



CÁLCULOS NEUTRÔNICOS DO NÚCLEO DO REATOR AP1000

Giovanni Laranjo de Stefani¹, João Manoel de Losada Moreira² e José Rubens Maiorino²

¹Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN (laranjogiovanni@gmail.com)

²Universidade Federal do ABC - UFABC

Palavras-Chave: Código SERPENT, validação, AP1000, venenos queimáveis, cálculos de queima.

RESUMO

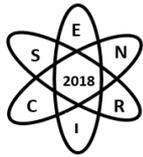
O presente trabalho trata da realização de cálculos de validação para modelagem de núcleo de um reator PWR utilizando o código SERPENT. O reator estudado em questão foi o AP1000, da Westinghouse. O estudo foi voltado ao primeiro ciclo do reator AP1000, de maneira a ser realizada uma comparação entre os valores reportados de k_{∞} para os elementos combustíveis em condição de potência zero frio com uma discrepância de 0,25%. Foram obtidos resultados compatíveis para cálculos de burnup referentes à curva do valor de concentração de boro, apesar do uso de distribuições uniformes de temperatura na modelagem. Além disso, também foram discutidos os efeitos de sombreamento entre os venenos queimáveis (IFBA e Pyrex) e barras de controle que são, juntamente com o boro solúvel, os meios de controle ao longo do primeiro ciclo. Notou-se que a presença de 9 barras de Pyrex em um elemento combustível diminuiu a reatividade média de uma barra de IFBA de 147 pcm para 33 pcm; e a presença de 28 barras de IFBA em um elemento combustível diminuiu a reatividade média de uma barra de Pyrex de 631 pcm para 277 pcm. O valor de reatividade de uma barra de controle negra reduz em cerca de 20% quando 28 barras de IFBA são inseridas no elemento combustível. Dessa forma os resultados mostram que esta versão do código SERPENT pode ser usada para projetar estudos de núcleos de reatores heterogêneos.

1. Introdução

Estudos de núcleo de PWR avançados geralmente têm especificações como longos ciclos de combustível e uso extensivo de venenos queimáveis (VQ), que exigem cálculos refinados para tratar as heterogeneidades do elemento combustível (EC). Exemplo de tais estudos, juntamente com a validação do método, incluem os núcleos PWR avançados, como o reator AP1000 [1][2][3], núcleos avançados com diferentes misturas de U-Pu ou U-Th[4][5][6][7][8][9].

Um problema-chave de tais cálculos está relacionado às fortes heterogeneidades presentes no EC. Um bom exemplo disso é o projeto do núcleo do primeiro ciclo AP1000, que inclui 112 varetas de absorvedores queimáveis em diferentes designs em alguns de seus EC na configuração 17x17[10]. Este elevado número de varetas absorvedoras, com distâncias curtas entre si, cria importantes efeitos de sombreamento de reatividade, de modo que o valor combinado de reatividade de todos eles juntos é bastante diferente do valor da somatória de varetas absorvedoras individuais.

O principal objetivo deste trabalho é apresentar alguns resultados de verificação e validação realizados para o primeiro ciclo da configuração do núcleo do reator AP1000 utilizando o código SERPENT, um código tridimensional de transporte de partículas Monte Carlo de energia contínua [11][12]. A escolha desta configuração de núcleo do AP1000 deve-se ao seu design avançado, regiões de combustível com heterogeneidades importantes, uma combinação de dois diferentes tipos de absorvedores queimáveis,



diferentes enriquecimentos axiais de combustível e um ciclo de combustível de 18 meses de baixa fuga [13][2].

Embora a AP1000 seja um reator nuclear bem conhecido e discutido, a coleta de informações detalhadas sobre o assunto na literatura aberta não são uma tarefa simples. As informações utilizadas neste trabalho provêm do relatório da Westinghouse sobre o projeto do reator AP1000 [10], artigos técnicos do abrangente programa de benchmark VERA [1][2][3] e outros artigos técnicos. Os parâmetros usados para validar o método de cálculo e a modelagem física são o k_{∞} para cálculos em nível de célula e de EC e k_{ef} para cálculos do núcleo completo. Em seguida, realizamos cálculos completos de queima para o primeiro ciclo de 18 meses, obtendo a curva de concentração de boro.

