta T) \times \Delta T$, contendo a função auxiliar $f(\Delta T)$ e reta identidade.	41
FIG. 3.7 Representação gráfica da sequencia x_n	42
FIG. 3.8 Gráfico $f(\Delta T) \times \Delta T$, contendo função auxiliar $f(\Delta T)$, a reta identidade e a sequência x_n	42
FIG. 3.9 Representação gráfica da sequencia x_n	43
FIG. 3.10 Gráfico $f(\Delta T) \times \Delta T$, contendo função auxiliar $f(\Delta T)$, a reta identidade e a sequência x_n	43
FIG. 3.11 Configuração de um hipotético explosivo nuclear similar a um dos casos estudados por Kessler.....	44
FIG. 3.12 Gráfico $T \times r$, solução numérica e analítica.....	45
FIG. 3.13 Gráfico $T \times r$, solução numérica realizada por Kessler.....	46
FIG. 3.14 Configuração da bomba nuclear <i>Fat Man</i>	47
FIG. 3.15 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior da <i>Fat Man</i> para as composições isotópicas de plutônio.	48
FIG. 4.1 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de berílio de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.....	52
FIG. 4.2 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de berílio de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.....	53

FIG. 4.3 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de berílio de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.....	53
FIG. 4.4 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.....	54
FIG. 4.5 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de urânio natural de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.....	54
FIG. 4.6 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de urânio natural de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.....	55
FIG. 4.7 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de berílio de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.....	56
FIG. 4.8 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de berílio de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.....	56
FIG. 4.9 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de berílio de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.....	57
FIG. 4.10 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de urânio natural de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.....	57
FIG. 4.11 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de urânio natural de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.....	58
FIG. 4.12 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição <i>Weapon-Grade</i> , cobertura de urânio natural de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.....	58

FIG. 4.13 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.....	60
FIG. 4.14 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.....	61
FIG. 4.15 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.....	61
FIG. 4.16 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.....	62
FIG. 4.17 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.....	62
FIG. 4.18 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.....	63
FIG. 4.19 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	64
FIG. 4.20 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	64
FIG. 4.21 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	65
FIG. 4.22 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	65

FIG. 4.23 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	66
FIG. 4.24 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	66
FIG. 4.25 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.....	68
FIG. 4.26 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.....	69
FIG. 4.27 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.....	69
FIG. 4.28 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.....	70
FIG. 4.29 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.....	70
FIG. 4.30 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.....	71
FIG. 4.31 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	72
FIG. 4.32 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	72

FIG. 4.33 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	73
FIG. 4.34 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	73
FIG. 4.35 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	74
FIG. 4.36 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	74
FIG. 4.37 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.....	76
FIG. 4.38 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.....	77
FIG. 4.39 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR FBR-Blanket, cobertura de berílio de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.....	77
FIG. 4.40 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.....	78
FIG. 4.41 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.....	78
FIG. 4.42 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.....	79

FIG. 4.43 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	80
FIG. 4.44 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	80
FIG. 4.45 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	81
FIG. 4.46 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	81
FIG. 4.47 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	82
FIG. 4.48 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.	82
FIG. 6.1 Arquivo de entrada ATNA_PU.DAT para plutônio de composição Weapon-Grade.	105
FIG. 6.2 Arquivo de entrada ATNA_CAMADAS.DAT para o hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B de alto-explosivo.	105
FIG. 6.3 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT para o hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B de alto-explosivo.	106
FIG. 6.4 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	107
FIG. 6.5 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	108
FIG. 6.6 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	109
FIG. 6.7 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	110
FIG. 6.8 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	111
FIG. 6.9 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	112

FIG. 6.10 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação)	113
FIG. 6.11 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	114
FIG. 6.12 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	115
FIG. 6.13 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	116
FIG. 6.14 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	117
FIG. 6.15 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	118
FIG. 6.16 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	119
FIG. 6.17 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).	120

LISTA DE TABELAS

TAB. 1.1 Propriedades dos Isótopos de Plutônio.....	19
TAB. 2.1 Criticalidade nas montagens críticas JEZEBEL, JEZEBEL-Pu e FLATTOP-Pu por meio do código ANISN e as seções de choque de Hansen-Roach.	23
TAB. 2.2 Descrição da composição isotópica Weapon-Grade.	24
TAB. 2.3 Descrição da composição isotópica PWR 33MW-d/kg.....	24
TAB. 2.4 Descrição da composição isotópica HWR 7500MW-d/t.....	25
TAB. 2.5 Descrição da composição isotópica FBR-Blanket.	25
TAB. 2.6 Propriedades dos núcleos físséis dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam plutônio de composição Weapon-Grade.	27
TAB. 2.7 Propriedades dos núcleos físséis dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam plutônio de composição PWR 33MW-d/kg.....	27
TAB. 2.8 Propriedades dos núcleos físséis dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam plutônio de composição HWR 7500MW-d/t.....	28
TAB. 2.9 Propriedades dos núcleos físséis dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam plutônio de composição FBR-Blanket.	28
TAB. 3.1 Propriedades termodinâmicas do ar à 1 atm.	34
TAB. 3.2 Emissividade de alguns materiais.	36
TAB. 3.3 Coeficientes de condutividade térmica utilizados por Kessler.....	45
TAB. 3.4 Comparação entre o resultado obtido por meio do programa ATNA e o resultado obtido por Kessler.	46
TAB. 3.5 Coeficientes de condutividade térmica utilizados na determinação da distribuição de temperatura no interior da <i>Fat Man</i>	48
TAB. 4.1 Coeficientes de condutividade térmica utilizados na determinação da distribuição de temperatura no interior dos hipotéticos explosivos nucleares.....	50
TAB. 4.2 Temperaturas críticas dos alto-explosivos.	51

RESUMO

Este trabalho estuda a influência do vetor isotópico do plutônio na distribuição de temperatura no interior de hipotéticos explosivos nucleares do tipo implosão.

O objetivo principal é determinar a distribuição de temperatura devido ao calor gerado pelo decaimento alfa dos diversos isótopos do plutônio utilizado no explosivo, bem como fazer uma análise da influência das temperaturas geradas nos outros componentes do explosivo, particularmente no alto-explosivo químico usado para a implosão da massa físsil e cuja temperatura de fusão não pode ser ultrapassada.

Dois composições isotópicas típicas são consideradas: uma, característica do plutônio usado em explosivos nucleares (*weapon-grade plutonium*), com alta porcentagem do isótopo Pu^{239} , e outras, características do plutônio produzido em reatores nucleares de potência (*reactor-grade plutonium*), com altas porcentagens dos isótopos pares Pu^{238} e Pu^{240} , os quais contribuem mais significativamente para a geração de calor devido ao decaimento alfa.

Neste intuito, primeiramente serão definidas configurações de hipotéticos explosivos nucleares, consistindo basicamente de uma massa físsil (plutônio), de uma cobertura ou refletor de nêutrons (urânio-natural ou Berílio) e de um alto-explosivo químico (Composto B ou PBX-9404), respeitando-se a condição de que os hipotéticos explosivos nucleares sejam inicialmente subcríticos nas suas configurações pré-montagem supercrítica. Os cálculos de criticalidade serão realizados pelo código de transporte ANISN e usando-se as seções de choque de Hansen-Roach, a 16 grupos de energia.

Uma vez definidas as configurações dos hipotéticos explosivos nucleares, foi feita a análise térmica por meio de um programa de computador, desenvolvido nesta dissertação, em linguagem FORTRAN, o qual soluciona numericamente a equação estática de condutividade térmica considerando simetria esférica e, como condições de contorno, a convecção natural e a emissão de radiação térmica.

Com os resultados obtidos, foram feitas considerações sobre a possibilidade de fabricação de explosivos nucleares usando o plutônio proveniente de reatores nucleares de potência, portanto com altas porcentagens de isótopos pares, os quais geram mais altas quantidades de calor e, portanto, mais altas temperaturas no interior do explosivo nuclear, podendo inviabilizar completamente a fabricação do mesmo.

Tal análise, evidentemente, tem implicações e grande importância nas discussões gerais sobre o uso da energia nuclear e o problema associado da proliferação de armas nucleares.

ABSTRACT

This work studies the influence of the isotopic vector of plutonium on the temperature distribution within the hypothetical nuclear explosive implosion type.

The main objective is to determine the temperature distribution due to heat generated by alpha decay of various isotopes of plutonium used in the explosive, as well as to analyze the influence of the temperatures generated on the other components of the explosive, particularly on the chemical high-explosive used to imploded the fissile mass and whose melting temperature may not be exceeded.

Two typical isotopic compositions are considered: one characteristic of the plutonium used in nuclear explosives (weapon-grade plutonium), with high percentages of the isotope Pu^{239} , and others characteristics of the plutonium produced in nuclear power reactors (reactor-grade plutonium), with high percentages of the pairs isotopes Pu^{238} and Pu^{240} , which contribute most significantly to the generation of heat due to alpha decay.

For this purpose, we first set up the hypothetical nuclear explosives, consisting basically of a fissile mass (plutonium), a cover or neutron reflector (natural uranium or beryllium) and a chemical high-explosive (Composite B or PBX-9404), all subject to the condition that the hypothetical nuclear explosive is initially subcritical in its pre-assembly supercritical configuration. The criticality calculations are performed by the transport code ANISN and using the 16 energy groups Hansen-Roach cross sections library.

Once the hypothetical nuclear explosives are defined, the thermal analysis is performed using a computer program developed in this thesis, in FORTRAN language, which solves numerically the static equation of thermal conductivity in spherical symmetry and with boundary conditions given by natural convection and thermal radiation emission.

With the results obtained, we discuss the possibility of making nuclear explosives using plutonium from nuclear power reactors, which contain high percentages of the pair isotopes and, consequently, with generation of high amounts of heat and high temperatures inside the explosive.

This analysis, of course, has implications and great importance to the general discussions about the use of nuclear energy and about the associated problem of the nuclear weapons proliferation.

1. INTRODUÇÃO

Durante o período de 1942 a 1945 os Estados Unidos desenvolveram o famoso Projeto Manhattan, cuja finalidade era construir a bomba atômica, antes que os alemães o fizessem, durante a Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, ficou demonstrado que os alemães jamais teriam condições de construir a bomba atômica, no tempo hábil do conflito.

O Projeto Manhattan reuniu a maior constelação de cientistas jamais reunida, totalizando 21 prêmios Nobel, presentes e futuros. Além de desenvolver avanços significativos na área de pesquisa nuclear, como no campo das interações dos nêutrons com a matéria, desenvolvimento de métodos de separação isotópica, foi capaz de desenvolver três explosivos nucleares. O primeiro, chamado de Trinity, era uma bomba atômica de implosão, a base de plutônio que foi detonada durante um teste em Alamogordo, próximo a Los Alamos. O segundo, Little Boy, de urânio, foi detonado em Hiroshima utilizando um método de detonação balístico. O terceiro, Fat Man, também de implosão, a base de plutônio, foi detonada em Nagasaki. (BARROSO, 2009)

Neste trabalho será considerado o modelo do explosivo nuclear de implosão, com utilização do plutônio, conforme se vê na figura FIG. 1.1. O núcleo físsil consiste de uma massa de plutônio que pode estar em sua fase alotrópica normal, conhecida como fase alfa, ou estabilizado na fase delta (com a adição de um pequeno percentual de gálio), podendo a mesma estar na forma oca, compacta ou ainda conter uma fonte de nêutrons, em formato esférico, em seu interior. A cobertura da massa físsil poderá ser composta de uma ou mais camadas, sendo a camada que circunda o núcleo físsil geralmente composta de urânio natural ou berílio, os quais têm a propriedade de serem excelentes refletores de nêutrons de volta à massa físsil. Finalmente, a cobertura é circundada por uma camada de alto-explosivo químico cuja detonação, esfericamente convergente, deve ser suficiente para implodir e comprimir a massa físsil até as condições desejadas.

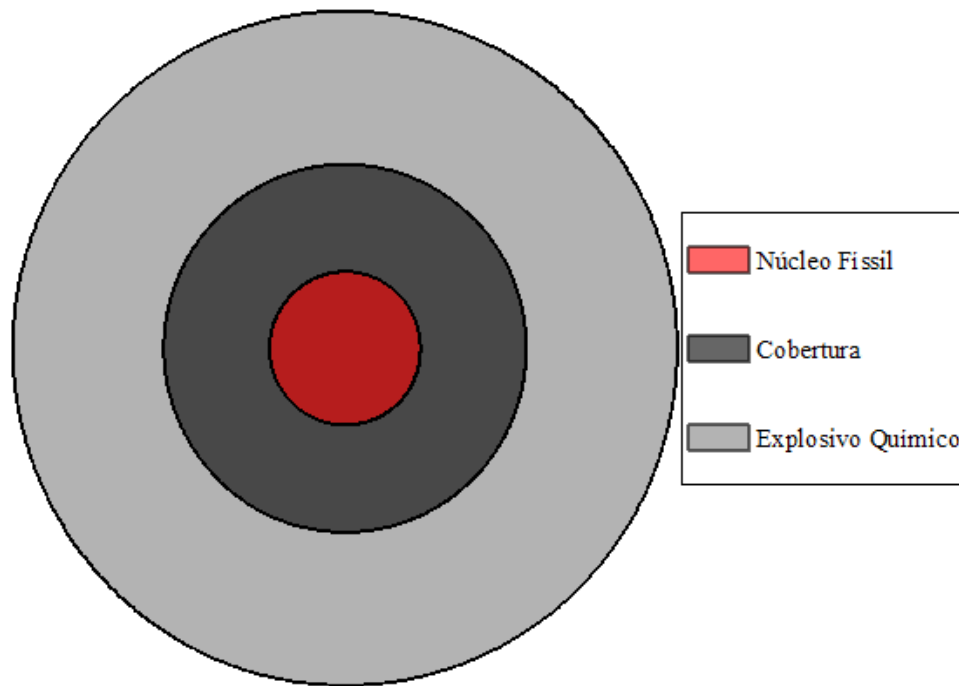


FIG. 1.1 Configuração básica de um explosivo nuclear de implosão.

Um projeto de explosivo nuclear de implosão cujo núcleo fissil é composto de plutônio enfrenta dois grandes desafios: a fissão espontânea que pode provocar uma pré-ignição do sistema; e a produção de calor, devido ao decaimento alfa dos isótopos do plutônio, que, dependendo de sua amplitude, pode provocar a dilatação do sistema, principalmente da camada de explosivo químico que, normalmente, têm ponto de fusão bem inferior aos dos outros materiais usados no explosivo nuclear.

TAB. 1.1 Propriedades dos Isótopos de Plutônio.

Isótopos	Fonte de Nêutrons por Fissão Espontânea [n/g-s] ¹	Produção de Calor pelo Decaimento Alfa [W/kg] ¹	Meia-Vida [em anos] ²
Pu-238	2800	570	87,7
Pu-239	0,02	1,9	24110
Pu-240	910	6,8	6564
Pu-241	0,05	3,3 ^(*)	14,35
Pu-242	1700	0,15	373300

(Fonte: 1 - KESSLER,2011; 2 - KAERI,2014; (*) decaimento β)

A tabela TAB 1.1 exibe características dos isótopos do plutônio em relação à produção de nêutrons por fissão espontânea, a produção de calor devido ao decaimento alfa e suas respectivas meias-vidas.

O objetivo deste trabalho é analisar a influência da composição isotópica do plutônio na distribuição de temperatura do interior de um hipotético explosivo nuclear devido ao calor gerado pelo decaimento alfa. Kessler, em seu artigo *Plutonium Denaturing ²³⁸Pu*, apresentou um estudo similar ao apresentado neste trabalho. Diferentemente do trabalho de Kessler, que priorizou composições isotópicas de plutônio ricas no seu isótopo 238 do plutônio, a análise neste trabalho será feita em composições isotópicas realistas como a *Weapon-Grade*, própria para armas nucleares, e composições isotópicas de plutônio típicas das existentes no plutônio proveniente da queima de elementos combustíveis em reatores nucleares de potência. O objetivo é analisar a possibilidade de estes últimos serem usados para a construção de armas nucleares.

Assim, primeiramente, são definidas configurações de hipotéticos explosivos nucleares, respeitando a condição de que estes sejam inicialmente subcríticos, usando para isso o código de transporte ANISN e as seções de choque de Hansen-Roach, a 16 grupos de energia (esta etapa está apresentada no capítulo 2). Uma vez definidas as configurações dos hipotéticos explosivos nucleares, a análise térmica é feita por meio de um programa de computador, elaborado nesta dissertação, em linguagem FORTRAN, que soluciona numericamente a equação da condutividade térmica, considerando a simetria esférica e como condição de contorno externo a convecção natural e a emissão de radiação térmica. (A teoria necessária para sua criação está exposta no terceiro capítulo e o programa elaborado, bem como arquivos de entrada e saída, estão disponíveis no Apêndice.) No quarto, e último, capítulo, são expostos os resultados, em forma gráfica, da distribuição de temperatura no interior dos hipotéticos explosivos nucleares definidos no segundo capítulo.

2. CRITICALIDADE

Neste capítulo, será feita uma breve revisão da teoria de transporte de nêutrons, tendo em vista, definir as dimensões dos hipotéticos explosivos nucleares, cujas configurações também serão definidas neste capítulo.

2.1 A EQUAÇÃO DE TRANSPORTE DE NÊUTRONS

A equação de transporte de nêutrons, que determina a distribuição e evolução temporal do fluxo de nêutrons, é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \Psi(r, E, \hat{\Omega}, t)}{\partial t} + \hat{\Omega} \nabla \Psi(r, E, \hat{\Omega}, t) + \Sigma_t(r, E) \Psi(r, E, \hat{\Omega}, t) = & \quad (2.1) \\ = \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(r, E' \Rightarrow E, \hat{\Omega}' \Rightarrow \hat{\Omega}) \Psi(r, E', \hat{\Omega}', t) \\ + \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_{4\pi} d\hat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \nu(E') \Sigma_f(r, E') \Psi(r, E', \hat{\Omega}', t), \end{aligned}$$

onde $\Psi(r, E, \hat{\Omega}, t)$ é o fluxo angular de nêutrons, ou seja, o número de nêutrons por unidade de área por unidade de tempo por unidade de ângulo sólido por unidade de energia que tem energia E e direção angular $\hat{\Omega}$, no ponto r e no tempo t ; v é a velocidade dos nêutrons [$v = (2E/m)^{1/2}$]; $\Sigma_t = \Sigma_a + \Sigma_s$ é a seção de choque macroscópica total, dada pela soma das seções de choque macroscópicas de absorção e espalhamento, e $\Sigma_s(r, E' \Rightarrow E, \hat{\Omega}' \Rightarrow \hat{\Omega})$, a seção de choque macroscópica de espalhamento diferencial, que dá a probabilidade por unidades de comprimento, ângulo e energia de espalhamento do nêutron de energia E' e direção $\hat{\Omega}'$ para a energia E e direção $\hat{\Omega}$, no ponto r ; $\chi(E)$ é o espectro de fissão, ou seja, a probabilidade do nêutron de fissão ser emitido com energia E ; $\nu(E)$ é o número de nêutrons produzidos por fissão causada por um nêutron incidente de energia E .

Já a criticalidade de um sistema físsil pode ser analisada por intermédio da grandeza k_{ef} (k-efetivo; em inglês k_{eff}), autovalor da seguinte equação estática de transporte de nêutrons:

$$\begin{aligned}
\widehat{\Omega}\nabla\Psi(r, E, \widehat{\Omega}) + \Sigma_t(r, E)\Psi(r, E, \widehat{\Omega}) &= \tag{2.2} \\
&= \int_{4\pi} d\widehat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \Sigma_s(r, E' \Rightarrow E, \widehat{\Omega}' \Rightarrow \widehat{\Omega})\Psi(r, E', \widehat{\Omega}') \\
&+ \frac{1}{k_{ef}} \frac{\chi(E)}{4\pi} \int_{4\pi} d\widehat{\Omega}' \int_0^\infty dE' \nu(E')\Sigma_f(r, E')\Psi(r, E', \widehat{\Omega}')
\end{aligned}$$

O k_{ef} pode ser interpretado como a grandeza que altera o número médio de nêutrons produzidos por fissão, $\nu(E)$, de modo que ocorra o perfeito balanço de nêutrons entre o lado esquerdo e direito da equação (2. 2), isto é, a igualdade entre perda e produção de nêutrons, por este motivo denomina-se o k_{ef} como fator efetivo de multiplicação. A análise do k_{ef} se dá da seguinte forma: se $k_{ef} < 1$ significa que o sistema está subcrítico, já que é necessário aumentar a produção de nêutrons; se $k_{ef} > 1$, o sistema é classificado como supercrítico; e quando $k_{ef} = 1$ o sistema é exatamente crítico. (BARROSO, 2009)

2.1.1 O CÓDIGO DE TRANSPORTE ANISN

O calculo do k_{ef} , neste trabalho, será realizado por meio do código de transporte ANISN, que utiliza o método das ordenadas discretas para solução da equação (2.2), também conhecido como método S_N , o qual consiste na discretização da variável angular em um número N de direções.

O tratamento angular do espalhamento diferencial, para simplificação da integral no primeiro termo do lado direito da equação (2. 1), pode ser feito por meio da expansão da dependência angular do espalhamento em polinômios de Legendre:

$$\Sigma_s(r, E' \Rightarrow E, \mu_0) = \sum_{n=0}^N \frac{2n+1}{4\pi} \Sigma_{sn}(r, E' \Rightarrow E) P_n(\mu_0) \tag{2.3}$$

onde $\mu_0 = \widehat{\Omega} \cdot \widehat{\Omega}'$ é o cosseno do ângulo formado pelas direções inicial e final do nêutron, e os coeficientes $\Sigma_{sn}(r, E' \Rightarrow E)$, devido a ortogonalidade dos polinômios de Legendre, são dados por:

$$\Sigma_{sn}(r, E' \Rightarrow E) = 2\pi \int_{-1}^1 \Sigma_s(r, E' \Rightarrow E, \mu_0) P_n(\mu_0) d\mu_0 \tag{2.4}$$

Dependendo do número de termos considerado na expansão em (2. 3), obtêm-se as chamadas seções de choque de espalhamento P_0, P_1, P_2 etc., que são calculadas por (2. 4). Se o espalhamento for isotrópico, a dependência angular é eliminada e têm-se apenas seções de choque P_0 . Por outro lado, proporcionalmente a anisotropia do sistema terá maior exigência dos termos da expansão.

Em relação a variável energia costuma-se dividir o intervalo total de energia dos nêutrons em intervalos menores, denominados grupos de energia, e integrar a equação de transporte de nêutrons para obter a chamada Equação Multigrupo de Transporte de Nêutrons. (BARROSO, 2009)

As seções de choque utilizadas foram as seções de choque de Hansen-Roach, a 16 grupos de energia. Na solução da equação de transporte, considerou-se a aproximação S_8 , 8 direções angulares, e espalhamento isotrópico (seções de choque P_0), com exceção do elemento hidrogênio (contido no alto-explosivo químico), para o qual foram usadas seções de choque até a aproximação P_1 , em razão da maior anisotropia do espalhamento de nêutrons nesse elemento leve.

As seções de choque de Hansen-Roach têm sido empregadas em cálculos de criticalidade, principalmente em sistemas de nêutrons rápidos e epitérmicos, e sua precisão, comprovada no confronto com resultados experimentais. Como podemos observar na tabela a seguir, prevêem particularmente bem as criticalidades nas montagens JEZEBEL, JEZEBEL-Pu e FLATTOP-Pu. (MATSUMOTO, 1979)

TAB. 2.1 Criticalidade nas montagens críticas JEZEBEL, JEZEBEL-Pu e FLATTOP-Pu por meio do código ANISN e as seções de choque de Hansen-Roach.

Artefato Nuclear	Criticalidade
JEZEBEL	1,0025
JEZEBEL-Pu	1,0012
FLATTOP-Pu	1,0218

2.2 COMPOSIÇÕES ISOTÓPICAS DO PLUTÔNIO

Neste trabalho, o plutônio utilizado nos núcleos dos hipotéticos explosivos nucleares é considerado estabilizado na fase δ , com a adição de 0,034 em fração atômica do elemento gálio. Sua densidade é $15,8 \text{ g/cm}^3$, bem menor do que a densidade do Plutônio na fase α

(19,8 g/cm³). A fase δ é geralmente utilizada em explosivos nucleares, devido as suas melhores propriedades metalúrgicas em relação ao plutônio na fase α — duro quebradiço e mais difícil de moldar. Além disso, o plutônio na fase δ sofre uma transformação brusca para a fase α quando submetido a fortes pressões de choque.

Para compor esta liga de plutônio e gálio serão considerados quatro casos exemplos de composição isotópica: Weapon-Grade, PWR 33MW-d/kg, HWR 7500MW-d/t, FBR-Blanket.

- **WEAPON-GRADE:**

Trata-se de uma composição isotópica própria para construção de armas nucleares.

TAB. 2.2 Descrição da composição isotópica Weapon-Grade.

Isótopo	Fração Atômica	Fração em Massa	Percentual de Calor Produzido
Pu-238	0,00012	0,000118	3,0102
Pu-239	0,93800	0,928215	78,9309
Pu-240	0,05800	0,057635	17,5404
Pu-241	0,00350	0,003493	0,5159
Pu-242	0,00038	0,000381	0,0026

(Fonte: MARK, HIPPEL e LYMAN, 2009)

- **PWR 33MW-D/KG:**

Trata-se do plutônio oriundo da queima do combustível de um de reator nuclear do tipo PWR (Pressurized Water Reactor) após produção de energia de 33MW-d/kg.

TAB. 2.3 Descrição da composição isotópica PWR 33MW-d/kg.

Isótopo	Fração Atômica	Fração em Massa	Percentual de Calor Produzido
Pu-238	0,013	0,012784	70,313
Pu-239	0,603	0,595485	10,9174
Pu-240	0,243	0,240977	15,8117
Pu-241	0,091	0,090619	2,8855
Pu-242	0,050	0,049998	0,0724

(Fonte: MARK, HIPPEL e LYMAN, 2009)

- **HWR 7500MW-D/T:**

Trata-se do plutônio oriundo da queima do combustível de um reator nuclear do tipo HWR (Heavy Water Reactor) após produção de energia de 7500MW-d/t.

TAB. 2.4 Descrição da composição isotópica HWR 7500MW-d/t.

Isótopo	Fração Atômica	Fração em Massa	Percentual de calor produzido
Pu-238	0,0	0,0	0,0
Pu-239	0,666	0,658094	38,8109
Pu-240	0,266	0,263943	55,7099
Pu-241	0,053	0,052810	5,4093
Pu-242	0,015	0,015008	0,0699

(Fonte: ISIS, 2014)

- **FBR-BLANKET:**

Trata-se do plutônio oriundo da Cobertura (*blanket*), composta de urânio natural, de um reator super-regenerador a nêutrons rápidos, FBR (*Fast Breeder Reactor*).

TAB. 2.5 Descrição da composição isotópica FBR-Blanket.

Isótopo	Fração Atômica	Fração em Massa	Percentual de Calor Produzido
Pu-238	0,0	0,0	0,0
Pu-239	0,960	0,950087	86,9756
Pu-240	0,040	0,039753	13,0244
Pu-241	0,0	0,0	0,0
Pu-242	0,0	0,0	0,0

(Fonte: MARK, HIPPEL e LYMAN, 2009)

Considerou-se a presença do elemento gálio no cálculo da fração em massa de cada isótopo para cada composição isotópica descrita acima. A fração em massa do elemento gálio é aproximadamente 0,01.

2.3 CONFIGURAÇÃO DO HIPOTÉTICO EXPLOSIVO NUCLEAR

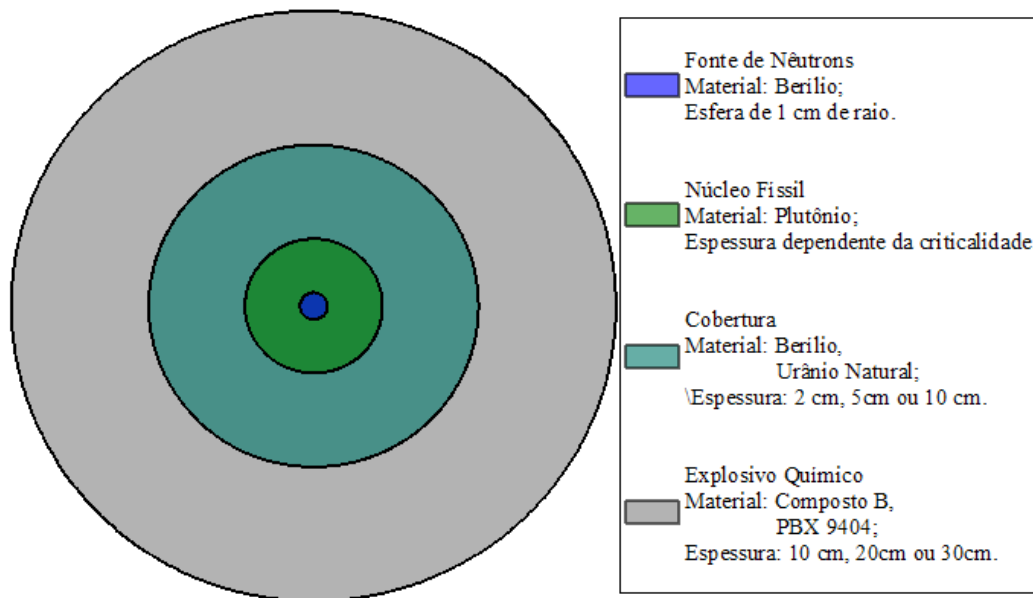


FIG. 2.1 Configuração do Hipotético Explosivo Nuclear.

A figura acima descreve o modelo simples de um hipotético explosivo nuclear, o qual terá a temperatura do seu interior analisada. Esse modelo consiste de uma esfera de 1 cm de raio do elemento berílio simulando uma fonte de nêutrons de Po-Be; em seguida, do núcleo físsil de plutônio cuja espessura depende da criticalidade do sistema e, por conseguinte, depende das composições isotópicas exibidas na seção anterior; do refletor de nêutrons, que será urânio natural ou berílio, com espessuras de 2 cm, 5 cm ou 10cm; e, finalmente, em torno da cobertura, uma camada de explosivo químico (que pode ser o Composto B ou o PBX-9404), com espessuras de 10 cm, 20cm ou 30 cm, responsável pela implosão do núcleo físsil do suposto artefato nuclear.

As espessuras dos núcleos físsis foram calculadas considerando cada composição isotópica de plutônio apresentada e os materiais das demais camadas do hipotético explosivo nuclear, descrito acima, de tal modo que $k_{ef} < 0,96$ (essa é a condição imposta para que o explosivo nuclear seja seguramente subcrítico em sua configuração pré-montagem supercrítica).

Para efeito do cálculo do k_{ef} , o Composto B e PBX 9404 foram considerados compostos totalmente de seus componentes principais, os explosivos primários RDX e HMX,

respectivamente. Os elementos componentes são o C, o N, o O e o H, cujas seções de choque estão disponíveis nas seções de choque de Hansen-Roach.

A seguir veremos tabelas para cada composição isotópica, que exibem para cada material e espessura da Cobertura e para uma espessura do explosivo químico de 30 cm, ou seja, com reflexão praticamente infinita do sistema (isso garante que o explosivo seja seguramente subcrítico sob quaisquer condições de influências externas).

TAB. 2.6 Propriedades dos núcleos físséis dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam plutônio de composição Weapon-Grade.

		Explosivo Químico (30 cm de espessura)							
		Composto B				PBX 9404			
Material da Cobertura	Espessura da Cobertura [cm]	k_{ef}	Espessura [cm]	Massa de Pu-Ga [kg]	Calor Total [W] (*)	k_{ef}	Espessura [cm]	Massa de Pu-Ga [kg]	Calor Total [W] (*)
Berílio	2	0,958	3,43	5,6514	12,7083	0,959	3,40	5,5360	12,4489
	5	0,958	3,15	4,6344	10,4214	0,957	3,13	4,5668	10,2693
	10	0,957	2,89	3,8052	8,5567	0,958	2,89	3,8052	8,55567
Urânio Natural	2	0,959	3,58	6,2521	14,0590	0,959	3,55	6,1287	13,7816
	5	0,957	3,45	5,7292	12,8232	0,956	3,43	5,6514	12,7083
	10	0,955	3,35	5,3473	12,0243	0,956	3,35	5,3473	12,0243

(*) - Calor total gerado pelo decaimento alfa.

TAB. 2.7 Propriedades dos núcleos físséis dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam plutônio de composição PWR 33MW-d/kg.

		Explosivo Químico (30 cm de espessura)							
		Composto B				PBX 9404			
Material da Cobertura	Espessura da Cobertura [cm]	k_{ef}	Espessura [cm]	Massa de Pu-Ga [kg]	Calor Total [W] (*)	k_{ef}	Espessura [cm]	Massa de Pu-Ga [kg]	Calor Total [W] (*)
Berílio	2	0,956	3,75	6,9821	72,8218	0,958	3,73	6,8935	71,8971
	5	0,956	3,45	5,7293	59,7551	0,959	3,45	5,7293	59,7551
	10	0,956	3,18	4,7372	49,4075	0,957	3,18	4,7372	49,4075
Urânio Natural	2	0,955	3,91	7,7186	80,5029	0,959	3,90	7,6711	80,0079
	5	0,957	3,78	7,1165	74,2233	0,959	3,78	7,1165	74,2233
	10	0,956	3,68	6,6751	69,9196	0,957	3,68	6,6751	69,9196

(*) - Calor total gerado pelo decaimento alfa.

TAB. 2.8 Propriedades dos núcleos físséis dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam plutônio de composição HWR 7500MW-d/t.

		Explosivo Químico (30 cm de espessura)							
		Composto B				PBX 9404			
Material da Cobertura	Espessura da Cobertura [cm]	k_{ef}	Espessura [cm]	Massa de Pu-Ga [kg]	Calor Total [W] (*)	k_{ef}	Espessura [cm]	Massa de Pu-Ga [kg]	Calor Total [W] (*)
Berílio	2	0,958	3,73	6,8934	22,3508	0,958	3,70	6,7619	21,9242
	5	0,957	3,43	5,6515	18,3240	0,959	3,40	5,5361	17,9500
	10	0,959	3,17	4,7028	15,2479	0,959	3,17	4,7028	15,2479
Urânio Natural	2	0,959	3,90	7,6711	24,8722	0,956	3,85	7,4367	24,1121
	5	0,957	3,75	6,9821	22,6383	0,959	3,75	6,9821	22,6383
	10	0,957	3,65	6,5463	21,2252	0,957	3,65	6,5463	21,2252

(*) - Calor total gerado pelo decaimento alfa.

TAB. 2.9 Propriedades dos núcleos físséis dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam plutônio de composição FBR-Blanket.

		Explosivo Químico (30 cm de espessura)							
		Composto B				PBX 9404			
Material da Cobertura	Espessura da Cobertura [cm]	k_{ef}	Espessura [cm]	Massa de Pu-Ga [kg]	Calor Total [W] (*)	k_{ef}	Espessura [cm]	Massa de Pu-Ga [kg]	Calor Total [W] (*)
Berílio	2	0,958	3,40	5,5361	11,5637	0,958	3,37	5,4223	11,3259
	5	0,959	3,13	4,5668	9,5391	0,958	3,11	4,4998	9,3992
	10	0,958	2,87	3,7458	7,8242	0,959	2,87	3,7458	7,8242
Urânio Natural	2	0,958	3,55	6,1287	12,8016	0,958	3,52	6,007	12,5474
	5	0,958	3,43	5,6514	11,8046	0,958	3,42	5,6128	11,7239
	10	0,958	3,34	5,31	11,0915	0,959	3,34	5,31	11,0915

(*) - Calor total gerado pelo decaimento alfa.

Uma espessura de 10 cm de explosivo químico já garante a reflexão infinita para o modelo acima proposto. De fato, ao variar a espessura obteve-se $0,95 < k_{ef} < 0,96$. Por exemplo, variando em um caso a espessura do composto B de 10 para 30 cm, o k_{eff} variou apenas de 0,952 para 0,956.

3. ANÁLISE TÉRMICA

Este capítulo tem como objetivo analisar o processo de transferência de calor e as equações de condutividade térmica a serem resolvidas, tendo em vista obter a temperatura no interior de um suposto explosivo nuclear de implosão. Após esta breve revisão, será determinada, como primeiro exemplo, a temperatura no interior da bomba atômica *Fat Man* lançada sobre Nagasaki, no Japão, pelos Estados Unidos, em 9 de agosto de 1945. Além disso, será feita uma análise da viabilidade da própria *Fat Man* se nesta fosse utilizado plutônio proveniente da queima do combustível de um reator nuclear de potência em operação comercial, com altas porcentagens de seus isótopos pares.

3.1 EQUAÇÃO DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Experiências relacionadas à condutividade térmica mostram que o calor é transferido de uma região de alta temperatura para uma região de baixa temperatura. A taxa de calor transferida por unidade de área é proporcional ao gradiente de temperatura

$$\frac{q}{A} \propto \frac{dT}{dx}.$$

Quando esta proporção é constatada se tem a Lei de Fourier, dada por:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}, \quad (3.1)$$

onde: q é a fonte de calor; k é o coeficiente de condutividade térmica; A é a área da superfície pela qual passa o fluxo de calor; $T = T(x)$ é a função que relaciona a temperatura com a espessura x percorrida pelo fluxo de calor.

