

AVALIAÇÃO DE PERFORMANCE DO COMBUSTÍVEL NUCLEAR EM UM REATOR DO TIPO SMR

Thadeu H. S. C. Afonso¹, Gabriel G. G. Fontes¹, Maria L. Moreira², Daniel A. P. Palma³

¹Programa de Engenharia Nuclear - PPGEN (Instituto Militar de Engenharia, Praça Gen. Tibúrcio, 80 - Urca, Rio de Janeiro)

²Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Nucleares - PPGIEN (Instituto de Engenharia Nuclear, R. Hélio de Almeida, 75 - Cidade Universitária, Rio de Janeiro)

³Comissão Nacional de Energia Nuclear (Rua General Severiano, 90, Botafogo, Rio de Janeiro)
thadeu.santos@ime.eb.br , gabriel.gomes@ime.eb.br , malu@ien.gov.br , dapalma@cnen.gov.br

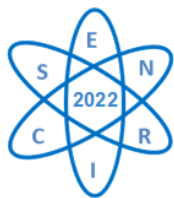
Palavras-Chave: SMR; Combustível Nuclear; Zirlo

RESUMO

A energia nuclear se mostra uma opção muito viável para o fortalecimento da malha energética, sendo a expansão do programa nuclear brasileiro uma realidade face aos novos projetos de reatores que estão em fase de licenciamento e/ou construção no país. O objeto de estudo deste trabalho é um reator modular pequeno (SMR) baseado no Reator CAREM 25 projetado pela Argentina, que representa uma inovação na pesquisa de reatores nucleares na América Latina e pertence a categoria de reatores avançados. Trata-se de um PWR de dimensões reduzidas, com circuitos primário e secundário integrados, sistemas passivos e de segurança redundantes, refrigerado à água leve e com uma potência de 25 MW. No presente trabalho o comportamento de alguns parâmetros de segurança relacionados a operação de uma vareta de combustível nuclear a altas queimas, considerando diferentes tipos de revestimento comumente utilizados no país, foi simulada. Os aspectos que foram abordados são relacionados a segurança de operação da planta e a integridade do combustível, quais sejam: temperatura da linha central do combustível, temperatura da superfície do revestimento, espessura da camada de óxido na superfície da vareta e a concentração de hidrogênio no revestimento. Os resultados obtidos, embora ainda preliminares, mostram que as ferramentas utilizadas para a simulação do desempenho de varetas combustíveis em reatores PWR comumente grandes, tais como os da linha FRAPCON, podem ser utilizadas em reatores modulares menores bem como a viabilidade da utilização dos revestimentos bem estabelecidos no país.

1. INTRODUÇÃO

É sabido que aproximadamente 60% do total de emissões globais de gases estufa são provenientes da geração energética de fontes fósseis, o que contribui negativamente para as mudanças climáticas. Nesse cenário, a utilização da energia nuclear é vista como uma opção viável, o que é comprovado pela IAEA (Agência Internacional de Energia Atômica) pelos dados divulgados em suas publicações especializadas que reportaram que em 2019 estavam em funcionamento cerca de 443 reatores nucleares com aproximadamente 392 MW(e) de geração [1].



No âmbito nacional, a energia nuclear também se mostra uma opção muito viável embora atualmente apenas 1,2% da energia utilizada na rede brasileira é proveniente da fissão de átomos de urânio [2], mesmo sendo uma fonte de energia de base muito estável [3]. Neste trabalho será feito um estudo do comportamento de alguns parâmetros de segurança importantes nas varetas combustíveis em estado estacionário de um reator baseado em um SMR de fabricação argentina, o CAREM 25, utilizando o código FRAPCON 4.0. Na seção 2 será apresentada, de forma conceitual, a geometria e a composição do combustível nuclear simulado nesse reator PWR de dimensões reduzidas, com circuitos primário e secundário integrados, sistemas passivos e de segurança redundantes, refrigerado à água leve e com uma potência de 25 MW. Na seção 3 será apresentada brevemente a ferramenta computacional utilizada, na seção 4 os resultados obtidos para os parâmetros de segurança de interesse são reportados e, finalmente, conclusões e discussões acerca de trabalhos futuros encontram-se na seção 5.

