

## CÁLCULO DE TEMPERATURA NO SILÍCIO IRRADIADO NO REATOR IEA-R1

Pedro Ernesto Umbehaun, Hélio Yoriyaz, Mitsuo Yamaguchi

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN-CNEN/SP  
Av. Prof. Lineu Prestes, 2242 – Cidade Universitária  
05508-000 São Paulo, Brasil

### RESUMO

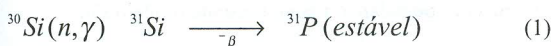
O silício é o material mais comumente usado na fabricação de componentes eletrônicos, que sofre uma dopagem para melhorar suas características. Este material é irradiado no reator IEA-R1 para dopagem nuclear, que tem vantagem sobre a convencional. A irradiação deposita energia no material, aumentando a sua temperatura. Valores relativamente altos podem alterar as propriedades do material. Este trabalho apresenta uma estimativa do calor gerado no silício utilizando o programa MCNP para cálculo da energia depositada no material e um modelo termo-hidráulico desenvolvido para o cálculo de temperatura.

**Keywords:** thermal hydraulics, silicon, irradiation.

### I. INTRODUÇÃO

O silício é o material mais comumente usado na fabricação de componentes eletrônicos, principalmente de circuitos integrados para computadores. Entretanto, para este uso, o silício precisa ser dopado para obter uma resistividade adequada [1]. O material mais utilizado para a dopagem é o fósforo. A dopagem convencional acarreta uma distribuição não-uniforme do material dopante, ocasionando grandes variações na resistividade.

O método NTD (Neutron Transmutation Doping) produz silício com material dopante distribuído com extrema uniformidade. O método consiste em irradiar o silício em um reator nuclear, cujo processo é baseado na captura de neutrões térmicos pelo  $^{30}\text{Si}$  (sua abundância é de 3,1 % no silício natural) produzindo a seguinte reação nuclear:



A meia-vida do  $^{31}\text{Si}$  é de 2,62 horas. Essas reações nucleares mais os fótons provenientes do núcleo depositam energia no silício, acarretando um aumento de temperatura em seu interior.

O objetivo deste trabalho é calcular a temperatura no mono-cristal de silício que é irradiado no reator IEA-R1. A energia depositada foi calculada com o programa MCNP [2], que simula o transporte de neutrões e fótons.

Para o cálculo da distribuição de temperatura no mono-cristal de silício, desenvolveu-se um modelo térmico denominado SILICIO.EES, utilizando o pacote "Engineering Equation Solver – EES" [3].

### II. DESCRIÇÃO DO REATOR IEA-R1

O reator IEA-R1, localizado nas dependências do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) em São Paulo, é um reator de pesquisas do tipo piscina destinado à produção de radioisótopos para uso na medicina e indústria, testes de materiais e de combustíveis nucleares, irradiação de amostras com nêutrons, realização de pesquisas fundamentais em diversas áreas tais como física, radioquímica, radiobiologia, análise por ativação, auxílio à formação de recursos humanos a nível de pós-graduação e treinamento de pessoal especializado para operação de reatores.

A configuração atual do núcleo do reator (Fig. 1) consiste de um arranjo de 24 elementos combustíveis tipo MTR (LEU, enriquecido a 20 %), sendo 20 padrão, constituídos de 18 placas de combustível e 4 de controle com 12 placas de combustível e refletores de grafita, além dos dispositivos de irradiação. Todos os elementos combustíveis são de fabricação IPEN, sendo 4 com densidade de 1,9 gU/cm<sup>3</sup> (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-Al), 15 com densidade de 2,3 gU/cm<sup>3</sup> (U<sub>3</sub>O<sub>8</sub>-Al, em negrito na Fig. 1) e 5 com densidade de 3,0 gU/cm<sup>3</sup> (U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-Al, em negrito e itálico na Fig. 1). A espessura do cerne é de 0,76 mm, do revestimento 0,38 mm e a do canal refrigerante 2,89 mm. As barras de controle são do tipo garfo com espessura de 3,1mm, constituídas de uma liga de Ag-In-Cd (80-15-5 % em peso) e são introduzidas entre duas placas de alumínio do elemento de controle.

O elemento de irradiação de berílio (conhecido como EIBE, posição 65, Fig.1), localizado no centro do núcleo, se destina à produção de  $^{99}\text{Mo}$  via captura no  $^{98}\text{Mo}$ . As regiões hachuradas localizadas na periferia do núcleo ativo (posições 24, 34,36, 52, 58 e 72 Fig.1) se destinam à

irradiação de materiais que possuem absorção térmica. O silício é irradiado no elemento de irradiação, conhecido como EIS, que ocupa 4 posições da placa matriz (posições 31, 32, 41 e 42, Fig.1).