A partir da lei de Fourier, se deduz o caso unidimensional da Equação da Condutividade Térmica para meio plano, dada por:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (3.2)$$

onde \dot{q} é a variação da fonte de calor pontual em relação ao tempo; ρ é a massa específica do material; c é o calor específico do material; e t é o tempo. (HOLMAN, 1979)

Generalizando a equação anterior para o espaço tridimensional e aplicando coordenadas esféricas (r, θ, φ) , obtemos a Equação Geral da Conduktividade Térmica:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(k \sin \theta \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(k \frac{\partial T}{\partial \varphi} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3.3)$$

Ao considerar a simetria esférica do sistema e a dependência somente sobre o r , a equação acima se reduz a

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}. \quad (3.4)$$

Para um sistema estático, portanto a função temperatura independe da variável tempo, obtém-se a equação abaixo:

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 k \frac{dT}{dr} \right) + \dot{q} = 0. \quad (3.5)$$

Esta equação será analisada analiticamente e numericamente considerando a condição de contorno

$$\left. \frac{dT}{dr} \right|_{r=0} = 0. \quad (3.6)$$

3.1.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA

Na solução analítica para um sistema esférico unidimensional, além da condição de contorno apresentada anteriormente, também são consideradas as seguintes condições de interface:

$$T_n(R_n) = T_{n+1}(R_n) \quad (3.7)$$

e

$$k_n \frac{\partial T_n}{\partial r}(R_n) = k_{n+1} \frac{\partial T_{n+1}}{\partial r}(R_n), \quad (3.8)$$

onde $T_n(r)$ é a função temperatura obtida da EDO para a n -ésima camada; R_n é o raio onde ocorre a mudança de material da camada n para $n + 1$; k_n é o coeficiente de condutividade térmica do material da n -ésima camada, k_n considerado constante.

Por meio das condições citadas, foi obtida a equação que relaciona as temperaturas nas interfaces:

$$Q_t = \frac{4\pi(T(o) - T_n)}{\frac{1}{k_1} \frac{1}{2R_1} + \frac{1}{k_2} \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \dots + \frac{1}{k_n} \left(\frac{1}{R_{n-1}} - \frac{1}{R_n} \right)}, \quad (3.9)$$

onde $T(0)$ é a temperatura no centro da esfera; T_n é a temperatura na n -ésima interface; e Q_t é o calor total gerado na camada de plutônio, dependente da composição isotópica e de sua massa.

3.1.2 SOLUÇÃO NUMÉRICA

A solução numérica da equação (3.5), reescrita novamente a seguir,

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 k \frac{dT}{dr} \right) + \dot{q} = 0$$

será dada por meio do método de diferenças finitas. Para tal, considere uma partição do intervalo $[0, R]$, onde R é o raio da esfera, de índice $i = 0, 1, \dots, N$.

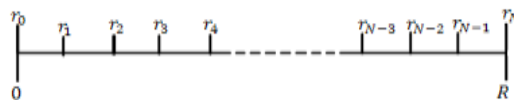


FIG. 3.1 Partição do intervalo $[0, R]$.

Como a equação diferencial acima é de segunda ordem é necessário refiná-la. Este refinamento é obtido pela inclusão de pontos intermediários entre o índice i e o índice $i + 1$, denominados de $i + \frac{1}{2}$, para $i = 0, 1, \dots, N - 1$, como podemos observar na figura a seguir.

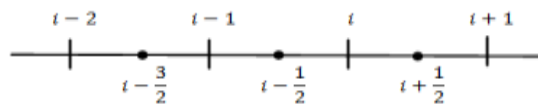


FIG. 3.2 Inclusão dos pontos intermediários à família de índices.

No intervalo $[0, R]$, o ponto $r_{i+\frac{1}{2}}$ é o ponto médio entre o ponto r_i e o ponto r_{i+1} , como pode ser observado na figura a seguir.

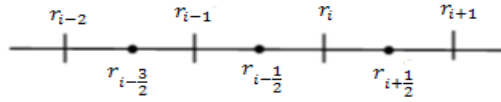


FIG. 3.3 Detalhe da partição refinada.

Ao analisar a equação no ponto $i - \frac{1}{2}$ obtém-se

$$\frac{1}{r_{i-\frac{1}{2}}^2} \frac{1}{r_i - r_{i-1}} \left(r_i^2 k_i \frac{\partial T}{\partial r}(r_i) - r_{i-1}^2 k_{i-1} \frac{\partial T}{\partial r}(r_{i-1}) \right) + \dot{q}_{i-\frac{1}{2}} = 0,$$

donde

$$\frac{1}{r_{i-\frac{1}{2}}^2} \frac{1}{r_i - r_{i-1}} \left(r_i^2 k_i \frac{T_{i+\frac{1}{2}} - T_{i-\frac{1}{2}}}{r_{i+\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{1}{2}}} - r_{i-1}^2 k_{i-1} \frac{T_{i-\frac{1}{2}} - T_{i-\frac{3}{2}}}{r_{i-\frac{1}{2}} - r_{i-\frac{3}{2}}} \right) + \dot{q}_{i-\frac{1}{2}} = 0 \quad (3.10)$$

Coletando os coeficientes de $T_{i-\frac{3}{2}}$, $T_{i-\frac{1}{2}}$ e $T_{i+\frac{1}{2}}$ da equação (3.10), obtém-se a equação:

$$a_i T_{i-\frac{3}{2}} + b_i T_{i-\frac{1}{2}} + c_i T_{i+\frac{1}{2}} = -q_{i-\frac{1}{2}}, \quad (3.11)$$

onde $a_1, c_N = 0$ e $i = 1, 2, \dots, N$. Da equação (3.11) resulta um sistema tri-diagonal

$$[A][T] = -[Q], \quad (3.12)$$

onde $[A]$ é uma matriz tri-diagonal; $[T]$ é o vetor Temperatura a ser determinado; e $[Q]$ é o vetor que representa a fonte de calor volumétrica. O sistema (3.12) é solucionado por meio do método de eliminação de Gauss, onde definem-se os coeficientes:

$$\beta_k = \frac{c_k}{b_k - a_k \beta_{k-1}}, \quad (3.13)$$

$$\alpha_k = -\frac{q_{i-\frac{1}{2}} + a_k \alpha_{k-1}}{b_k - a_k \beta_{k-1}}, \quad (3.14)$$

com $\beta_1 = c_1/b_1$, $\alpha_1 = -q_{\frac{1}{2}}/b_1$ e $\beta_N = 0$.

A seguir, obtêm-se as temperaturas, em ordem decrescente dos intervalos, pela equação:

$$T_k = \alpha_k - \beta_k T_{k+1}, \quad (3.15)$$

com $k = N, N - 1, \dots, 1$. (BARROSO, 2009)

3.2 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para obter os valores das temperaturas internas ao sistema é necessário e suficiente conhecer a temperatura na superfície do sistema T_S . Para tal, devem-se considerar os fenômenos da convecção natural e da radiação térmica.

3.2.1 CONVECÇÃO NATURAL

O transporte de calor por convecção natural é um mecanismo no qual o calor é retirado de uma fonte térmica pelo movimento do fluido que a envolve. Este movimento não é gerado por uma fonte externa, mas somente pelas diferenças de densidade do fluido que ocorre devido ao gradiente de temperatura. Na convecção natural, o fluido que envolve uma fonte de calor recebe calor, torna-se menos denso e se afasta da fonte de calor. O fluido ambiente, mais frio, então se desloca para substituí-lo. Este fluido mais frio é então aquecido e o processo continua, formando uma corrente de convecção.

Devido à velocidade do fluido em contato com a superfície da fonte térmica ser nula, o processo de troca de calor inicia-se por condução seguindo a lei de resfriamento de Newton:

$$Q = h_c A (T_S - T_a), \quad (3.16)$$

onde Q é o calor a ser transferido, h_c é o coeficiente de transferência de calor por convecção natural, A é a área da superfície da fonte térmica, T_S é a temperatura da superfície e T_a é a temperatura ambiente, isto é, a temperatura do fluido.

O coeficiente de transferência de calor por convecção natural h_c depende da geometria da superfície, da temperatura da superfície T_S e da temperatura do ar T_a , de fato:

$$h_c = \frac{Nu}{D} k, \quad (3.17)$$

onde Nu é o número de Nusselt, D é o comprimento característico (no caso, o diâmetro da esfera) e k é o coeficiente de condutividade térmica do ar.

O número de Nusselt para superfícies esféricas se dá pela relação:

$$Nu = 2 + 0.43Ra^{\frac{1}{4}}. \quad (3.18)$$

O número de Rayleigh, Ra , por sua vez é dado por:

$$Ra = \frac{g\beta}{\alpha\nu}(T_s - T_a)D^3, \quad (3.19)$$

onde $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ é constante gravitacional; β é a expansividade térmica, em K^{-1} ; α é a difusividade térmica, em m^2/s ; ν é a viscosidade cinemática, em m^2/s . Os valores de β , α , ν e k são calculados na Temperatura de Película ou Temperatura de Filme T_f :

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} \quad (3.20)$$

A temperatura de película é uma aproximação da temperatura do fluido no interior da camada limite. (HOLMAN, 1979)

O fluido a ser considerado na convecção natural no presente problema é o ar. A partir do *handbook CRC HANDBOOK CHEMISTRY AND PHYSICS 87TH* determinou-se a tabela a seguir com os dados termodinâmicos necessários para o cálculo do coeficiente de transferência de calor por convecção natural h_c .

TAB. 3.1 Propriedades termodinâmicas do ar à 1 atm.

T [K]	β [1/K]	k [W/m.K]	α [m^2/s]	ν [m^2/s]
100	0,01	0,0094	0,0000025615	0,0000019966
200	0,005	0,0184	0,0000104651	0,0000076174
300	0,00333	0,0262	0,0000224099	0,0000160207
400	0,0025	0,0333	0,0000373068	0,0000264696
500	0,002	0,0397	0,0000553789	0,0000389368
600	0,0016667	0,0457	0,0000747232	0,0000531218

(Fonte: HAYNES, 2006)

3.2.2 RADIAÇÃO TÉRMICA

A emissão de radiação térmica de um radiador ideal, denominado corpo negro, segue a Lei de Stefan-Boltzmann

$$E_b = \sigma T^4, \quad (3.21)$$

onde: E_b é a emissão de radiação térmica por unidade de área do corpo negro; $\sigma = 6,699 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann; e T é a temperatura do corpo negro.

Quando uma radiação atinge uma superfície de um determinado material, ela se divide em três partes: uma parte ρ da radiação é refletida; uma parte α é absorvida; e a outra τ é transmitida.

$$\rho + \alpha + \tau = 1$$

A maioria dos corpos sólidos não transmite radiação térmica, de modo que τ seja igual à zero. Então,

$$\rho + \alpha = 1 \quad (3.22)$$

O poder de absorção e a emissividade de um corpo podem ser relacionados pela lei de Kirchhoff da radiação.

O poder emissivo de um corpo E é definido como a energia emitida por um corpo por unidade de área por unidade de tempo. Considere um corpo colocado no interior de uma cavidade negra, fechada, cujas paredes são mantidas à temperatura uniforme T . O corpo acaba por atingir o equilíbrio com as paredes da cavidade. Seja q_i , em W/m^2 , o fluxo de radiação espectral das paredes, à temperatura T , incidente no corpo. A energia absorvida pelo corpo é

$$EA = q_i A \alpha. \quad (3.23)$$

Enquanto para um corpo negro é dado por

$$E_b A = q_i A. \quad (3.24)$$

O poder de absorção α é dado pelo quociente da equação (3. 23) pela equação (3. 24)

$$\alpha = \frac{E}{E_b}$$

Portanto, a razão entre o poder emissivo de corpo para o poder emissivo de um corpo negro à mesma temperatura é igual ao poder de absorção do corpo. Esta relação é definida como a emissividade do corpo

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (3. 25)$$

$$\epsilon = \alpha \quad (3. 26)$$

Os valores de emissividade e absorvidade que foram discutidas são as propriedades integrais de um material específico, ou seja, eles representam o comportamento integrado do material sobre levando em conta todos os comprimentos de onda.

Substâncias reais emitem menos radiações do que as superfícies negras ideais, conforme medido pela emissividade e o comprimento de onda da radiação. Um corpo cinzento é definido de tal modo que a emissividade monocromática ϵ_λ do corpo é independente do comprimento de onda, ou seja, ϵ_λ é constante.

$$\epsilon = \epsilon_\lambda \quad (3. 27)$$

Os valores de emissividade de diversas substâncias variam amplamente de acordo com o comprimento de onda, a temperatura, e a condição da superfície. (HOLMAN, 1979)

TAB. 3.2 Emissividade de alguns materiais.

Material	Emissividade
Corpo Negro	1
Ouro Polido	0,03
Alumínio Polido	0,04
Prata Polida	0,035
Aço Polido	0,286
Alumínio Laminado	0,07

(Fonte: KUCHLING, 1999)

3.2.2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR RADIAÇÃO

A transferência de calor líquido entre corpos calcula-se pela diferença de potencial total dividido pela soma das resistências espaciais e de superfícies de cada corpo. Sejam C_1 e C_2 dois corpos cujas áreas de superfícies sejam A_1 e A_2 respectivamente, em metros quadrados. Admitindo que C_1 esta cedendo calor ao corpo C_2 .

Neste sistema existe apenas uma resistência espacial que representa a porção da área A_1 que de fato é efetiva para transmissão do calor do corpo C_1 para o corpo C_2 . Assim sendo, a resistência espacial deste sistema é dada pelo inverso do produto $F_{12}A_1$, onde F_{12} é a fração de radiação emitida pelo corpo C_1 que atinge o corpo C_2 .

A resistência de superfície é definida como razão entre a radiação refletida e a radiação absorvida por unidade de área de cada corpo, isto é,

$$\frac{\rho}{\alpha A}$$

Devido às equações (3. 25) e (3. 26), a resistência de superfície pode ser rescrita apenas em função da emissividade e da área da superfície. Portanto, as resistências de superfície dos corpos C_1 e C_2 são dadas respectivamente por:

$$\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} \text{ e } \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}$$

deste modo, a equação que rege a transferência de calor do corpo C_1 para o corpo C_2 é dada por

$$Q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1 - \epsilon_1}{\epsilon_1 A_1} + \frac{1}{F_{12}A_1} + \frac{1 - \epsilon_2}{\epsilon_2 A_2}} \quad (3. 28)$$

A fim de facilitar sua manipulação, a equação (3. 28) é reescrita do seguinte modo

$$Q = \frac{\sigma(T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{A_1} \left(\frac{1}{\epsilon_1} - 1 \right) + \frac{1}{F_{12}A_1} + \frac{1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}$$

E, multiplicando o numerador e denominador da fração à direita por A_1 , tem-se

$$Q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right) + \frac{1 - F_{12}}{F_{12}}} \quad (3. 29)$$

Se admitirmos que o corpo C_2 envolve o corpo C_1 por completo, então $F_{12} = 1$, e a equação (3. 29) pode se reescrita de forma mais simples

$$Q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\epsilon_2} - 1 \right)}. \quad (3. 30)$$

Supondo ainda que a área A_2 é muito grande em relação à área A_1 , isto é, $A_2 \gg A_1$, podemos reescrever (3. 30) de modo obter a relação de transferência de calor por radiação a seguir:

$$Q = \epsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4). \quad (3. 31)$$

Esta equação é aplicada para calcular a energia de radiação emitida por um objeto quente em uma sala grande, onde T_1 é a temperatura do corpo e T_2 , a temperatura da parede da sala.

3.2.3 O PROCESSO INTERATIVO DO CÁLCULO DE T_S

Ao considerar a convecção natural e a radiação térmica como condições de contorno para o sistema, temos a equação

$$Q = h_c A (T_S - T_a) + \epsilon \sigma A (T_S^4 - T_p^4), \quad (3. 32)$$

onde T_S é a temperatura da superfície do hipotético explosivo nuclear, T_a é a temperatura ambiente, T_p é a temperatura da parede da sala/laboratório e A no nosso estudo é a área da superfície do hipotético explosivo nuclear.

A hipótese da área da superfície da sala/laboratório ser muito grande em relação à área A nos leva a admitir que $T_p = T_a$, que conduz à equação

$$Q = h_c A (T_S - T_a) + \epsilon \sigma A (T_S^4 - T_a^4). \quad (3. 33)$$

A dependência térmica do coeficiente de transferência de calor por convecção h_c nos leva a considerar um método iterativo para determinar T_S . Para tal, é interessante definir o coeficiente de transferência de calor pela radiação térmica h_r , dado por:

$$h_r = \frac{\epsilon\sigma(T_S^4 - T_a^4)}{T_S - T_a} \quad \therefore$$

$$h_r = \epsilon\sigma(T_S + T_a)(T_S^2 + T_a^2). \quad (3.34)$$

Portanto, tem-se:

$$Q = (h_c + h_r)A(T_S - T_a). \quad (3.35)$$

A fim de facilitar os cálculos, fixemos a temperatura T_a tornando-a um parâmetro e, conseqüentemente, podemos escrever $T_S = T_a + \Delta T$, onde $\Delta T = T_S - T_a$. Note que ΔT é nulo se, e somente se, a fonte de calor Q é nula. Deste modo,

$$Q = (h_c(\Delta T) + h_r(\Delta T))A\Delta T. \quad (3.36)$$

Então para determinar T_S , devemos determinar o valor de ΔT que satisfaz a condição:

$$\Delta T = \frac{Q}{A(h_c(\Delta T) + h_r(\Delta T))}.$$

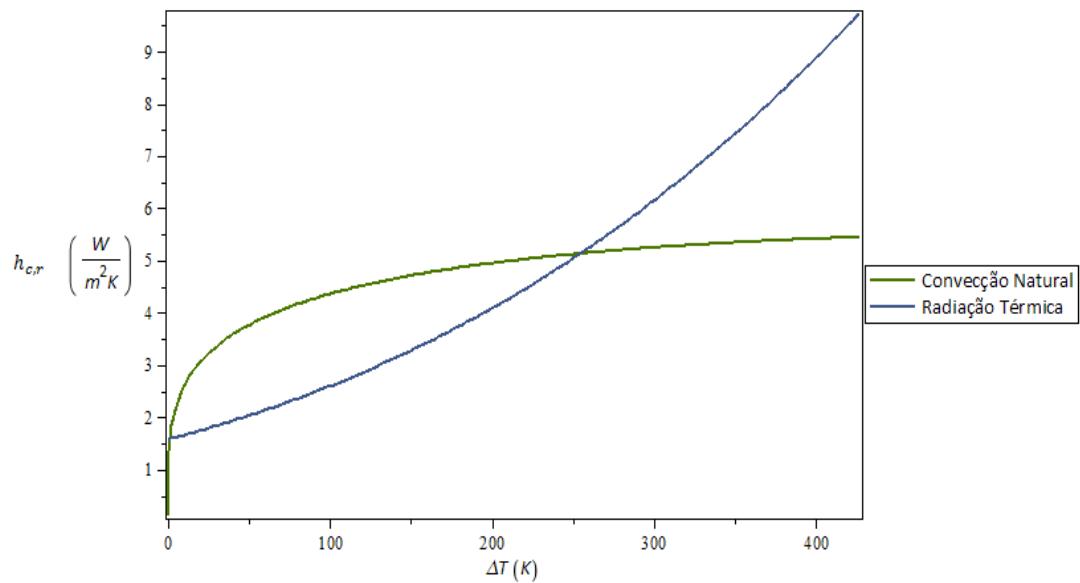


FIG. 3.4 Gráfico $h_{c,r} \times \Delta T$, para uma superfície esférica de aço polido com um raio de 21 cm e temperatura ambiente de 20°C.

Para determinar este ΔT será necessário estudar o comportamento da função

$$f(\Delta T) = \frac{Q}{A(h_c(\Delta T) + h_r(\Delta T))}.$$

Abaixo, podemos observar o gráfico da função $f(\Delta T)$ para uma fonte térmica de 100W contida numa esfera de raio 21 cm cuja superfície é aço com uma emissividade $\epsilon = 0,286$.

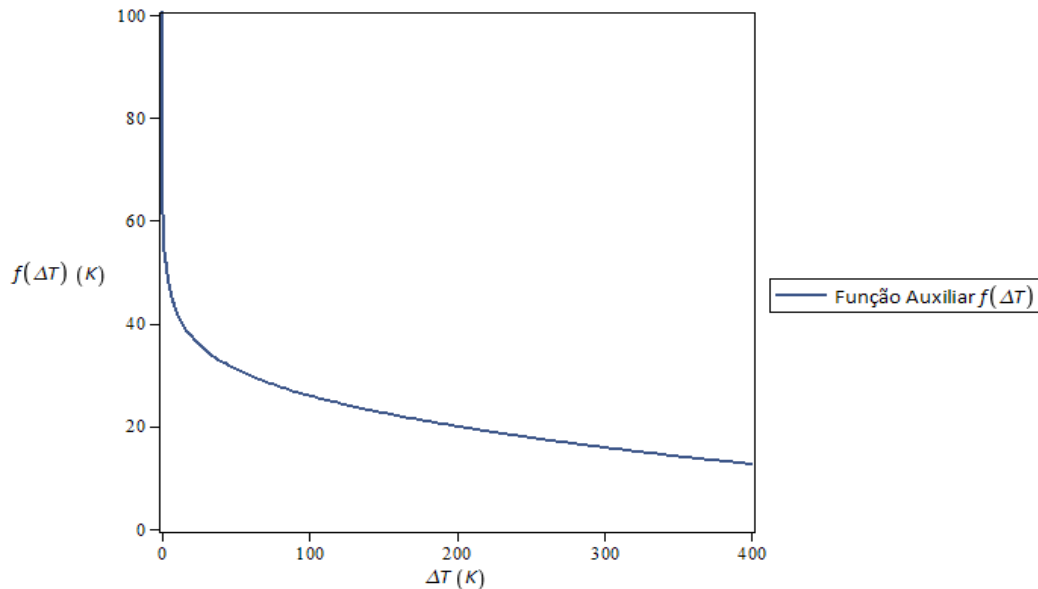


FIG. 3.5 Gráfico $f(\Delta T) \times \Delta T$, função auxiliar $f(\Delta T)$.

Do gráfico da função $f(\Delta T)$ obtemos as seguintes conclusões: a função f é contínua; para valores de ΔT pequenos tem-se $f(\Delta T) > \Delta T$ e para valores de ΔT grandes tem-se $f(\Delta T) < \Delta T$. Logo, a função f satisfaz as condições do caso real do Teorema do Ponto Fixo de Brouwer que garante a existência de um ponto fixo no domínio da função f , isto é, existe ΔT tal que

$$f(\Delta T) = \Delta T. \tag{3.37}$$

Além disso, este ponto fixo é único devido ao fato de que a função f é estritamente decrescente. Geometricamente, este ponto fixo da função é a interseção do gráfico de f com a reta identidade.

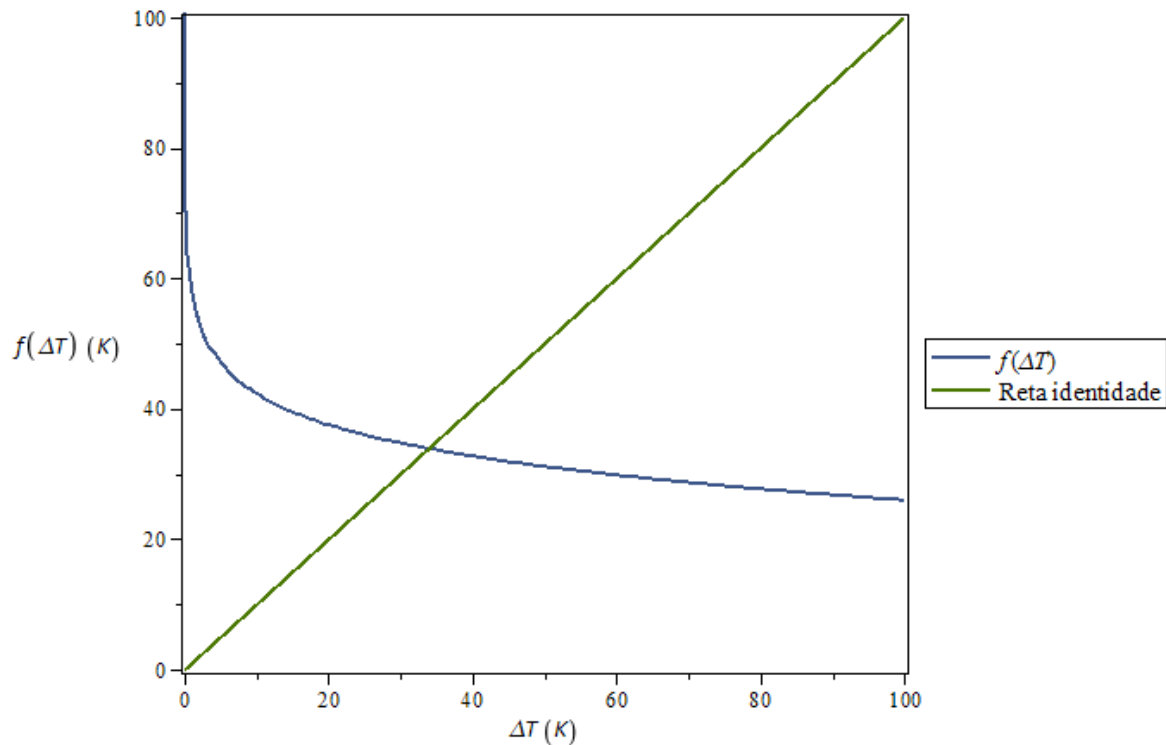


FIG. 3.6 Gráfico $f(\Delta T) \times \Delta T$, contendo a função auxiliar $f(\Delta T)$ e reta identidade.

Para determinar o ponto fixo da função f , deve-se criar uma sequência de pontos do seguinte modo: fixe um valor ΔT_0 como ponto inicial da sequência; para este trabalho, tomemos $\Delta T_0 = 1$; e a partir deste ponto inicial consideremos a seguinte lei de formação:

$$x(n) = x_n = \frac{x_{n-1} + f(x_{n-1})}{2}. \quad (3.38)$$

Geometricamente, a sequência x_n é uma sequência de pontos médios entre pontos do gráfico de f e da reta identidade de mesma abscissa.

A sequência x_n possui um bom comportamento assintótico, devido ao comportamento das funções envolvidas em sua lei de formação. Para valores relativamente baixos de Q/A , temos que x_n é monótona crescente, fato que pode ser observado nas figuras FIG. 3.7 e FIG. 3.8. Enquanto para valores relativamente grandes de Q/A temos, que a partir do segundo ponto da sequência, um comportamento monótono decrescente, como se observa nas figuras FIG. 3.9 e FIG. 3.10.

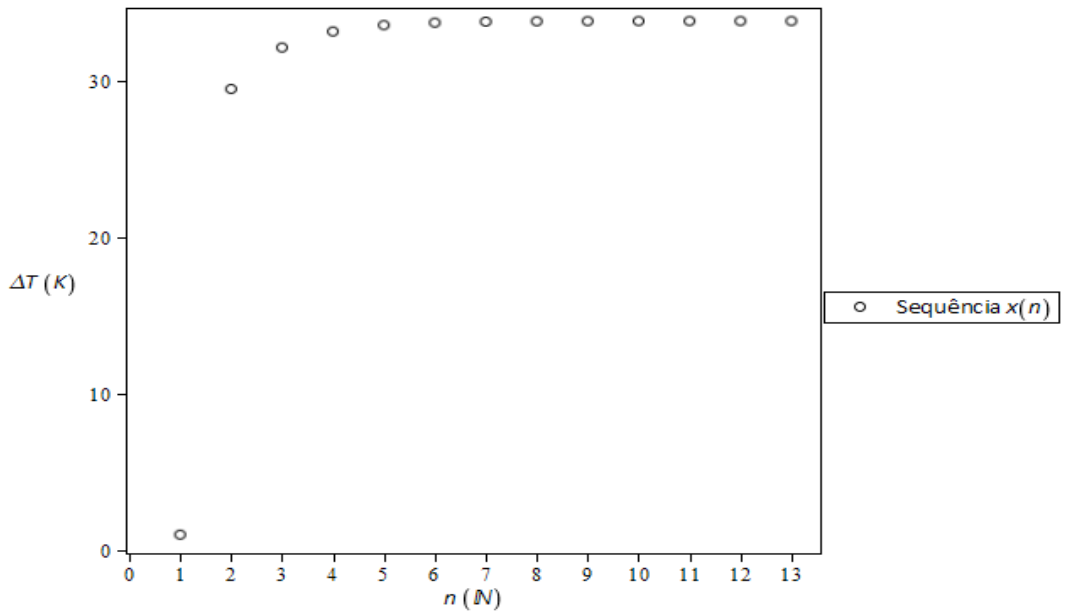


FIG. 3.7 Representação gráfica da sequência x_n .

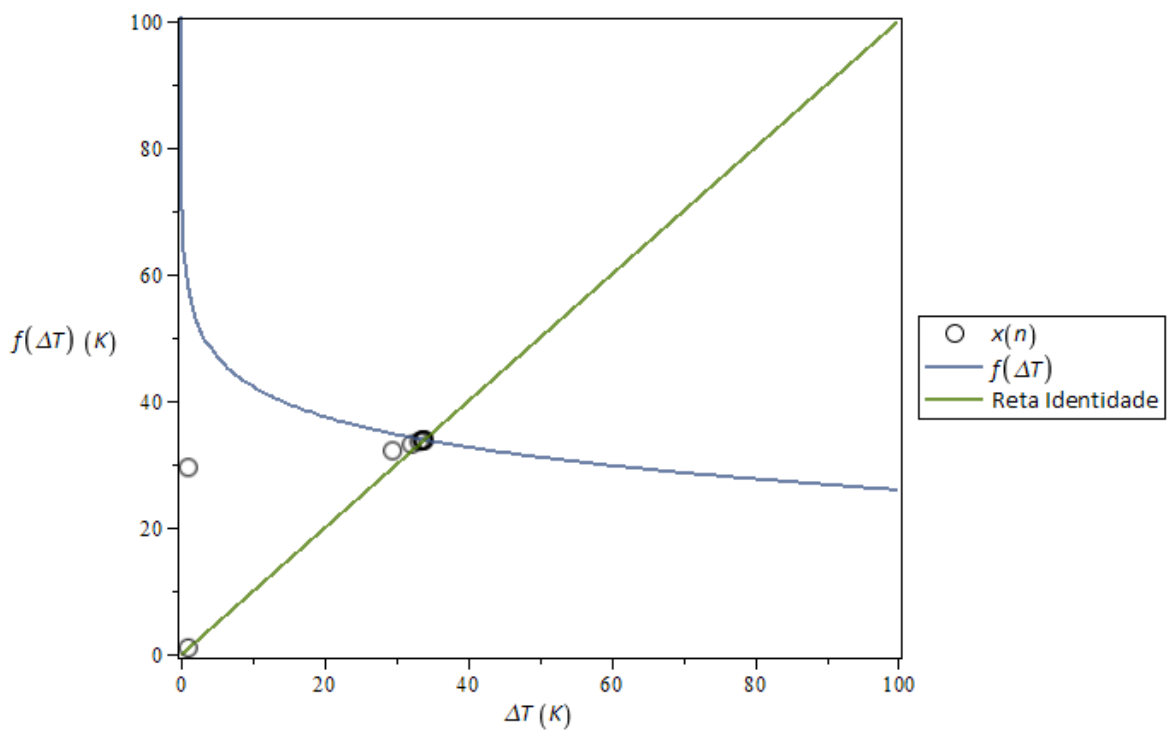


FIG. 3.8 Gráfico $f(\Delta T) \times \Delta T$, contendo função auxiliar $f(\Delta T)$, a reta identidade e a sequência x_n .

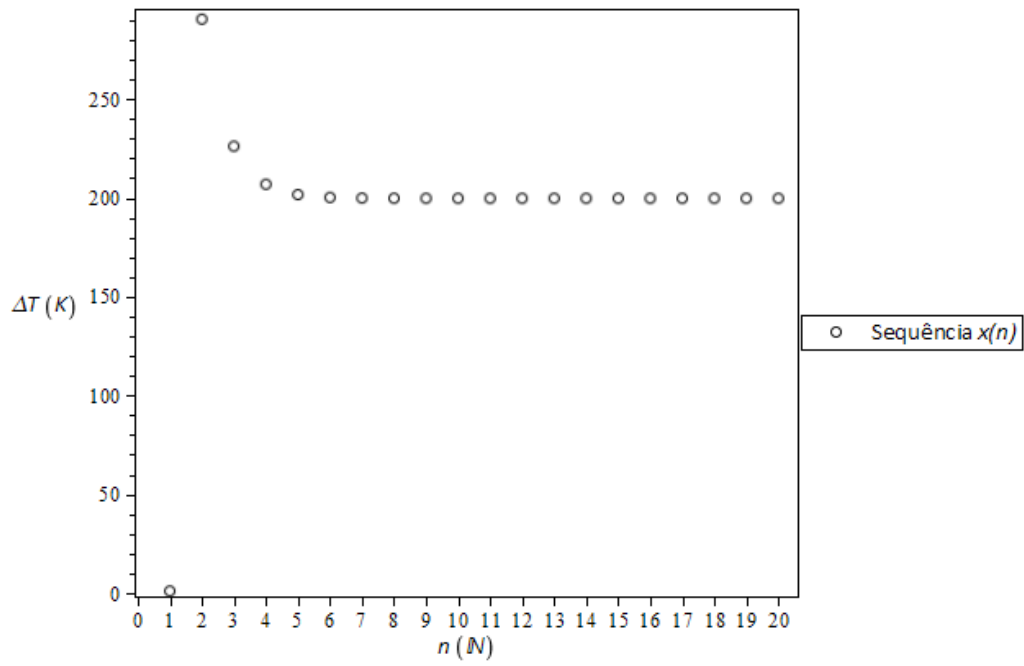


FIG. 3.9 Representação gráfica da sequência x_n .

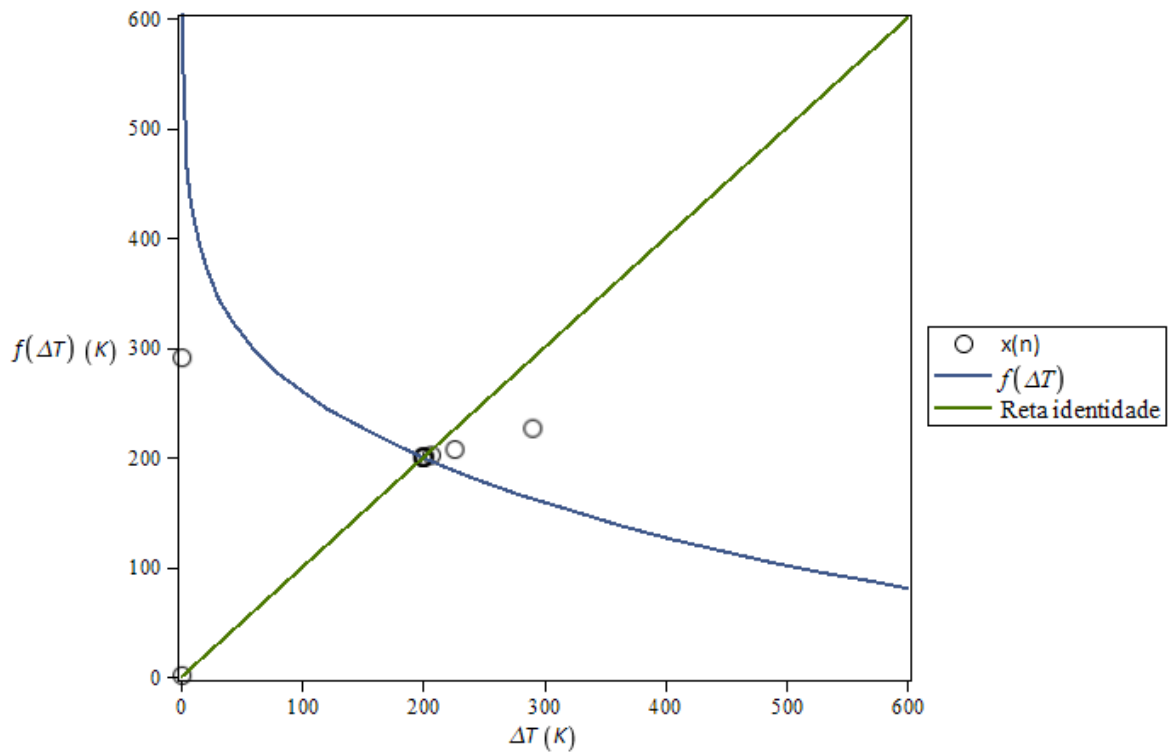


FIG. 3.10 Gráfico $f(\Delta T) \times \Delta T$, contendo função auxiliar $f(\Delta T)$, a reta identidade e a sequência x_n .