2. REATOR SIMULADO

O presente trabalho levou em consideração o reator simulado por Lima et. al [4] utilizando o código OPENMC em sua dissertação de mestrado, porém com alguns ajustes de projeto. Basicamente, serão considerados três revestimentos distintos e bem estabelecidos na literatura e na indústria nacional, todos baseados em ligas de zircônio.

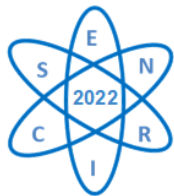
O zircônio é um material que possui uma alta permeabilidade a nêutrons térmicos, além de boas propriedades mecânicas e de resistência à corrosão em altas temperaturas. Suas ligas são amplamente usadas na indústria nuclear, principalmente em tubos de revestimentos do elemento combustível e em componentes estruturais para reatores do tipo PWR [5]. Na Tab. 1 a seguir a composição básica das ligas Zircaloy 2, Zircaloy 4 e Zirlo, consideradas neste trabalho, são brevemente descritas.

Tab. 1. % em massa dos elementos das ligas Zircaloy 2, Zircaloy 4 e Zirlo. [5]

	Sn	Fe	Cr	Ni	Nb	O (ppm)
Zircaloy 2	1,2 – 1,7	0,07 – 0,2	0,05 – 0,15	0,03 – 0,08	--	--
Zircaloy 4	1,2 – 1,7	0,18 – 0,24	0,07 – 0,17	--	--	1000 – 1400
Zirlo (Westinghouse)	1,0	0,1	--	--	1,0	1100

Dados acerca da geometria e da composição do combustível nuclear simulado podem ser visualizados nas Tabelas 2 e 3. Na Fig. 1 é possível visualizar um esquema tridimensional da pastilha combustível desenhada no software fusion 360 e na Fig. 2 um detalhamento de sua geometria.

Tab. 2. Geometria e composição proposta para a vareta combustível.



Parâmetro		Unidade
Diâmetro externo	0,009	m
Comprimento total	1,6	m
Comprimento ativo	1,4	m
Gás de enchimento	Hélio	-----
Pressão do gás de enchimento	1720000	Pa
Pitch das varetas	0,0138	m
Espessura da parede de revestimento	0,000625	m
Espessura do gap	0,000775	m
Diâmetro externo da mola	0,0077	m
Diâmetro da mola	0,00202	m
Altura da mola	0,146	m
Número de voltas da mola	28	-----

Tab. 3. Geometria e composição proposta para a pastilha de combustível.

Parâmetro		Unidade
Diâmetro da pastilha	0,0076	m
Altura da pastilha	0,008	m
Altura do prato interno	0,000933	m
Enriquecimento	4,25	%
Raio (esfera de corte) interno da pastilha	0,003098	m
Densidade	95	%
Largura do ombro da pastilha	0,001432	m
Composição	UO ₂	-----

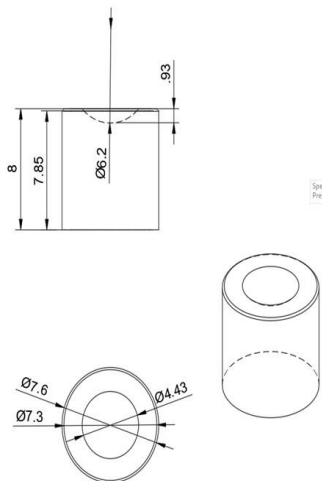
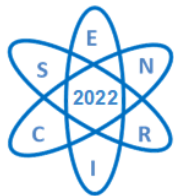


Fig. 1: Representação tridimensional da pastilha combustível

Fig. 2: Medidas da pastilha combustível.



As Fig. 3 e 4 mostram uma ampliação da vareta combustível dando ênfase a mola interna e uma representação do núcleo respectivamente.



