



COMPARAÇÃO DE CENÁRIOS DE GERAÇÃO NUCLEAR UTILIZANDO O MESSAGE NO HORIZONTE DE 2050

**Fidellis B. G. L. e Estanislau¹, Carlos E. Velasquez¹, Raoni A. S. Jonusan¹,
Antonella L. Costa¹ e Cláudia Pereira¹**

¹ Universidade Federal de Minas Gerais
Departamento de Engenharia Nuclear
Av. Antônio Carlos, 6627, Campus Pampulha, 31270-901, Belo Horizonte, MG, Brasil
fidellis01@hotmail.com

Palavras-Chave: Planejamento energético, energia nuclear, cenários, geração de eletricidade, MESSAGE

RESUMO

O planejamento energético integrado é uma ferramenta de grande importância nos estudos de médio e longo prazo, projeções e revisões do mix energético de um país ou região. As expectativas de expressivo aumento do consumo de energia, especialmente de energia elétrica, as preocupações crescentes com a segurança energética e as pressões ambientais, sobretudo com relação às emissões de gases de efeito estufa, têm recolocado a opção nuclear nas discussões acerca da energia. Assim, dentro de um contexto de crescimento da demanda de eletricidade e das projeções e cenários de expansão do sistema de geração de energia nuclear projetados pela Empresa de Pesquisa Energética nos Plano Nacional de Energia 2030 e 2050, este trabalho tem como objetivo comparar dois cenários de geração a partir de fontes nucleares no horizonte de 2050 utilizando o MESSAGE. O cenário de referência considera as usinas de Angra 1, 2 e 3 e o cenário alto, ou seja, de maior crescimento nuclear, compreende a instalação de mais 8 usinas no sistema integrado nacional. O estudo mostra a participação de cada cenário na oferta interna de eletricidade até 2050, compara o consumo de urânio natural para ambos cenários bem como o combustível nuclear queimado armazenado. O trabalho também apresenta resultados relacionados aos gastos anuais com o ciclo de combustível e operação e manutenção das instalações nos dois cenários.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento socioeconômico, o crescimento econômico e a garantia da satisfação das necessidades humanas básicas estão intrinsecamente ligados ao acesso a uma fonte confiável de energia [1]. No Brasil, as previsões de crescimento da demanda mostram um aumento de 3,1% ao ano no consumo de eletricidade até 2050, triplicando a demanda em relação a 2013 como pode ser visto na Fig. 1 [2]. A expansão do sistema energético deve ocorrer de maneira sustentável de modo a garantir o cumprimento de acordos ambientais e de mudanças climáticas além de proporcionar segurança energética para o país.

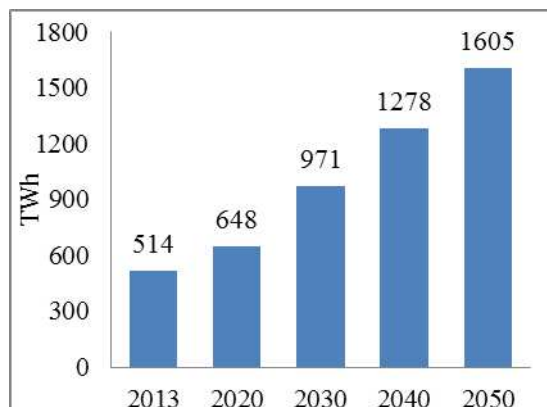


Fig. 1. Consumo total de eletricidade, 2013-2050. Adaptado de [2]

A geração nucleoeleétrica é uma opção que favorece a fixação de energia na base do sistema, contribuindo para sua segurança e confiabilidade. Ademais, as reservas brasileiras de urânio proporcionam uma independência do setor (Tab. 1) e a geração nuclear é caracterizada por baixos custos operacionais, resultantes da baixa proporção do custo do combustível na estrutura de custo total [3]. Esses e outros aspectos mostram a importância de se avaliar sistemas de geração nuclear em âmbito nacional e os impactos que podem advir do uso dessa tecnologia.