3.3 O PROGRAMA ATNA

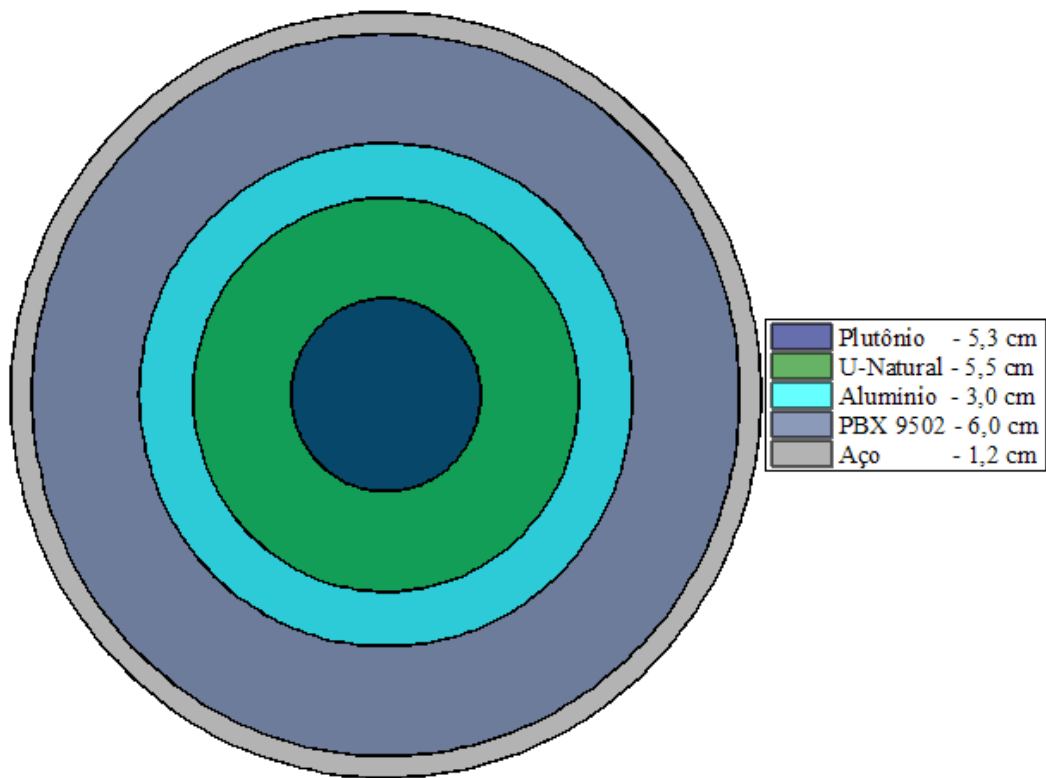


FIG. 3.11 Configuração de um hipotético explosivo nuclear similar a um dos casos estudados por Kessler.

Com base no desenvolvimento teórico apresentado, foi criado um programa de computador em linguagem FORTRAN, denominado ATNA, que soluciona numericamente a equação de condutividade térmica em geometria esférica unidimensional. O programa ATNA, apresentado no Apêndice, está configurado para até vinte camadas de materiais distintos e uma partição de até mil pontos espaciais, e possuindo quatro opções de condição de contorno a serem escolhidas no *input*: 1) convecção natural e radiação térmica; 2) convecção natural; 3) radiação térmica; e 4) temperatura de superfície conhecida.

No intuito de validar a solução numérica descrita neste texto, será apresentado um sistema similar ao apresentado pelo pesquisador Kessler, no artigo mencionado anteriormente. O sistema apresentado na figura FIG. 3.11 é similar, pois Kessler em seu trabalho considerou um pequeno *gap* de 0,11 cm entre as camadas de plutônio e urânio natural. O sistema analisado é o apresentado a seguir:

TAB. 3.3 Coeficientes de condutividade térmica utilizados por Kessler.

Material	k [W/cm°C]
Pu	0,19
U natural	0,34
Al	1,465
PBX 9502	0,00561
Aço	0,136

(Fonte: Kessler, 2007)

No trabalho publicado por Kessler foi considerado que a camada de plutônio produzia um calor total de 144 W, temperatura de superfície de 58°C e os coeficientes de condutividade térmica para cada material exibido na tabela acima.

Através desses dados foram calculadas as soluções analítica e numérica do sistema que resultaram no gráfico a seguir:

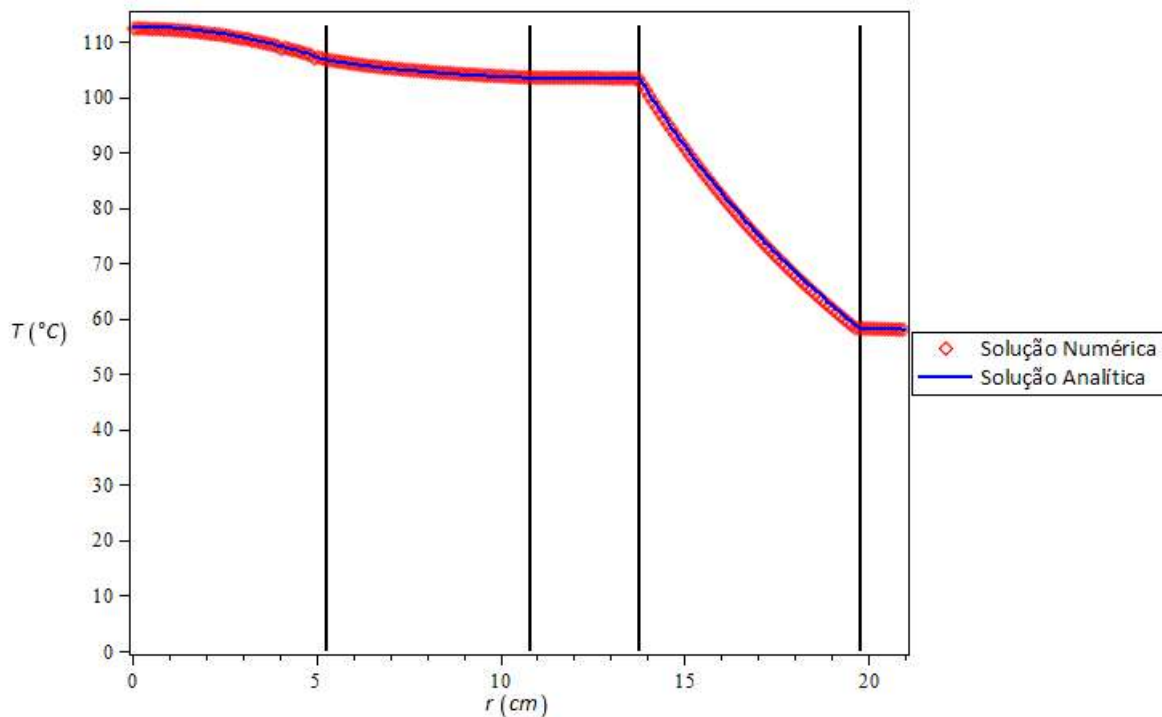


FIG. 3.12 Gráfico $T \times r$, solução numérica e analítica.

No gráfico, observamos que a solução numérica esta coerente com a solução analítica. A seguir temos o gráfico obtido da solução numérica do trabalho publicado pelo Kessler e uma tabela que compara os resultados do programa ATNA com o resultado obtido por Kessler:

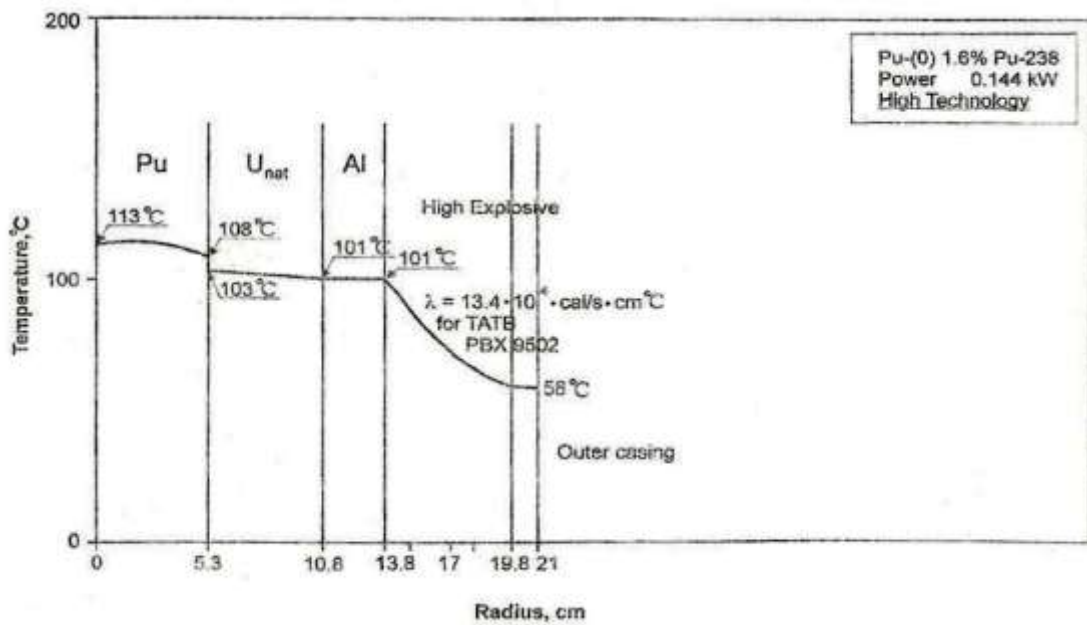


FIG. 3.13 Gráfico $T \times r$, solução numérica realizada por Kessler.

TAB. 3.4 Comparação entre o resultado obtido por meio do programa ATNA e o resultado obtido por Kessler.

Raio [cm]	Temperatura [°C] de acordo programa ATNA	Temperatura [°C] de acordo Kessler
0	112,4	113
5,3	106,7	108(antes do gap) / 103(após gap)
10,8	103,6	101
13,8	102,3	101
19,8	58,27	58
21	58	58

Os resultados apresentados acima mostram que há excelente concordância dos resultados numéricos com os resultados analíticos, bem como os resultados obtidos por Kessler, dando confiabilidade ao programa elaborado.

3.4 A TEMPERATURA NO INTERIOR DA FAT MAN

Visando a exemplificar a metodologia deste trabalho será determinada a temperatura no interior da bomba atômica *Fat Man*, utilizando duas composições isotópicas de plutônio: a composição que de fato foi utilizada na *Fat Man*, composta de 99,1 % do isótopo de Pu-239 e de 0,9 % do isótopo de Pu-240; e a composição de plutônio oriunda de um reator nuclear modelo PWR com queima do combustível de 33MW-d/kg.

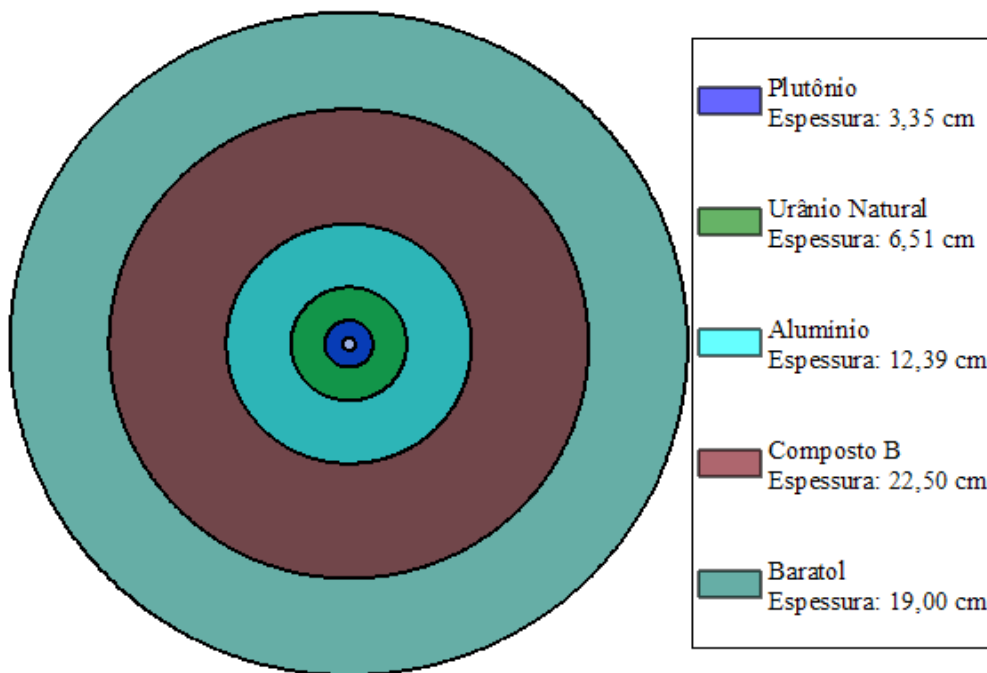


FIG. 3.14 Configuração da bomba nuclear *Fat Man*.

A figura FIG. 3.14 exibe o modelo do núcleo da *Fat Man*, onde as lentes explosivas externas foram consideradas compostas exclusivamente do explosivo baratol, já que a modelagem real dessas lentes exigiria um cálculo tridimensional. Tal fato, entretanto, pouca importância tem nos resultados, tendo em vista que as lentes se situam a uma distância muito grande do núcleo físsil, tendo pouca influência na distribuição das temperaturas internas, como será visto a seguir. Para o cálculo da temperatura no interior da *Fat Man* foram considerados os seguintes dados: temperatura ambiente de 25°C, emissividade da superfície igual a 1 e os seguintes coeficientes de condutividade térmica:

TAB. 3.5 Coeficientes de condutividade térmica utilizados na determinação da distribuição de temperatura no interior da *Fat Man*.

Material	k [W/cm°C]
Plutônio	0,19
Urânio natural	0,34
Alumínio	1,465
Composto B	0,00219
Baratol	0,00494

(Fonte: Kessler, 2007)

O resultado do cálculo da temperatura no interior da *Fat Man* pode ser visto no gráfico a seguir:

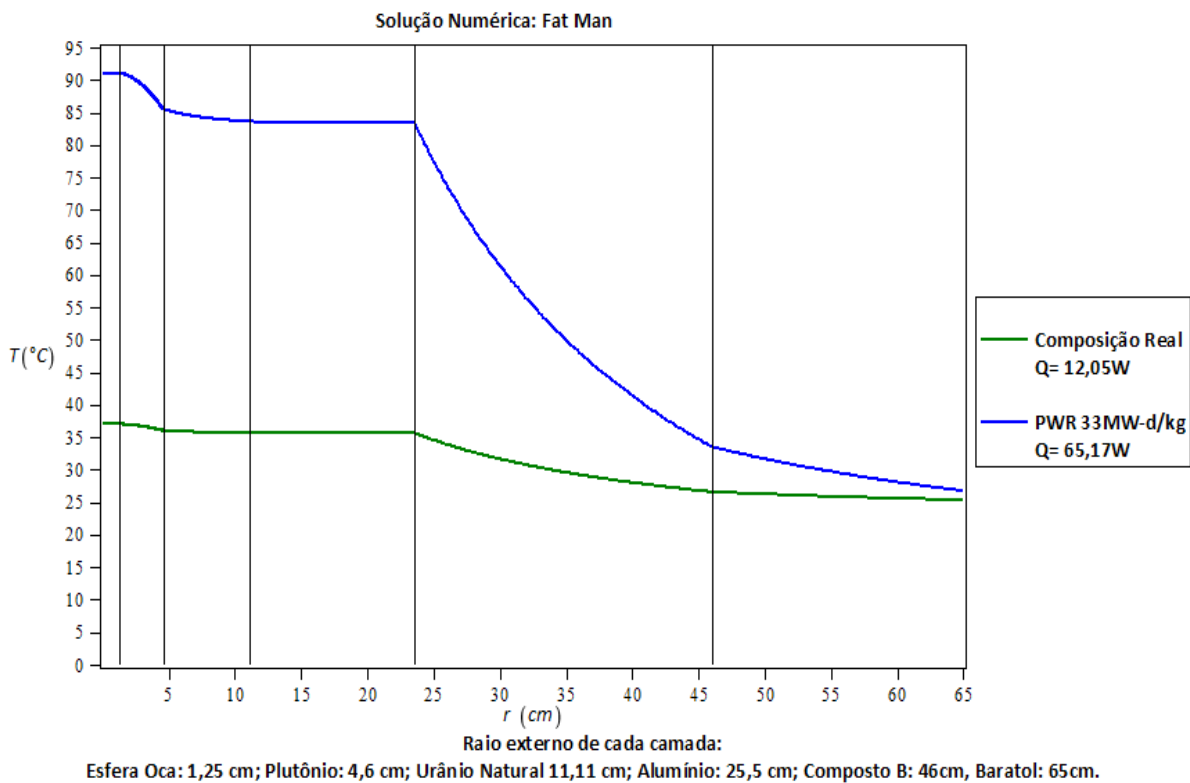


FIG. 3.15 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior da *Fat Man* para as composições isotópicas de plutônio.

No gráfico acima podemos observar uma grande discrepância entre as curvas de temperatura e também entre o calor gerado por cada composição isotópica do plutônio. A composição utilizada na *Fat Man* produz um calor total de 12,05 W que não é capaz de elevar a temperatura no interior do artefato de modo a provocar dilatações e perda das

propriedades geométricas do mesmo. Enquanto para a composição isotópica do plutônio típica da queima de um reator PWR de 33MW-d/kg, produz um calor total de 65,17 W, fazendo com que a temperatura na camada do explosivo composto B supere o seu ponto de fusão, que é de 79°C, inutilizando completamente o explosivo.

Este resultado mostra que a escolha da composição isotópica de plutônio é um passo crucial em um projeto de um artefato nuclear, analisando apenas do ponto de vista do calor gerado pelo decaimento alfa dos isótopos do plutônio, além de outros problemas, como o problema da pré-ignição.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Neste capítulo, será exibido o resultado da aplicação do programa ATNA no cálculo da distribuição de temperatura no interior dos hipotéticos explosivos nucleares cujas configurações foram determinadas no segundo capítulo deste texto com o auxílio do código de transporte ANISN e as seções de choque de Hansen-Roach, a 16 grupos de energia.

Para o cálculo da distribuição de temperatura considerou-se a temperatura ambiente de 25°C. A emissividade da superfície do alto-explosivo, por falta de dados mais precisos, foi considerada igual à emissividade da superfície de um corpo negro, ou seja, $\epsilon = 1$. É importante salientar que, ao considerar a emissividade da superfície igual à de um corpo negro, estamos minimizando a temperatura da superfície e, conseqüentemente, a temperatura no interior dos supostos explosivos nucleares. Os coeficientes de condutividade térmica considerados são mostrados na tabela a seguir.

TAB. 4.1 Coeficientes de condutividade térmica utilizados na determinação da distribuição de temperatura no interior dos hipotéticos explosivos nucleares.

Material	K [W/cm °C]
Liga de Plutônio com adição de Gálio ¹	0,0875
Berílio ²	2,0100
Urânio Natural ²	0,2750
Composto B ³	0,00219
PBX 9404 ³	0,00385

(Fonte: 1 - ANDREW, 1981; 2 - HAYNES, 2006; 3 - KESSLER, 2011)

Como dito anteriormente, os alto-explosivos químicos apresentam propriedades térmicas mais sensíveis (em termos de temperatura de fusão e de deterioração do material) do que os outros materiais que compõem um artefato nuclear. Além disso, a eficiência da detonação de um explosivo nuclear está intrinsecamente ligada à geometria das lentes explosivas que são compostas pelos os alto-explosivos. Portanto, uma dilatação da camada de alto explosivo do hipotético explosivo nuclear seria o suficiente para inviabilizar o projeto.

Na tabela TAB. 4.2, apresentam-se as temperaturas de fusão e de explosão dos explosivos Composto B e PBX-9404.

TAB. 4.2 Temperaturas críticas dos alto-explosivos.

Alto-explosivo	Temperatura de Fusão [°C]	Temperatura de Pirólise [°C]	Temperatura de Explosão [°C]
Composto B	79	200	214
PBX 9404	190	290	236

(Fonte: KESSLER,2007)

4.1 RESULTADOS NUMÉRICOS DA DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA NO INTERIOR DOS HIPOTÉTICOS EXPLOSIVOS NUCLEARES

Agora iremos exibir a distribuição de temperatura no interior dos hipotéticos explosivos nucleares começando com a composição isotópica do plutônio comumente usado nas armas nucleares (Weapon-Grade plutonium) e, em seguida, utilizando as composições isotópicas do plutônio proveniente de reatores nucleares PWR (queima de 33MW-d/kg), HWR (queima de 7500MW-d/t) e FBR-Blanket, respectivamente. A escolha da composição *Weapon-Grade* tem o intuito de fornecer um parâmetro de comparação com as demais composições do plutônio, uma vez que esta composição do plutônio é tipicamente utilizada nos explosivos nucleares.

Os segmentos de reta verticais nos gráficos representam os limites de cada região: fonte de nêutrons, núcleo físsil, cobertura e alto-explosivo. Cada gráfico apresenta três curvas de distribuição, uma para cada espessura do alto-explosivo definida no segundo capítulo. Além disso, poderão ser exibidas curvas que representam as temperaturas críticas (de fusão e alto-explosão) dos alto-explosivos, visando a uma melhor interpretação do resultado apresentado.

4.1.1 COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA WEAPON-GRADE

- ALTO-EXPLOSIVO: COMPOSTO B;
 - COBERTURA: BERÍLIO;

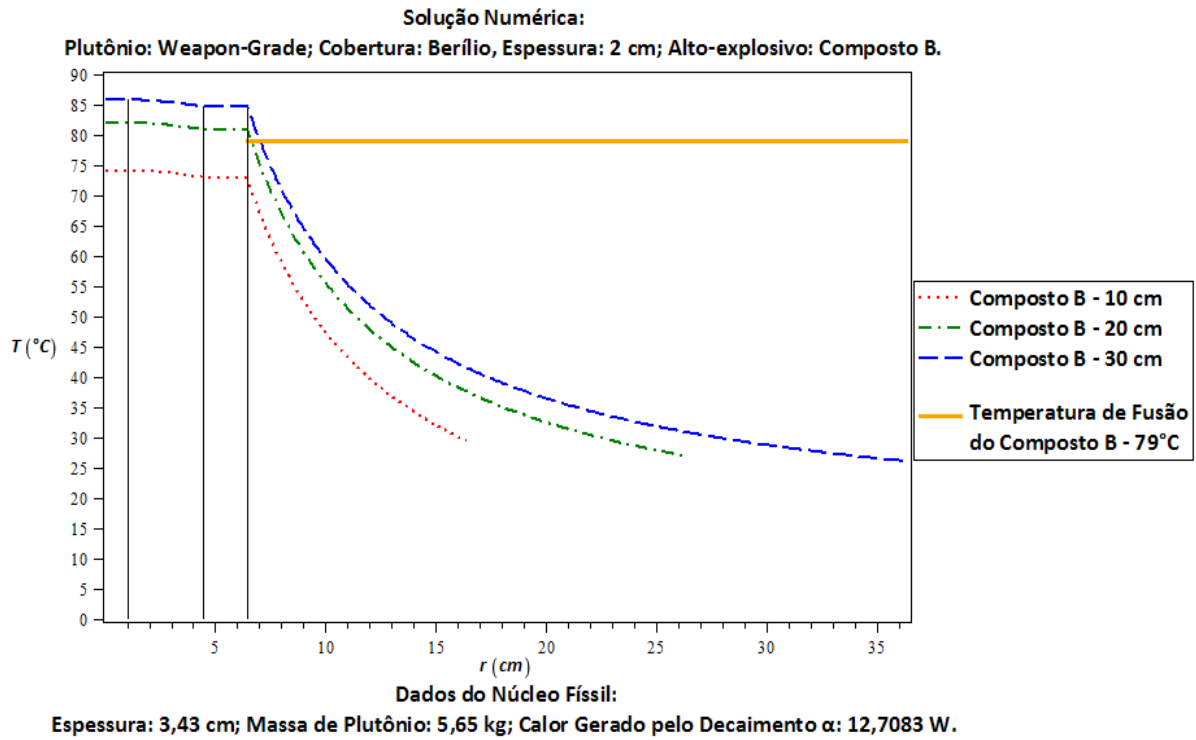


FIG. 4.1 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de berílio de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.

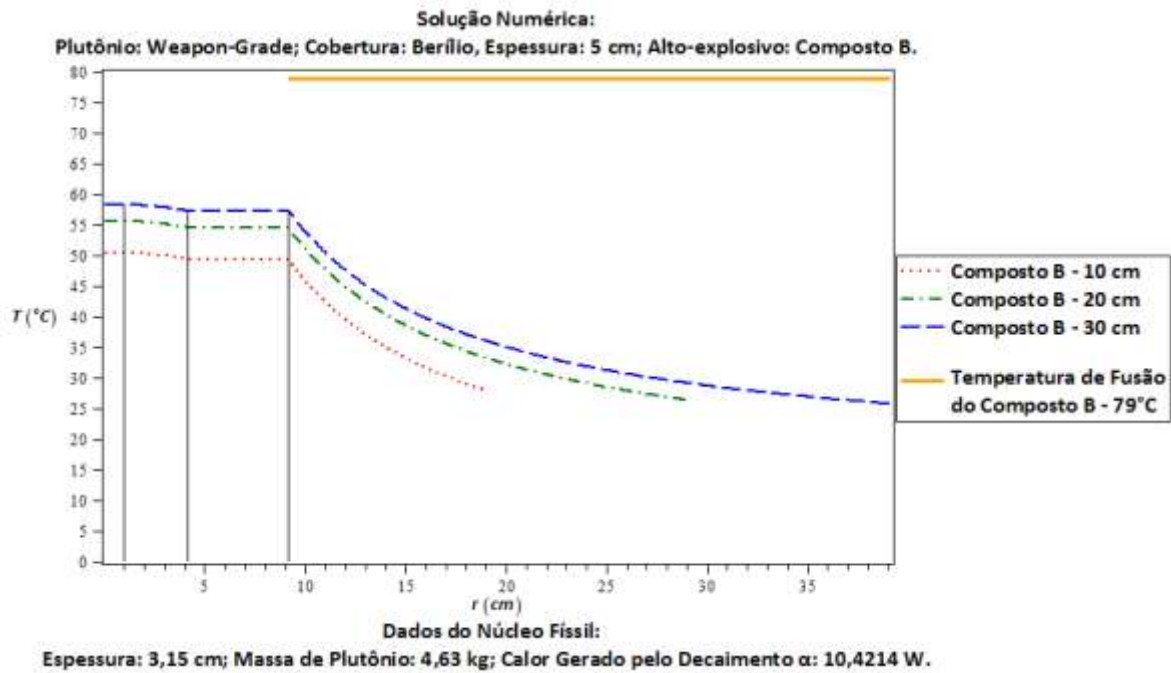


FIG. 4.2 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição *Weapon-Grade*, cobertura de berílio de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.

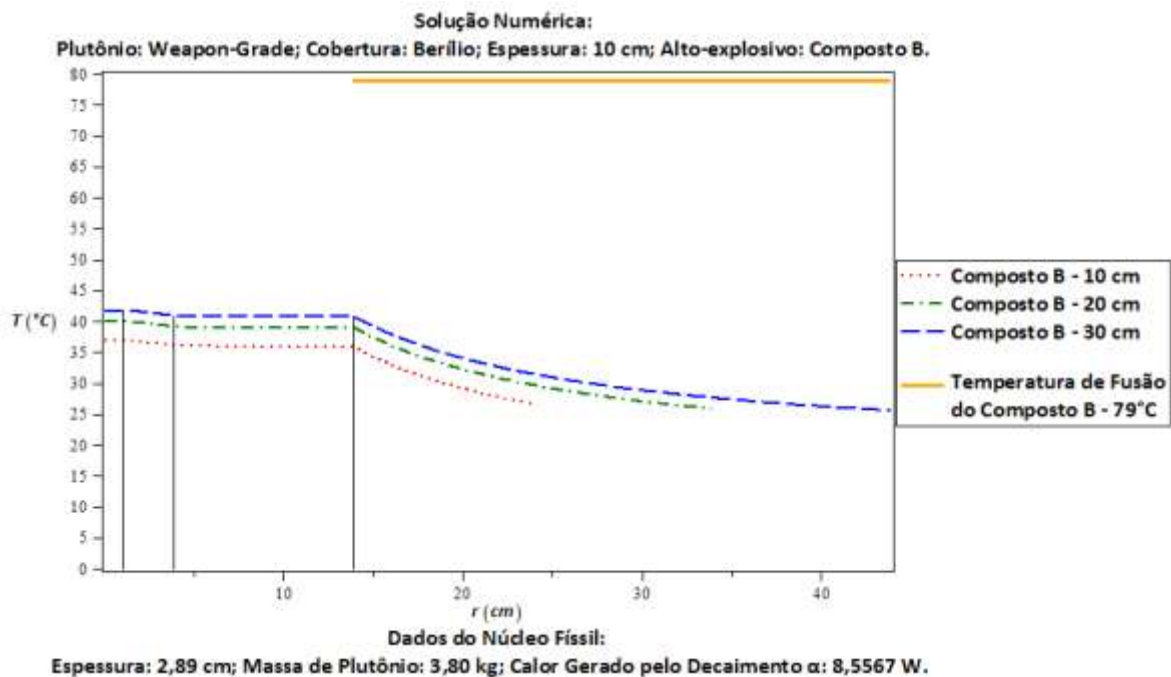


FIG. 4.3 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição *Weapon-Grade*, cobertura de berílio de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.

- COBERTURA: URÂNIO NATURAL;

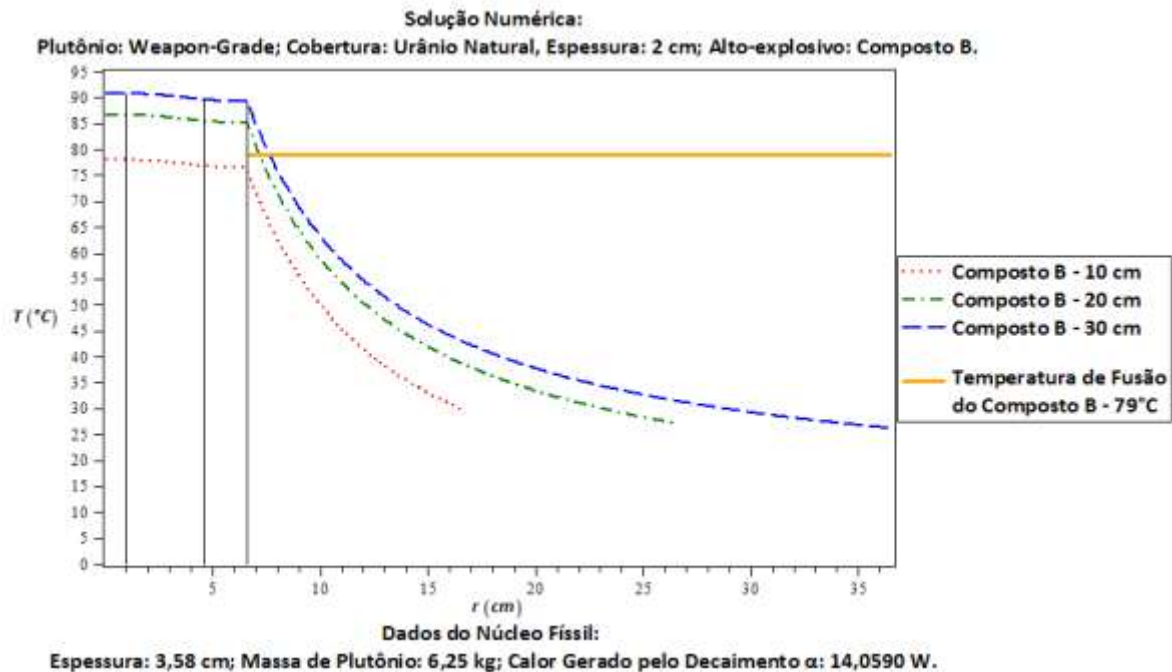


FIG. 4.4 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição *Weapon-Grade*, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.

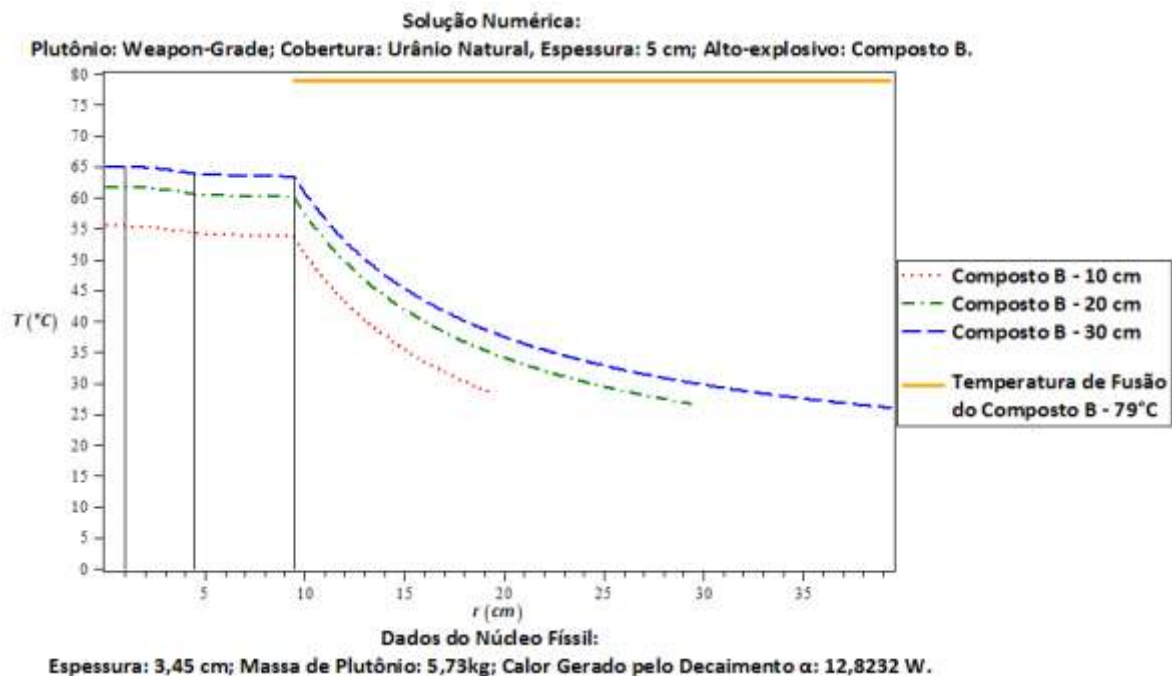


FIG. 4.5 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição *Weapon-Grade*, cobertura de urânio natural de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.

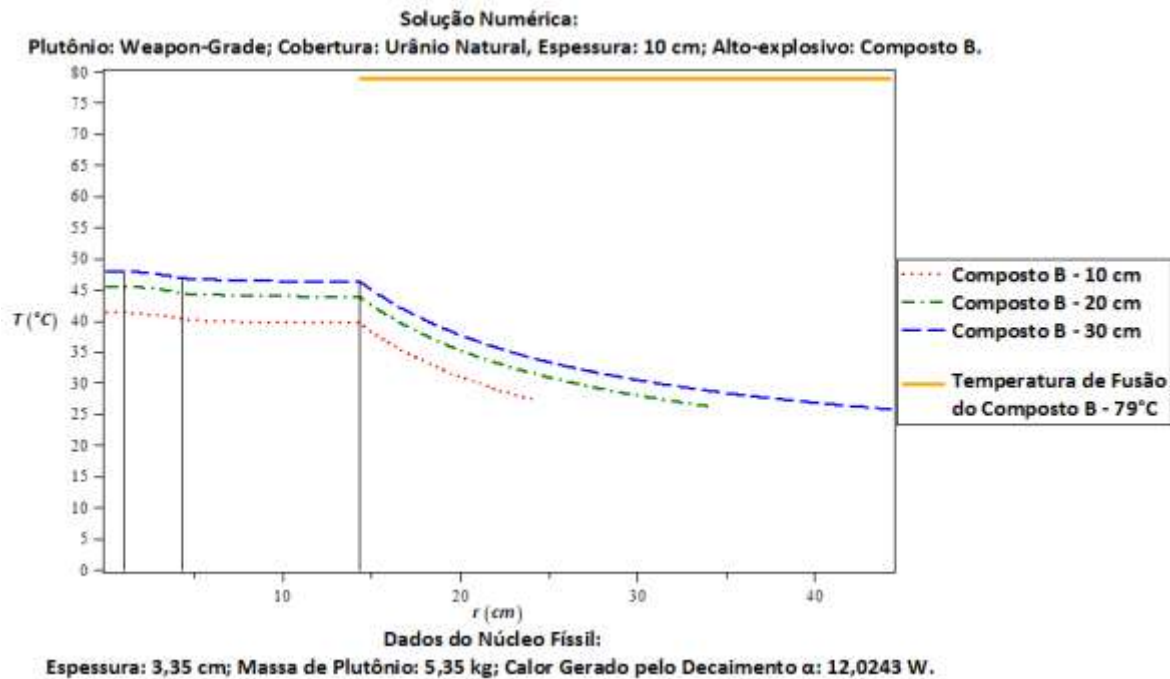


FIG. 4.6 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição *Weapon-Grade*, cobertura de urânio natural de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.