Fig. 3 Zoom na vareta combustível dando ênfase na mola.

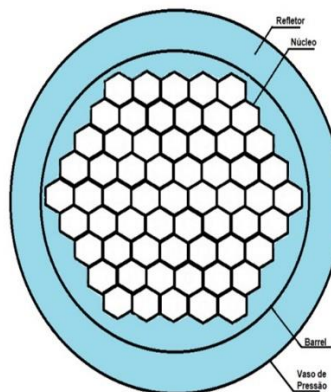


Fig. 4 Representação do núcleo [2].

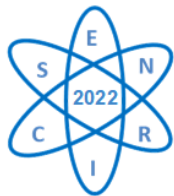
3. METODOLOGIA

3.1. FRAPCON

O código FRAPCON é um código computacional desenvolvido pelo PACIFIC NORTHWEST NATIONAL LABORATORY, em linguagem FORTRAN [5], capaz de simular o comportamento termomecânico em estado estacionário de varetas combustíveis de UO_2 em altas queimas. Seu código principal chama as sub-rotinas que contém as correlações e propriedades dos materiais de interesse para a simulação da vareta analisada. O arquivo de entrada é dividido em três subseções, quais sejam: FRPCN, FRPCON, EMFPCN. A Tabela a seguir mostra dois blocos do arquivo de entrada utilizado no presente trabalho.

Tab. 4. Blocos do arquivo de entrada da vareta simulada. [6]

Bloco do FRPCN	Bloco do FRPCON
<pre>\$frpcn im=28 na=7, nr= 11 ngasr = 45, \$end</pre>	<pre>\$frpcon cpl = 0.146, crdt = 0.0, thkcl = 0.000625, thkgap = 0.000775, dco = 0.009, pitch = 0.0138, nplot=1, rc = 0.003098, fotmtl = 2., dishsd=0.001432, den = 95., dspg = 0.0077, fa = 1.000001, dspgw = 0.00202, enrch = 4.5, fgpav = 1720000, hdish = 0.000933, hplt = 0.008, icm = 4, imox = 0, comp = 0, idxgas = 1, iplant = -2, iq = 1, jdlpr = 0, totl = 1.4, roughc = 0.7e-06, roughf = 2.0e-06, vs = 28.0, nunits = 0, rsntr = 0.0, nsp = 0,</pre>



<pre>p2= 12.25e+6, tw= 538, go= 2.723e+3, ProblemTime= 0.1, 0.5, 1., 5., 10., 20., 30., 60., 90., 120., 150., 180., 210., 240., 270., 300., 331., 360., 390., 420., 450., 480., 510., 540., 570., 600., 625., 650. qmpy = 0, 1, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 0, 0, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 2.7, 0 \$end</pre>
--

A seguir, os três blocos supracitados serão brevemente descritos.

3.1.1. FRPCN

Bloco com as variáveis inteiras. Esta seção do arquivo de entrada retrata como a simulação será dividida no que tange ao número de passos de queima, contornos radiais onde os cálculos serão efetuados, quantidades de regiões axiais em que a vareta combustível será dividida, entre outros. [5].

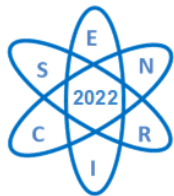
3.1.2. FRPCON

É composto por variáveis inteiras e reais, abrangendo todos os parâmetros de engenharia e de operação tais como, diâmetro da pastilha, diâmetro da vareta, espessura e material do revestimento, entre outros. É a maior seção do arquivo de entrada.

É importante realçar que nesse bloco os termos “nunits” que define qual unidade será utilizada para realização dos cálculos, sendo elas as unidades Britânicas ou Internacionais, “iplant” que tem a função de indicar qual tipo de planta está sendo utilizada PWR, BWR, HBWR que são os três tipos de plantas que o programa está hábil a simular. Dentro desse bloco cria-se sub-blocos que tem funções distintas, mas são dependentes entre eles.