Tab. 1. Reservas de urânio do Brasil - 2007 [4]

Depósito-Jazida	Medidas e Indicadas (t)			Inferidas (t)	Total (t)
	<40US\$/kgU	<80US\$/kgU	Sub-total	<80US\$/kgU	
Caldas (MG)	-	500	500	4.000	4.500
Lagoa Real (BA)	24.200	69.800	94.000	6.770	100.770
Santa Quitéria (CE)	42.000	41.000	83.000	59.500	142.500
Outras	-	-	-	61.600	61.600
Total	66.200	111.300	177.500	131.870	309.370

Como demonstrado em trabalhos anteriores, como em “*Modelling of a LWR Open Fuel Cycle Using the MESSAGE Code*”, o MESSAGE (*Model for Energy Supply System Alternatives and Their General Environmental Impact*) é uma ferramenta potencial para realizar avaliações e analisar com alguns detalhes sistemas de geração nuclear [1]. Assim, o presente trabalho busca comparar dois cenários de geração nucleoeleétrica no Brasil. O cenário de referência procura caracterizar o cenário mais provável com um sistema nuclear compostos pelas usinas de Angra 1, Angra 2 e Angra 3 até 2050. E o cenário alto expressa um cenário de maior crescimento nuclear no país com a introdução de mais 8 usinas nucleares de acordo com as projeções do PNE-30 [5]. As novas usinas incluídas no modelo são do tipo *Evolutionary Power Reactor* (EPR), que são um desenvolvimento evolutivo dos atuais reatores de água pressurizada operando na Alemanha e na França [6].



2. METODOLOGIA

Os cenários de geração nuclear são representados matematicamente, no MESSAGE com sua descrição técnica e econômica, de acordo com os dados da Tab. 2. As usinas nucleares operam com o ciclo aberto do combustível.

Tab. 2. Características técnicas e econômicas [6,7,8,9,10,11,12]

Item	Unidade	Angra 1	Angra 2	Angra 3	EPR
Capacidade Líquida	MW(e)	626	1275	1245	1660
Fator de capacidade	%	77,7	89,5	89,5	92
Eficiência Térmica	-	0,342	0,358	0,358	0,36
Discharge burnup	MWd/t HM	55000	50000	50000	65000
Tempo de residência	days	1168	1168	1168	1168
Enriquecimento	-	0,04	0,04	0,04	0,05
Rejeito	-	0,003	0,003	0,03	0,03
Tempo de refrigeração	years	5	5	5	5
Tempo de Construção	years	10	19	13	8
Vida útil da planta	years	40	40	40	60
Custo de investimento*	US\$/kW(e)	1981	1908	5190	2400
Custos fixos de O&M*	US\$/kW yr	225,71	128,96	128,96	128,96
Custos variáveis de O&M*	US\$/kW yr	53,74	24,62	24,62	24,62
Custo de conversão	US\$/kgU	6,75	6,75	6,75	6,75
Custo de enriquecimento	US\$/kg SWU	60	60	60	60
Fabricação de combustível	US\$/kg HM	120	120	120	120
Custo do armazenamento refrigerado	US\$/kg HM/yr	5	5	5	5

*valores referentes a 2017. Conversão para dólar cotado a R\$3,31 em 31/12/2017 [13].

O cenário referência desenvolvido no horizonte de 2018-2050 compreende a introdução de Angra 3 na matriz energética e o descomissionamento de Angra 1 e Angra 2. Segundo informações da Eletronuclear, a expectativa é de que a operação comercial da usina de Angra 3 aconteça em dezembro de 2022 [8], assim sua introdução no modelo considerado ocorre em 2023. Decorridos os 40 anos de vida útil das instalações de Angra 1 e Angra 2, seus respectivos descomissionamentos estão previstos, inicialmente, para 12/2024 e 08/2040 [8].

O cenário alto leva em consideração as projeções do Plano Nacional de Energia 2030, com a introdução de mais oito usinas term nucleares, além de Angra 3, no Sistema Interligado Nacional, sendo quatro na região sudeste e quatro no nordeste [5]. O reator EPR, de terceira geração, desenvolvido pela Framatome e Électricité de France, foi a tecnologia usada no modelo para representar essas usinas nucleares. A escolha da tecnologia foi feita relativa ao memorando assinado em junho desse ano entre Eletrobrás/Eletronuclear e a estatal francesa para estudar a retomada e conclusão de Angra 3 e o desenvolvimento de novas usinas nucleares no Brasil [14].