2. Dados do núcleo do reator e métodos de cálculo

2.1. Descrição geral do AP1000

Os dados materiais e geométricos que descrevem o núcleo do reator AP1000 foram coletados da literatura disponível [10], e relatórios de benchmark VERA [1][2][3]. O reator AP1000 é um PWR avançado que opera a uma potência nominal de 3400 MWte seu núcleo é descrito na Fig. 1. O EC contém uma matriz 17x17 com 264 barras de combustível e 25 tubos de guia. Os tubos guias podem ser usados para inserir varetas de controle, instrumentação e VQ. O núcleo em início do ciclo (BOC) possui dois tipos de absorvedores queimáveis: o Integral Fuel Burnable Absorber (IFBA) e o absorvedor de Pyrex. As varetas de IFBA ocupam algumas das posições das varetas de combustível, enquanto as varetas de Pyrex ocupam algumas das posições do tubo guia.

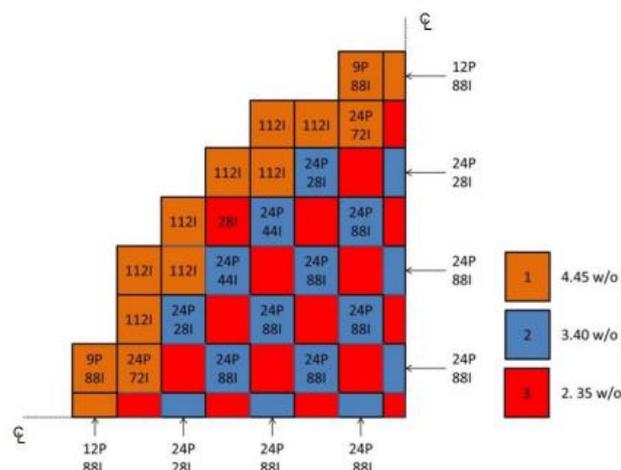


Fig. 1. Núcleo do reator AP1000 mostrando as 3 regiões de diferentes enriquecimentos de ^{235}U . Os números indicam as quantidades de varetas absorvedoras de cada tipo em um determinado EC: IFBA (I) e Pyrex (P).

As informações detalhadas sobre a espessura do revestimento de ZrB_2 no IFBA e sua massa específica foram obtidas de [14]. Dados geométricos e de material dos absorvedores de combustíveis Pyrex foram obtidos de [2]. A distribuição axial variável do enriquecimento de ^{235}U nas barras absorvedoras queimadas do IFBA foi obtida a partir de [15].



2.3. Modelo completo do núcleo do AP1000 com o código SERPENT

A Tabela 1 identifica as condições que descrevem os 3 estados principais considerados neste trabalho: potência zero-frio (CZP), potência zero-quente (HZP) e potência total quente (HFP). Apresenta para cada estado do reator a temperatura do combustível, a temperatura da estrutura (incluindo o revestimento) e do moderador, a massa específica do moderador, a temperatura do tratamento S (α , β) dos efeitos de ligação nas seções de choque do moderador e as temperaturas consideradas no código SERPENT nas bibliotecas de seção de choque.

Tabela 1. Descrição dos três estados principais considerados.

Estado do reator	Temperatura do combustível(K)	Moderador e estrutura(K)	Densidade do moderador (g/cm ³)*	Temperatura para S(α,β)†(K)	Temperatura para as seções de choque (K)
CZP	293.6	293.6	0.995	293.6	300 [†]
HZP	565	565	0.744	550	565
HFP**	900	565	0.744	550	900 (combustível) e 565 (moderador e estrutura)

* Considerando pressão de 1 atm para CZP e de 153 atm para HZP e HFP.

† Temperaturas mais próximas disponíveis no código SERPENT.

** Potência total: 3400 MWt

Tabela 2. Configurações do reator AP1000 consideradas neste trabalho.

Configuração	Descrição	Configuração	Descrição
Rw	Célula de combustível com w w/o de enriquecimento em ²³⁵ U em CZP.	C-E	Núcleo completo, em estado E*, BOC, água sem boro solúvel e bancos de controle removidos
Aw+xP+yI	EC 17x17, CZP, BOC, água sem boro solúvel, x Varetas de Pyrex, y varetas com IFBA e w w/o enriquecimento em ²³⁵ U.	C-E+Bz	Núcleo completo, em estado E*, BOC, água com boro solúvel (z ppm) e bancos de controle removidos
Aw+xP+yI +CR	EC 17x17, CZP, BOC, água sem boro solúvel, x Varetas de Pyrex, com as barras de controle inseridas e w w/o enriquecimento em ²³⁵ U.	C-E+Bz+XE	Núcleo completo em estado E*, BOC, equilíbrio de xenônio, água com boro solúvel (z ppm) e bancos de controle removidos

* Estado qualquer, podendo ser qualquer um dos três estados definidos na tabela 1.

