

Análise da energia nuclear no âmbito do despacho termoeletrico e da sustentabilidade: um panorama da termoeletricidade nuclear e a inserção de Angra 3 no sistema interligado nacional

RESUMO

Este trabalho discute a contribuição da energia nuclear para a complementação térmica do Sistema Interligado Nacional, as questões relacionadas com a usina Angra 3 em construção e analisa sua contribuição para a sustentabilidade do sistema elétrico. Neste trabalho avalia-se o valor estratégico da segurança energética provido pelas fontes termoeletricas e, em particular, pela alternativa nuclear. A análise de custo é baseada no custo marginal de operação. A análise de sustentabilidade considera 6 critérios: emissão de gases do efeito estufa, área imobilizada, consumo de matéria prima na forma de combustível, consumo de água, morbidade e fatalidades em acidentes. Esses critérios são considerados importantes pelos setores de energia, industrial e pela sociedade. Conclui-se que a energia nuclear na função de complementação térmica garante segurança energética, confiabilidade no fornecimento de energia, menor custo marginal e operação e maior contribuição para sustentabilidade.

PALAVRAS-CHAVE: Angra 3. Despacho Termoeletrico. Energia nuclear. Segurança energética. Sustentabilidade socioeconômica.

Reinaldo Fugitaro Otope Junior

rei.fugitaro@gmail.com

Universidade Federal do ABC - Santo André, São Paulo, Brasil.

João Manoel Losada Moreira

joao.moreira@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC - Santo André, São Paulo, Brasil.

Letícia Caroline Gonçalves

goncalves.leticia@gmail.com

Universidade Federal do ABC - Santo André, São Paulo, Brasil.

Roberto Tadeu Soares Pinto

robertotadeusoarespinto@yahoo.com.br

Universidade Federal do ABC - Santo André, São Paulo, Brasil.

Patrícia Teixeira Leite Asano

patricia.leite@ufabc.edu.br

Universidade Federal do ABC - Santo André, São Paulo, Brasil.

INTRODUÇÃO

A segurança energética tem reflexos nas dimensões socioeconômica e ambiental. Normalmente, no caso de falta de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), as fontes que entram são as mais caras e também as ambientalmente menos interessantes, como óleo combustível, diesel, carvão e outras fontes. A importância da termoeletricidade no sistema elétrico brasileiro está relacionada ao fato de se tratar de fontes complementares que podem atuar nos períodos em que outras fontes como a geração hidrelétrica podem ficar comprometidas como no caso de estiagens. Adicionalmente, em um sistema hidrotérmico de geração como o SIN brasileiro, o custo de operação é dado pelo custo do combustível utilizado na operação das usinas termelétricas, o custo de importação de energia de outros sistemas e o custo da falta de suprimento de energia (MOREIRA e PINTO, 2018). Outro ponto relevante está no custo associado à expansão do sistema de transmissão, em especial nas interligações regionais, que se apresentam como de fundamental importância ao permitir a importação e exportação de grandes blocos de energia entre regiões (QUINTELLA, 2016).

A geração nuclear tem um importante papel por se tratar de uma fonte de grande potencial para garantir a segurança energética e confiabilidade de fornecimento de eletricidade com custos competitivos, disponibilidade de combustível a longo prazo e baixa causa de morbidade (MARIZ, 2014; MOREIRA et al., 2015; LAMARSH e BARATTA, 2001). No Brasil a termoeletricidade nuclear tornou-se relevante dentro do planejamento energético tendo em vista que esta fonte está sendo operada de forma contínua durante todo o período de planejamento, isto é com alto fator de capacidade (EPE, 2018; ANEEL, 2017; ELETRONUCLEAR, 2018). Para efeito comparativo, segundo dados do ONS, o maior custo marginal de operação registrado em 2017 ocorreu no subsistema Sudeste/Centro-Oeste no mês de outubro, a um valor médio de R\$ 860,45/MWh (ONS, 2018). A tarifa de geração nuclear de acordo com a recente revisão tarifária é de R\$ 400/MWh (anteriormente era de R\$ 240/MWh). Este valor, embora elevado para competir com as hidrelétricas brasileiras que são operadas continuamente, é a metade do valor máximo do CMO das termoeletricas utilizadas atualmente.