Como o tempo médio para a construção de uma usina nuclear é de aproximadamente 8 anos [12], a primeira nova planta foi introduzida no modelo em 2028 e a cada 3 anos uma nova usina entra em operação. A taxa de desconto de 8% foi utilizada como parâmetro para avaliação econômica do projeto de investimento futuro.

3. RESULTADOS

A oferta interna de eletricidade a partir de fontes nucleares pode atingir cerca de 14 GWh por ano no cenário alto em 2050 (Fig. 2). Essa geração representaria aproximadamente 8% da matriz elétrica nacional, considerando as projeções de aumento da demanda total de energia elétrica do PNE-50 (Fig. 3). Em contrapartida, o cenário de referência atinge seu ponto máximo de geração em 2023 e 2024 gerando cerca de 2,7 GWh por ano, representando um máximo de 3,2% da matriz elétrica.

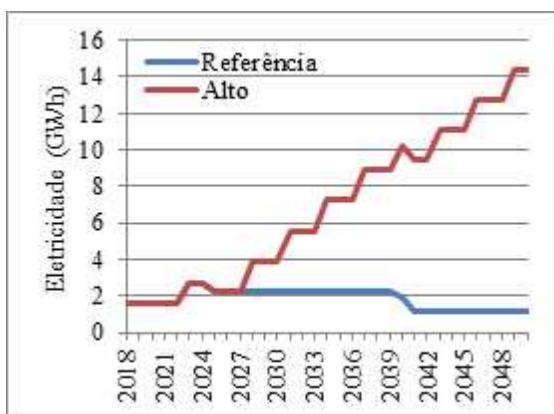


Fig. 2. Geração de eletricidade.

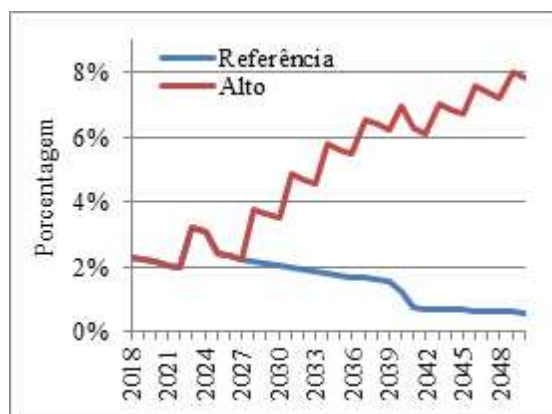


Fig. 3. Participação nuclear na matriz elétrica.

A Fig. 4 mostra o consumo cumulativo de urânio natural nos dois cenários. O consumo de urânio natural no período de 2018 até 2050 no cenário referência é de aproximadamente 12 mil toneladas. Apenas metade dos recursos com custos menores que US\$40/kgU do depósito de Lagoa Real em Caetité/BA seria suficiente para atender a oferta de eletricidade desse cenário. No cenário alto seriam consumidos cerca de 48 mil toneladas de urânio natural, o que ainda estaria dentro dos depósitos com custos menores que US\$40/kgU.

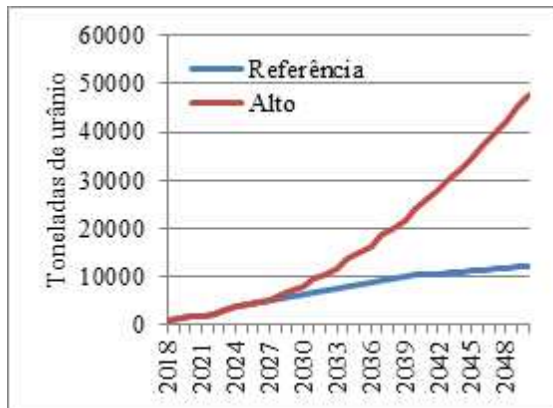


Fig. 4. Consumo cumulativo de urânio.



Fig. 5. Armazenamento de combustível queimado.

Ao final do período, temos quantidades consideráveis de combustível queimado armazenado como pode ser visto na Fig. 5. No cenário referência e no cenário alto, temos 1,2 e 3,8 mil toneladas de resíduos nucleares, respectivamente.