3. Resultados do Código SERPENT e discussão

3.1 Verificação dos cálculos de EC e núcleo completo

A Tabela 3 apresenta a comparação entre o fator de multiplicação infinita e os fatores de multiplicação efetiva obtidos neste trabalho com os de [10]. Os estados do núcleo AP1000 estão descritos na Tabela 2. Consideramos dados de [10] apresentando pelo menos 2 dígitos significativos após o ponto decimal.



Tabela 3. Fator de multiplicação efetivo para diferentes configurações principais em comparação com os resultados da Westinghouse.

Configuração / estado	k_{ef} (Calculado)	$k_{\text{ef}}[10]$	Discrepância (%)
A/2.35	$1,33112 \pm 0,00008^\dagger$	$1,328^\dagger$	0,23
C/CZP	$1,20201 \pm 0,00004$	1,205	-0,25
C/CZP+B1574	$0,99398 \pm 0,00004$	0,99	0,40
C/HZP+B1502	$0,99188 \pm 0,00004$	0,99	0,19

[†] Este resultado se trata de k_∞ .

A comparação do valor de k_∞ na Tabela 3 do cálculo de EC para a condição CZP mostra uma concordância razoável. A discrepância de 0,25% pode estar associada a algumas pequenas diferenças na modelagem do EC, uma vez que nenhuma informação detalhada foi dada sobre ela no relatório da Westinghouse. Mas a razão mais provável para essa diferença deve-se às bibliotecas de seção de choque, uma vez que este trabalho usa a ENDF/B.VII.0, enquanto no relatório é usada ENDF/B.V.

3.2. Cálculos de combustível em nível de célula

Apresentamos na Fig. 2 o k_∞ e respectivo desvio padrão para as células de combustível presentes nos EC do AP1000 e descritos na Tabela 2. Os cálculos de Monte Carlo com o código SERPENT apresentam desvios-padrão menores que 4 pcm.

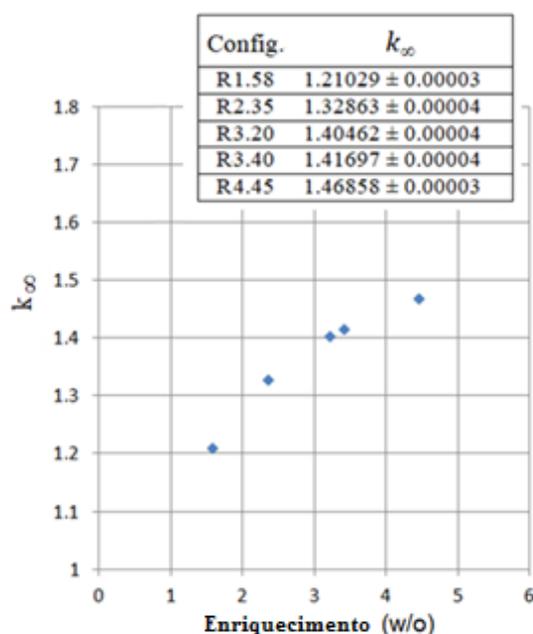


Fig. 2. k_∞ da Célula de combustível em função do enriquecimento para diferentes configurações.

Os resultados mostrados na Fig. 2 permitem avaliar a influência do enriquecimento na reatividade do núcleo. Isso mostra que o k_∞ começa a saturar para enriquecimento de combustível acima de 3,5 w/o,



indicando que, para obter maior k_{∞} , para ciclos de combustível mais longos, por exemplo, seriam necessários aumentos significativos no enriquecimento de combustível.

3.3. Cálculo dos EC e efeitos de sombreamento de reatividade entre as barras de VQ

A Tabela 4 apresenta o k_{∞} e o respectivo desvio padrão para as várias configurações de EC descritos na Tabela 2. Observe o k_{∞} para as configurações A/2.35+CR e A/2.35+CR+28I. Aparentemente, há uma inconsistência desde que a adição do revestimento de ZrB_2 aumentou o k_{∞} , mas é preciso lembrar que o enriquecimento de urânio nas extremidades superior e inferior das varetas de IFBA é diferente. O enriquecimento axial dos EC é de 1.58 w/o em 20.32 cm de cada extremidade para as varetas de combustível sem revestimento de IFBA e de 3.2 w/o nas varetas de combustível revestidas com IFBA.