O silício a ser irradiado se apresenta na forma de tarugos cilíndricos com 127 mm de diâmetro e 400 mm de altura, que é colocado dentro do irradiador e é mantido em movimento de rotação de forma a homogeneizar a irradiação.

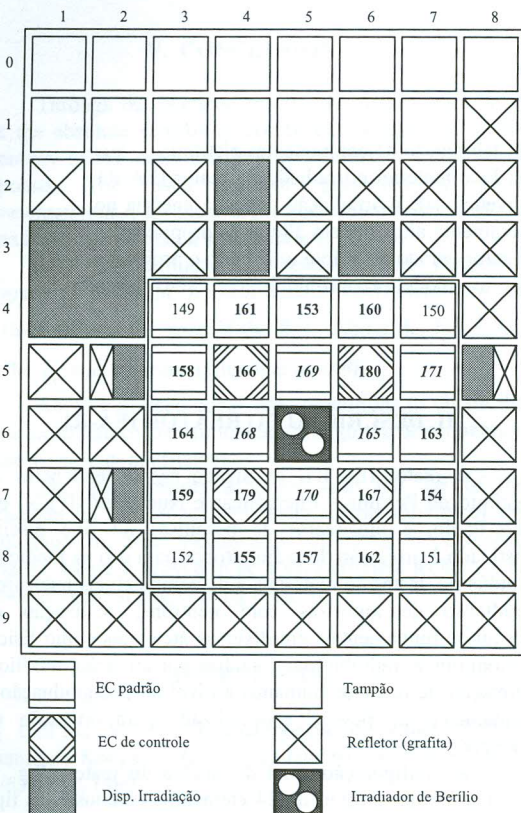


Figura 1. Seção Transversal do Núcleo do Reator IEA-R1.

III. METODOLOGIA DE CÁLCULO

A taxa de fissões foi determinada utilizando a metodologia de cálculo neutrônico empregada na Área de Física de Reatores. Baseia-se nos programas LEOPARD [4] e HAMMER-TECHNION [5] para geração de seções de choque e 2DB [6] e CITATION [7] para cálculo dos parâmetros neutrônicos do núcleo.

Apresenta-se a seguir o modelo térmico desenvolvido para a avaliação das temperaturas da amostra de silício.

Salienta-se que, segundo a referência[8], a temperatura da amostra de silício não deve ultrapassar 100°C.

A Fig. 2 apresenta, esquematicamente, a divisão nodal adotada, considerando a irradiação do mono-cristal de silício. Tendo em vista a simetria geométrica e térmica do problema, pode-se limitar o modelo a meio cilindro dividido radialmente ao meio. O cilindro de silício e o fluido refrigerante são subdivididos em n nós na direção axial, igualmente espaçados. Na direção radial, tem-se um nó no centro do cilindro, um na superfície externa e um n fluido refrigerante.

As trocas térmicas consideradas no modelo são:

- condução de calor transversal no mono-cristal de silício;
- convecção entre a superfície externa do mono-cristal e o fluido em escoamento;
- transporte entálpico devido ao escoamento do fluido;

Desprezou-se a condução de calor axial no mono-cristal e no fluido refrigerante e a resistência térmica da caneca de alumínio devido a sua alta condutividade e ao movimento de rotação. As propriedades térmicas do fluido refrigerante e do mono-cristal foram consideradas constantes.

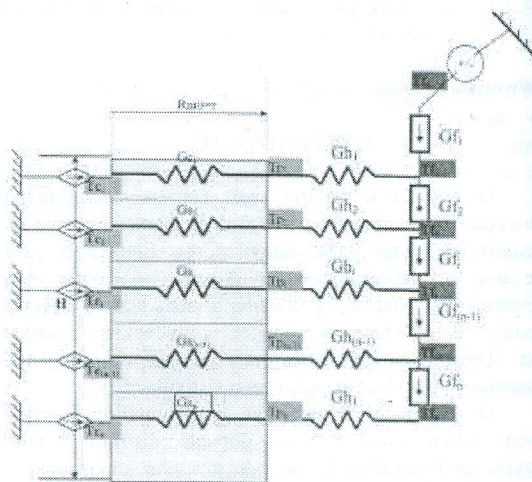


Figura 2. Esquema Simplificado do Modelo.