Os hipotéticos explosivos nucleares de núcleo fissil composto de plutônio *Weapon-Grade*, alto-explosivo Composto B e cobertura com espessura de 2 cm se mostram inviáveis, uma vez que a temperatura na camada de alto-explosivo chega a proximidade ou excedem a temperatura de fusão, resultando na dilatação ou derretimento do Composto B. Para cobertura de espessura de 5 e 10 cm os hipotéticos explosivos nucleares aparentemente se mostram viáveis, uma vez que estão abaixo da temperatura de fusão do Composto B.

- ALTO-EXPLOSIVO: PBX 9404;
 - COBERTURA: BERÍLIO;

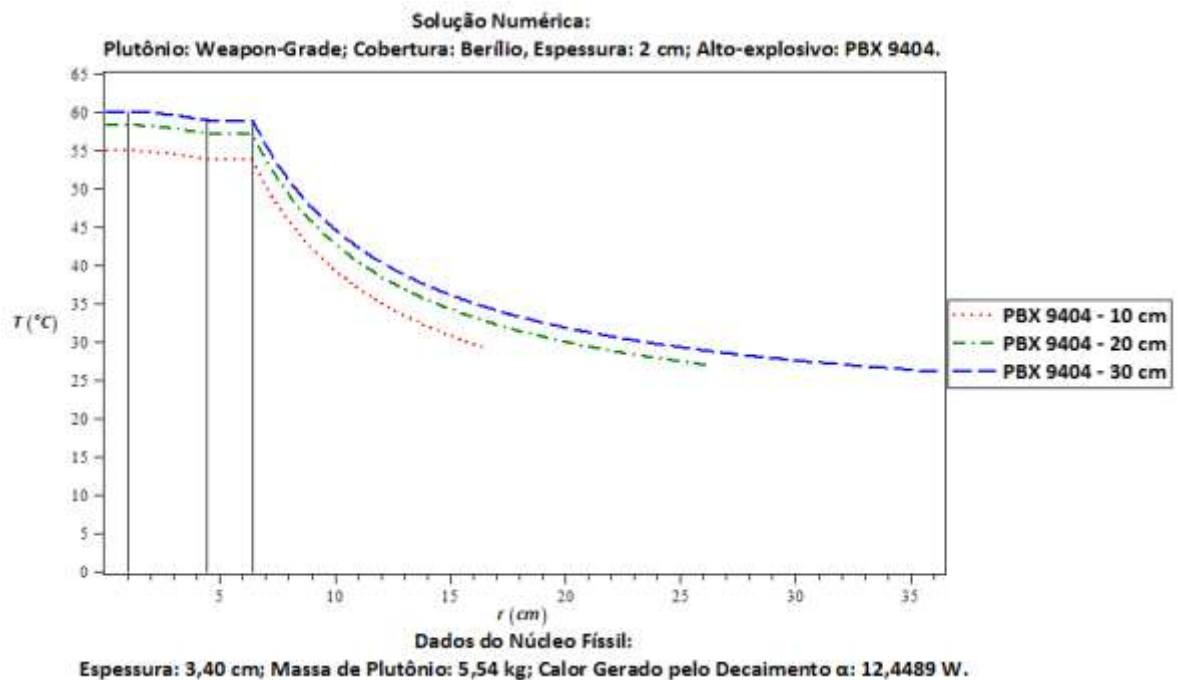


FIG. 4.7 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de berílio de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

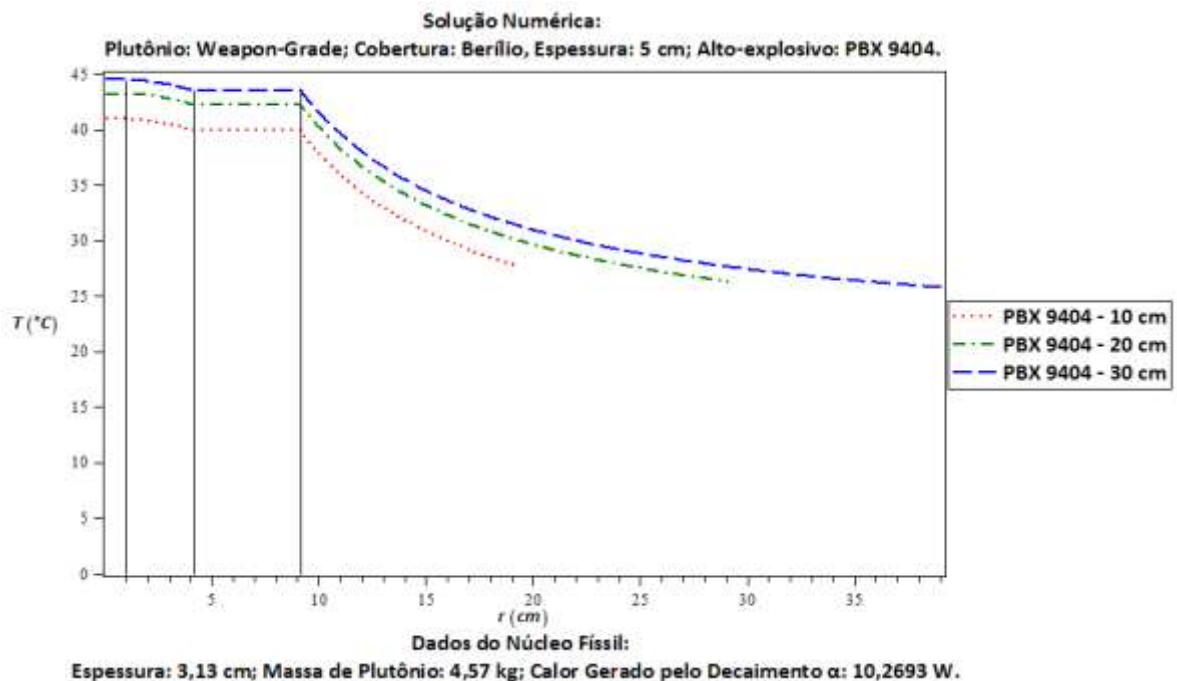


FIG. 4.8 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de berílio de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

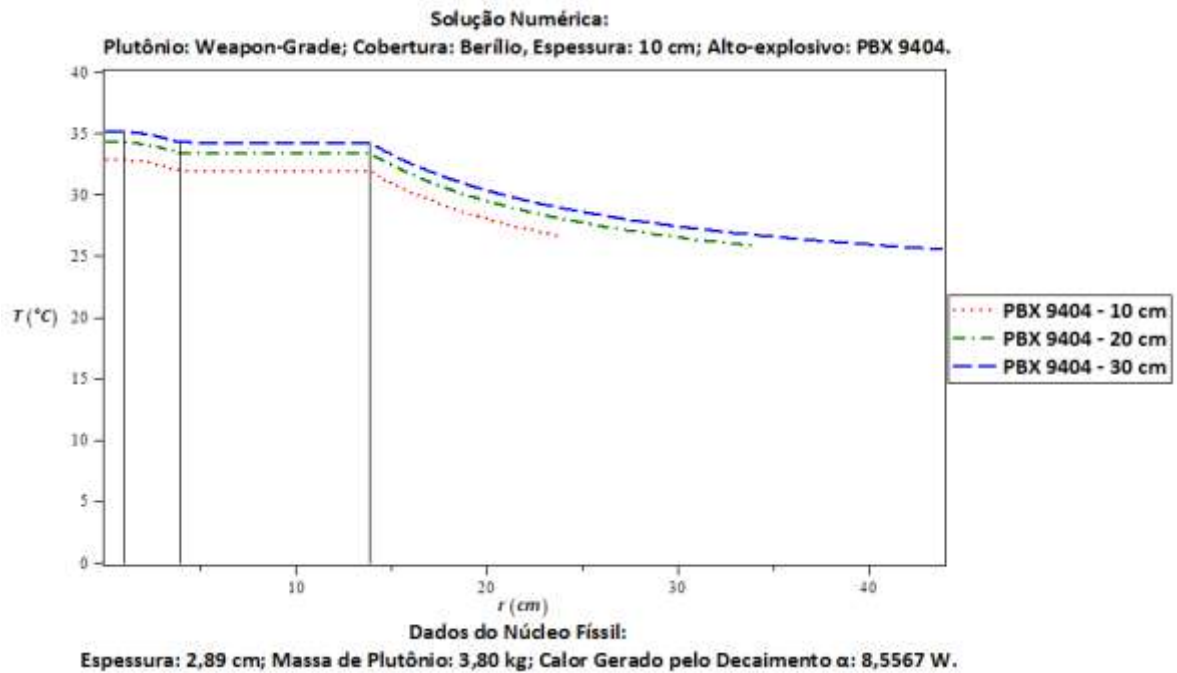


FIG. 4.9 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de berílio de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

- COBERTURA: URÂNIO NATURAL;

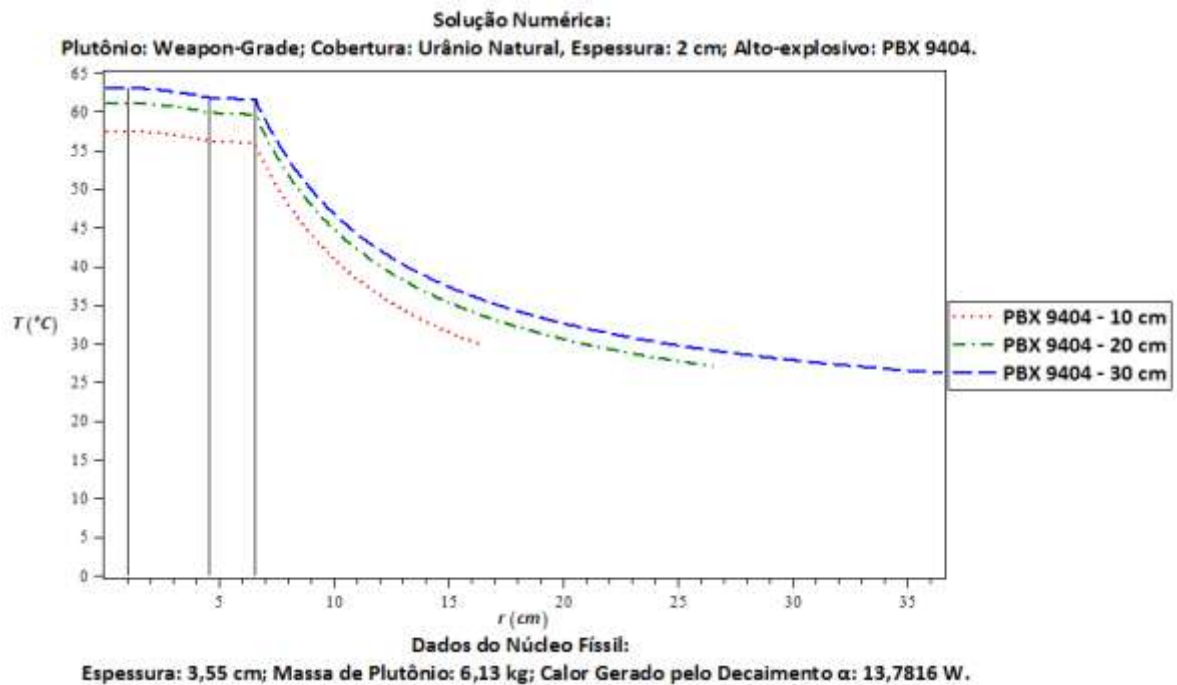


FIG. 4.10 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de urânio natural de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

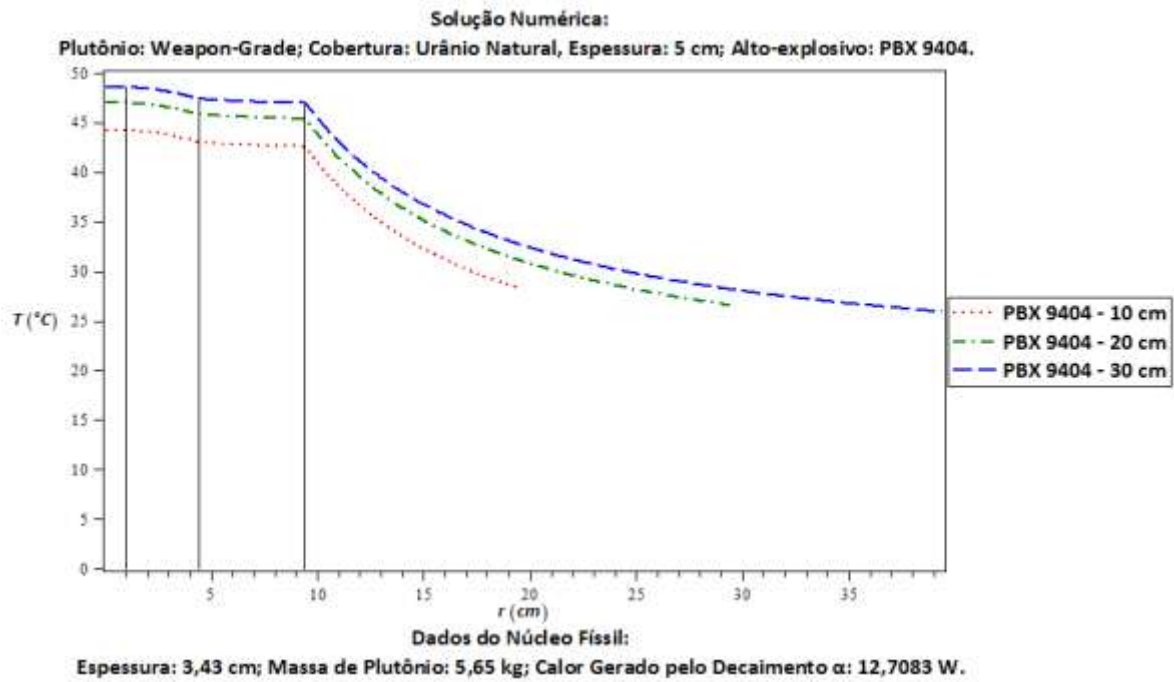


FIG. 4.11 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de urânio natural de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

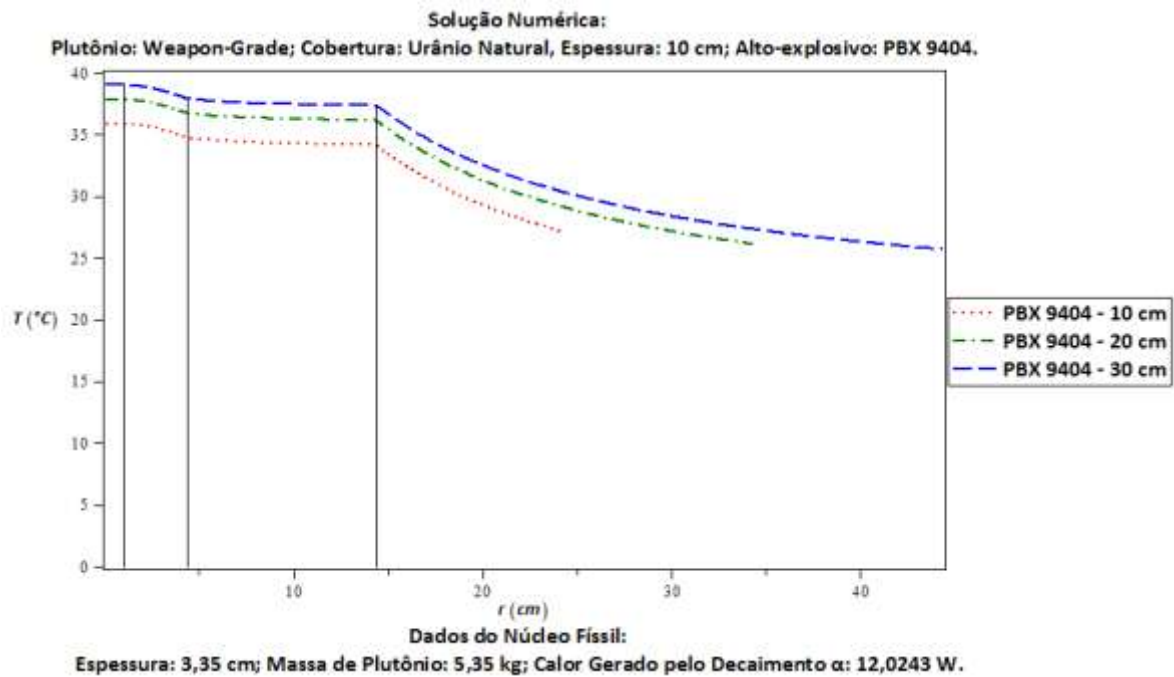


FIG. 4.12 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de urânio natural de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

Os hipotéticos explosivos nucleares com plutônio de composição *Weapon-Grade*, com utilização do alto-explosivo PBX 9404, se mostram viáveis para todas as configurações apresentadas, pois em todos os casos a temperatura no interior do PBX-9404 ficou aquém de sua temperatura de fusão, que é de 190°C.

4.1.2 COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA PWR 33MW-D/KG

- ALTO-EXPLOSIVO: COMPOSTO B;
 - COBERTURA: BERÍLIO;

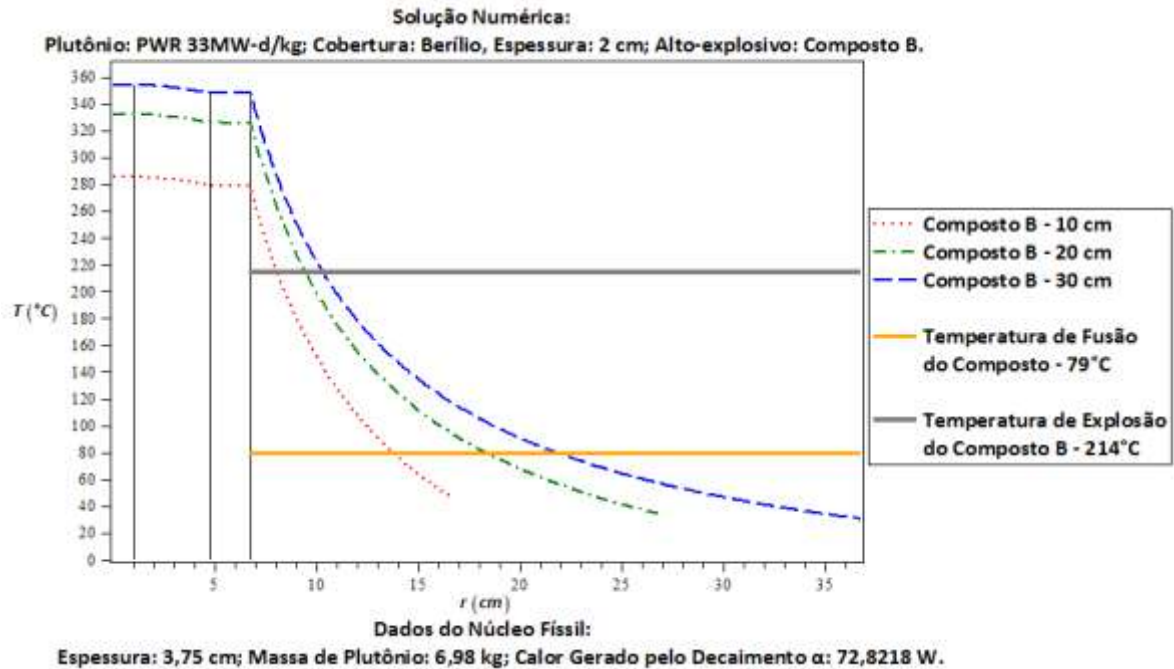


FIG. 4.13 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.

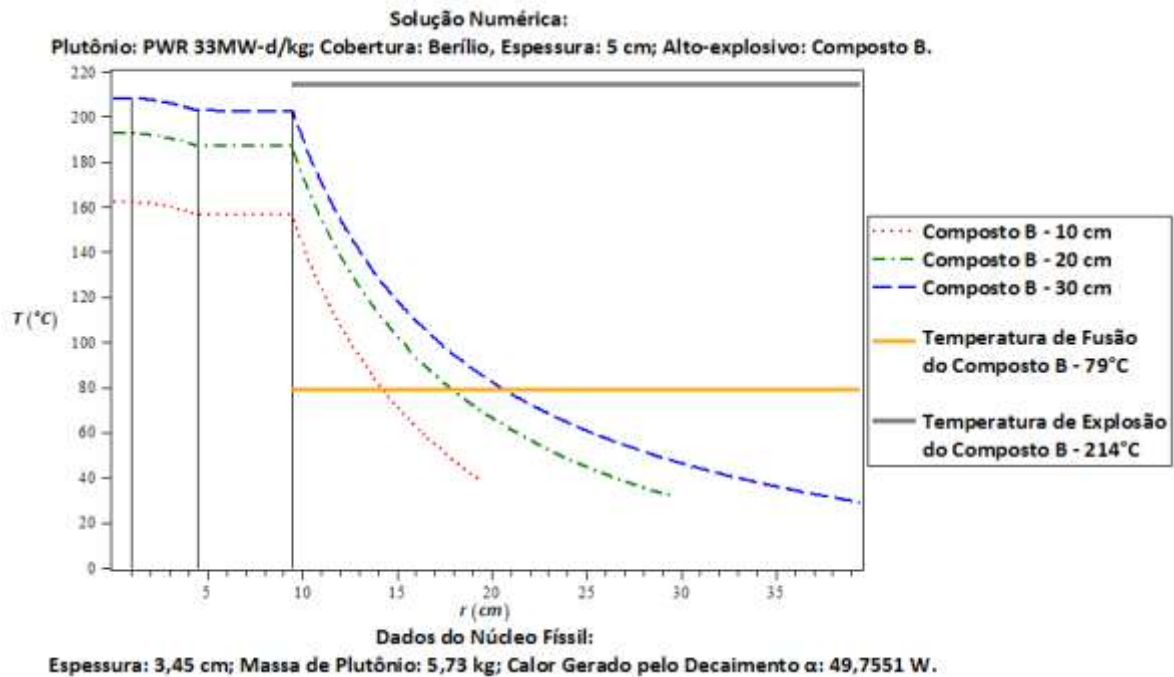


FIG. 4.14 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.

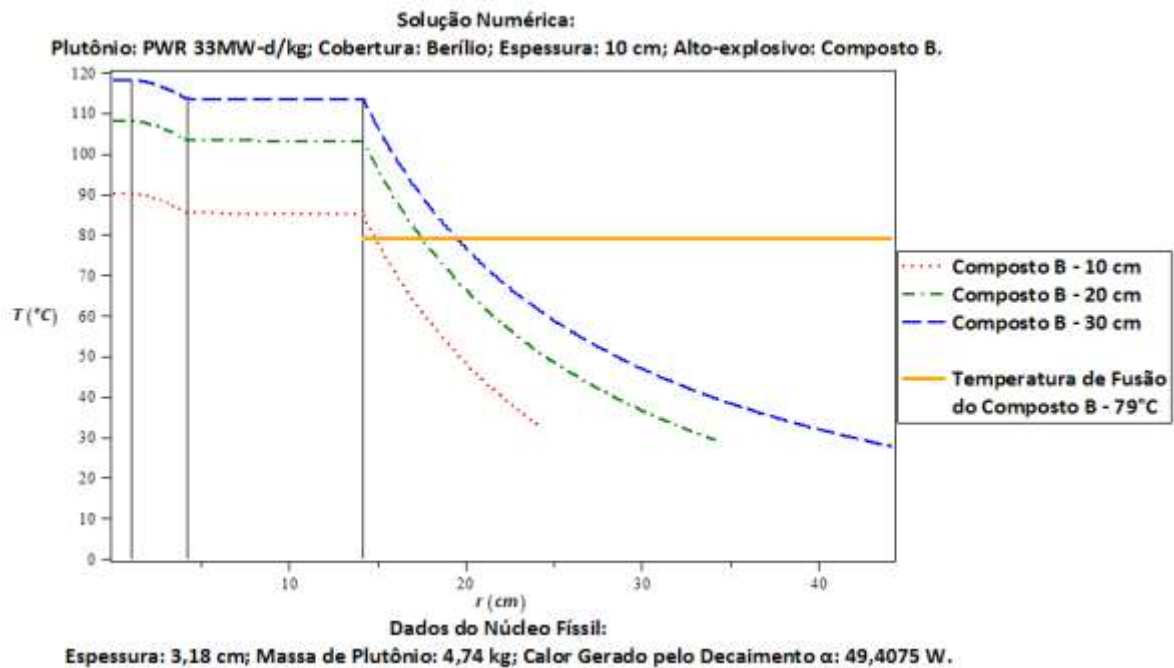


FIG. 4.15 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.

- COBERTURA: URÂNIO NATURAL;

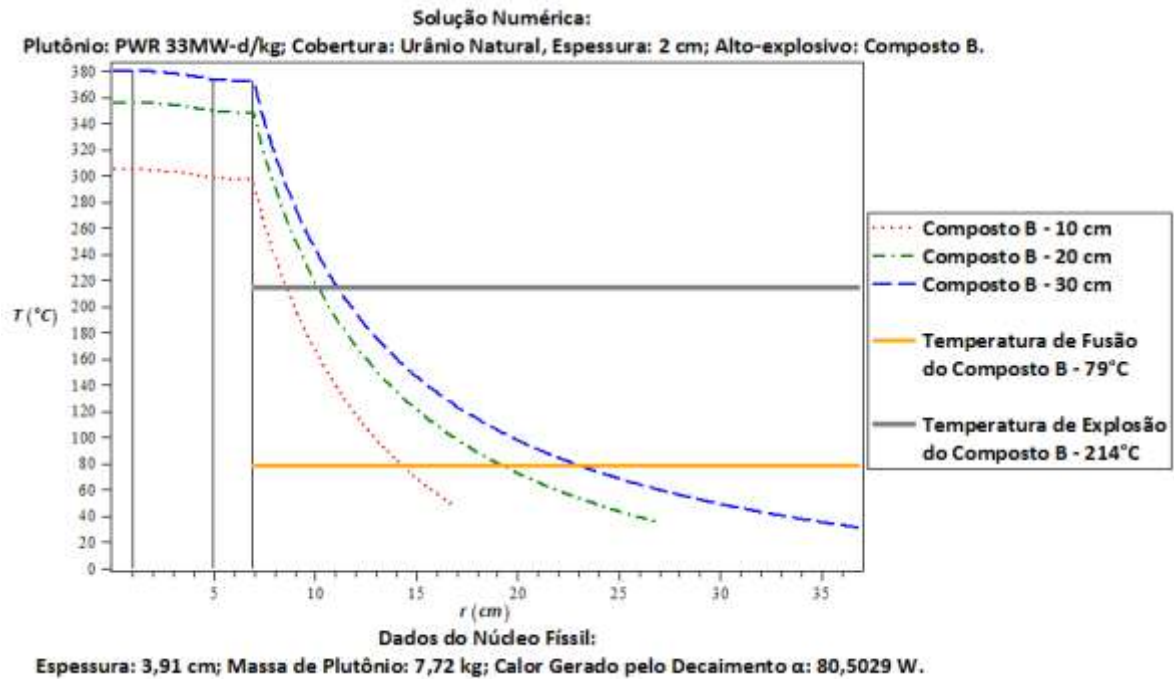


FIG. 4.16 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.

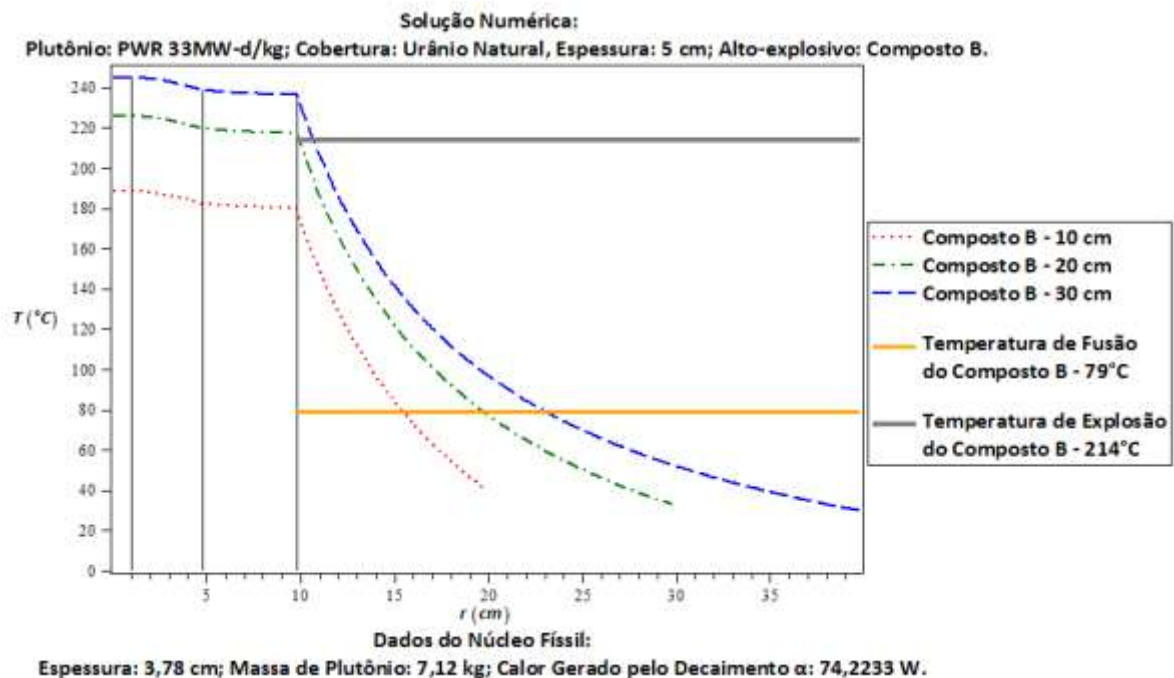


FIG. 4.17 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.

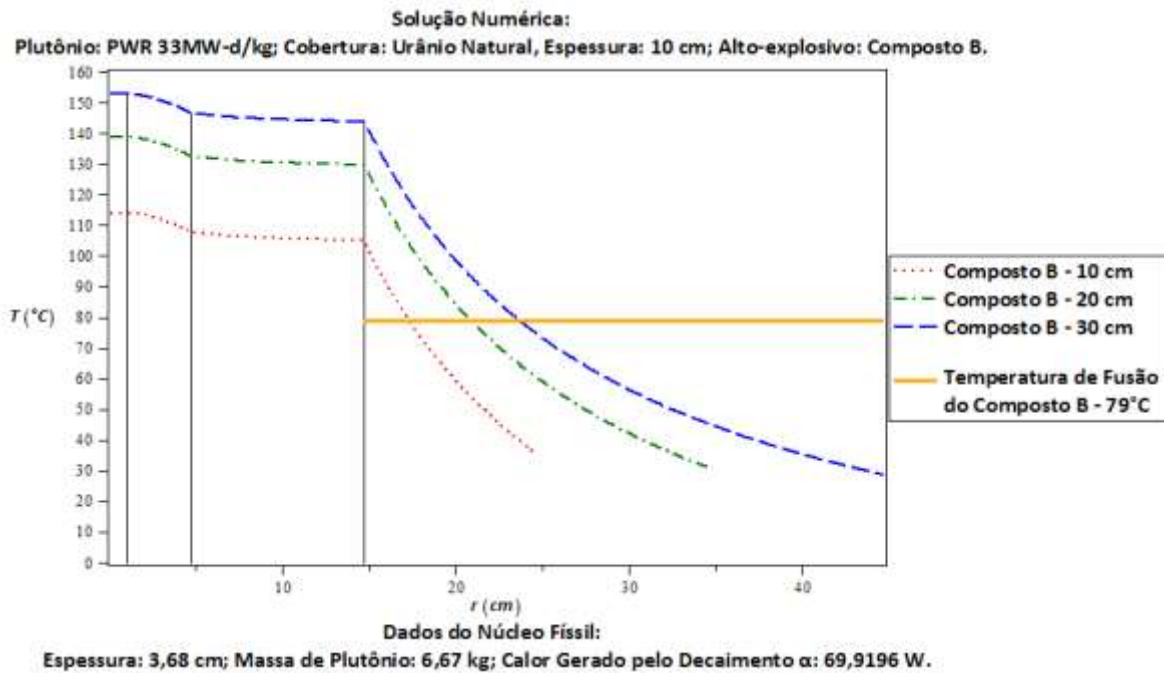


FIG. 4.18 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.

No presente caso, o calor produzido pelo plutônio proveniente do reator PWR com queima do combustível de 33MW-d/kg mostrou-se alto o suficiente para tornar inviáveis os hipotéticos explosivos nucleares que o utilizam, uma vez que, em todos os casos a temperatura ultrapassou a temperatura de fusão do composto B. Além disso, em alguns casos a temperatura ultrapassou a temperatura de alto-explosão.