Tabela 4. k_{∞} em cada EC e respectivo desvio padrão para várias configurações de EC para o reator de potência AP1000. As configurações estão descritas na tabela 2.

Configuração	k_{∞} (3-D)	Barras de controle	Configuração	k_{∞} (3-D)	Barras de controle
A2.35	1,33112 ± 0,00008	Removido	A3.40+24P+44I	1,23642 ± 0,00008	Removido
A2.35+28I	1,26197 ± 0,00008	Removido	A3.40+24P+88I	1,22529 ± 0,00008	Removido
A2.35+9P	1,23757 ± 0,00008	Removido	A4.45+9P+88I	1,28804 ± 0,00008	Removido
A2.35+9P+28I	1,22352 ± 0,00008	Removido	A4.45+12P+88I	1,28473 ± 0,00008	Removido
A2.35+CR	1,14184 ± 0,00008	Inserido	A4.45+24P+72I	1,26524 ± 0,00008	Removido
A2.35+28I+CR	1,17018 ± 0,00008	Inserido	A4.45+112I	1,30754 ± 0,00008	Removido
A3.40+24P+28I	1,26895 ± 0,00008	Removido			

A Tabela 5 compara os valores de reatividade do VQ de IFBA e Pyrex no EC e infere o efeito de sombreamento causado em sua reatividade, devido à presença de outros absorvedores no EC. A inserção média de reatividade de uma vareta é obtida pela divisão desses resultados pelo número de varetas nessas configurações, 28 e 9 para os absorvedores de queima IFBA e Pyrex, respectivamente.

Tabela 5. Efeitos de reatividade observados dos bastões absorvedores de calor queimados com IFBA e Pyrex no EC A/2.35.

Descrição	Reatividade(pcm)
Reatividade devido a 28 varetas de IFBA inseridos no EC A/2.35	4117
Reatividade devido a 9 varetas de Pyrex inseridas no EC A/2.35.	5679
Média da reatividade de uma vareta de IFBA	147
Média da reatividade de uma vareta de Pyrex	631
Média da reatividade de uma vareta de IFBA sombreada por 9 varetas de Pyrex.	33
Média de reatividade de uma vareta de Pyrex sombreada por 28 varetas de IFBA	277
Média de uma vareta de Pyrex sombreada por 88 varetas de IFBA + 9 Pyrex.	67
Reatividade integral do banco de controle para o EC A/2.35	12453
Reatividade integral do banco de controle para o EC A/2.35 com 28 varetas de IFBA.	10332

Para obter a reatividade média de uma vareta de VQ sombreada por outras barras absorvedoras presentes no EC, seguimos uma abordagem semelhante a anterior. Para as varetas de IFBA sombreadas por 9 varetas de Pyrex, obtivemos a partir da mudança de reatividade entre as configurações A/2.35+9P e A/2.35+9P+28I divididas por 28. Por outro lado, para as varetas de Pyrex sombreadas por 28 IFBA nós as obtemos pela variação da reatividade entre as configurações A/2.35+28I e A/2.35+9P+28I dividido por



9. Para as varetas de Pyrex sombreadas por 88 varetas de IFBA e 9 Pyrex, consideramos a mudança de reatividade entre as configurações A/4.45+9P+88I e A/4.45+12P+88I.

A Fig. 3 apresenta o k_{∞} como uma função do número de varetas de VQ de IFBA no EC, mostrando o efeito de saturação quando o seu número no EC é aumentado.

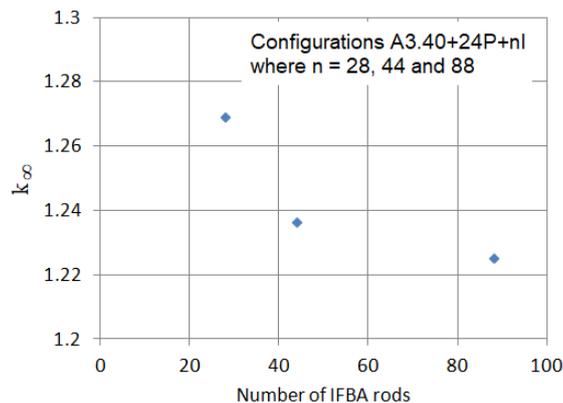


Fig. 3. Fator de multiplicação infinita para configuração A/3.40+24P+28I, A/3.40+24P+44 e A/3.40+24P+88I mostrando a saturação da reatividade do absorvedor queimado em função do número de barras absorvedoras queimadas.