As despesas com a operação e manutenção do sistema de geração nuclear representam os maiores gastos em ambos cenários (Fig. 6), chegando a 2,6 bilhões de dólares anuais no final do cenário alto. Os custos com o ciclo do combustível nuclear são mostrados nas Fig. 7 e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, para os cenários referência e alto, respectivamente. Os picos representam o início da operação das usinas, onde o núcleo do reator precisa ser totalmente carregado.

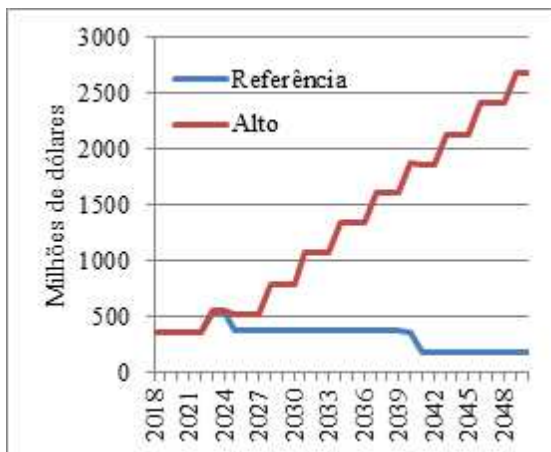


Fig. 6. Despesas de O&M.

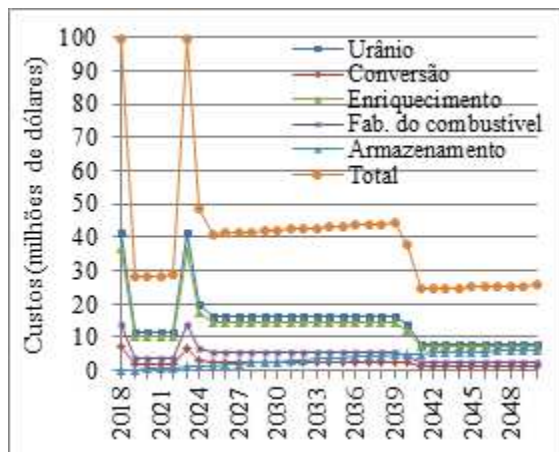


Fig. 7. Despesas anuais no ciclo do combustível - cenário referência.

Comparando os custos nivelados das usinas (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), verificamos que Angra 3 possui o maior custo por kW ano de energia produzido em razão do seu alto custo de investimento e longo tempo de construção. Angra 1 por sua vez aparece na segunda posição de maior custo devido às despesas com O&M.



Angra 2 e as usinas EPR possuem custos bem próximos por kW ano de eletricidade produzida.

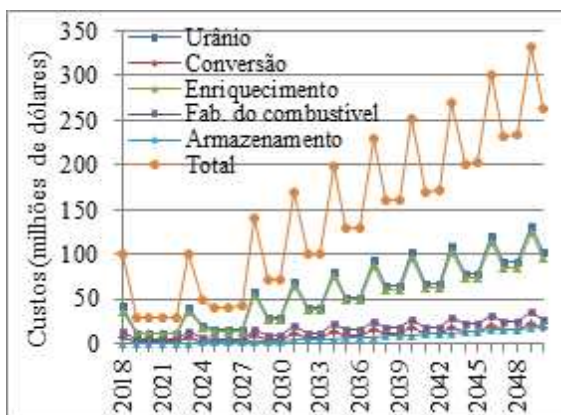


Fig. 8. Despesas anuais no ciclo do combustível - cenário alto.

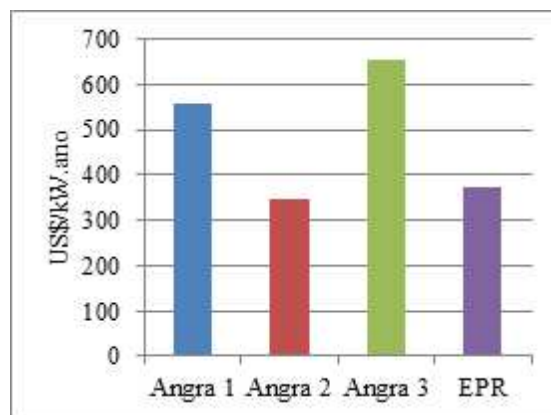


Fig. 9. Custo nivelado de energia.