- ALTO-EXPLOSIVO: PBX 9404;
 - COBERTURA: BERÍLIO;

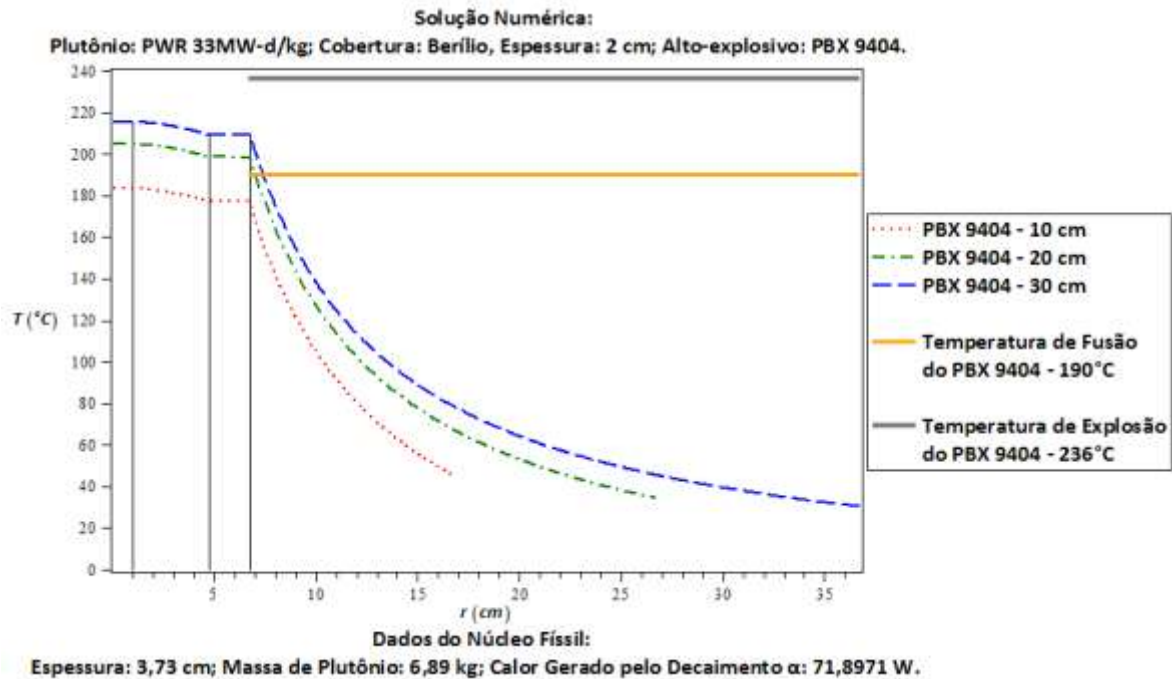


FIG. 4.19 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

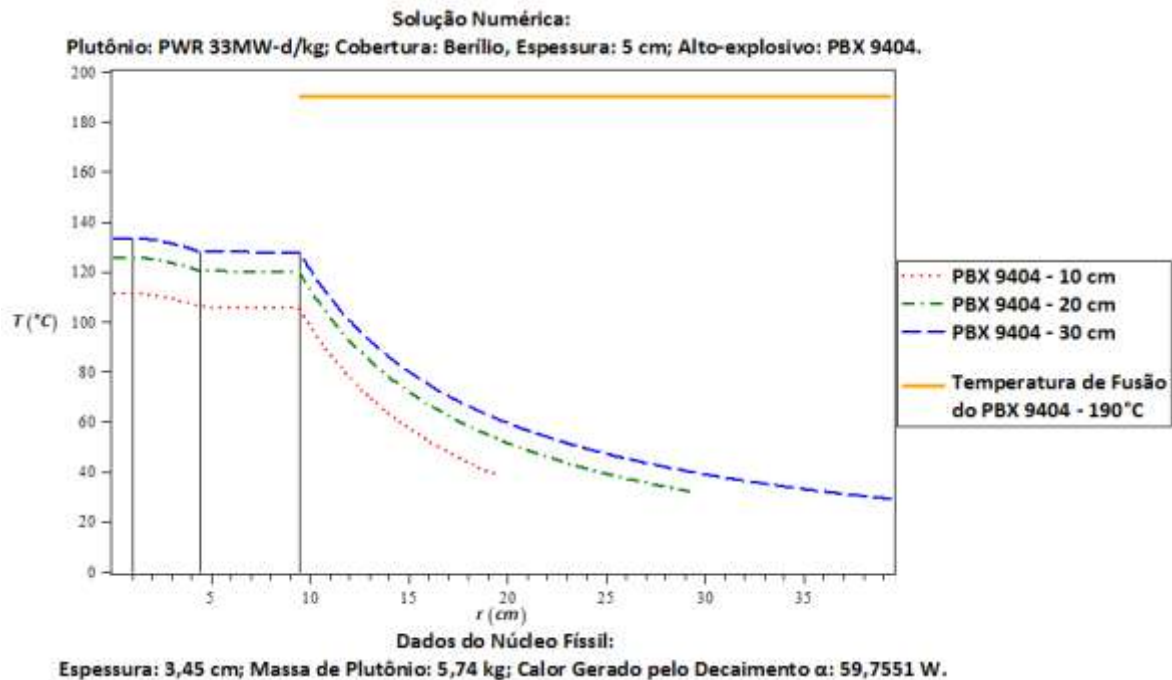


FIG. 4.20 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

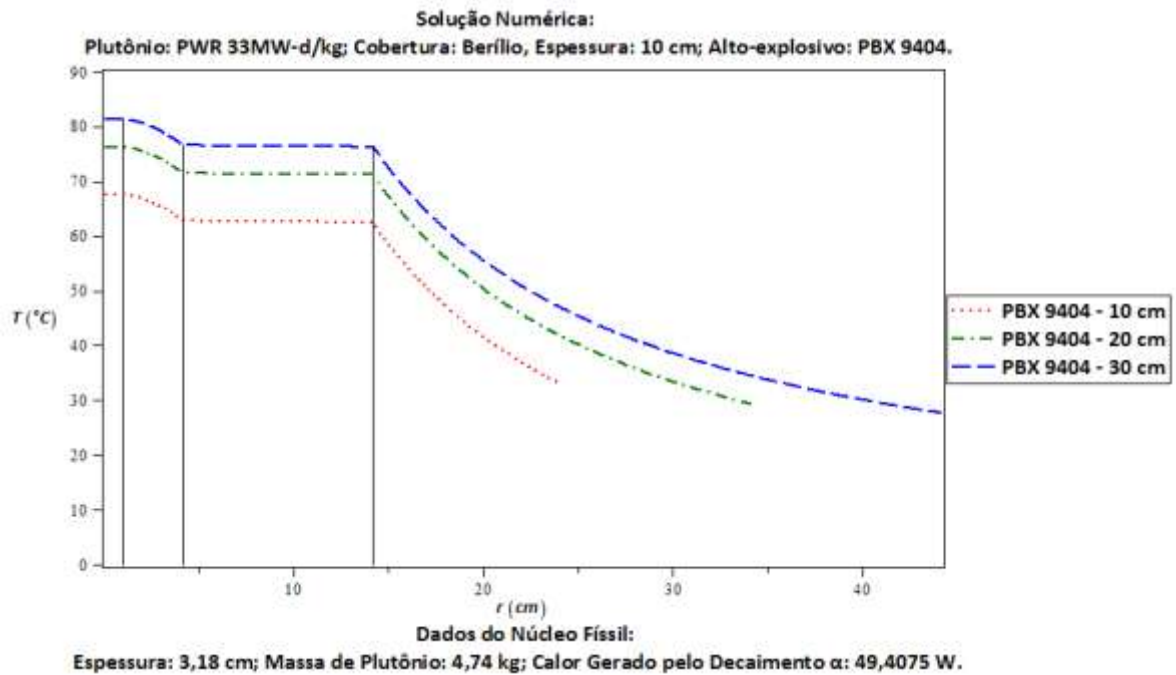


FIG. 4.21 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de berílio de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

- COBERTURA: URÂNIO NATURAL;

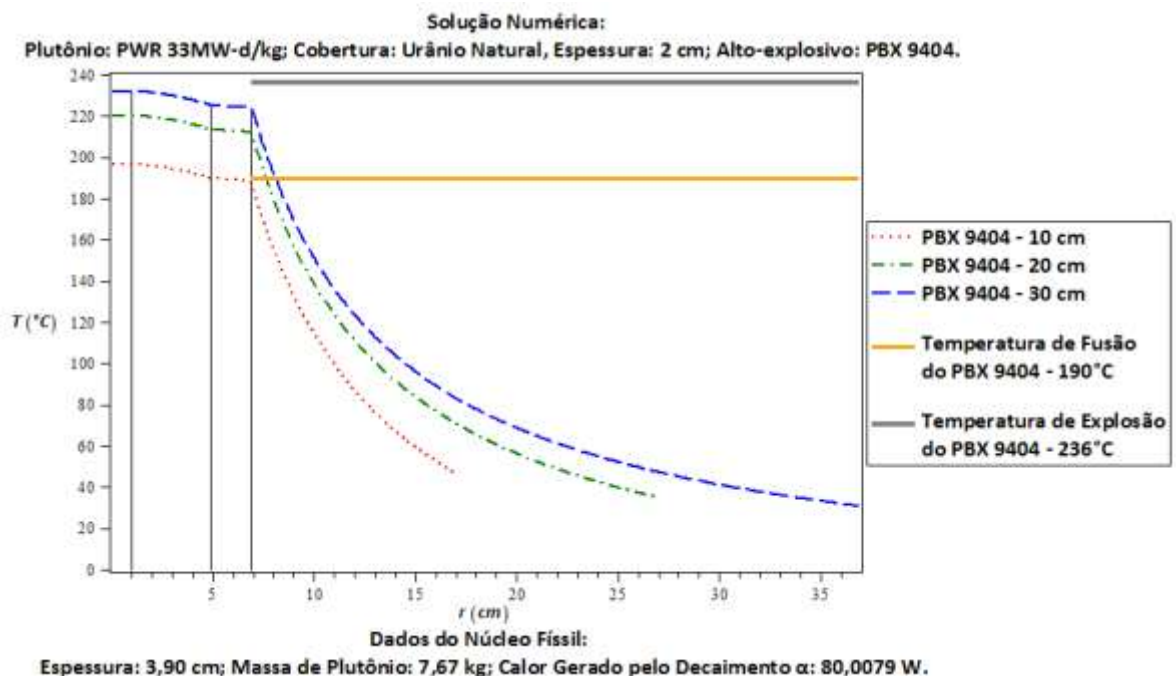


FIG. 4.22 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

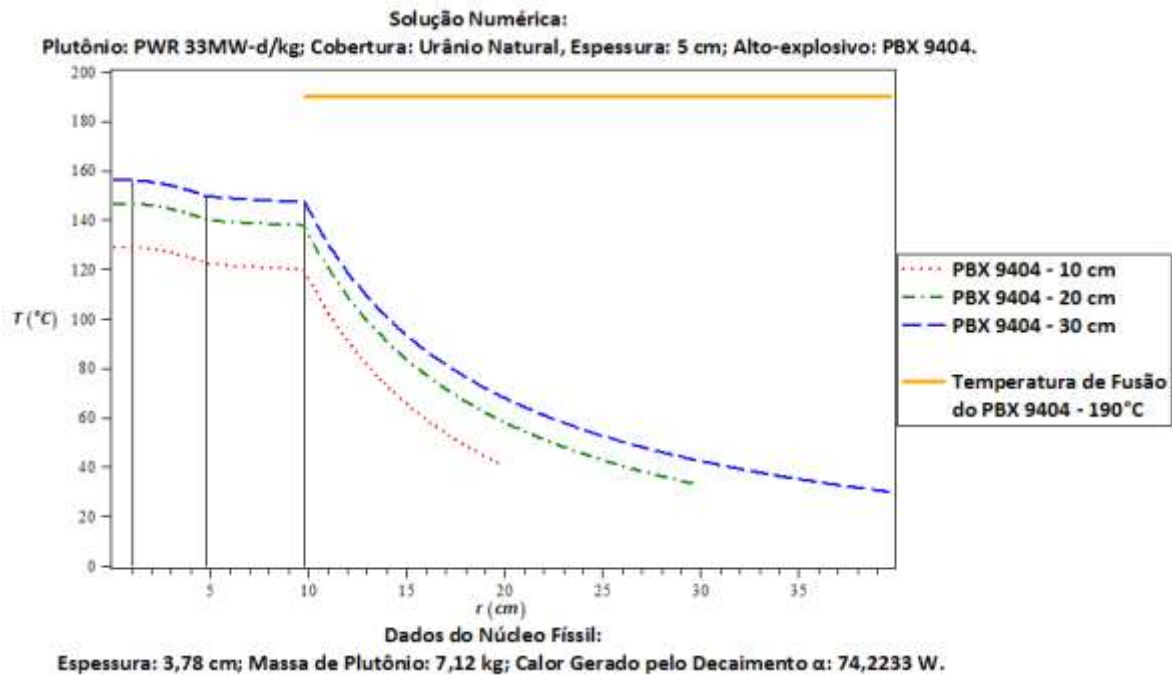


FIG. 4.23 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

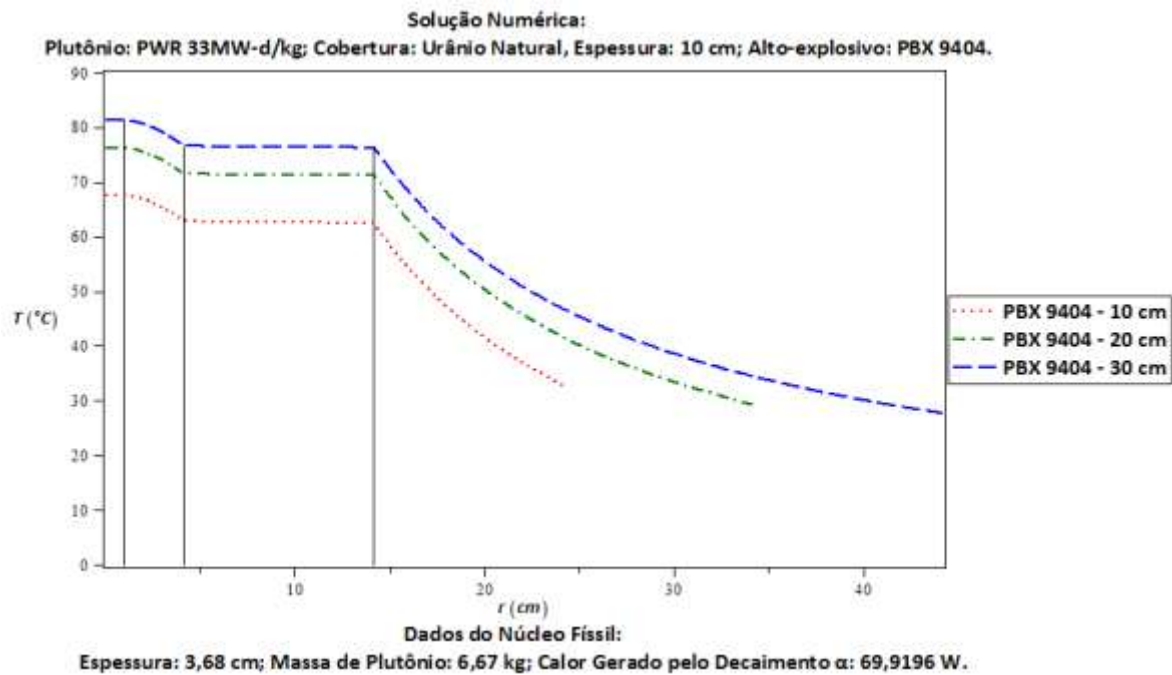


FIG. 4.24 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição PWR 33MW-d/kg, cobertura de urânio natural de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

No caso dos hipotéticos explosivos nucleares que utilizam o plutônio produzido em reatores PWR e o alto-explosivo PBX 9404, há uma possível viabilidade para coberturas de 5 e 10 cm de espessura. Os que possuem cobertura de 2 cm de espessura apresentam temperaturas que ultrapassam ou são muito próximas da temperatura de fusão do PBX-9404.

4.1.3 COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA HWR 7500MW-D/T

- ALTO-EXPLOSIVO: COMPOSTO B;
 - COBERTURA: BERÍLIO;

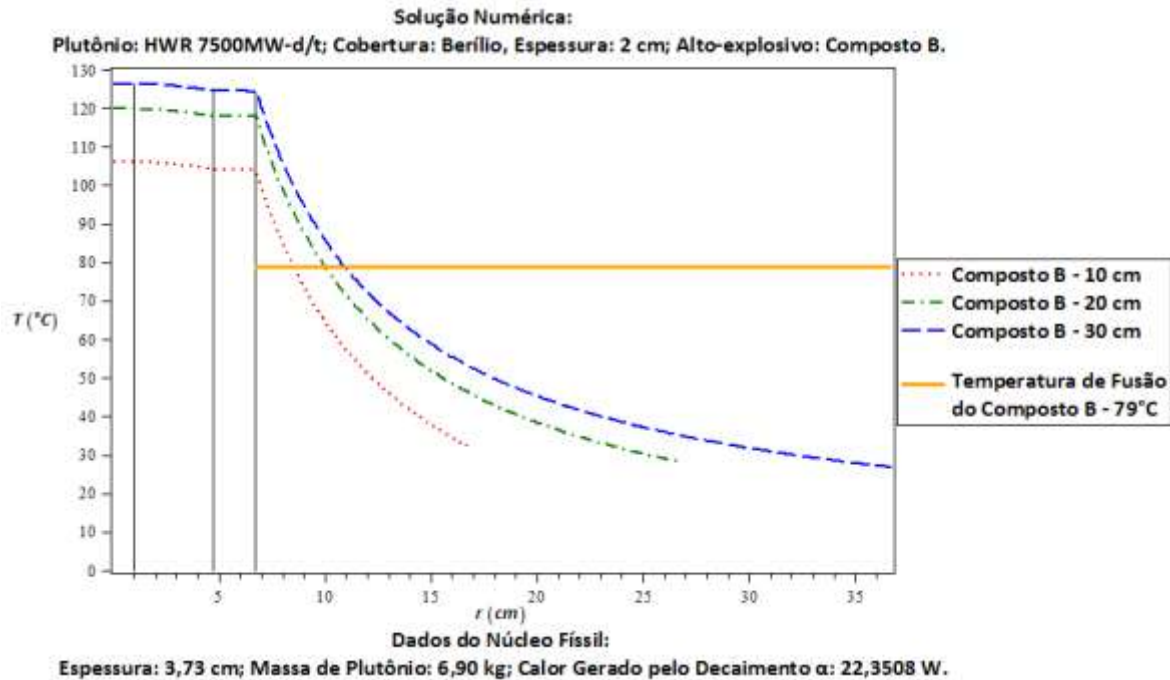


FIG. 4.25 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.

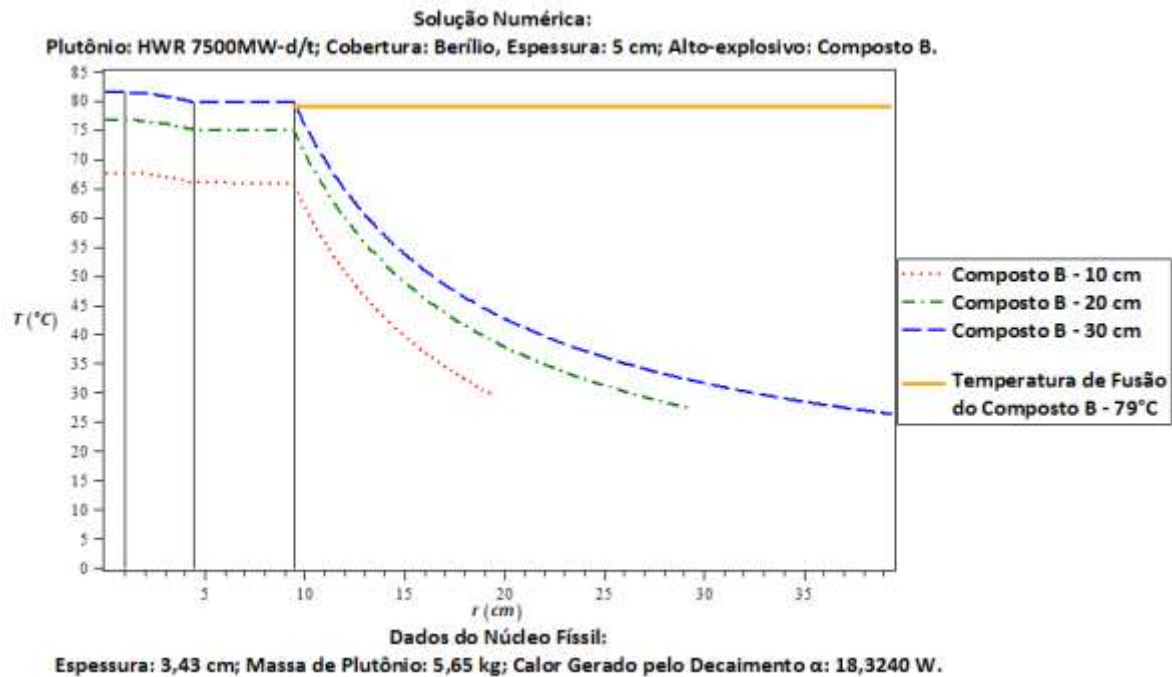


FIG. 4.26 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.

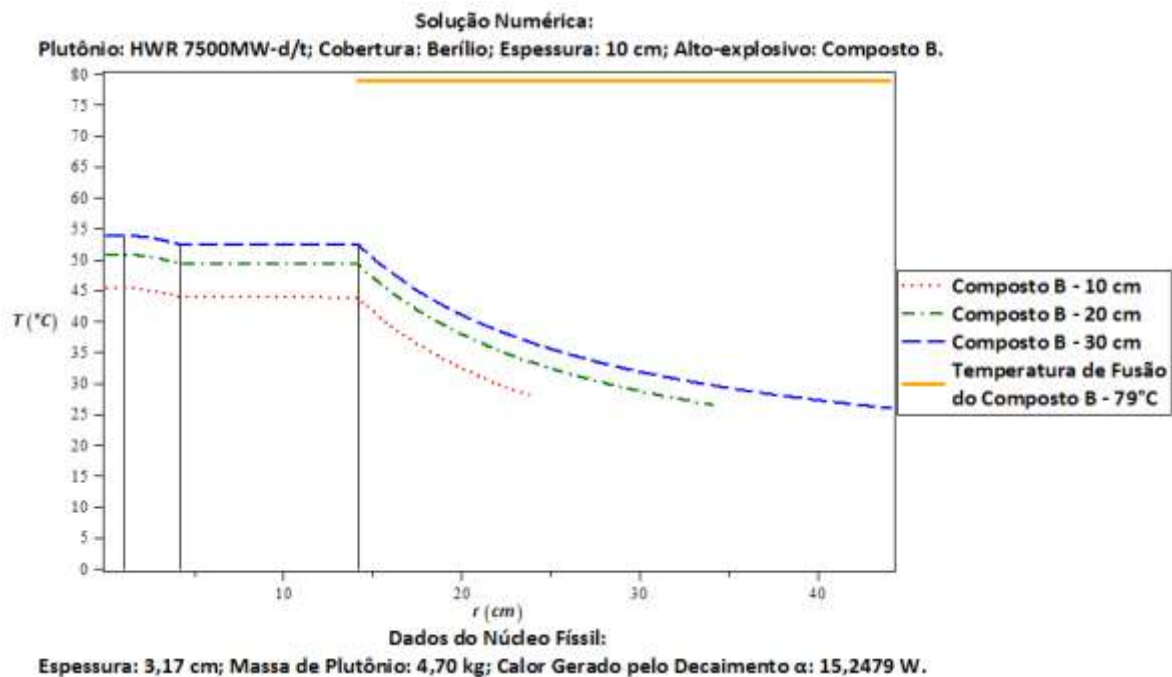


FIG. 4.27 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.

- COBERTURA: URÂNIO NATURAL;

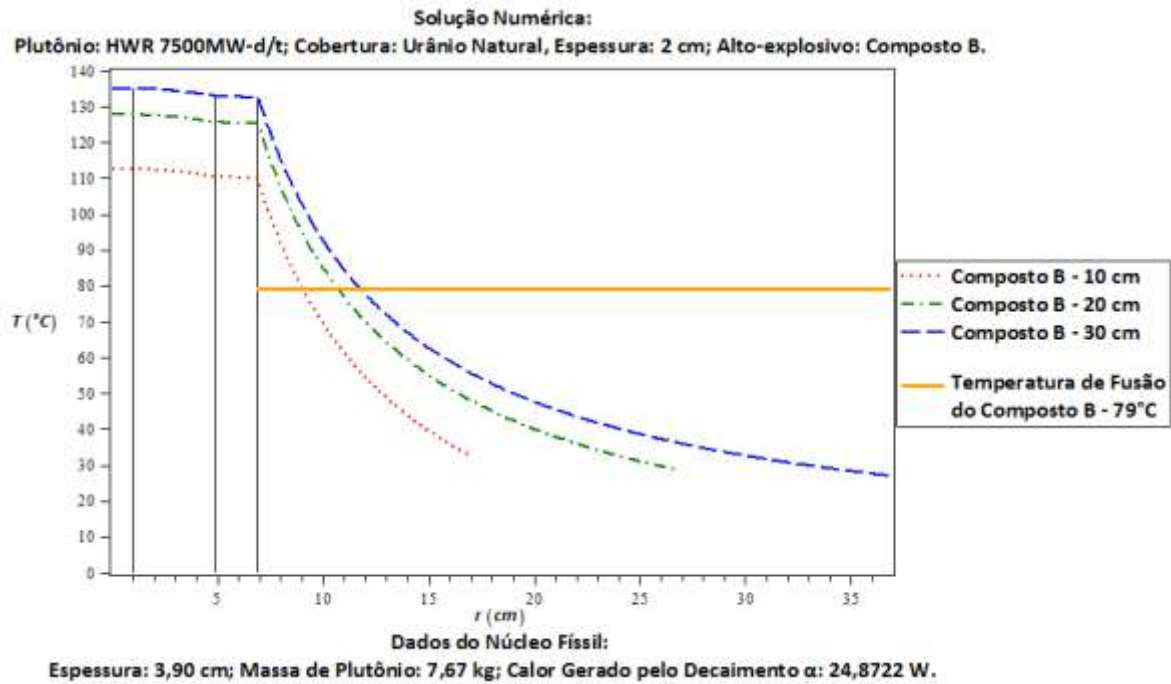


FIG. 4.28 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.

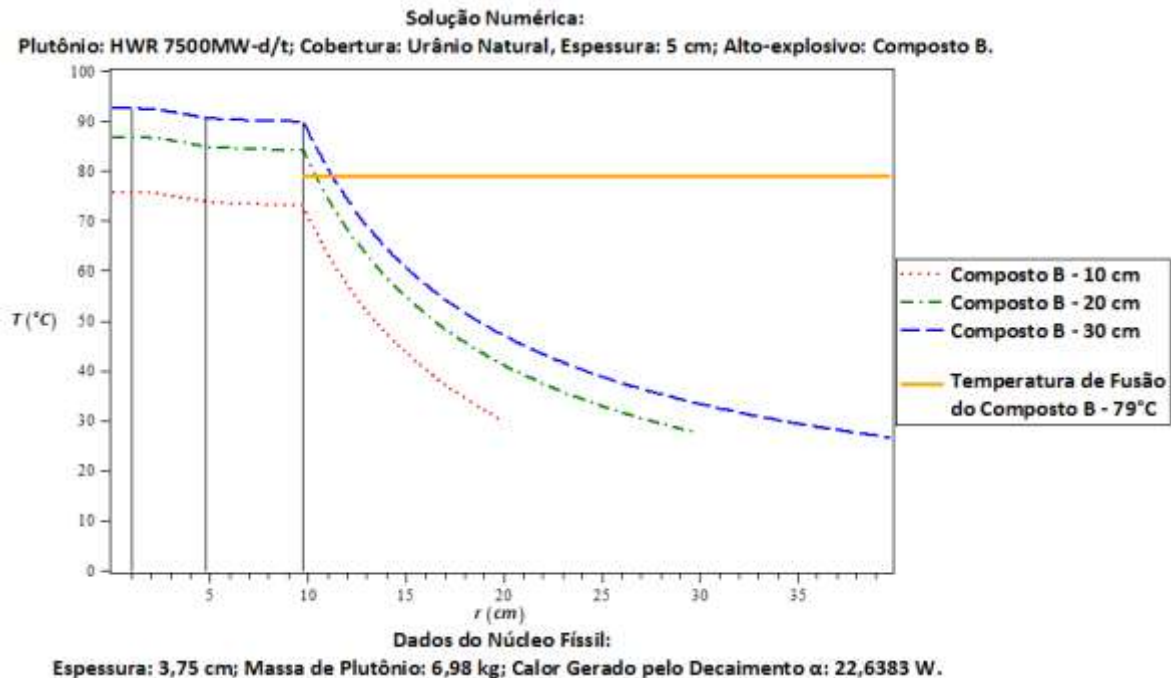


FIG. 4.29 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.

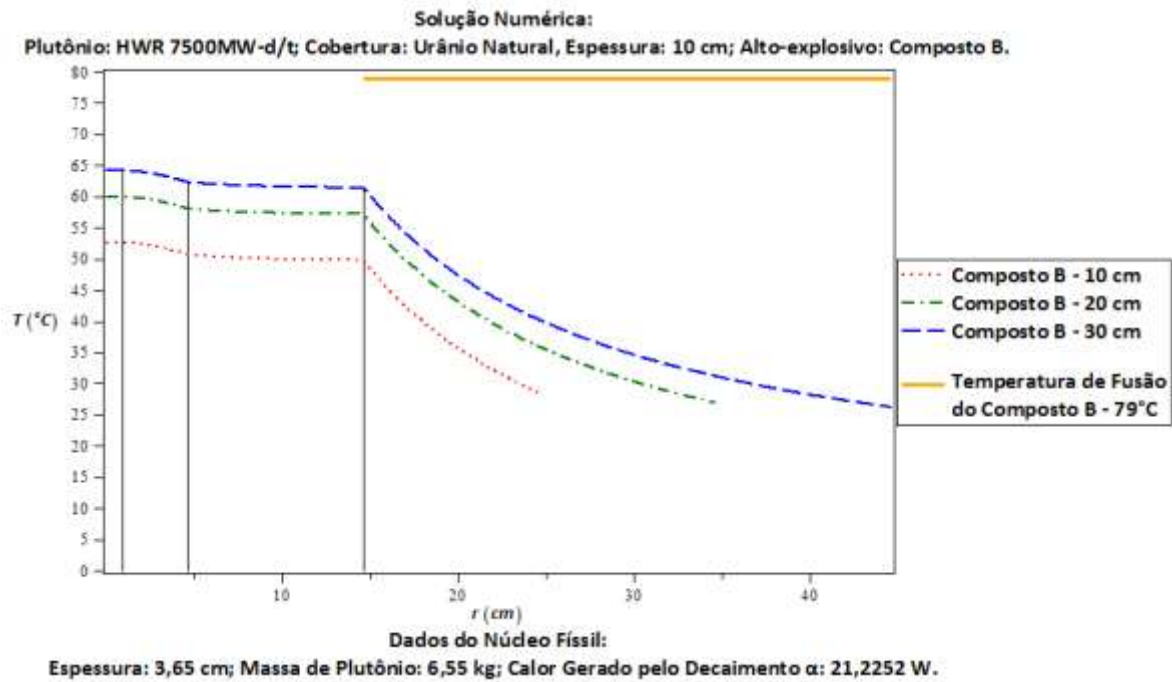


FIG. 4.30 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.

As soluções numéricas da distribuição de temperatura mostram que apenas os hipotéticos explosivos nucleares que utilizam o plutônio proveniente de reatores HWR e o composto B somente são viáveis se a espessura de suas coberturas for de 10 cm. Nos demais casos a temperatura na camada de composto B chegam muito próximas ou excedem a temperatura de fusão do mesmo.

- ALTO-EXPLOSIVO: PBX 9404;
 - COBERTURA: BERÍLIO;

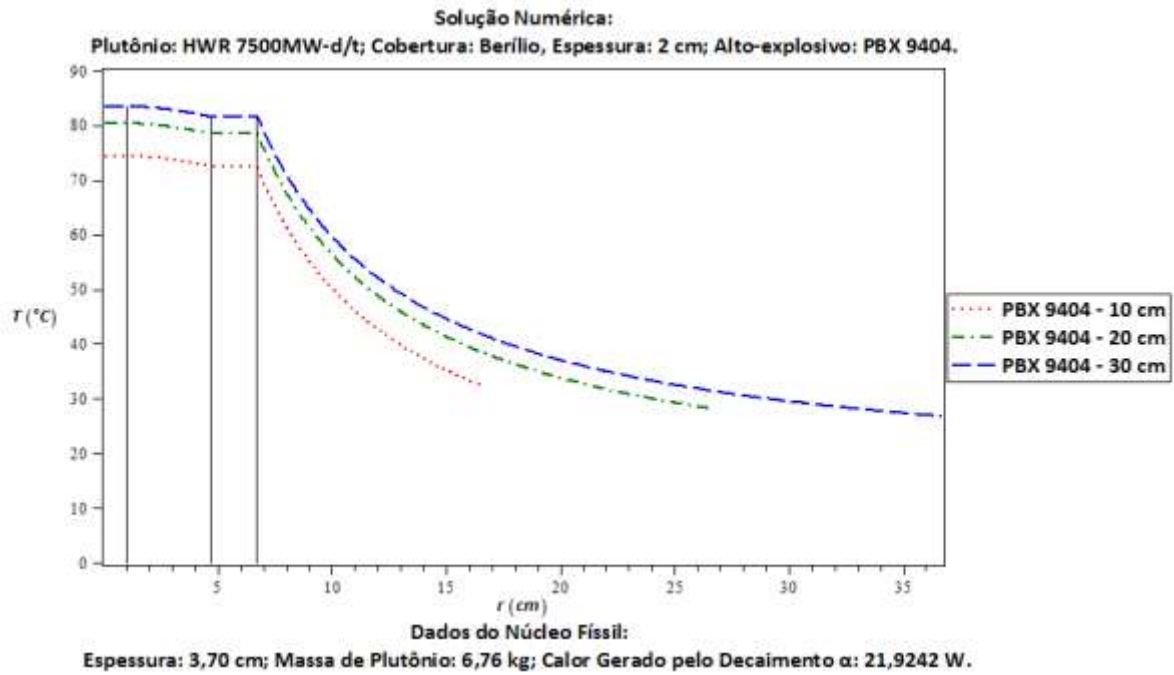


FIG. 4.31 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

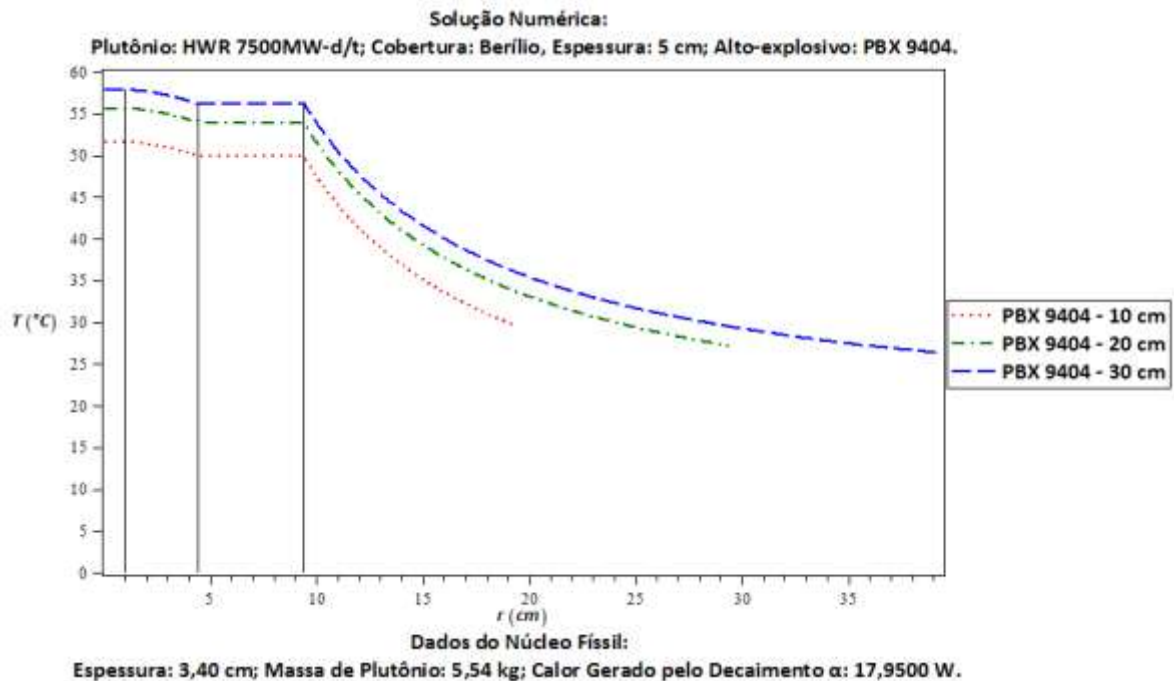


FIG. 4.32 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

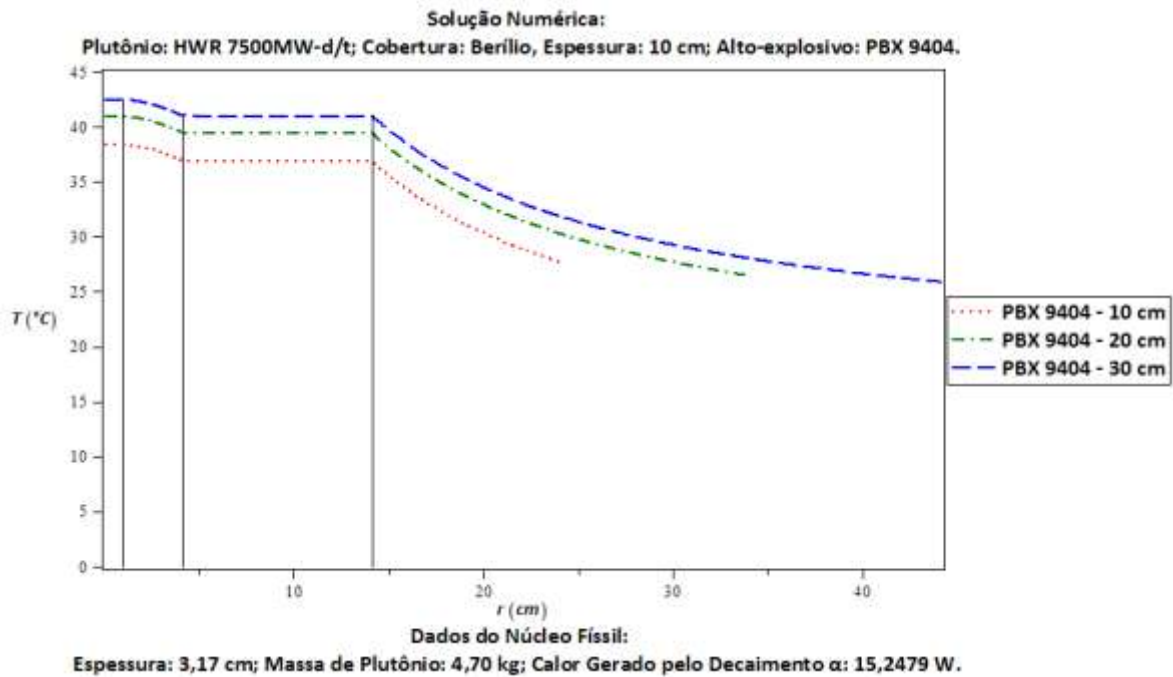


FIG. 4.33 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de berílio de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

- COBERTURA: URÂNIO NATURAL;