A inserção de reatividade por varetas absorvedoras de Pyrex é maior que a das varetas de IFBA. Enquanto 28 varetas de IFBA inseriram 4117 pcm no conjunto A2.35, 9 varetas de Pyrex inseriram 5679 pcm. A reatividade média inserida por uma vareta de Pyrex é cerca de 4 vezes maior que a de uma vareta de IFBA.

A reatividade da barra de controle que é avaliada pela presença de barras de VQ foi evidenciada nas Tabelas 3 e 4. Comparando as configurações dos ECA2.35+CR e A/2.35+28I+CR, notamos que adicionando 28 varetas de IFBA ocorre um aumento do k_{∞} . O maior k_{∞} configuração A/2.35+28I+CR é devido ao maior enriquecimento de ^{235}U nas extremidades superior e inferior das varetas IFBA.

3.3. Cálculos dos mecanismos de controle de reatividade em função do burnup

O controle de reatividade do núcleo ao longo do ciclo é realizado através dos VQ e do boro solúvel. A curva do valor de boro solúvel apresenta a quantidade de boro a ser diluída no moderador para que o excesso de reatividade do núcleo no dado nível de queima seja igual ao do final do ciclo. A Fig. 4 compara, para a condição HFP, o resultado da curva solúvel de boro obtida neste trabalho com a fornecida por [10]. Os dados foram extraídos da [10] com o software digitalizador [17].

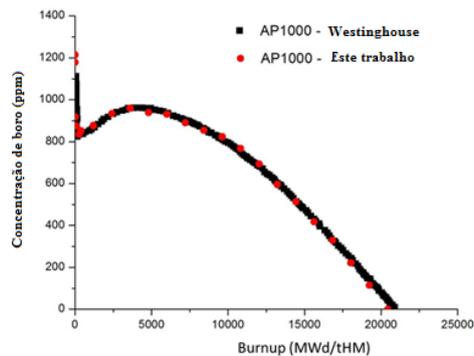
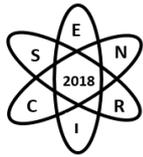


Fig. 4. Concentração de boro no moderador em função da queima.

A curva de concentração de boro permite validar a modelagem do VQ de IFBA adotado neste trabalho [14], especialmente a espessura do revestimento ZrB_2 . As curvas quase coincidentes indicando boa modelagem dos efeitos combinados da reatividade do núcleo e dos mecanismos de controle ao longo do primeiro ciclo.

4. Conclusão

Os resultados apresentados acima mostram que a versão atual do código SERPENT, com uma biblioteca de seção de choque limitada e sem realimentação termo-hidráulica, reproduz bem os valores de k_∞ e k_{ef} para o EC e cálculos de núcleo completo do núcleo do reator AP1000. Os modelos de VQ adotados neste trabalho, especialmente o do IFBA, parecem adequados para fornecer resultados com este nível de precisão.

Os cálculos de EC permitiram analisar os efeitos de reatividade dos VQ de Pyrex e IFBA e o forte sombreamento nos EC heterogêneos do primeiro núcleo do AP1000. A reatividade média inserida por uma VQ de Pyrex é cerca de 4 vezes maior que a de um IFBA. O efeito de sombreamento de reatividade destas varetas uma sobre a outra no EC é muito forte. Cálculos precisos de tal conjunto heterogêneo exigem pelo menos uma abordagem detalhada de transporte bidimensional em nível de EC. Um efeito de reatividade interessante entre VQ e barras de controle foi notado no núcleo do primeiro ciclo AP1000. O EC para cálculos de k_∞ quase estabiliza (não reduz) quando são inseridas mais de 80 varetas IFBA. O valor de reatividade de uma barra de controle negra reduz em cerca de 20% quando 28 varetas IFBA são inseridas nela.

A curva de concentração de boro obtida neste trabalho foi quase coincidente com a relatada. Esta curva fornece uma importante validação global do modelo SERPENT usado neste trabalho, pois são cálculos de núcleo completo tridimensional incluindo todos os sistemas de controle disponíveis no núcleo do reator AP1000.

Os resultados mostram que esta versão do código SERPENT pode ser usada para projetar e estudar núcleos de reatores muito heterogêneos. A inclusão de uma biblioteca de seção de choque mais completa em relação às temperaturas de combustível e moderador e um modelo termo-hidráulico para corrigir seções de choque melhoraria seus resultados para estudos de condições de potência nominal.