As equações de balanço para o presente modelo são:

$$Tf0 = Tc \text{ (temperatura de entrada do fluido refrigerante) } (2)$$

$$Q + Gs * (Tpi - Tci) = 0 \quad (3)$$

$$Gs * (Tci - Tpi) + Gh * (Tfi - Tpi) = 0 \quad (4)$$

$$Gf * (Tfi-1 - Tfi) + Gh * (Tpi - Tfi) = 0 \quad (5)$$

onde:

$$Gs = (4 * \pi * L * K_{Si}) / N \quad (6)$$

$$Gf = m * Cp_{\text{água}} \quad (7)$$

$$Gh=(hc \cdot A_{\text{troca}})/N \quad (8)$$

$$ht=0,023 \cdot (Re^{0,8} \cdot Pr^{0,3}) \cdot k/De \quad \text{para } Re > 4000 \quad (9)$$

$$h=4,36 \cdot k/De \quad \text{se } Re < 2000 \quad (10)$$

$$h=((Re-2000) \cdot ht + (4000-Re) \cdot hl)/2000 \quad \text{se } 2000 < Re < 4000 \quad (11)$$

sendo:

- Tc temperatura central;  
 Tf temperatura do fluido;  
 Tp temperatura na parede;  
 Q calor gerado;  
 N número de nós;  
 Gs condutância do mono-cristal de silício;  
 Gf Condutância fluida;  
 Gh condutância convectiva;  
 h coeficiente de convecção;  
 ht coeficiente de convecção para regime turbulento;  
 hl coeficiente de convecção para regime laminar;  
 Re número de Reynolds;  
 K condutividade térmica;  
 Pr número de Prandt;  
 De diâmetro equivalente.

São definidas as seguintes condições de contorno na entrada do irradiador:

- temperatura de entrada do fluido refrigerante,
- vazão volumétrica do fluido refrigerante (variável parametrizada no modelo).

É ainda definida a temperatura máxima de entrada do fluido refrigerante : 40 °C .

#### IV. RESULTADOS

As Figuras 3 e 4 apresentam o perfil de energia depositada no silício devido a neutrões e fótons, respectivamente, onde a altura "0" (zero) representa o mono-cristal na altura média do núcleo, -20 a face inferior do mono-cristal e +20 a face superior do mono-cristal.

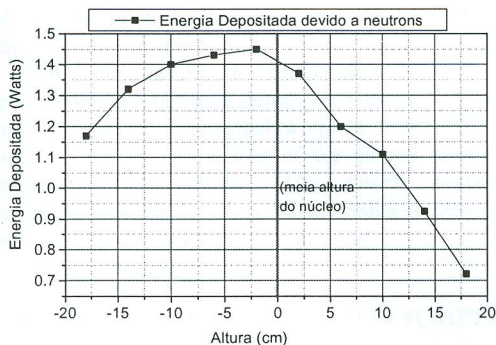


Figura 3. Energia Depositada no Silício Devido ao Fluxo de Neutrões.

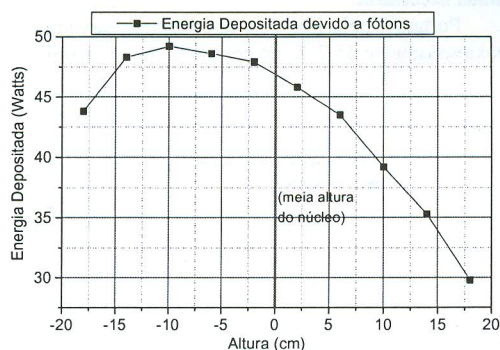


Figura 4. Energia Depositada no Silício Devido a Fótons.

A Fig. 5 mostra o comportamento da temperatura máxima central e na superfície do silício em função da vazão. Observa-se que praticamente não existe diferença entre as temperatura central e a temperatura na superfície do mono-cristal (diferença de ~ 0,8 °C). Reduzindo-se a vazão até o valor de aproximadamente 1,9 m³/h atinge-se o valor limite de temperatura máxima do silício (100 °C), ou seja, esta é a mínima vazão para que seja garantido o resfriamento adequado. Este valor é aproximadamente 10% da vazão que, atualmente, passa por elemento combustível (~19,5 m³/h).

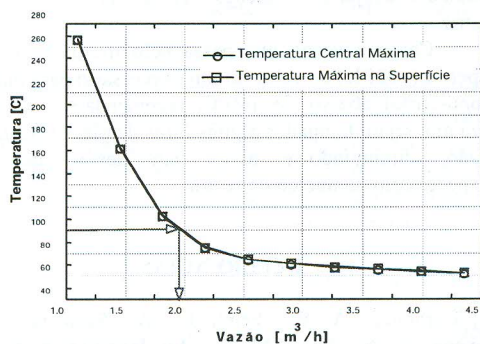


Figura 5. Temperatura Máxima na Superfície e no Centro do Mono-cristal de Si.