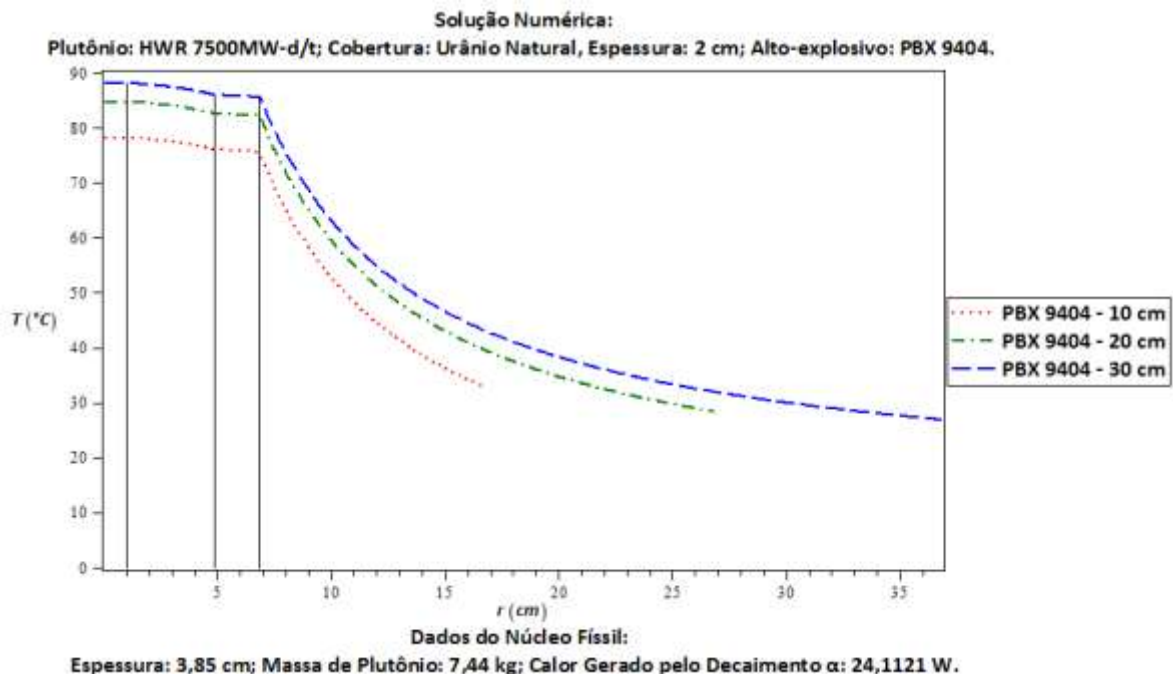


FIG. 4.34 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

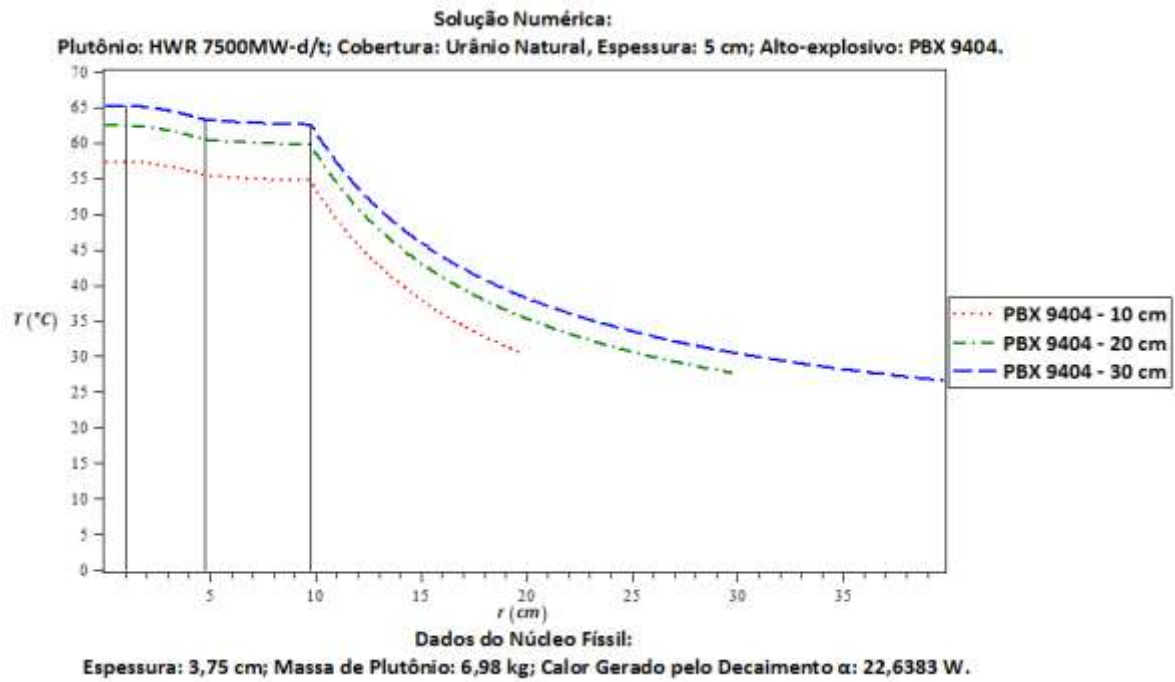


FIG. 4.35 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

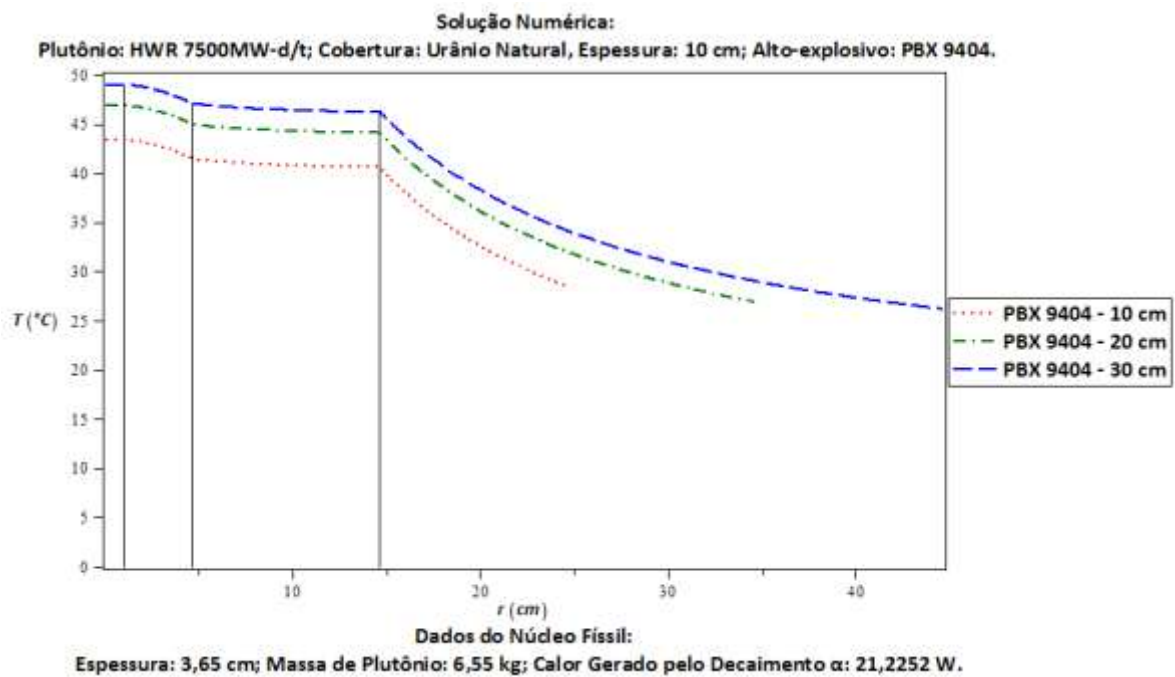


FIG. 4.36 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR 7500MW-d/t, cobertura de urânio natural de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

Neste caso, apesar de o calor produzido ser maior que o que é produzido no plutônio com composição *Weapon-Grade*, apresenta-se uma possível viabilidade, já que em todos os casos as curvas de temperatura se mantiveram bem abaixo da temperatura de fusão do PBX 9404.

4.1.4 COMPOSIÇÃO ISOTÓPICA FBR-BLANKET

- ALTO-EXPLOSIVO: COMPOSTO B;
 - COBERTURA: BERÍLIO;

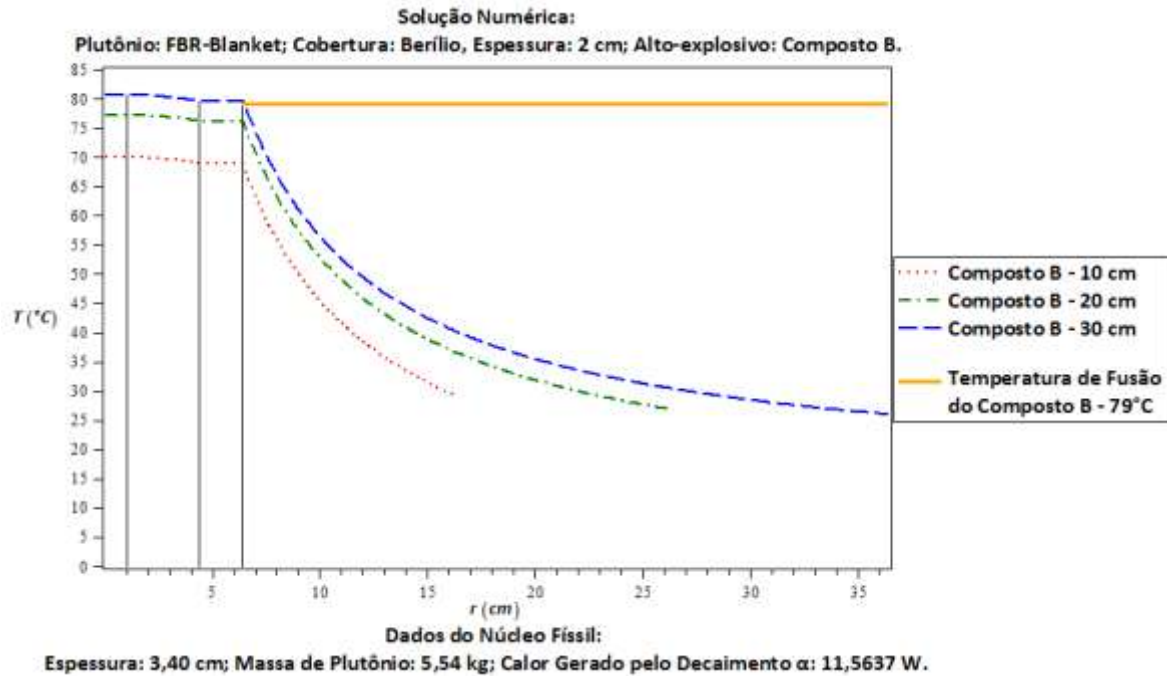


FIG. 4.37 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.

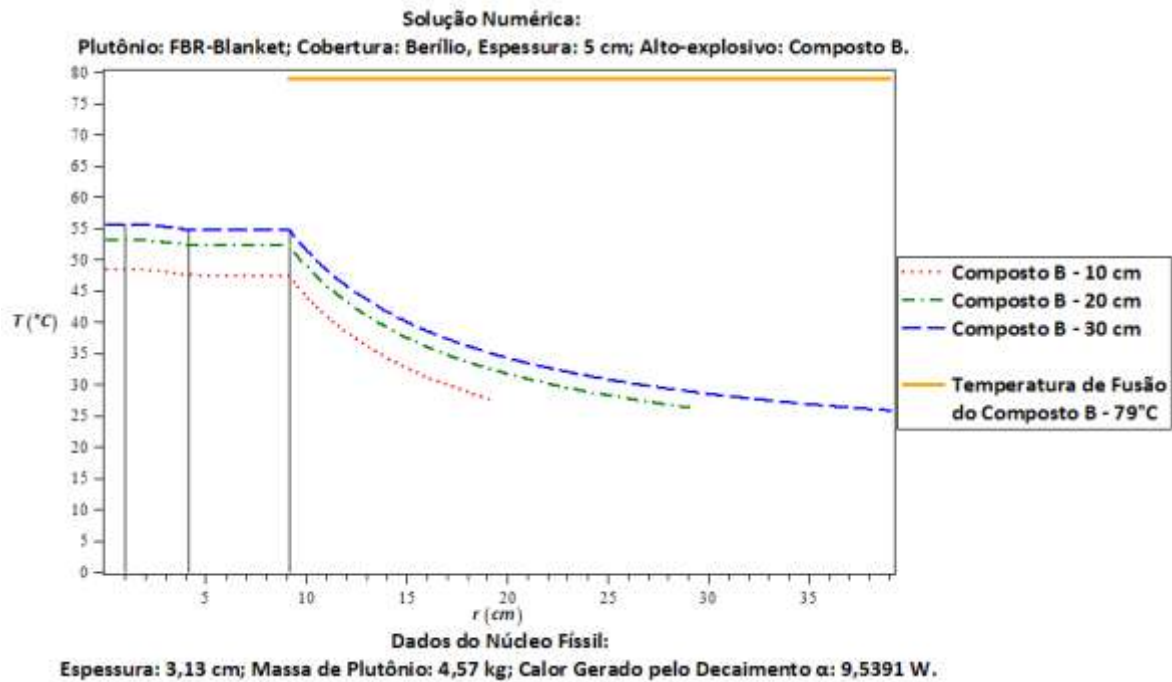


FIG. 4.38 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.

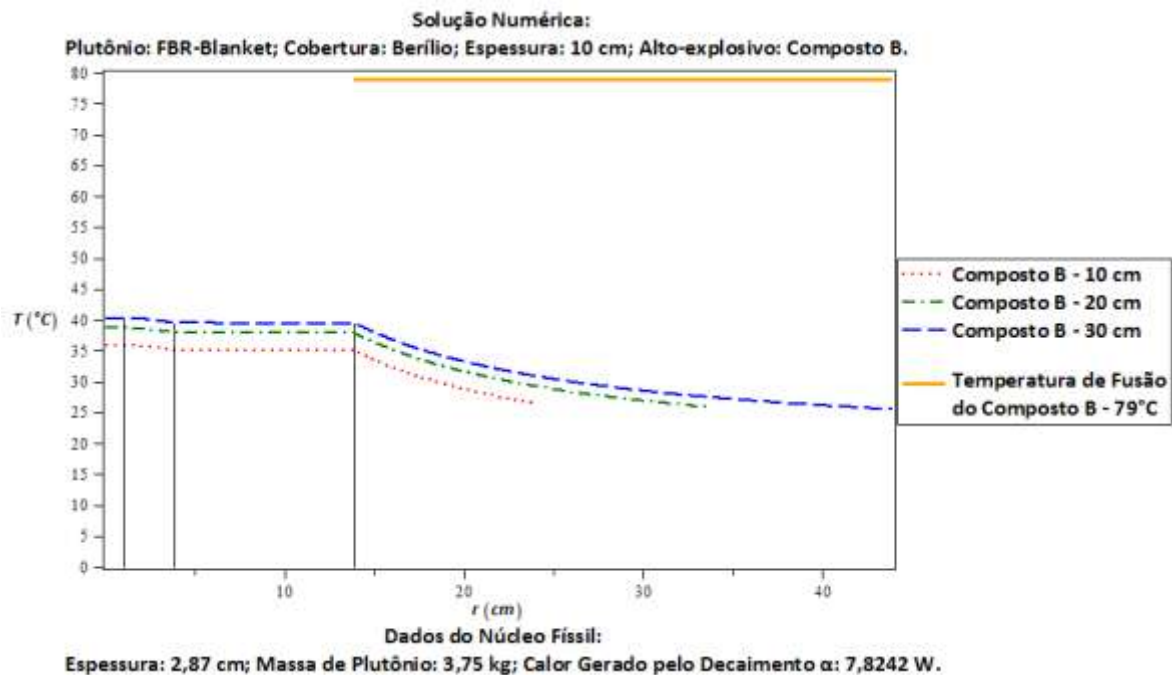


FIG. 4.39 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição HWR FBR-Blanket, cobertura de berílio de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.

- COBERTURA: URÂNIO NATURAL;

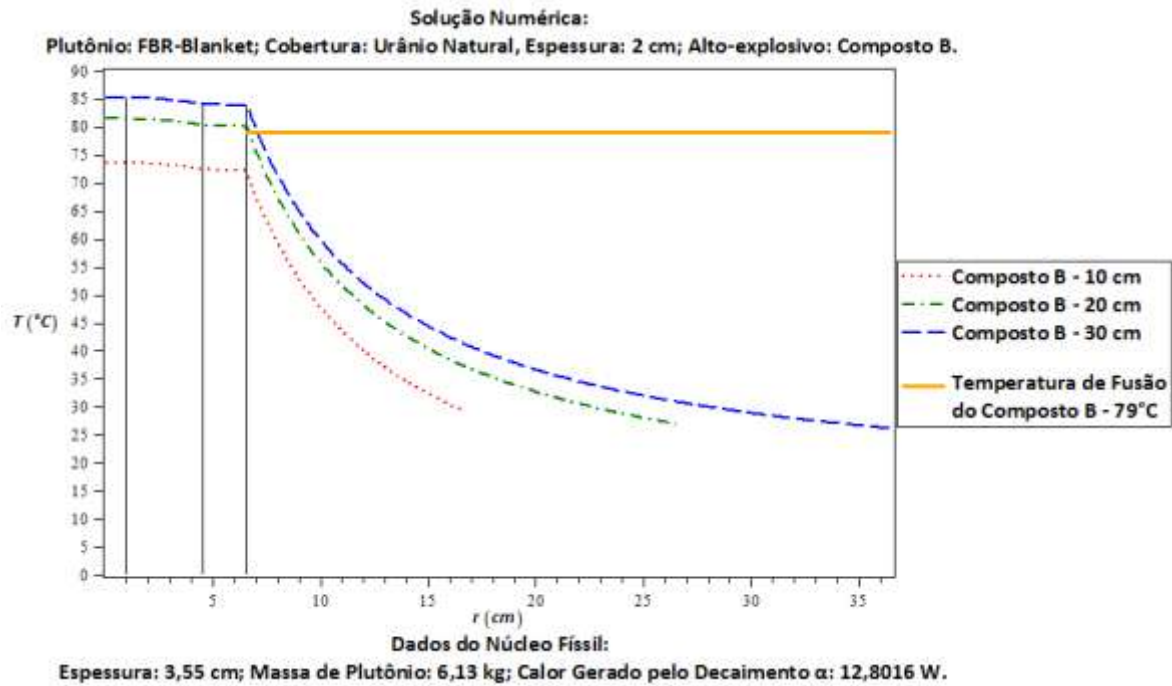


FIG. 4.40 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B como alto-explosivo.

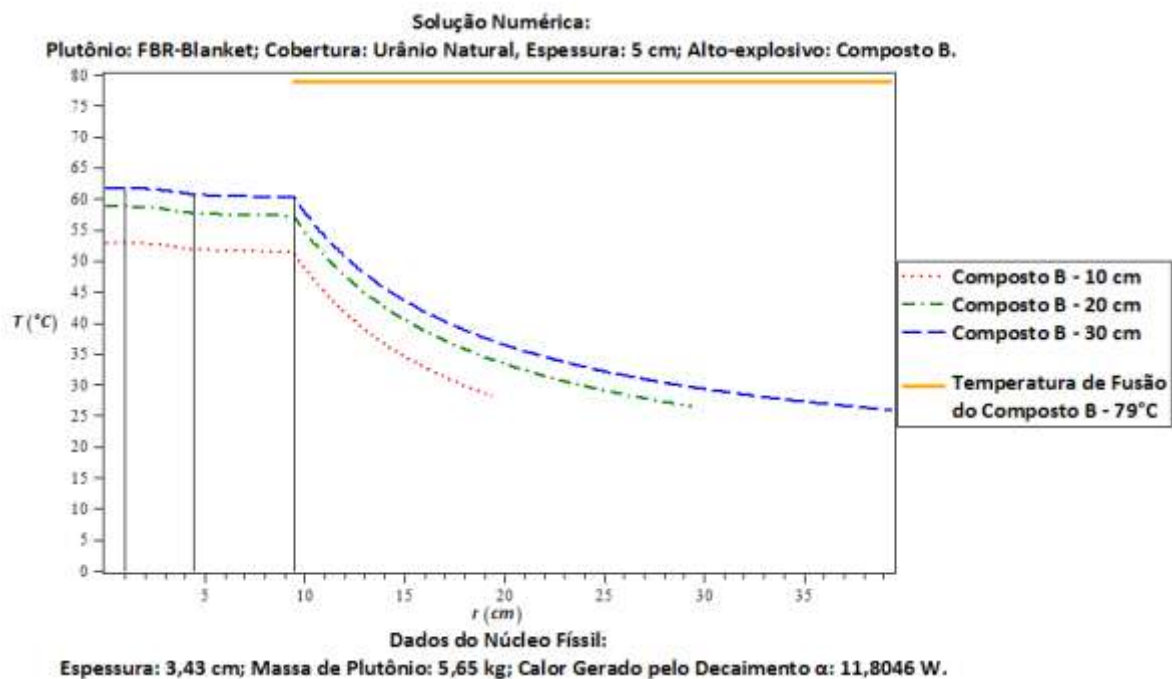


FIG. 4.41 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 5 cm e Composto B como alto-explosivo.

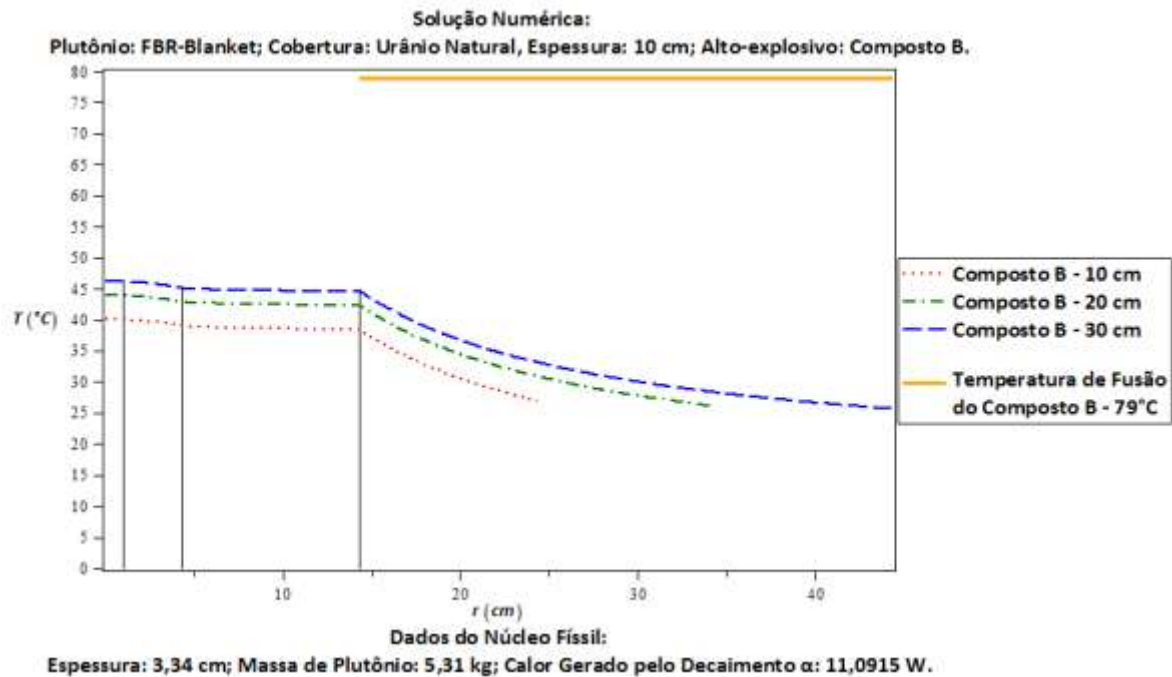


FIG. 4.42 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 10 cm e Composto B como alto-explosivo.

O plutônio produzido no FBR-Blanket apresenta uma produção de calor um pouco menor do que a produzida pelo plutônio *Weapon-Grade* para as configurações equivalentes dos hipotéticos explosivos nucleares. Em virtude deste fato, a distribuição de temperatura tem um comportamento similar ao do caso *Weapon-Grade*, mostrando inviabilidade apenas para os casos cuja espessura da cobertura é de 2 cm, quando a temperatura no composto B chega próxima ou excede sua temperatura de fusão.

- ALTO-EXPLOSIVO: PBX 9404;
 - COBERTURA: BERÍLIO;

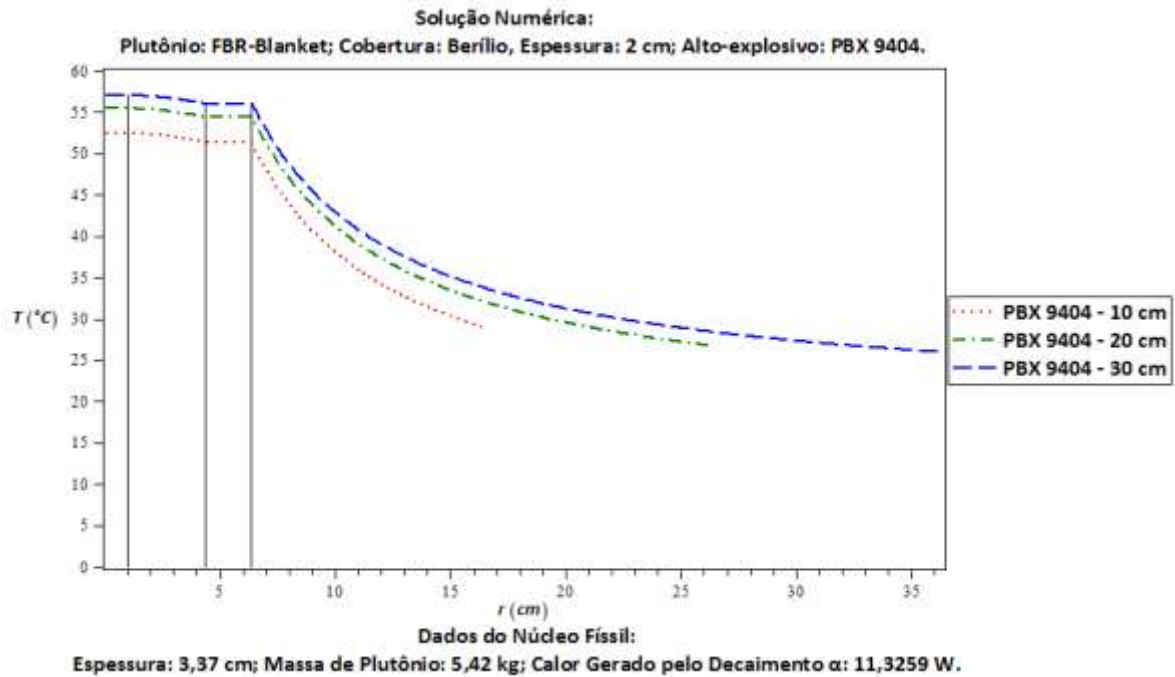


FIG. 4.43 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

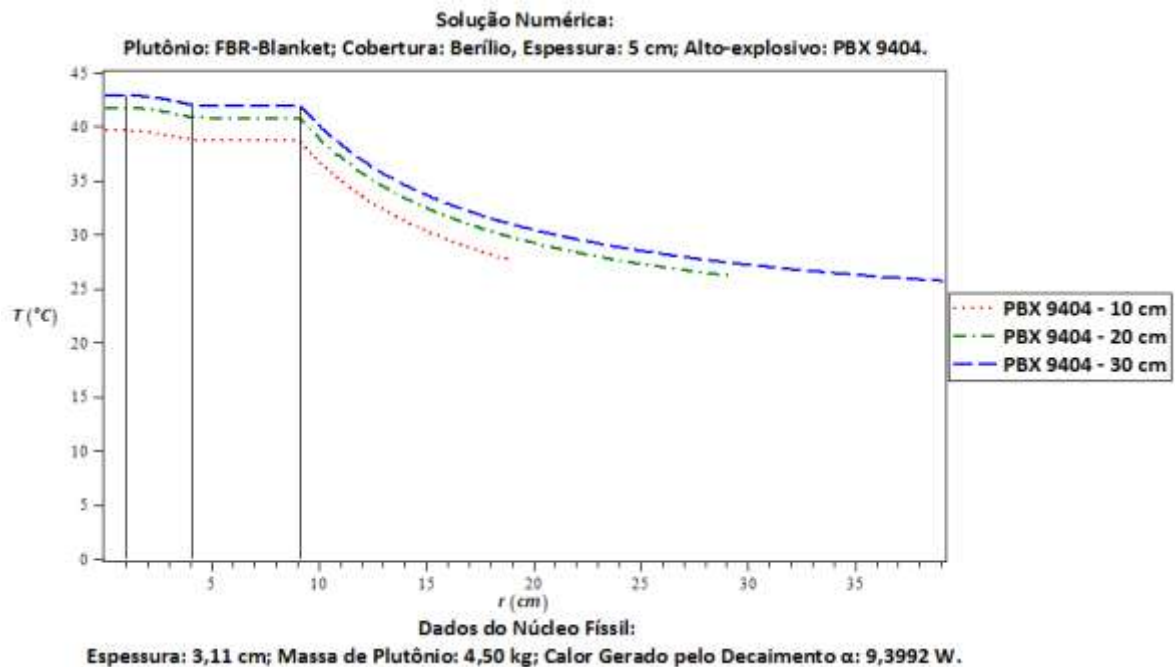


FIG. 4.44 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

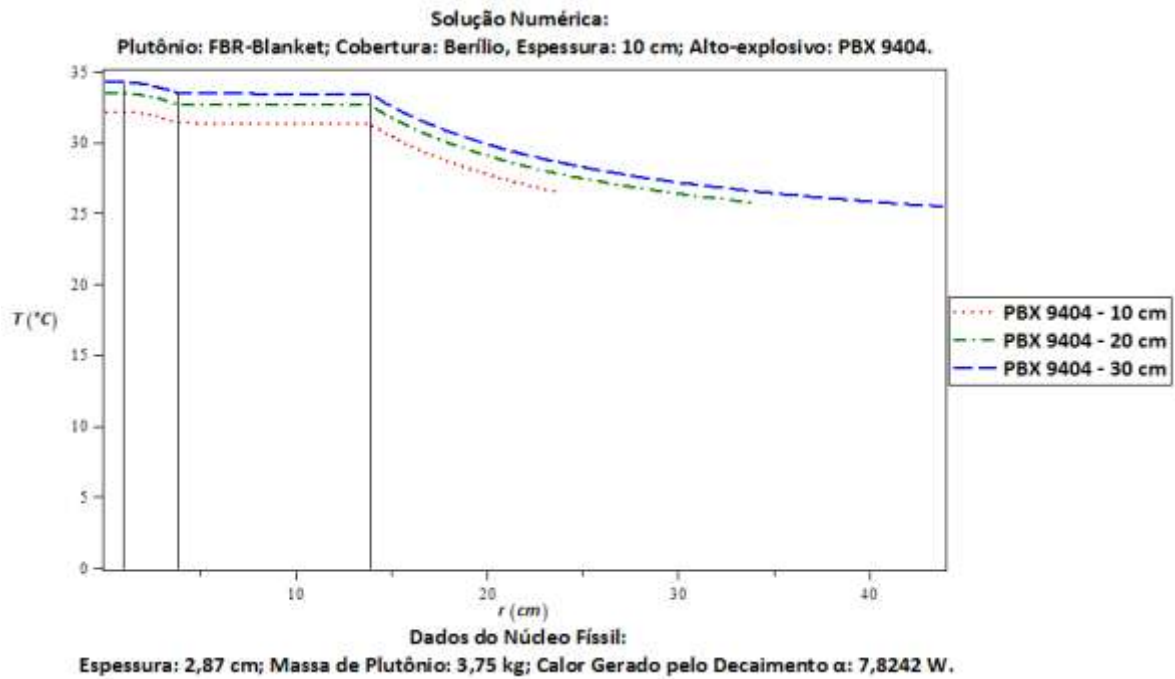


FIG. 4.45 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de berílio de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

- COBERTURA: URÂNIO NATURAL;

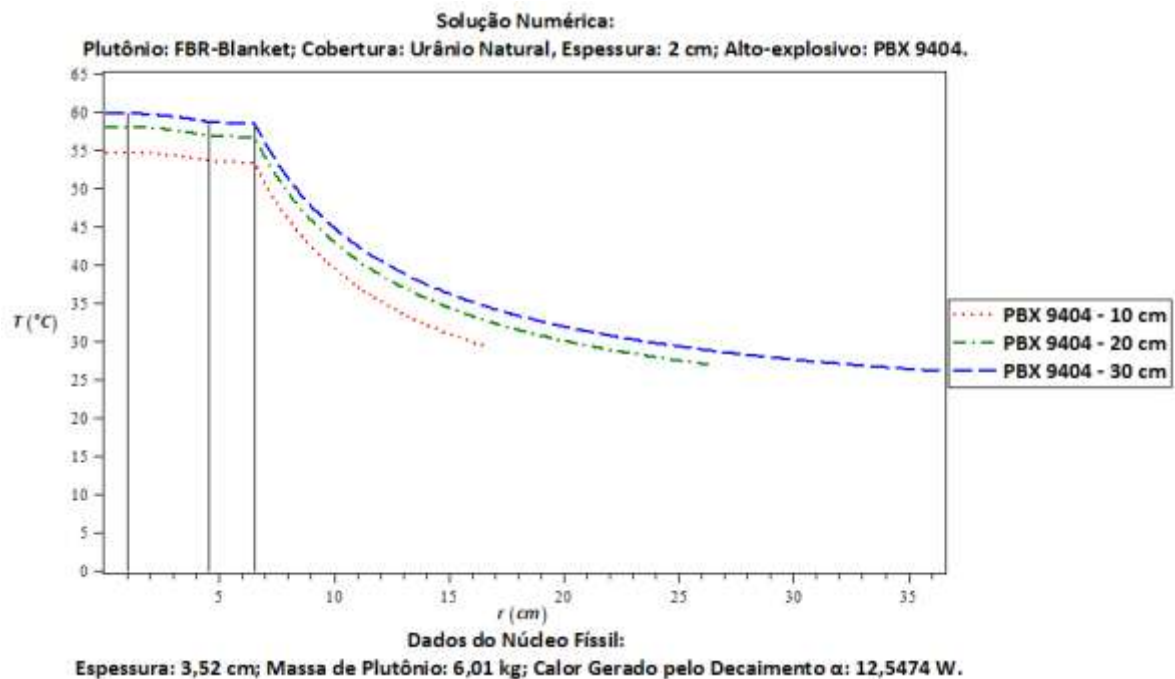


FIG. 4.46 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 2 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

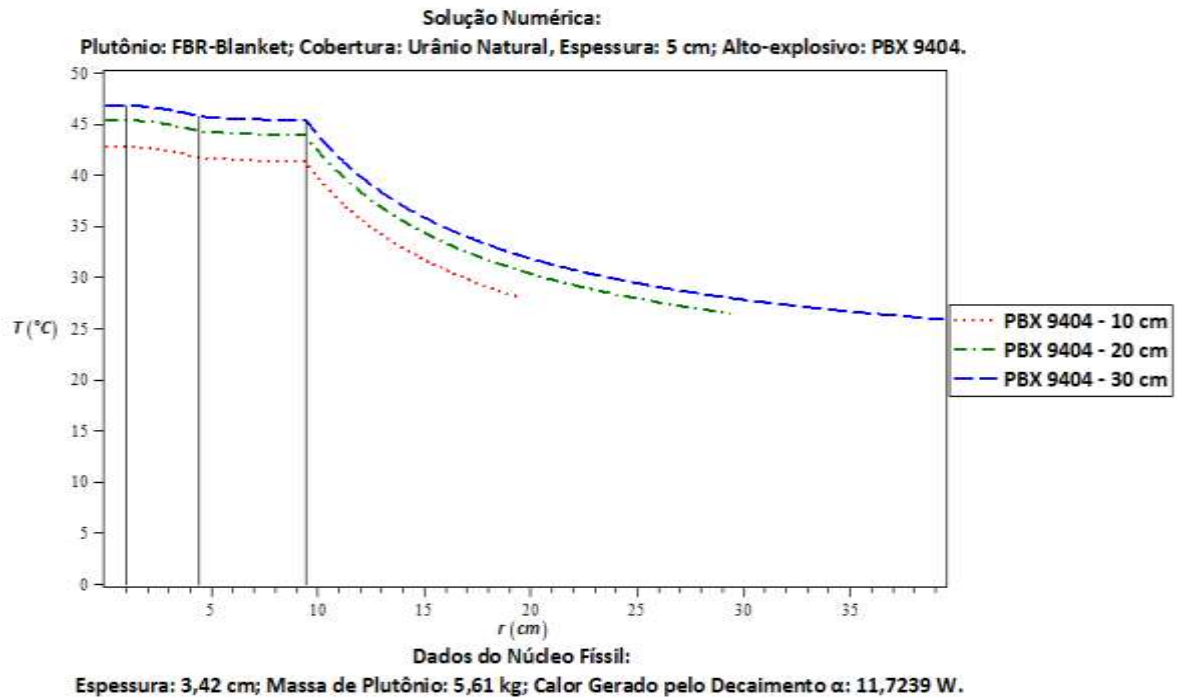


FIG. 4.47 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 5 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

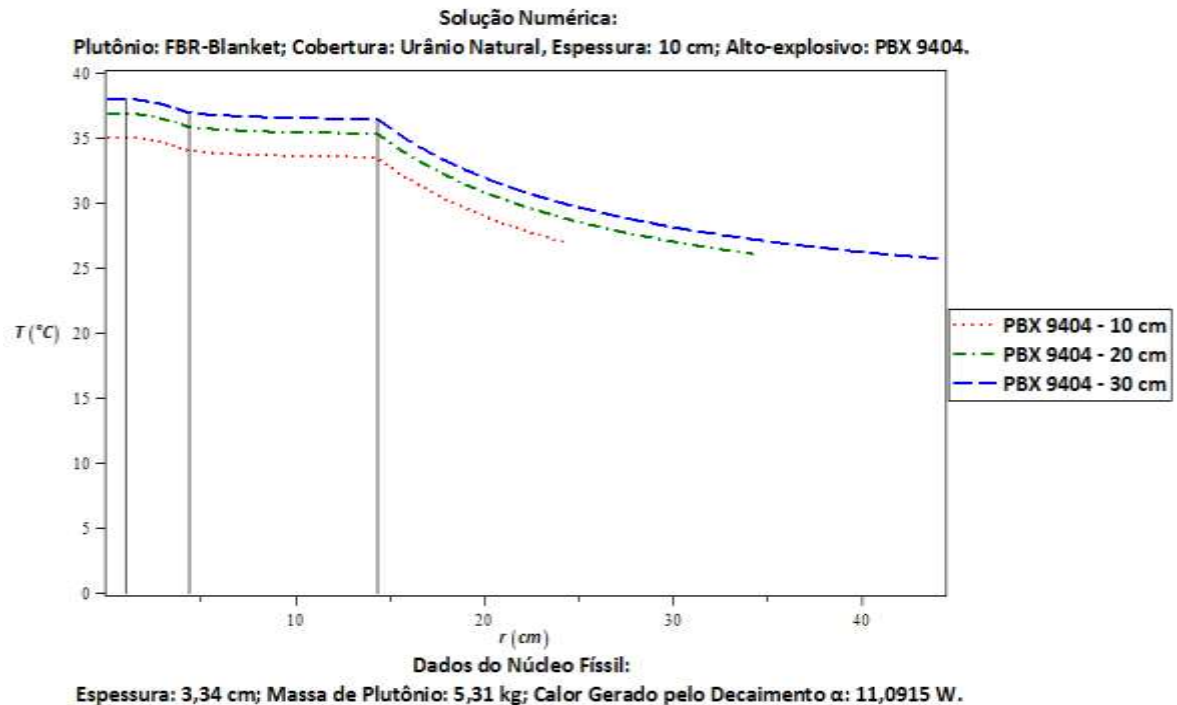


FIG. 4.48 Gráfico $T \times r$, solução numérica da distribuição de temperatura no interior do hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição FBR-Blanket, cobertura de urânio natural de 10 cm e PBX 9404 como alto-explosivo.