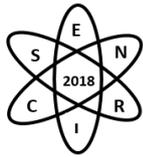


Agradecimentos

GLS agradece a CNEN pelo financiamento do estudo.

Referências

- [1] Franceschini, F., Godfrey, A., Kulesza, J., Oelrich, R., Westinghouse VERA test stand - Zero Power Physics Test Simulations for the AP1000 PWR. CASL Technical Report CASL-U-2014-0012-001 (2014).
- [2] Godfrey, A. T., VERA core physics benchmark progression problem specifications, CASL Technical Report CASL-U-2012-0131-004 (2014).
- [3] Palmtag, S., Godfrey, A. T., VERA common input user manual, CASL Technical Report CASL-U-2014-0014-002 (2014.)
- [4] Chambers, A. and Ragusa, J. C., Multi-recycling of transuranic elements in a PWR assembly with reduced fuel rod diameter, 2014, Nucl. Eng. Design 270, 436–450.
- [5] Alhaj, M. Y., Badawi, A., Abou-Gabal, H. H., Mohamed, N. M. A., Partial loading of Thorium-Plutonium Fuel in a Pressurized Water Reactor, Nucl. Technol. 194, 314-323 (2016).
- [6] Baldova, D., Fridman, E., Shwageraus, E., High conversion Th–U233 fuel for current generation of PWRs: Part II 3D full core analysis, Ann.Nucl. Energy 73, 560-566 (2014).
- [7] Ernout, M., David, S., Doligez, X., Meplan, O., Leniau, B., Bidaud, A., Nuttin, A., Mouginot, B., Wilson, J., Capellan, N., Thiolliere, N., Advanced plutonium management in PWR, complementarity of thorium and uranium, Prog.Nucl.Energ. 78, 330-340 (2015).
- [8] Lindley, B. A., Franceschini, F., Parks, G. T., The closed thorium–transuranic fuel cycle in reduced-moderation PWRs and BWRs, Ann.Nucl. Energy 63, 241–254 (2014).
- [9] Maiorino, J.R., Stefani, G. L., Moreira, J. M. L., Rossi, P. C. R., Santos, T. A, Feasibility to convert an advanced PWR from UO₂ to a mixed U/ThO₂ core – Part I: Parametric studies, Ann.Nucl. Energy 102, 47-55 (2017).
- [10] Westinghouse. Westinghouse AP1000 Design Control Document Rev. 19. Section 4.3 – Reactor, Nuclear Design. In: <https://www.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A445.pdf> (2011).
- [11] Leppanen, J., Pusa, M., Viitanen, T., Valtavirta, V., Kaltiaisenaho, T., The SERPENT Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013, Ann.Nucl. Energy 82, 142-150 (2015).
- [12] Leppanen, J., SERPENT - a Continuous-energy Monte Carlo reactor physics burnup calculation code - User's Manual, June 18. Accessed in <http://montecarlo.vtt.fi/> (2015).
- [13] Franceschini, F., Godfrey, A. T., Stimpson, S., Evans, T., Collins B., Gehin, J. C., Turner J., Graham, A., Downar, T., AP1000 PWR startup core modeling and simulation with VERA-CS. Advances in Nuclear Fuel Management V, Hilton Head Island, South Carolina, USA, March 29 – April 1, 2015. American Nuclear Society (2015).
- [14] Walker, D. E., Modeling Integral Fuel Burnable Absorbers using the method of characteristics. Master Thesis. The University of Tennessee, Knoxville (2014).



Quarta Semana de Engenharia Nuclear e Ciências das Radiações - SENCIR 2018

Belo Horizonte, 6 a 8 de novembro de 2018

Escola de Engenharia - Universidade Federal de Minas Gerais

[15] Elswawi, M. A and Hraiz, A. S. B., Benchmarking of the WIMS9/PARCS/TRACE code system for neutronic calculations of the Westinghouse AP1000 reactor, *Ann.Nucl. Energy* 293, 249-257 (2015).

[16] Bell, G. I., Glasstone, S. *Nuclear Reactor Theory*, chapt. 6, pag. 273. Ed. Van Nostrand Reinhold, New York (1970).

[17] Huwaldt, J. A., Plot Digitizer 2.6.8. In: <https://sourceforge.net/projects/plotdigitizer/files/plotdigitizer/2.6.8/>. Accessed in 10/27/2015.