Os dois sub-blocos obrigatórios são o do tempo e de potência que são indicados no final desse bloco FRPCON pelas variáveis “ProblemTime” que indica quantos passos e quanto tempo entre eles se tem que decorrer, enquanto “qmpy” tem papel de descrever as potências que serão empregadas para cada passo de tempo. [5].

3.1.4. EMFPCN



Indica os modelos de cálculo que serão considerados tais como, modelos de densificação, relocação de combustível, tipo de deformação (permanente ou não), condutância térmica no *gap* dentre outros. Neste trabalho, utilizou-se os modelos padrão do código [6].

4. RESULTADOS

Foram utilizados dois períodos de operação de aproximadamente 310 dias cada, separados por 30 dias para emular uma eventual recarga/manutenção a potência zero seguindo o gráfico na Fig. 5.

A simulação foi realizada a partir dos dados de geometria e composição descritos nas Tabelas 2 e 3 que permitiram construir o arquivo de entrada parcialmente descrito na Tabela 4. O comportamento ao longo do tempo da temperatura média do combustível ao longo da vareta pode ser observado no gráfico da Fig. 6.

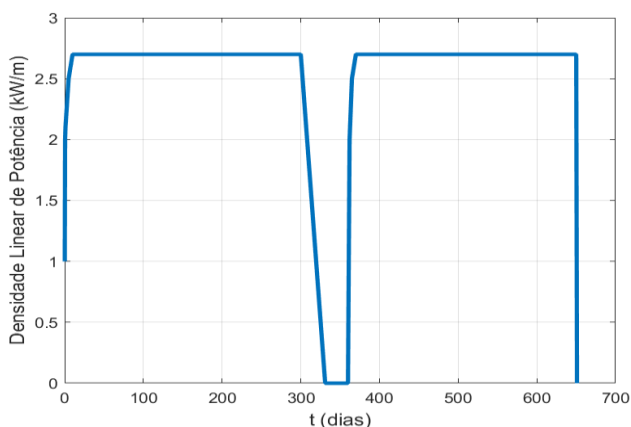


Fig. 5 Histórico de potência considerado na simulação.

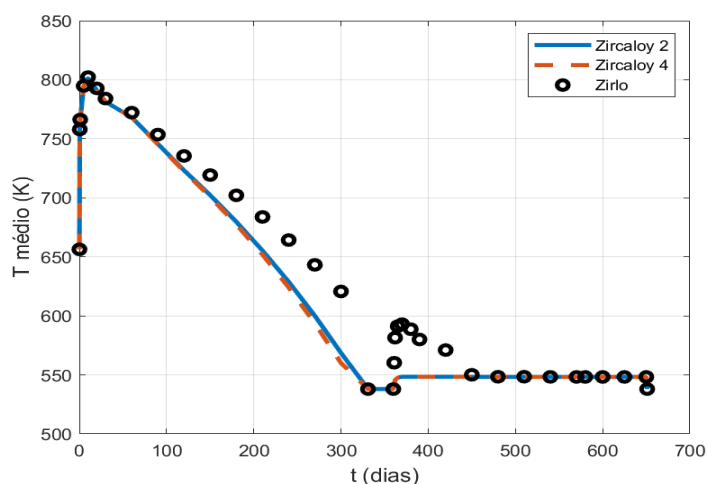
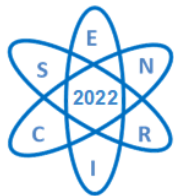


Fig. 6 Comportamento da temperatura ao longo do tempo para os revestimentos considerados.

Observa-se no gráfico da Fig. 6 uma concordância entre a temperatura média apresentada quando se considera as ligas Zircaloy 2 e Zircaloy 4, e o Zirlo apresentando maiores



temperaturas, embora distantes do ponto de fusão dos materiais em questão, ou seja, sem violar nenhum parâmetro de segurança.

A seguir, na Fig. 7, a evolução da espessura da camada de óxido ao longo do tempo para os revestimentos considerados pode ser visualizada.