Para o caso que utiliza o alto-explosivo PBX 9404, assim como no caso com composição *Weapon-Grade*, o uso do plutônio produzido no *blanket* dos reatores regeneradores FBR (*Fast Breeder Reactors*) tornam a construção desses explosivos viáveis, pelo menos do ponto de vista das temperaturas devido ao decaimento alfa.

4.2 CONCLUSÕES FINAIS

O uso do plutônio de composição isotópica denominada de *Weapon-Grade*, no projeto dos hipotéticos explosivos nucleares aqui analisados, e usando os dois alto-explosivos considerados (Composto B e PBX-98404), como era esperado, mostrou-se exequível (construtivamente viável), devido à baixa produção de calor gerado pelo decaimento alfa dos isótopos do plutônio. Essa composição apenas apresenta restrição no caso em que se utiliza o alto-explosivo Composto B e a espessura da cobertura de 2 cm, devido ao baixo ponto de fusão do Composto B.

O plutônio com composição isotópica típica da existente no plutônio proveniente de reatores nucleares de potência do tipo PWR, com queima do combustível de 33 MW-d/kg, apresenta uma possível viabilidade de uso apenas com o emprego do explosivo PBX-9404, cujo ponto de fusão (190 C°) é bem superior ao do Composto B, e de coberturas com espessuras de 5 e 10 cm do modelo proposto para o hipotético explosivo nuclear.

O plutônio de composição isotópica típica da que é produzida nos reatores HWR (com queima característica do combustível de 7,5MW-d/kg), apesar de ter uma composição isotópica similar à do plutônio produzido nos reatores PWR, não apresenta teores significativos do isótopo Pu-238, resultando numa produção de calor bem inferior. No entanto, sua produção de calor é bem superior à do plutônio de composição denominada de *Weapon-Grade*. Caso seja usado o Composto B, sua utilização mostra-se viável apenas quando a cobertura do hipotético explosivo nuclear proposto é máxima. Já no caso em que no hipotético explosivo nuclear é utilizado o alto-explosivo PBX-9404, o plutônio proveniente dos reatores HWR não apresenta empecilho de uso, pelo menos em relação ao calor produzido devido ao decaimento alfa.

Já com relação ao plutônio produzido no *blanket* dos reatores regeneradores (FBR – *Fast Breeder Reactor*), sua composição isotópica é próxima daquela que é usada no plutônio utilizado nos explosivos nucleares, apresentando restrição de uso apenas no caso em que são empregados o Composto B e uma cobertura com espessura de 2 cm, nos hipotéticos explosivos nucleares aqui analisados.

É importante ressaltar que a viabilidade desses hipotéticos explosivos nucleares deveria ser analisada também do ponto de vista da influência das fissões espontâneas

existentes no interior da massa físsil, cuja produção de nêutrons pode causar a pré-ignição (pré-detonação) do explosivo nuclear, comprometendo-lhe a eficiência. Os isótopos do plutônio Pu-238, Pu-240 e Pu-242 possuem uma alta taxa de produção de nêutrons por fissão espontânea, podendo tornar os hipotéticos explosivos nucleares aqui analisados inviáveis também desse ponto de vista, caso seja utilizado o plutônio com altas porcentagens desses isótopos, como é o caso do plutônio produzido nos reatores de potência PWR e HWR em operação comercial.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDREW, J.F. E KLEMENS, P.G. *Thermal Conductivity and Lorenz Number of Plutonium and Plutonium-Gallium Alloys*, 17th International Thermal Conductivity Conference, NBS, 1981.
- BARROSO, Dalton Ellery Girão, *A Física dos Explosivos Nucleares*, Editora Livraria da Física, 2009.
- DUDERSTADT, James J., E LOUIS J. HAMILTON. *Nuclear Reactor Analysis*. Department of Nuclear Engineering. The University of Michigan, 1975.
- EISENBERG R. e RESNICK R. *Física Quântica*. Editora Campus, 1979.
- HAYNES, William M., *CRC HANDBOOK CHEMISTRY AND PHYSICS 87TH*, CRC, 2006.
- HOLMAN, J.P., *Heat Transfer*, International Student - Mc Graw Hill, 1981.
- ISIS, Institute for Science and International Security. *Production of Plutonium and Highly Enriched Uranium*, http://www.isis-online.org/publications/fmct/primer/Section_II_nopics.html, 11 de Agosto de 2014.
- KAERI, Korea Atomic Energy Research Institute. *TABLE OF NUCLIDES*, <http://atom.kaeri.re.kr/>, 11 de Agosto de 2014.
- KESSLER, G., *Proliferation-Proof Uranium/Plutonium Fuel Cycles - Safeguards and Non-Proliferation*, Kit Scientific Publishing, 2011.
- KESSLER, G., *Plutonium Denaturing ²³⁸Pu*, NUCLEAR SCIENCE and ENGINEERING, Vol. 155, 2007.
- KUCHLING, H. *Taschenbuch der Physik*, Fachbuchverlag Leipzig, 1999.
- MARK, J. Carson, HIPPEL, Frank and LYMAN, Edward, *Explosive Properties of Reactor-Grade Plutonium*, Science and Global Security, 17: 170-185, LLC, 2009.
- MATSUMOTO, T., NAKANO, K., YUMOTO, R. *Validation of KENO , ANISN and Hansen-Roach Cross-Sections Set on Plutonium Oxide and Metal Fuel System*, Annual Meeting of Atomic Energy Society of Japan, 1979.
- SCHLICHTING, H. *Boundary Layer Theory*, McGraw-Hill Book Company, 1962.

6. APÊNDICES

6.1 CÓDIGO DO PROGRAMA ATNA

```
C      PROGRAMA ATNA
C      -----
C
C              VARIAVEIS
C      -----
C
C      DOUBLE PRECISION RI, RE, RC(20), XRC(21), XR(1001), XRM(1000),
C      + CCT(20), XKM(1000),XK(1000), PGA, DGA, MGA,
C      + PPU(5), DPU, QT, V, MPU(5), MASSA, QPKPU(5), QTPU(5), QTPV,
C      + Q(1000), PQPU(5),
C      + A(1000), B(1000), C(1000), BETA(1000), ALPHA(1000),
C      + AN, BN, CN, BETAN, ALPHN,
C      + TM(1000), TA, TS, VTI,VTF, TAK, TSK,TF, DIFT, VISC, EXPT, DIAM,
C      + GRAV, RAYL, NUSEL, KAR, HC, EMS, SIGMA, HR, PI, AREA, PHC, PHR
C      INTEGER I, NTP, N, NN, K, IS(21), NC, INC, J(1000), NPU(5),
C      + NPC(20), CQ, ICC, IRAD, ICV
C      CHARACTER TITLE*80,MATC(20)*16, MATM(1000)*16
C      DATA PI,SIGMA,GRAV/3.14159265,5.67E-08,9.80665/
C
C      -----
C
C              ARQUIVO DE ENTRADA
C      -----
C
C      OPEN(UNIT=4,FILE='ATNA_CAMADAS.DAT', STATUS='UNKNOWN')
C      OPEN(UNIT=5,FILE='ATNA_PU.DAT', STATUS='UNKNOWN')
C
C      -----
C
C              ARQUIVO DE SAIDA
C      -----
C
C      OPEN(UNIT=10,FILE='ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT', STATUS='UNKNOWN')
C      OPEN(UNIT=11,FILE='ATNA GRAFICO.OUT', STATUS='UNKNOWN')
C
C      -----
C
```

```

C           LEITURA DOS DADOS
C           -----
C           TÍTULO
C           READ(4,10) TITLE
10          FORMAT(A80)
C
C           ESCOLHA DA CONDIÇÃO DE CONTORNO=====
C           READ(4,*) ICC
C
C           INDICE DE CONVECÇÃO, EPSILON, N° DE INTERAÇÕES MÁXIMO =====
C           READ(4,*)ICV,EPSLON,MAXIT
C
C           TEMPERATURA AMBIENTE =====
C           READ(4,*) TA
C
C           EMISSIVIDADE DA SUPERFÍCIE =====
C           READ(4,*) EMS
C
C           NUMERO DE CAMADAS =====
C           READ(4,*) NC
C
C           CAMADA FONTE DE CALOR =====
C           IFONT=0 - ENTER ALPHA PU-SOURCE
C           IFONT=1 - ENTER EXTERNAL SOURCE Q
C           READ(4,*) CQ,IFONT,QEXT
C
C           RAIOS DAS INTERFACES [cm] =====
C           READ(4,*) RI
C
C           RAIOS DAS INTERFACES [cm] =====
C           DO 30 I=1,NC,1

```

```

READ(4,*) K,RC(I), CCT(I), NPC(I), MATC(I)
30  CONTINUE
C
IF(IFONT.EQ.1) GOTO 40
C
C  VETOR ISOTÓPICO DE PLUTÔNIO [%] =====
READ(5,*) DPU
C
DO 50 I=1,5,1
READ(5,*) NPU(I),PPU(I),QPKPU(I)
50  CONTINUE
READ(5,*) DGA
C
40  CONTINUE
C
C  -----
C          PROGRAMA
C  -----
C  NUMERO DE PONTOS [#] =====
INC=NC+1
C
IS(1)=0
DO 100 I=2,INC,1
IS(I)=IS(I-1)+NPC(I-1)
100 CONTINUE
NTP=IS(INC)
C
C  PONTOS DA PARTIÇÃO [cm] =====
RE=RC(NC)
XRC(1)=RI
DO 110 I=2,INC,1

```

```

XRC(I)=RC(I-1)
110 CONTINUE
C
N=NTP+1
XR(N)=RE
DO 120 I=1,NTP,1
DO 125 K=1,NC,1
C
IF (I.LE.IS(K+1)) THEN
XR(I)=XRC(K)+(I-IS(K)-1)*(XRC(K+1)-XRC(K))/NPC(K)
EXIT
ENDIF
C
125 CONTINUE
120 CONTINUE
C
C PONTOS MEDIOS DOS MESH'S =====
DO 130 I=1,NTP,1
XRM(I)=(XR(I)+XR(I+1))/2
130 CONTINUE
C
C FONTE TÉRMICA =====
C
C CALOR TOTAL POR VOLUME [J/(s*cm**3)] =====
C V[cm**3], MPU(I)[kg], MASSA[kg], QTPU(I)[W], QT[W] =====
C
V=(4*PI/3)*(RC(CQ)**3-XRC(CQ)**3)
IF(IFONT.EQ.0) GOTO 140
QT=QEXT
QTPV=QEXT/V
GOTO 145

```

```

C
140    CONTINUE
      DO 200 I=1,5,1
      MPU(I)=V*DPU*PPU(I)/100000.0
200    CONTINUE
      PGA=100.0-PPU(1)-PPU(2)-PPU(3)-PPU(4)-PPU(5)
      MGA=V*DGA*PGA/100000.0
      MASSA=MPU(1)+MPU(2)+MPU(3)+MPU(4)+MPU(5)+MGA
      DO 210 I=1,5,1
      QTPU(I)=QPKPU(I)*MPU(I)
210    CONTINUE
      QT=QTPU(1)+QTPU(2)+QTPU(3)+QTPU(4)+QTPU(5)
      QTPV=QT/V
      DO 220 I=1,5,1
      PQPU(I)=100*QTPU(I)/QT
220    CONTINUE
C
145    CONTINUE
C
C
C    VETOR DE CALOR [J/(s*cm**3)] =====
      DO 230 I=1,NTP,1
      IF (XRM(I).GE.XRC(CQ) .AND. XRM(I).LE.RC(CQ)) THEN
      Q(I)=QTPV
      ELSE
      Q(I)=0
      ENDIF
230    CONTINUE
C
C    COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA [J/(s*cm*°C)] =====
      DO 300 I=1,NTP,1
      DO 305 K=1,NC,1

```

```

C
    IF (XRM(I).LE.RC(K)) THEN
    XKM(I)=CCT(K)
    J(I)=K
    MATM(I)=MATC(K)
    EXIT
    ENDIF

C
305    CONTINUE
300    CONTINUE

C
    DO 310 I=1,NTP,1

C
    IF (I.EQ.NTP) THEN
    XK(I)=XKM(NTP)
    ELSEIF (I.EQ.1) THEN
    XK(I)=XRM(1)
    ELSE
    XK(I)=(XRM(I-1)*XKM(I-1)+XRM(I)*XKM(I))/(XRM(I-1)+XRM(I))
    ENDIF

C
310    CONTINUE

C
C    COEFICIENTES DO SISTEMA [J/(s*(cm**3)*°C)] =====
    NN=NTP-1

C
    DO 400 I=1,NN,1

C    CALCULO DO COEFICIENTE A(I) =====
C
    IF (I.EQ.1) THEN
    A(I)=0

```

```

ELSE
A(I)=XK(I)*(XR(I)**2)/
+((XRM(I)**2)*(XR(I+1)-XR(I))*(XRM(I)-XRM(I-1)))
ENDIF

C
C      CALCULO DO COEFICIENTE C(I) =====
C      C(I)=XK(I+1)*(XR(I+1)**2)/
C      +((XRM(I)**2)*(XR(I+1)-XR(I))*(XRM(I+1)-XRM(I)))

C
C      CALCULO DO COEFICIENTE B(I) =====
C      B(I)=-A(I)-C(I)

C
C      COEFICIENTES DO SISTEMA ESCALONADO =====
C
C      CALCULO DO COEFICIENTE BETA(I) =====
C      IF (I.EQ.1) THEN
C      BETA(I)=C(1)/B(1)
C      ELSE
C      BETA(I)=C(I)/(B(I)-A(I)*BETA(I-1))
C      ENDIF

C      CALCULO DO COEFICIENTE ALPHA(I) =====
C      IF (I.EQ.1) THEN
C      ALPHA(I)=-Q(1)/B(1)
C      ELSE
C      ALPHA(I)=(-Q(I)-A(I)*ALPHA(I-1))/(B(I)-A(I)*BETA(I-1))
C      ENDIF

400    CONTINUE

C
C      TEMPERATURA DA SUPERFÍCIE =====
C
C
C      COEFICIENTES

```

```

AN=XK(NTP)*(XR(NTP)**2)/
+((XRM(NTP)**2)*(RE-XR(NTP))*(XRM(NTP)-XRM(NN)))
C
CN=XKM(NTP)*(RE**2)/
+((XRM(NTP)**2)*(RE-XR(NTP))*(RE-XRM(NTP)))
C
BN=-AN-CN
C
BETAN=CN/(BN-AN*BETA(NN))
C
ALPHN=(-Q(NTP)-AN*ALPHA(NN))/(BN-AN*BETA(NN))
C
C
C CONDIÇÃO DE CONTORNO =====
C
C ICC=0 =====>> COND. DE CONTORNO = CONVECÇÃO NATURAL + RADIAÇÃO
C ICC=1 =====>> COND. DE CONTORNO = CONVECÇÃO NATURAL
C
C AREA=4*PI*(RE/100)**2
C
C ICONT=0
C
C IF (ICC.LE.1) THEN
C
C IRAD=1-ICC
C DIAM=2*RE/100.
C TAK=273.15+TA
C VTI=1.0
500 CONTINUE
C IF (ICV.EQ.0) THEN
C TF=TAK+0.5*VTI
C ELSE

```



```

TF=TAK
ENDIF

C
C   CONVECÇÃO NATURAL =====
C
C   DIFUSIDADE TÉRMICA
C   DIFT=4.62143590045239*(TF)**1.88315073511789
C   DIFT=DIFT/(10.0**10.0)
C
C   VISCOSIDADE CINEMÁTICA
C   VISC=4.52981482036947*(TF)**1.82998405667075
C   VISC=VISC/(10.0**10.0)
C
C   EXPANSIVIDADE TÉRMICA
C   EXPT=1/(TF)
C
C   NÚMERO DE RAYLEIGH
C   RAYL=(GRAV*EXPT*VTI/(DIFT*VISC))*(DIAM**3)
C
C   NÚMERO DE NUSSEL
C   NUSEL=2+0.43*DSQRT(DSQRT(RAYL))
C
C   COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA DO AR
C   IF (TF.GE.100 .AND. TF.LT.200) THEN
C   KAR=0.00009*TF+0.0004
C   ELSEIF (TF.GE.200 .AND. TF.LT.300) THEN
C   KAR=0.000078*TF+0.0028
C   ELSEIF (TF.GE.300 .AND. TF.LT.400) THEN
C   KAR=0.000071*TF+0.0049
C   ELSEIF (TF.GE.400 .AND. TF.LT.500) THEN
C   KAR=0.000064*TF+0.0077

```

```

ELSE
KAR=0.000060*TF+0.0097
ENDIF

C
C   COEFICIENTE DE CUNDUTIVIDADE POR CONVECÇÃO
HC=(NUSEL*KAR)/DIAM

C
C   RADIAÇÃO =====
C
C   COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE POR RADIAÇÃO
TSK=273.15+TA+VTI
HR=IRAD*EMS*SIGMA*(TSK+TAK)*(TSK**2+TAK**2)

C
C   CÁLCULO DA NOVA VARIAÇÃO
VTF=QT/(AREA*(HC+HR))

C
IF(ABS((VTF-VTI)/VTI).GE.EPSLON) THEN

C
VTA=VTI
VTI=(VTF+VTA)/2.

C
ICONT=ICONT+1
IF(ICONT.LT.MAXIT) GOTO 500

C
WRITE(10,222) MAXIT
222  FORMAT(/,'SOLUÇÃO PARA CÁLCULO DE TS NÃO CONVERGIU EM ',I5,
+' ITERAÇÕES')
STOP

C
ELSE

C

```

```

TS=TA+VTF
PHC=(100*HC)/(HC+HR)
PHR=(100*HR)/(HC+HR)
C
ENDIF
C
C
C ICC=2 =====>> COND. DE CONTORNO = RADIAÇÃO
C
ELSEIF (ICC.EQ.2) THEN
TAK=273.15+TA
TSK=DSQRT(DSQRT((TAK)**4+(QT/(AREA*EMS*SIGMA))))
TS=TSK-273.15
PHR=100.0
PHC=0.0
C
C ICC=2 =====>>> =====>>> CONDIÇÃO DE CONTORNO = TS CONHECIDA
C
ELSEIF (ICC.EQ.3) THEN
TS=TA
ENDIF
C
C VETOR TEMPERATURA =====
DO 600 K=NTP,1,-1
IF (K.EQ.NTP) THEN
TM(K)=ALPHN-BETAN*TS
ELSE
TM(K)=ALPHA(K)-BETA(K)*TM(K+1)
ENDIF
600 CONTINUE
C

```

```

C -----
C             IMPRESSAO PARA O ARQUIVO
C -----
C
C DADOS INICIAIS DA ESTRUTURA DO SISTEMA =====
WRITE(10,1000)
1000  FORMAT('--- ATNA ARQUIVO DE SAÍDA',/,'--- -----
+-----
+----',/)
WRITE(10,1010) TITLE
1010  FORMAT('--- ',A80,/,'--- -----
+-----
+----',/)
WRITE(10,1020) NC
1020  FORMAT('--- QUANTIDADE DE REGIÕES: ',7X,I2,/ )
WRITE(10,1025) RI
1025  FORMAT('--- RAI0 INTERNO DO SISTEMA: ',F12.4,' [cm]',/)
WRITE(10,1030) RE
1030  FORMAT('--- RAI0 EXTERNO DO SISTEMA: ',F12.4,' [cm]',/)
C
C DESCRICAO POR CAMADAS =====
C
WRITE(10,1040)
1040  FORMAT(/,'--- DESCRICAÇÃO POR CAMADAS',/,'--- -----
+-----
+-----',/,'REGIÃO',3X,'RAIO INICIAL [cm]',3X,'RAIO FINAL [cm]',
+5X,'k [W/cm°C]',4X,'NUMERO DE PONTOS',6X,'MATERIAL',/)
WRITE(10,1045) (I, XRC(I), RC(I), CCT(I), NPC(I), MATC(I),
+ I=1,NC,1)
1045  FORMAT(I3,5X,F12.4,7X,F12.4,9X,F11.8,9X,I3,11X,A16)
WRITE(10,1050)

```

```

1050  FORMAT('-----
+-----')
      WRITE(10,1055) NTP
1055  FORMAT(60X,'TOTAL: ',I4,/)
C
C    LEGENDA =====
      WRITE(10,1060)
1060  FORMAT('*** LEGENDA: ',/, '.k: COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA
+ [W/cm°C]',/)
C
C    DADOS DO NUCLEO =====
      WRITE(10,1100)
1100  FORMAT('--- DADOS DO NÚCLEO',/, '-----
+-----'
+/,)
      WRITE(10,1110) CQ
1110  FORMAT('--- REGIÃO DO NÚCLEO:',I2,/)
      IF(IFONT.EQ.0) WRITE(10,1120) DPU
1120  FORMAT('--- DENSIDADE: ',F5.2,' [g/cm³]',/)
      WRITE(10,1130) V
1130  FORMAT('--- VOLUME DO NÚCLEO: ',F12.4,' [cm³]',/)
C
      IF(IFONT.EQ.1) GOTO 1190
      WRITE(10,1140)
1140  FORMAT('-----
+-----'
+/, 'ISÓTOPO',9X,'[%]',5X,'FONTE ALFA [w/kg]',3X,'MASSA [kg]'
+/,7X,'Q [W]',6X,'PERCENTUAL DE CALOR [%]',/)
      WRITE(10,1150) (NPU(I),PPU(I),QPKPU(I),MPU(I),QTPU(I),PQPU(I),
+ I=1,5)
1150  FORMAT('Pu ',I3,3X,F12.4,1X,F12.4,4X,F12.4,5X,F12.4,5X,F12.4)

```

C

```
IF (PGA.GT.0.0) THEN
WRITE(10,1160) PGA, MGA
1160  FORMAT('GÁLIO',4X,F12.4,17X,F12.4)
ELSE
GOTO 1165
ENDIF
```

C

```
1165  CONTINUE
WRITE(10,1170)
1170  FORMAT(/,'-----
+-----')
WRITE(10,1180) MASSA, QT
1180  FORMAT(32X,'TOTAL:',F12.4,6X,F12.4,/)
1190  CONTINUE
```

C

```
IF(IFONT.EQ.1) WRITE(10,1195) QEXT
1195  FORMAT('--- FONTE DE CALOR FORNECIDA (IFONT=1): Q =',E12.4)
```

C

```
C  CONDIÇÃO DE CONTORNO =====
WRITE(10,1200)
1200  FORMAT(/,'--- CONDIÇÕES DE CONTORNO',/,'-----
+-----
+-----',/)
```

C

```
IF (ICC.EQ.0) THEN
WRITE(10,1202) ICC
1202  FORMAT('--- CONDIÇÃO DE CONTORNO: ',I2
+,' CONVECÇÃO NATURAL E RADIAÇÃO',/)
ELSEIF (ICC.EQ.1) THEN
WRITE(10,1204) ICC
```

```

1204  FORMAT('--- CONDIÇÃO DE CONTORNO: ',I2,' CONVECÇÃO NATURAL',/)
      ELSEIF (ICC.EQ.2) THEN
      WRITE(10,1206) ICC
1206  FORMAT('--- CONDIÇÃO DE CONTORNO: ',I2,' RADIAÇÃO',/)
      ELSEIF (ICC.EQ.3) THEN
      WRITE(10,1208) ICC
1208  FORMAT('--- CONDIÇÃO DE CONTORNO: ',I2
+, ' TEMPERATURA DE SUPERFÍCIE CONHECIDA',/)
      ENDIF

C
      WRITE(10,1210) AREA
1210  FORMAT('--- ÁREA DA SUPERFÍCIE:',2X,F12.4,' [m²]',/)

C
      IF (ICC.LE.2) WRITE(10,1220) TA
1220  FORMAT('--- TEMPERATURA AMBIENTE:',F12.4,' [°C]',/)

C
      IF(ICC.EQ.0.OR.ICC.EQ.2) WRITE(10,1223) EMS
1223  FORMAT('--- PROPRIEDADE DA RADIAÇÃO',/,/,
+, '--- EMISSIVIDADE DA SUPERFÍCIE: ',F12.4,/,/,
+',-----
+',-----',/)

C
      IF(ICC.NE.0.AND.ICC.NE.1) GOTO 99
      WRITE(10,1225)
1225  FORMAT('--- PROPRIEDADES DO AR PARA CONVECÇÃO NATURAL')
      TFC=TF-273.15
      WRITE(10,1227) TFC,EXPT,DIFT,VISC,RAYL,NUSEL,KAR
1227  FORMAT(/,'--- TEMPERATURA PELÍCULA TF',14X,'= ',E12.4,' [°C]',/
+, '--- EXPANSIVIDADE TÉRMICA',16X,'= ',E12.4,' [1/K]',/
+, '--- DIFUSIDADE TÉRMICA ',18X,'= ',E12.4,' [m²/s]',/
+, '--- VISCOSIDADE CINEMÁTICA ',14X,'= ',E12.4,' [m²/s]',/

```

```

+, '--- NÚMERO DE RAYLEIGH ', 18X, '= ', E12.4, /
+, '--- NÚMERO DE NUSSEL', 21X, '= ', E12.4, /
+, '--- CONSTANTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA k = ', E12.4, ' [W/mK]', /,
+/, '-----
+-----', /)

C

      IF (ICV.NE.0) WRITE(10,1228)
1228   FORMAT('--- OBS: ', /, ' TF= TEMPERATURA AMBIENTE; ', /,
+ ' EXPANSIVIDADE, DIFUSIDADE E VISCOSIDADE CONSTANTES PARA
+TEMPERATURA AMBIENTE.', /)

C

99     CONTINUE

C

      WRITE(10,1230)
1230   FORMAT('-----
+-----', /, 20X,
+ 'COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR [W/m2°C]', 5X,
+ 'EXTRAÇÃO DE CALOR [%]', /)
      WRITE(10,1240) HC, PHC
1240   FORMAT('CONVECÇÃO NATURAL:', 15X, F12.4, 28X, F12.4, /)
      WRITE(10,1250) HR, PHR
1250   FORMAT(9X, 'RADIAÇÃO:', 15X, F12.4, 28X, F12.4, /, '-----
+-----
+-----', /)

C

      IF (ICC.LE.1) THEN
      WRITE(10,1260) ICONT, EPSLON
1260   FORMAT('--- NÚMERO DE ITERAÇÕES:', I4, '; ', 2X, 'EPSILON=', E12.4, /)
      END IF

C

C     TEMPERATURA =====

```



```

WRITE(10,1300)
1300  FORMAT(/,'--- TEMPERATURA',/, '-----
+-----',/)
C
WRITE(10,1310) TS
1310  FORMAT('--- TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE: ',F12.4,' [°C]',/)
C
WRITE(10,2000)
2000  FORMAT('MESH', 3X,'REGIÃO',10X,'RAIO [cm]',6X,
+'TEMPERATURA [°C]',9X,'MATERIAL',/)
C
WRITE(10,3000) (I, J(I), XRM(I), TM(I), MATM(I), I=1,NTP,1)
3000  FORMAT(1X,I4,5X,I1,7X,F12.4,8X,F12.4,13X,A16)
C
C  GRÁFICO (MAPLE) =====
WRITE(11,4000)
4000  FORMAT('with(plottools):',/, 'with(plots):',/, 'display(curve([',\)
WRITE(11,4010) (XRM(I), TM(I), I=1,NTP,1)
4010  FORMAT(['F12.4,', 'F12.4,'], '\)
WRITE(11,4020) RE, TS
4020  FORMAT(['F12.4,', 'F12.4,'])))
C
C  FECHANDO OS ARQUIVOS
CLOSE(10)
CLOSE(11)
C
C  ENCERRANDO O PROGRAMA
STOP
END

```

6.2 ARQUIVOS DE ENTRADA DO PROGRAMA ATNA

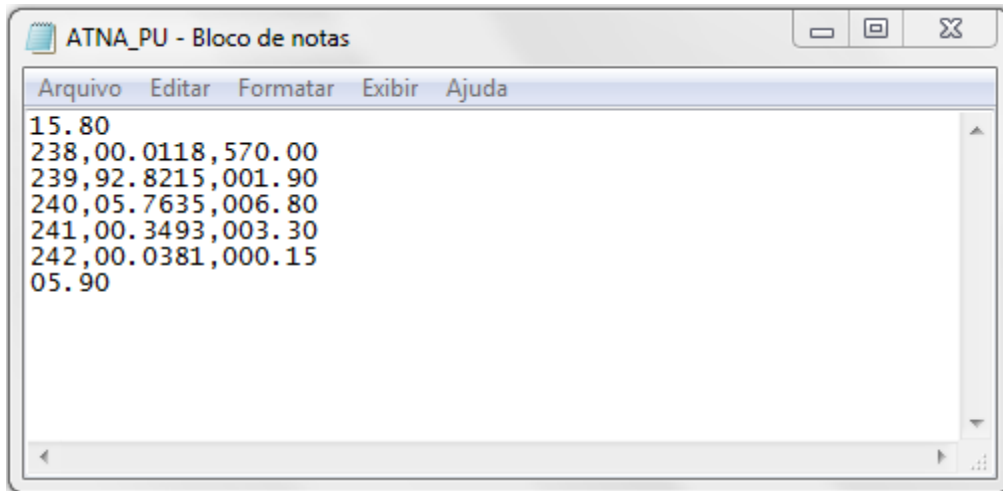


FIG. 6.1 Arquivo de entrada ATNA_PU.DAT para plutônio de composição Weapon-Grade.

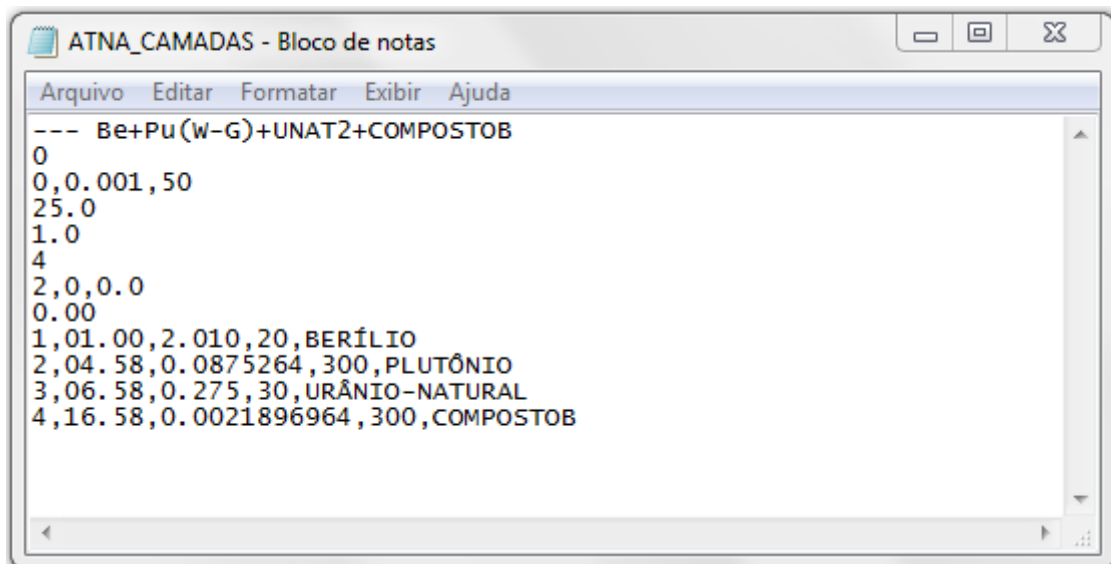


FIG. 6.2 Arquivo de entrada ATNA_CAMADAS.DAT para o hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B de alto-explosivo.

6.3 ARQUIVO DE SAÍDA DO PROGRAMA ATNA

```

--- ATNA ARQUIVO DE SAÍDA
-----
--- --- Be+Pu(w-G)+UNAT2+COMPOSTOB
-----
--- QUANTIDADE DE REGIÕES:          4
--- RAO INTERNO DO SISTEMA:         0.0000 [cm]
--- RAO EXTERNO DO SISTEMA:         16.5800 [cm]

--- DESCRIÇÃO POR CAMADAS
-----
REGIÃO   RAO INICIAL [cm]   RAO FINAL [cm]   k [w/cm²C]   NUMERO DE PONTOS   MATERIAL
-----
  1       0.0000         1.0000         2.01000000         20         BERÍLIO
  2       1.0000         4.5800         0.08752640        300         PLUTÔNIO
  3       4.5800         6.5800         0.27500000         30         URÂNIO-NATURAL
  4       6.5800        16.5800         0.00218970        300         COMPOSTOB
-----
                                          TOTAL: 650

*** LEGENDA:
.k: COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA [w/cm²C]

--- DADOS DO NÚCLEO
-----
--- REGIÃO DO NÚCLEO: 2
--- DENSIDADE: 15.80 [g/cm³]
--- VOLUME DO NÚCLEO: 398.2363 [cm³]

-----
ISÓTOPO      [%]   FONTE ALFA [w/kg]   MASSA [kg]   Q [w]   PERCENTUAL DE CALOR [%]
-----
Pu 238        0.0118   570.0000         0.0007         0.4232         3.0102
Pu 239       92.8215    1.9000         5.8405        11.0969        78.9309
Pu 240        5.7635    6.8000         0.3626         2.4660        17.5404
Pu 241        0.3493    3.3000         0.0220         0.0725         0.5159
Pu 242        0.0381    0.1500         0.0024         0.0004         0.0026
GÁLIO         1.0158
-----
                                          TOTAL: 6.2521   14.0590

--- CONDIÇÕES DE CONTORNO
-----
--- CONDIÇÃO DE CONTORNO: 0 CONVECÇÃO NATURAL E RADIAÇÃO
--- ÁREA DA SUPERFÍCIE: 0.3454 [m²]
--- TEMPERATURA AMBIENTE: 25.0000 [°C]
--- PROPRIEDADE DA RADIAÇÃO
--- EMISSIVIDADE DA SUPERFÍCIE: 1.0000

-----
--- PROPRIEDADES DO AR PARA CONVECÇÃO NATURAL
--- TEMPERATURA PELÍCULA TF = 0.2739E+02 [°C]
--- EXPANSIVIDADE TÉRMICA = 0.3327E-02 [1/K]
--- DIFUSIDADE TÉRMICA = 0.2143E-04 [m²/s]
--- VISCOSIDADE CINEMÁTICA = 0.1551E-04 [m²/s]
--- NÚMERO DE RAYLEIGH = 0.1712E+08
--- NÚMERO DE NUSSEL = 0.2966E+02
--- CONSTANTE DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA k = 0.2624E-01 [w/mK]

-----
COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR [w/m²°C]   EXTRAÇÃO DE CALOR [%]
-----
CONVECÇÃO NATURAL: 2.3468 27.5964
RADIAÇÃO: 6.1572 72.4036
-----
--- NÚMERO DE ITERAÇÕES: 9; EPSILON= 0.1000E-02

```

FIG. 6.3 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT para o hipotético explosivo nuclear que utiliza: plutônio de composição Weapon-Grade, cobertura de urânio natural de 2 cm e Composto B de alto-explosivo.