A Fig. 6 mostra a curva teórica e os valores experimentais de vazão pelo irradiador de silício em função do diferencial de pressão no núcleo do reator apresentados na referência [8]. Sendo o diferencial de pressão no núcleo de aproximadamente 74,0 mbar, para a atual vazão de 19,5 m³/h por elemento combustível, pode-se dizer, pela Figura 5, que a atual vazão pelo irradiador de silício é de

aproximadamente 8,0 m<sup>3</sup>/h, ou seja, 320% superior à vazão mínima necessária.

Portanto, pela Fig. 5, a temperatura máxima será de aproximadamente 45,7 °C no centro do mono-cristal.

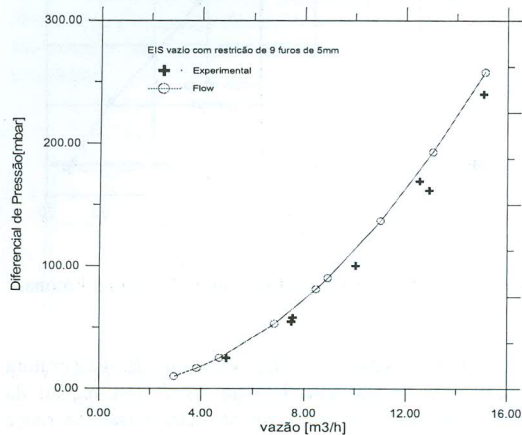


Figura 6. Vazão X Diferencial de Pressão no Núcleo

## V. CONCLUSÃO

A vazão que passa pelo irradiador de silício garante o resfriamento adequado do mono-cristal de silício, mantendo a temperatura máxima no centro do mesmo em 45,7°C, quando o reator opera a uma potência de 5 MW e o irradiador ocupa as posições 31, 32, 41 e 42 da placa matriz.

Como a vazão que passa pelo irradiador é muito superior (~320%) ao valor mínimo necessário para manter o mono-cristal abaixo de 100°C, recomenda-se um estudo para que sejam tampados alguns furos da placa restritora de vazão, diminuindo-se assim um desvio de vazão desnecessário do núcleo do reator.

## REFERÊNCIAS

- [1] Carbonari, A. W.; Pendl Jr., W.; Sebastião, J. R.; Saxena, R. N.; Dias, M. S., **An Irradiation Rig for Neutron Transmutation Doping of Silicon in the IEA-R1 Research Reactor**, Nuclear Instruments & Methods in Physics Research B 83, 157-162, 1993.
- [2] Briemeister J. F. [2000]. **MCNP: A General Monte Carlo N-Particle Transporte Code (Version 4C)**. Los Alamos National Laboratory. (LA-13709-M).
- [3] Klein, S.A.; Alvarado F.L. "EES Engineering equation solver for the microsoft windows operating system", Version 4.334W Dec. 1996. Middleton, WI. :F-Chart Software, 1992.

[4] Barry, R. F., **LEOPARD - A Spectrum Dependent Non-Spatial Depletion Code**, WCAP-3269-26, Westinghouse Electric Corporation, September 1963.

[5] Barhen, J.; Rhotenstein, W. and Taviv, E., **The HAMMER Code System Technion**, Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, NP-565, 1978.

[6] Little, W. W., Jr.; Hardie, R. W., **2DB User's Manual - Revision I**, BNWL-831, REVI, Battelle Pacific Northwest Laboratory, 1969.

[7] Fowler, T. B.; Vondy, D. R. and Cunningham, G. W., **Nuclear Reactor Core Analysis Code: CITATION**, Oak Ridge National Laboratory, ORNL-TM-2496, Rev. 2, July 1971.

[8] Umbehaun, P. E.; Mendonça, A.G. – Relatório Técnico – PSI.ROI.IEAR1.026 RELT.001.R00 – **Álise termo-hidráulica do EIS** – São Paulo, 1997.

## ABSTRACT

This work presents a estimate of the heat generated in silicon using the program MCNP and a model developed for thermal-hydraulic analysis of silicon irradiator. Engineering Equation Solver – EES pack is used for the solution of the equation system. A parametric study regarding the cooling flow was carried out to verify the temperature behavior.

The main result of this work is that the real flow through the irradiator is upper the minimum flow necessary to keep the surface temperature below of 100°C.