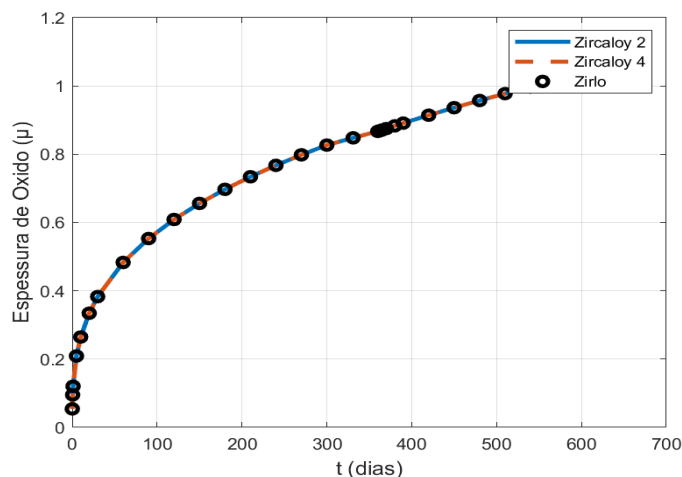


Fig. 7 Comportamento da espessura da camada de óxido ao longo do tempo para os revestimentos considerados.

A partir do gráfico na Fig. 7 pode-se concluir que ambos os revestimentos estudados apresentaram o mesmo comportamento temporal. Nota-se que até mesmo nos dias em que a potência foi a zero no intervalo o processo oxidação permaneceu, tendo sua inclinação quase imperceptivelmente alterada.

A seguir, na Fig. 8, a evolução da concentração de hidrogênio acumulada no revestimento ao longo do tempo para os revestimentos considerados pode ser visualizada. A partir do gráfico é possível concluir que o revestimento de Zircaloy 2 é o que mais acumula hidrogênio em sua estrutura e por isso é que mais teria propensão a se tornar quebradiço. Isso faz com que, na ordem de prioridade em relação a segurança e resistência a falhas, o mesmo seja a última opção dentre as avaliadas. Esse fato não é estranho uma vez que a liga Zircaloy 2 é relativamente antiga e muitas melhorias foram feitas até os dias atuais. Mais uma vez, nota-se que até mesmo no intervalo de tempo em que a potência foi a zero o processo oxidação permaneceu, tendo sua inclinação quase imperceptivelmente alterada.

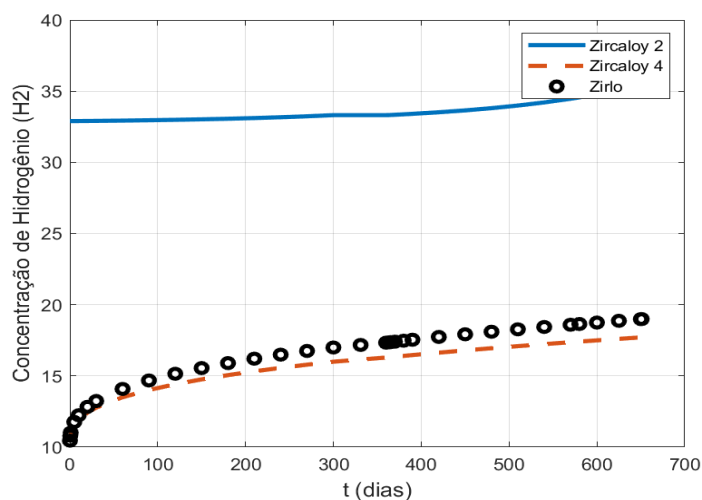
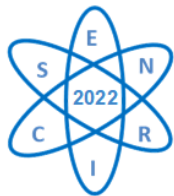


Fig. 8 Comportamento da concentração de hidrogênio ao longo do tempo para os revestimentos considerados.

A liga zircaloy-4, largamente utilizada até os dias atuais, é uma variação do zircaloy-2 isenta de níquel, que foi desenvolvida para diminuir a captura de hidrogênio e que apresenta uma melhor resistência à corrosão com relação ao zircaloy-2.