4. CONCLUSÃO

No cenário alto, a geração nuclear tem uma participação mais significativa em longo prazo, o que poderia acrescentar certa segurança ao sistema elétrico brasileiro intensificando a geração de energia de base. O consumo de urânio natural mesmo no cenário alto é atendido sem esforços pelas reservas nacionais, proporcionando a independência do setor nuclear em relação ao combustível para geração de energia. A acumulação de combustível queimado atinge a ordem de toneladas gerando maiores custos de gerenciamento de resíduos nucleares com o passar do tempo e dentro do planejamento do setor deve-se pensar em uma disposição final adequada para tais resíduos. Como esperado, novas usinas trazem novas despesas ao setor. Por fim, o custo nivelado unitário de eletricidade produzido pelas usinas EPR, do cenário alto, são menores que os de Angra 3 e Angra 1 e comparáveis ao de Angra 2 indicando a potencialidade dessa nova tecnologia no setor nuclear brasileiro. Trabalhos futuros incluirão novas tecnologias de reatores no cenário de geração nuclear considerando casos de reprocessamento do combustível, ciclo do combustível fechado bem como emissões de gases de efeito estufa decorrentes do uso destas tecnologias.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências brasileiras de financiamento da pesquisa: FAPEMIG CAPES, CNPq e CNEN, pelo apoio. Obrigado também à Agência Internacional de Energia Atômica, IAEA, pela licença de uso do MESSAGE.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ESTANISLAU, F. B. et al. **Modelling of a LWR Open Fuel Cycle Using the MESSAGE Code**. Belo Horizonte: Proceedings of the eighth International Nuclear Atlantic Conference - INAC, 2017.



2. EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Demanda de Energia 2050: Nota técnica DEA 13/15. **Série Estudos da Demanda de Energia**, Rio de Janeiro, 2016.
3. TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: Gás Natural, Biomassa, Carvão, Nuclear**. 1. ed. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2016.
4. HEIDER, M. Mineração de Energia. In: BRASIL, D. N. P. M. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: DNPM, 2009. Cap. 2, p. 27-94.
5. EPE, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Plano Nacional de Energia 2030–PNE 2030**. Rio de Janeiro: EPE/MME, v. 15, 2007. 2010 p.
6. AREVA. Status Report 78–The Evolutionary Power Reactor (EPR), 2014. Disponível em: <<https://aris.iaea.org/PDF/EPR.pdf>>. Acesso em: 25 março 2018.
7. ELETRONUCLEAR. Central Nuclear de Angra dos Reis. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/AEmpresa/CentralNuclear>>. Acesso em: 07 janeiro 2018.
8. ELETRONUCLEAR. Perguntas frequentes. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Saibamais/Perguntasfrequent.es.aspx>>. Acesso em: 07 janeiro 2018.
9. IAEA, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. Power reactor information system (PRIS). Disponível em: <<http://www.iaea.org/pris>>. Acesso em: 06 janeiro 2018.
10. ELETRONUCLEAR. Custo de produção de Angra 1 e Angra 2 [mensagem pessoal por meio da Lei de Acesso à Informação]. Mensagem recebida por <fidellis@ufmg.br>, 26 fevereiro 2018.
11. UXC. Ux Consulting - The Nuclear Fuel Price Reporter. Disponível em: <<https://www.uxc.com/>>. Acesso em: 02 janeiro 2018.
12. BERTHÉLEMY, M.; RANGEL, L. E. Nuclear reactors' construction costs: The role of lead-time, standardization and technological progress. **Energy Policy**, v. 82, p. 118-130, 2015.
13. REUTERS. Currencies. Disponível em: <<https://www.reuters.com/finance/currencies>>. Acesso em: 17 setembro 2018.
14. ELETRONUCLEAR. Eletronuclear, Eletrobras e grupo EDF assinam memorando de entendimento para cooperação na área nuclear. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Not%C3%ADcias/NoticiaDetalhes.aspx?NoticiaID=2076>>. Acesso em: 01 junho 2018.