--- TEMPERATURA

--- TEMPERATURA NA SUPERFÍCIE: 29.7858 [°C]

MESH	REGIÃO	RAIO [cm]	TEMPERATURA [°C]	MATERIAL
1	1	0.0250	77.9375	BERÍLIO
2	1	0.0750	77.9375	BERÍLIO
3	1	0.1250	77.9375	BERÍLIO
4	1	0.1750	77.9375	BERÍLIO
5	1	0.2250	77.9375	BERÍLIO
6	1	0.2750	77.9375	BERÍLIO
7	1	0.3250	77.9375	BERÍLIO
8	1	0.3750	77.9375	BERÍLIO
9	1	0.4250	77.9375	BERÍLIO
10	1	0.4750	77.9375	BERÍLIO
11	1	0.5250	77.9375	BERÍLIO
12	1	0.5750	77.9375	BERÍLIO
13	1	0.6250	77.9375	BERÍLIO
14	1	0.6750	77.9375	BERÍLIO
15	1	0.7250	77.9375	BERÍLIO
16	1	0.7750	77.9375	BERÍLIO
17	1	0.8250	77.9375	BERÍLIO
18	1	0.8750	77.9375	BERÍLIO
19	1	0.9250	77.9375	BERÍLIO
20	1	0.9750	77.9375	BERÍLIO
21	2	1.0060	77.9375	PLUTÔNIO
22	2	1.0179	77.9374	PLUTÔNIO
23	2	1.0298	77.9373	PLUTÔNIO
24	2	1.0418	77.9371	PLUTÔNIO
25	2	1.0537	77.9369	PLUTÔNIO
26	2	1.0656	77.9366	PLUTÔNIO
27	2	1.0776	77.9363	PLUTÔNIO
28	2	1.0895	77.9360	PLUTÔNIO
29	2	1.1014	77.9355	PLUTÔNIO
30	2	1.1134	77.9351	PLUTÔNIO
31	2	1.1253	77.9345	PLUTÔNIO
32	2	1.1372	77.9340	PLUTÔNIO
33	2	1.1492	77.9334	PLUTÔNIO
34	2	1.1611	77.9327	PLUTÔNIO
35	2	1.1730	77.9320	PLUTÔNIO
36	2	1.1850	77.9313	PLUTÔNIO
37	2	1.1969	77.9305	PLUTÔNIO
38	2	1.2088	77.9297	PLUTÔNIO
39	2	1.2208	77.9288	PLUTÔNIO
40	2	1.2327	77.9279	PLUTÔNIO
41	2	1.2446	77.9270	PLUTÔNIO
42	2	1.2566	77.9260	PLUTÔNIO

FIG. 6.4 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

43	2	1.2685	77.9250	PLUTÔNIO
44	2	1.2804	77.9239	PLUTÔNIO
45	2	1.2924	77.9228	PLUTÔNIO
46	2	1.3043	77.9217	PLUTÔNIO
47	2	1.3162	77.9205	PLUTÔNIO
48	2	1.3282	77.9193	PLUTÔNIO
49	2	1.3401	77.9181	PLUTÔNIO
50	2	1.3520	77.9168	PLUTÔNIO
51	2	1.3640	77.9155	PLUTÔNIO
52	2	1.3759	77.9142	PLUTÔNIO
53	2	1.3878	77.9128	PLUTÔNIO
54	2	1.3998	77.9114	PLUTÔNIO
55	2	1.4117	77.9099	PLUTÔNIO
56	2	1.4236	77.9085	PLUTÔNIO
57	2	1.4356	77.9070	PLUTÔNIO
58	2	1.4475	77.9054	PLUTÔNIO
59	2	1.4594	77.9038	PLUTÔNIO
60	2	1.4714	77.9022	PLUTÔNIO
61	2	1.4833	77.9006	PLUTÔNIO
62	2	1.4952	77.8989	PLUTÔNIO
63	2	1.5072	77.8972	PLUTÔNIO
64	2	1.5191	77.8955	PLUTÔNIO
65	2	1.5310	77.8938	PLUTÔNIO
66	2	1.5430	77.8920	PLUTÔNIO
67	2	1.5549	77.8902	PLUTÔNIO
68	2	1.5668	77.8883	PLUTÔNIO
69	2	1.5788	77.8864	PLUTÔNIO
70	2	1.5907	77.8845	PLUTÔNIO
71	2	1.6026	77.8826	PLUTÔNIO
72	2	1.6146	77.8806	PLUTÔNIO
73	2	1.6265	77.8787	PLUTÔNIO
74	2	1.6384	77.8766	PLUTÔNIO
75	2	1.6504	77.8746	PLUTÔNIO
76	2	1.6623	77.8725	PLUTÔNIO
77	2	1.6742	77.8704	PLUTÔNIO
78	2	1.6862	77.8683	PLUTÔNIO
79	2	1.6981	77.8661	PLUTÔNIO
80	2	1.7100	77.8640	PLUTÔNIO
81	2	1.7220	77.8617	PLUTÔNIO
82	2	1.7339	77.8595	PLUTÔNIO
83	2	1.7458	77.8572	PLUTÔNIO
84	2	1.7578	77.8550	PLUTÔNIO
85	2	1.7697	77.8526	PLUTÔNIO
86	2	1.7816	77.8503	PLUTÔNIO
87	2	1.7936	77.8479	PLUTÔNIO
88	2	1.8055	77.8455	PLUTÔNIO
89	2	1.8174	77.8431	PLUTÔNIO
90	2	1.8294	77.8407	PLUTÔNIO
91	2	1.8413	77.8382	PLUTÔNIO

FIG. 6.5 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

92	2	1.8532	77.8357	PLUTÔNIO
93	2	1.8652	77.8332	PLUTÔNIO
94	2	1.8771	77.8307	PLUTÔNIO
95	2	1.8890	77.8281	PLUTÔNIO
96	2	1.9010	77.8255	PLUTÔNIO
97	2	1.9129	77.8229	PLUTÔNIO
98	2	1.9248	77.8202	PLUTÔNIO
99	2	1.9368	77.8176	PLUTÔNIO
100	2	1.9487	77.8149	PLUTÔNIO
101	2	1.9606	77.8122	PLUTÔNIO
102	2	1.9726	77.8094	PLUTÔNIO
103	2	1.9845	77.8067	PLUTÔNIO
104	2	1.9964	77.8039	PLUTÔNIO
105	2	2.0084	77.8011	PLUTÔNIO
106	2	2.0203	77.7982	PLUTÔNIO
107	2	2.0322	77.7954	PLUTÔNIO
108	2	2.0442	77.7925	PLUTÔNIO
109	2	2.0561	77.7896	PLUTÔNIO
110	2	2.0680	77.7866	PLUTÔNIO
111	2	2.0800	77.7837	PLUTÔNIO
112	2	2.0919	77.7807	PLUTÔNIO
113	2	2.1038	77.7777	PLUTÔNIO
114	2	2.1158	77.7747	PLUTÔNIO
115	2	2.1277	77.7716	PLUTÔNIO
116	2	2.1396	77.7686	PLUTÔNIO
117	2	2.1516	77.7655	PLUTÔNIO
118	2	2.1635	77.7624	PLUTÔNIO
119	2	2.1754	77.7592	PLUTÔNIO
120	2	2.1874	77.7560	PLUTÔNIO
121	2	2.1993	77.7529	PLUTÔNIO
122	2	2.2112	77.7497	PLUTÔNIO
123	2	2.2232	77.7464	PLUTÔNIO
124	2	2.2351	77.7432	PLUTÔNIO
125	2	2.2470	77.7399	PLUTÔNIO
126	2	2.2590	77.7366	PLUTÔNIO
127	2	2.2709	77.7333	PLUTÔNIO
128	2	2.2828	77.7299	PLUTÔNIO
129	2	2.2948	77.7266	PLUTÔNIO
130	2	2.3067	77.7232	PLUTÔNIO
131	2	2.3186	77.7198	PLUTÔNIO
132	2	2.3306	77.7163	PLUTÔNIO
133	2	2.3425	77.7129	PLUTÔNIO
134	2	2.3544	77.7094	PLUTÔNIO
135	2	2.3664	77.7059	PLUTÔNIO
136	2	2.3783	77.7024	PLUTÔNIO
137	2	2.3902	77.6988	PLUTÔNIO
138	2	2.4022	77.6953	PLUTÔNIO
139	2	2.4141	77.6917	PLUTÔNIO
140	2	2.4260	77.6881	PLUTÔNIO

FIG. 6.6 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

141	2	2.4380	77.6844	PLUTÓNIO
142	2	2.4499	77.6808	PLUTÓNIO
143	2	2.4618	77.6771	PLUTÓNIO
144	2	2.4738	77.6734	PLUTÓNIO
145	2	2.4857	77.6697	PLUTÓNIO
146	2	2.4976	77.6660	PLUTÓNIO
147	2	2.5096	77.6622	PLUTÓNIO
148	2	2.5215	77.6584	PLUTÓNIO
149	2	2.5334	77.6546	PLUTÓNIO
150	2	2.5454	77.6508	PLUTÓNIO
151	2	2.5573	77.6469	PLUTÓNIO
152	2	2.5692	77.6431	PLUTÓNIO
153	2	2.5812	77.6392	PLUTÓNIO
154	2	2.5931	77.6353	PLUTÓNIO
155	2	2.6050	77.6313	PLUTÓNIO
156	2	2.6170	77.6274	PLUTÓNIO
157	2	2.6289	77.6234	PLUTÓNIO
158	2	2.6408	77.6194	PLUTÓNIO
159	2	2.6528	77.6154	PLUTÓNIO
160	2	2.6647	77.6114	PLUTÓNIO
161	2	2.6766	77.6073	PLUTÓNIO
162	2	2.6886	77.6032	PLUTÓNIO
163	2	2.7005	77.5991	PLUTÓNIO
164	2	2.7124	77.5950	PLUTÓNIO
165	2	2.7244	77.5909	PLUTÓNIO
166	2	2.7363	77.5867	PLUTÓNIO
167	2	2.7482	77.5825	PLUTÓNIO
168	2	2.7602	77.5783	PLUTÓNIO
169	2	2.7721	77.5741	PLUTÓNIO
170	2	2.7840	77.5698	PLUTÓNIO
171	2	2.7960	77.5655	PLUTÓNIO
172	2	2.8079	77.5613	PLUTÓNIO
173	2	2.8198	77.5569	PLUTÓNIO
174	2	2.8318	77.5526	PLUTÓNIO
175	2	2.8437	77.5483	PLUTÓNIO
176	2	2.8556	77.5439	PLUTÓNIO
177	2	2.8676	77.5395	PLUTÓNIO
178	2	2.8795	77.5351	PLUTÓNIO
179	2	2.8914	77.5306	PLUTÓNIO
180	2	2.9034	77.5262	PLUTÓNIO
181	2	2.9153	77.5217	PLUTÓNIO
182	2	2.9272	77.5172	PLUTÓNIO
183	2	2.9392	77.5127	PLUTÓNIO
184	2	2.9511	77.5081	PLUTÓNIO
185	2	2.9630	77.5036	PLUTÓNIO
186	2	2.9750	77.4990	PLUTÓNIO
187	2	2.9869	77.4944	PLUTÓNIO
188	2	2.9988	77.4898	PLUTÓNIO
189	2	3.0108	77.4851	PLUTÓNIO

FIG. 6.7 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

190	2	3.0227	77.4805	PLUTÓNIO
191	2	3.0346	77.4758	PLUTÓNIO
192	2	3.0466	77.4711	PLUTÓNIO
193	2	3.0585	77.4664	PLUTÓNIO
194	2	3.0704	77.4616	PLUTÓNIO
195	2	3.0824	77.4568	PLUTÓNIO
196	2	3.0943	77.4521	PLUTÓNIO
197	2	3.1062	77.4472	PLUTÓNIO
198	2	3.1182	77.4424	PLUTÓNIO
199	2	3.1301	77.4376	PLUTÓNIO
200	2	3.1420	77.4327	PLUTÓNIO
201	2	3.1540	77.4278	PLUTÓNIO
202	2	3.1659	77.4229	PLUTÓNIO
203	2	3.1778	77.4180	PLUTÓNIO
204	2	3.1898	77.4130	PLUTÓNIO
205	2	3.2017	77.4081	PLUTÓNIO
206	2	3.2136	77.4031	PLUTÓNIO
207	2	3.2256	77.3981	PLUTÓNIO
208	2	3.2375	77.3930	PLUTÓNIO
209	2	3.2494	77.3880	PLUTÓNIO
210	2	3.2614	77.3829	PLUTÓNIO
211	2	3.2733	77.3778	PLUTÓNIO
212	2	3.2852	77.3727	PLUTÓNIO
213	2	3.2972	77.3676	PLUTÓNIO
214	2	3.3091	77.3624	PLUTÓNIO
215	2	3.3210	77.3572	PLUTÓNIO
216	2	3.3330	77.3520	PLUTÓNIO
217	2	3.3449	77.3468	PLUTÓNIO
218	2	3.3568	77.3416	PLUTÓNIO
219	2	3.3688	77.3363	PLUTÓNIO
220	2	3.3807	77.3311	PLUTÓNIO
221	2	3.3926	77.3258	PLUTÓNIO
222	2	3.4046	77.3205	PLUTÓNIO
223	2	3.4165	77.3151	PLUTÓNIO
224	2	3.4284	77.3098	PLUTÓNIO
225	2	3.4404	77.3044	PLUTÓNIO
226	2	3.4523	77.2990	PLUTÓNIO
227	2	3.4642	77.2936	PLUTÓNIO
228	2	3.4762	77.2882	PLUTÓNIO
229	2	3.4881	77.2827	PLUTÓNIO
230	2	3.5000	77.2772	PLUTÓNIO
231	2	3.5120	77.2717	PLUTÓNIO
232	2	3.5239	77.2662	PLUTÓNIO
233	2	3.5358	77.2607	PLUTÓNIO
234	2	3.5478	77.2551	PLUTÓNIO
235	2	3.5597	77.2496	PLUTÓNIO
236	2	3.5716	77.2440	PLUTÓNIO
237	2	3.5836	77.2384	PLUTÓNIO
238	2	3.5955	77.2327	PLUTÓNIO

FIG. 6.8 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

239	2	3.6074	77.2271	PLUTÔNIO
240	2	3.6194	77.2214	PLUTÔNIO
241	2	3.6313	77.2157	PLUTÔNIO
242	2	3.6432	77.2100	PLUTÔNIO
243	2	3.6552	77.2042	PLUTÔNIO
244	2	3.6671	77.1985	PLUTÔNIO
245	2	3.6790	77.1927	PLUTÔNIO
246	2	3.6910	77.1869	PLUTÔNIO
247	2	3.7029	77.1811	PLUTÔNIO
248	2	3.7148	77.1753	PLUTÔNIO
249	2	3.7268	77.1694	PLUTÔNIO
250	2	3.7387	77.1635	PLUTÔNIO
251	2	3.7506	77.1577	PLUTÔNIO
252	2	3.7626	77.1517	PLUTÔNIO
253	2	3.7745	77.1458	PLUTÔNIO
254	2	3.7864	77.1399	PLUTÔNIO
255	2	3.7984	77.1339	PLUTÔNIO
256	2	3.8103	77.1279	PLUTÔNIO
257	2	3.8222	77.1219	PLUTÔNIO
258	2	3.8342	77.1158	PLUTÔNIO
259	2	3.8461	77.1098	PLUTÔNIO
260	2	3.8580	77.1037	PLUTÔNIO
261	2	3.8700	77.0976	PLUTÔNIO
262	2	3.8819	77.0915	PLUTÔNIO
263	2	3.8938	77.0854	PLUTÔNIO
264	2	3.9058	77.0792	PLUTÔNIO
265	2	3.9177	77.0731	PLUTÔNIO
266	2	3.9296	77.0669	PLUTÔNIO
267	2	3.9416	77.0607	PLUTÔNIO
268	2	3.9535	77.0544	PLUTÔNIO
269	2	3.9654	77.0482	PLUTÔNIO
270	2	3.9774	77.0419	PLUTÔNIO
271	2	3.9893	77.0356	PLUTÔNIO
272	2	4.0012	77.0293	PLUTÔNIO
273	2	4.0132	77.0230	PLUTÔNIO
274	2	4.0251	77.0166	PLUTÔNIO
275	2	4.0370	77.0103	PLUTÔNIO
276	2	4.0490	77.0039	PLUTÔNIO
277	2	4.0609	76.9975	PLUTÔNIO
278	2	4.0728	76.9910	PLUTÔNIO
279	2	4.0848	76.9846	PLUTÔNIO
280	2	4.0967	76.9781	PLUTÔNIO
281	2	4.1086	76.9716	PLUTÔNIO
282	2	4.1206	76.9651	PLUTÔNIO
283	2	4.1325	76.9586	PLUTÔNIO
284	2	4.1444	76.9521	PLUTÔNIO
285	2	4.1564	76.9455	PLUTÔNIO
286	2	4.1683	76.9389	PLUTÔNIO
287	2	4.1802	76.9323	PLUTÔNIO

FIG. 6.9 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

288	2	4.1922	76.9257	PLUTÔNIO
289	2	4.2041	76.9190	PLUTÔNIO
290	2	4.2160	76.9124	PLUTÔNIO
291	2	4.2280	76.9057	PLUTÔNIO
292	2	4.2399	76.8990	PLUTÔNIO
293	2	4.2518	76.8923	PLUTÔNIO
294	2	4.2638	76.8855	PLUTÔNIO
295	2	4.2757	76.8788	PLUTÔNIO
296	2	4.2876	76.8720	PLUTÔNIO
297	2	4.2996	76.8652	PLUTÔNIO
298	2	4.3115	76.8583	PLUTÔNIO
299	2	4.3234	76.8515	PLUTÔNIO
300	2	4.3354	76.8446	PLUTÔNIO
301	2	4.3473	76.8378	PLUTÔNIO
302	2	4.3592	76.8309	PLUTÔNIO
303	2	4.3712	76.8239	PLUTÔNIO
304	2	4.3831	76.8170	PLUTÔNIO
305	2	4.3950	76.8100	PLUTÔNIO
306	2	4.4070	76.8031	PLUTÔNIO
307	2	4.4189	76.7961	PLUTÔNIO
308	2	4.4308	76.7891	PLUTÔNIO
309	2	4.4428	76.7820	PLUTÔNIO
310	2	4.4547	76.7750	PLUTÔNIO
311	2	4.4666	76.7679	PLUTÔNIO
312	2	4.4786	76.7608	PLUTÔNIO
313	2	4.4905	76.7537	PLUTÔNIO
314	2	4.5024	76.7465	PLUTÔNIO
315	2	4.5144	76.7394	PLUTÔNIO
316	2	4.5263	76.7322	PLUTÔNIO
317	2	4.5382	76.7250	PLUTÔNIO
318	2	4.5502	76.7178	PLUTÔNIO
319	2	4.5621	76.7106	PLUTÔNIO
320	2	4.5740	76.7033	PLUTÔNIO
321	3	4.6133	76.6918	URÂNIO-NATURAL
322	3	4.6800	76.6792	URÂNIO-NATURAL
323	3	4.7467	76.6670	URÂNIO-NATURAL
324	3	4.8133	76.6551	URÂNIO-NATURAL
325	3	4.8800	76.6436	URÂNIO-NATURAL
326	3	4.9467	76.6324	URÂNIO-NATURAL
327	3	5.0133	76.6214	URÂNIO-NATURAL
328	3	5.0800	76.6108	URÂNIO-NATURAL
329	3	5.1467	76.6004	URÂNIO-NATURAL
330	3	5.2133	76.5903	URÂNIO-NATURAL
331	3	5.2800	76.5804	URÂNIO-NATURAL
332	3	5.3467	76.5708	URÂNIO-NATURAL
333	3	5.4133	76.5615	URÂNIO-NATURAL
334	3	5.4800	76.5523	URÂNIO-NATURAL
335	3	5.5467	76.5434	URÂNIO-NATURAL
336	3	5.6133	76.5347	URÂNIO-NATURAL

FIG. 6.10 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação)

337	3	5.6800	76.5262	URÂNIO-NATURAL
338	3	5.7467	76.5179	URÂNIO-NATURAL
339	3	5.8133	76.5098	URÂNIO-NATURAL
340	3	5.8800	76.5018	URÂNIO-NATURAL
341	3	5.9467	76.4941	URÂNIO-NATURAL
342	3	6.0133	76.4865	URÂNIO-NATURAL
343	3	6.0800	76.4791	URÂNIO-NATURAL
344	3	6.1467	76.4718	URÂNIO-NATURAL
345	3	6.2133	76.4647	URÂNIO-NATURAL
346	3	6.2800	76.4578	URÂNIO-NATURAL
347	3	6.3467	76.4510	URÂNIO-NATURAL
348	3	6.4133	76.4443	URÂNIO-NATURAL
349	3	6.4800	76.4378	URÂNIO-NATURAL
350	3	6.5467	76.4314	URÂNIO-NATURAL
351	4	6.5967	76.4220	COMPOSTOB
352	4	6.6300	76.0326	COMPOSTOB
353	4	6.6633	75.6471	COMPOSTOB
354	4	6.6967	75.2654	COMPOSTOB
355	4	6.7300	74.8876	COMPOSTOB
356	4	6.7633	74.5134	COMPOSTOB
357	4	6.7967	74.1429	COMPOSTOB
358	4	6.8300	73.7760	COMPOSTOB
359	4	6.8633	73.4127	COMPOSTOB
360	4	6.8967	73.0529	COMPOSTOB
361	4	6.9300	72.6966	COMPOSTOB
362	4	6.9633	72.3436	COMPOSTOB
363	4	6.9967	71.9941	COMPOSTOB
364	4	7.0300	71.6478	COMPOSTOB
365	4	7.0633	71.3049	COMPOSTOB
366	4	7.0967	70.9651	COMPOSTOB
367	4	7.1300	70.6285	COMPOSTOB
368	4	7.1633	70.2951	COMPOSTOB
369	4	7.1967	69.9647	COMPOSTOB
370	4	7.2300	69.6374	COMPOSTOB
371	4	7.2633	69.3131	COMPOSTOB
372	4	7.2967	68.9917	COMPOSTOB
373	4	7.3300	68.6733	COMPOSTOB
374	4	7.3633	68.3578	COMPOSTOB
375	4	7.3967	68.0451	COMPOSTOB
376	4	7.4300	67.7352	COMPOSTOB
377	4	7.4633	67.4281	COMPOSTOB
378	4	7.4967	67.1237	COMPOSTOB
379	4	7.5300	66.8220	COMPOSTOB
380	4	7.5633	66.5229	COMPOSTOB
381	4	7.5967	66.2265	COMPOSTOB
382	4	7.6300	65.9327	COMPOSTOB
383	4	7.6633	65.6414	COMPOSTOB
384	4	7.6967	65.3527	COMPOSTOB
385	4	7.7300	65.0664	COMPOSTOB

FIG. 6.11 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

386	4	7.7633	64.7826	COMPOSTOB
387	4	7.7967	64.5012	COMPOSTOB
388	4	7.8300	64.2223	COMPOSTOB
389	4	7.8633	63.9457	COMPOSTOB
390	4	7.8967	63.6714	COMPOSTOB
391	4	7.9300	63.3994	COMPOSTOB
392	4	7.9633	63.1297	COMPOSTOB
393	4	7.9967	62.8623	COMPOSTOB
394	4	8.0300	62.5971	COMPOSTOB
395	4	8.0633	62.3340	COMPOSTOB
396	4	8.0967	62.0732	COMPOSTOB
397	4	8.1300	61.8144	COMPOSTOB
398	4	8.1633	61.5578	COMPOSTOB
399	4	8.1967	61.3033	COMPOSTOB
400	4	8.2300	61.0508	COMPOSTOB
401	4	8.2633	60.8004	COMPOSTOB
402	4	8.2967	60.5520	COMPOSTOB
403	4	8.3300	60.3056	COMPOSTOB
404	4	8.3633	60.0611	COMPOSTOB
405	4	8.3967	59.8186	COMPOSTOB
406	4	8.4300	59.5780	COMPOSTOB
407	4	8.4633	59.3393	COMPOSTOB
408	4	8.4967	59.1024	COMPOSTOB
409	4	8.5300	58.8675	COMPOSTOB
410	4	8.5633	58.6343	COMPOSTOB
411	4	8.5967	58.4030	COMPOSTOB
412	4	8.6300	58.1734	COMPOSTOB
413	4	8.6633	57.9456	COMPOSTOB
414	4	8.6967	57.7196	COMPOSTOB
415	4	8.7300	57.4952	COMPOSTOB
416	4	8.7633	57.2726	COMPOSTOB
417	4	8.7967	57.0517	COMPOSTOB
418	4	8.8300	56.8324	COMPOSTOB
419	4	8.8633	56.6148	COMPOSTOB
420	4	8.8967	56.3989	COMPOSTOB
421	4	8.9300	56.1845	COMPOSTOB
422	4	8.9633	55.9717	COMPOSTOB
423	4	8.9967	55.7605	COMPOSTOB
424	4	9.0300	55.5509	COMPOSTOB
425	4	9.0633	55.3428	COMPOSTOB
426	4	9.0967	55.1362	COMPOSTOB
427	4	9.1300	54.9312	COMPOSTOB
428	4	9.1633	54.7276	COMPOSTOB
429	4	9.1967	54.5255	COMPOSTOB
430	4	9.2300	54.3249	COMPOSTOB
431	4	9.2633	54.1257	COMPOSTOB
432	4	9.2967	53.9279	COMPOSTOB
433	4	9.3300	53.7316	COMPOSTOB
434	4	9.3633	53.5366	COMPOSTOB

FIG. 6.12 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

435	4	9.3967	53.3430	COMPOSTOB
436	4	9.4300	53.1508	COMPOSTOB
437	4	9.4633	52.9600	COMPOSTOB
438	4	9.4967	52.7705	COMPOSTOB
439	4	9.5300	52.5823	COMPOSTOB
440	4	9.5633	52.3954	COMPOSTOB
441	4	9.5967	52.2099	COMPOSTOB
442	4	9.6300	52.0256	COMPOSTOB
443	4	9.6633	51.8426	COMPOSTOB
444	4	9.6967	51.6608	COMPOSTOB
445	4	9.7300	51.4803	COMPOSTOB
446	4	9.7633	51.3010	COMPOSTOB
447	4	9.7967	51.1230	COMPOSTOB
448	4	9.8300	50.9461	COMPOSTOB
449	4	9.8633	50.7705	COMPOSTOB
450	4	9.8967	50.5960	COMPOSTOB
451	4	9.9300	50.4227	COMPOSTOB
452	4	9.9633	50.2506	COMPOSTOB
453	4	9.9967	50.0796	COMPOSTOB
454	4	10.0300	49.9097	COMPOSTOB
455	4	10.0633	49.7410	COMPOSTOB
456	4	10.0967	49.5734	COMPOSTOB
457	4	10.1300	49.4069	COMPOSTOB
458	4	10.1633	49.2414	COMPOSTOB
459	4	10.1967	49.0771	COMPOSTOB
460	4	10.2300	48.9138	COMPOSTOB
461	4	10.2633	48.7516	COMPOSTOB
462	4	10.2967	48.5905	COMPOSTOB
463	4	10.3300	48.4303	COMPOSTOB
464	4	10.3633	48.2713	COMPOSTOB
465	4	10.3967	48.1132	COMPOSTOB
466	4	10.4300	47.9561	COMPOSTOB
467	4	10.4633	47.8001	COMPOSTOB
468	4	10.4967	47.6450	COMPOSTOB
469	4	10.5300	47.4909	COMPOSTOB
470	4	10.5633	47.3378	COMPOSTOB
471	4	10.5967	47.1857	COMPOSTOB
472	4	10.6300	47.0345	COMPOSTOB
473	4	10.6633	46.8842	COMPOSTOB
474	4	10.6967	46.7349	COMPOSTOB
475	4	10.7300	46.5865	COMPOSTOB
476	4	10.7633	46.4391	COMPOSTOB
477	4	10.7967	46.2925	COMPOSTOB
478	4	10.8300	46.1469	COMPOSTOB
479	4	10.8633	46.0021	COMPOSTOB
480	4	10.8967	45.8582	COMPOSTOB
481	4	10.9300	45.7152	COMPOSTOB
482	4	10.9633	45.5731	COMPOSTOB
483	4	10.9967	45.4318	COMPOSTOB

FIG. 6.13 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

484	4	11.0300	45.2914	COMPOSTOB
485	4	11.0633	45.1519	COMPOSTOB
486	4	11.0967	45.0131	COMPOSTOB
487	4	11.1300	44.8752	COMPOSTOB
488	4	11.1633	44.7382	COMPOSTOB
489	4	11.1967	44.6019	COMPOSTOB
490	4	11.2300	44.4665	COMPOSTOB
491	4	11.2633	44.3318	COMPOSTOB
492	4	11.2967	44.1980	COMPOSTOB
493	4	11.3300	44.0649	COMPOSTOB
494	4	11.3633	43.9326	COMPOSTOB
495	4	11.3967	43.8011	COMPOSTOB
496	4	11.4300	43.6704	COMPOSTOB
497	4	11.4633	43.5404	COMPOSTOB
498	4	11.4967	43.4112	COMPOSTOB
499	4	11.5300	43.2827	COMPOSTOB
500	4	11.5633	43.1550	COMPOSTOB
501	4	11.5967	43.0279	COMPOSTOB
502	4	11.6300	42.9017	COMPOSTOB
503	4	11.6633	42.7761	COMPOSTOB
504	4	11.6967	42.6513	COMPOSTOB
505	4	11.7300	42.5271	COMPOSTOB
506	4	11.7633	42.4037	COMPOSTOB
507	4	11.7967	42.2810	COMPOSTOB
508	4	11.8300	42.1590	COMPOSTOB
509	4	11.8633	42.0376	COMPOSTOB
510	4	11.8967	41.9169	COMPOSTOB
511	4	11.9300	41.7969	COMPOSTOB
512	4	11.9633	41.6776	COMPOSTOB
513	4	11.9967	41.5589	COMPOSTOB
514	4	12.0300	41.4409	COMPOSTOB
515	4	12.0633	41.3236	COMPOSTOB
516	4	12.0967	41.2069	COMPOSTOB
517	4	12.1300	41.0908	COMPOSTOB
518	4	12.1633	40.9754	COMPOSTOB
519	4	12.1967	40.8606	COMPOSTOB
520	4	12.2300	40.7464	COMPOSTOB
521	4	12.2633	40.6328	COMPOSTOB
522	4	12.2967	40.5199	COMPOSTOB
523	4	12.3300	40.4076	COMPOSTOB
524	4	12.3633	40.2959	COMPOSTOB
525	4	12.3967	40.1847	COMPOSTOB
526	4	12.4300	40.0742	COMPOSTOB
527	4	12.4633	39.9643	COMPOSTOB
528	4	12.4967	39.8549	COMPOSTOB
529	4	12.5300	39.7462	COMPOSTOB
530	4	12.5633	39.6380	COMPOSTOB
531	4	12.5967	39.5304	COMPOSTOB
532	4	12.6300	39.4233	COMPOSTOB

FIG. 6.14 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

533	4	12.6633	39.3168	COMPOSTOB
534	4	12.6967	39.2109	COMPOSTOB
535	4	12.7300	39.1055	COMPOSTOB
536	4	12.7633	39.0007	COMPOSTOB
537	4	12.7967	38.8964	COMPOSTOB
538	4	12.8300	38.7927	COMPOSTOB
539	4	12.8633	38.6895	COMPOSTOB
540	4	12.8967	38.5868	COMPOSTOB
541	4	12.9300	38.4847	COMPOSTOB
542	4	12.9633	38.3831	COMPOSTOB
543	4	12.9967	38.2820	COMPOSTOB
544	4	13.0300	38.1815	COMPOSTOB
545	4	13.0633	38.0814	COMPOSTOB
546	4	13.0967	37.9819	COMPOSTOB
547	4	13.1300	37.8828	COMPOSTOB
548	4	13.1633	37.7843	COMPOSTOB
549	4	13.1967	37.6862	COMPOSTOB
550	4	13.2300	37.5887	COMPOSTOB
551	4	13.2633	37.4916	COMPOSTOB
552	4	13.2967	37.3951	COMPOSTOB
553	4	13.3300	37.2990	COMPOSTOB
554	4	13.3633	37.2034	COMPOSTOB
555	4	13.3967	37.1082	COMPOSTOB
556	4	13.4300	37.0136	COMPOSTOB
557	4	13.4633	36.9194	COMPOSTOB
558	4	13.4967	36.8257	COMPOSTOB
559	4	13.5300	36.7324	COMPOSTOB
560	4	13.5633	36.6396	COMPOSTOB
561	4	13.5967	36.5472	COMPOSTOB
562	4	13.6300	36.4553	COMPOSTOB
563	4	13.6633	36.3639	COMPOSTOB
564	4	13.6967	36.2729	COMPOSTOB
565	4	13.7300	36.1823	COMPOSTOB
566	4	13.7633	36.0922	COMPOSTOB
567	4	13.7967	36.0025	COMPOSTOB
568	4	13.8300	35.9133	COMPOSTOB
569	4	13.8633	35.8244	COMPOSTOB
570	4	13.8967	35.7360	COMPOSTOB
571	4	13.9300	35.6480	COMPOSTOB
572	4	13.9633	35.5605	COMPOSTOB
573	4	13.9967	35.4733	COMPOSTOB
574	4	14.0300	35.3866	COMPOSTOB
575	4	14.0633	35.3003	COMPOSTOB
576	4	14.0967	35.2144	COMPOSTOB
577	4	14.1300	35.1289	COMPOSTOB
578	4	14.1633	35.0438	COMPOSTOB
579	4	14.1967	34.9591	COMPOSTOB
580	4	14.2300	34.8748	COMPOSTOB
581	4	14.2633	34.7909	COMPOSTOB

FIG. 6.15 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

582	4	14.2967	34.7074	COMPOSTOB
583	4	14.3300	34.6242	COMPOSTOB
584	4	14.3633	34.5415	COMPOSTOB
585	4	14.3967	34.4591	COMPOSTOB
586	4	14.4300	34.3771	COMPOSTOB
587	4	14.4633	34.2955	COMPOSTOB
588	4	14.4967	34.2143	COMPOSTOB
589	4	14.5300	34.1335	COMPOSTOB
590	4	14.5633	34.0530	COMPOSTOB
591	4	14.5967	33.9729	COMPOSTOB
592	4	14.6300	33.8931	COMPOSTOB
593	4	14.6633	33.8137	COMPOSTOB
594	4	14.6967	33.7347	COMPOSTOB
595	4	14.7300	33.6560	COMPOSTOB
596	4	14.7633	33.5777	COMPOSTOB
597	4	14.7967	33.4997	COMPOSTOB
598	4	14.8300	33.4221	COMPOSTOB
599	4	14.8633	33.3449	COMPOSTOB
600	4	14.8967	33.2679	COMPOSTOB
601	4	14.9300	33.1914	COMPOSTOB
602	4	14.9633	33.1151	COMPOSTOB
603	4	14.9967	33.0392	COMPOSTOB
604	4	15.0300	32.9637	COMPOSTOB
605	4	15.0633	32.8885	COMPOSTOB
606	4	15.0967	32.8136	COMPOSTOB
607	4	15.1300	32.7390	COMPOSTOB
608	4	15.1633	32.6648	COMPOSTOB
609	4	15.1967	32.5909	COMPOSTOB
610	4	15.2300	32.5173	COMPOSTOB
611	4	15.2633	32.4440	COMPOSTOB
612	4	15.2967	32.3711	COMPOSTOB
613	4	15.3300	32.2984	COMPOSTOB
614	4	15.3633	32.2261	COMPOSTOB
615	4	15.3967	32.1541	COMPOSTOB
616	4	15.4300	32.0824	COMPOSTOB
617	4	15.4633	32.0111	COMPOSTOB
618	4	15.4967	31.9400	COMPOSTOB
619	4	15.5300	31.8692	COMPOSTOB
620	4	15.5633	31.7988	COMPOSTOB
621	4	15.5967	31.7286	COMPOSTOB
622	4	15.6300	31.6587	COMPOSTOB
623	4	15.6633	31.5892	COMPOSTOB
624	4	15.6967	31.5199	COMPOSTOB
625	4	15.7300	31.4509	COMPOSTOB
626	4	15.7633	31.3822	COMPOSTOB
627	4	15.7967	31.3138	COMPOSTOB
628	4	15.8300	31.2457	COMPOSTOB
629	4	15.8633	31.1779	COMPOSTOB
630	4	15.8967	31.1104	COMPOSTOB

FIG. 6.16 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).

631	4	15.9300	31.0431	COMPOSTOB
632	4	15.9633	30.9762	COMPOSTOB
633	4	15.9967	30.9095	COMPOSTOB
634	4	16.0300	30.8431	COMPOSTOB
635	4	16.0633	30.7769	COMPOSTOB
636	4	16.0967	30.7110	COMPOSTOB
637	4	16.1300	30.6454	COMPOSTOB
638	4	16.1633	30.5801	COMPOSTOB
639	4	16.1967	30.5151	COMPOSTOB
640	4	16.2300	30.4503	COMPOSTOB
641	4	16.2633	30.3858	COMPOSTOB
642	4	16.2967	30.3215	COMPOSTOB
643	4	16.3300	30.2575	COMPOSTOB
644	4	16.3633	30.1938	COMPOSTOB
645	4	16.3967	30.1303	COMPOSTOB
646	4	16.4300	30.0671	COMPOSTOB
647	4	16.4633	30.0041	COMPOSTOB
648	4	16.4967	29.9414	COMPOSTOB
649	4	16.5300	29.8790	COMPOSTOB
650	4	16.5633	29.8167	COMPOSTOB

FIG. 6.17 Arquivo de saída ATNA ARQUIVO DE SAIDA.OUT (continuação).