No gráfico da Fig. 9 é possível ver que os esforços sobre a mola da vareta combustível estão diretamente ligados a quantidade de gás produzido por todos seus componentes, sendo consideravelmente maior na liga Zircaloy 2.

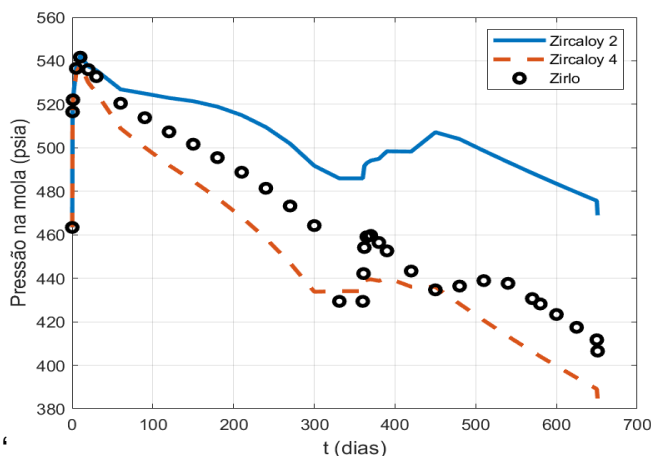
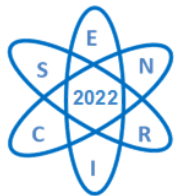


Fig. 9 Comportamento dos esforços axiais incidentes na mola ao longo do tempo para os revestimentos considerados.

5. CONCLUSÃO

O presente trabalho, em fase preliminar, buscou demonstrar que seria possível utilizar os códigos da linha FRAPCON para simular a performance de uma vareta combustível em um SMR com revestimentos comumente utilizados e fabricados no Brasil. Também,



demonstrou o comportamento temporal de diferentes parâmetros de segurança de interesse para três revestimentos distintos, todos baseados em Ligas de Zircônio e não em aço inoxidável como o CAREMS projetado na Argentina.

Os estudos e simulações apresentados neste trabalho indicam a possibilidade de utilização do revestimento Zirlo, que se mostrou mais adequado que as ligas Zircaloy 2 e Zircaloy 4 utilizando um histórico de potência realista e baseado em resultados prévios provenientes de simulações estritamente neutrônicas [4]. O Zirlo mostra uma resistência à corrosão mais elevada e uma estabilidade dimensional maior que a do Zircaloy 4, sendo esta estabilidade crítica para manter as propriedades de inserção das barras de controle, por exemplo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPERJ, FINEP (Projeto: 0298/16) e a CAPES pelo apoio a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <https://pris.iaea.org/pris/> acessado em: 05/07/2022.
- [2]. F. C. Kneipp *et al.*, Análise Comparativa da Viabilidade de Reatores Nucleares de Pequeno Porte e Usinas Termoeletricas a Combustíveis Fósseis no Cenário Nacional, V SENCIR 2021, 24-26 de maio (2021).
- [3]. H. A. R. Almeida *et al.*, A Evolução do Mercado de Urânio e as Perspectivas Futuras do Setor, V SENCIR 2021, 24-26 de maio (2021).
- [4] M. A. C. LIMA Simulação de um SMR usando OpenMC. 2022. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Nuclear, *Instituto de Engenharia Nuclear*, Rio de Janeiro, (2022).
- [5] R. M. Lobo e H. P. Andrade, “Novas ligas de Zircônio para aplicação nuclear”, 19º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais – CBECiMat, 21 a 25 de novembro de 2010, Campos do Jordão, SP, Brasil, (2010).
- [6]. Department of Energy Code Development Team. “FRAPCON-4.0: a computer code for the calculation of steady-state, thermal-mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup”. Pacific Northwest National Laboratory Richland, USA (2015).
- [7]. *Comissão Nacional de Energia Nuclear*. NT002: NT-CGRC 002/12. Rio de Janeiro: CNEN, (2012).