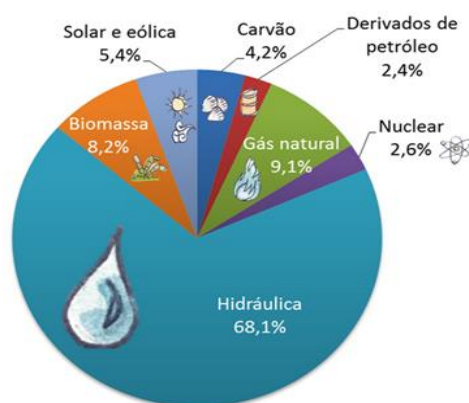
Este trabalho apresenta uma análise dos benefícios econômicos e de segurança energética promovidos pela inserção da tecnologia nuclear para a complementação térmica do SIN. Adicionalmente faz-se uma análise de sustentabilidade das opções de tecnologia de geração elétrica mais frequentemente usadas para a complementação térmica do SIN: gás natural, petróleo, carvão e nuclear.

Este artigo inicia-se avaliando a inserção de usinas nucleares na matriz elétrica brasileira visando a complementação térmica. A seguir apresenta-se a metodologia adotada em duas partes: a análise dos benefícios econômicos a partir do custo marginal de operação (CMO) e a análise multicritério de sustentabilidade baseada em indicadores de impacto composto. Finalmente, apresentam-se os resultados, as discussões e as considerações finais.

A TERMOELETRICIDADE NUCLEAR NO BRASIL

A título de informação aos leitores, inicia-se com uma breve descrição do setor nuclear brasileiro de geração elétrica. O Brasil possui um sistema hidrotérmico para a viabilização da garantia de suprimento do seu sistema elétrico. Neste contexto, são utilizadas fontes de energia renováveis e não renováveis para o atendimento da carga, conforme apresentado na Figura 1 com dados da matriz elétrica brasileira apurada para o ano de 2016.

Figura 1 - Matriz Elétrica Brasileira em 2016



Fonte: EPE, 2018

Se por um lado verifica-se a prevalência de energia hidráulica e renovável para a geração de eletricidade, por outro lado, configura-se ponto de atenção seja pelo risco da dependência hidrológica, seja pelas restrições ambientais, a construção de novas usinas hidrelétricas de grande porte para atendimento da demanda no Brasil.

Os períodos de estiagem verificados nos últimos anos e os impactos decorrentes como redução da participação da geração hidrelétrica complementada pela geração termoeétrica e de outras fontes comprovam a importância do risco hidrológico. A solução adotada envolve o despacho por ordem de mérito de usinas termelétricas com diferentes tecnologias e custos variáveis unitários (CVU) com impactos significativos para a economia e para a sociedade em função dos altos custos apurados. Quando há a necessidade de energia elétrica para o atendimento à demanda, o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) prioriza a geração de energia tendo em vista o critério de menor custo de combustível. Desta forma, usa-se a hidroeletricidade em primeiro lugar por ter um custo de combustível nulo e posteriormente usa-se a térmica de menor custo de combustível (GRAMULIA JUNIOR, 2014).

A energia elétrica torna-se extremamente cara para a sociedade devido à necessidade de utilização de geração a partir de termoeletricas de custos cada vez mais elevados. Tal fato é evidenciado pelas bandeiras tarifárias. Destaca-se em especial a bandeira vermelha, que indica a necessidade de operar usinas térmicas mais caras para compensar a geração hidráulica inibida pela falta de chuvas (ANEEL, 2017). As fontes termonucleares são as que apresentam menor

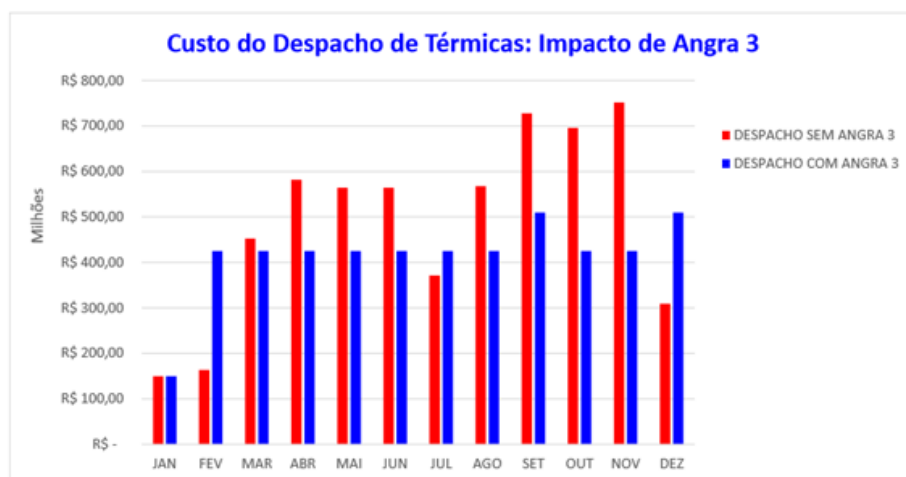
custo de combustível quando comparadas às demais fontes termoeletricas convencionais.

Em 1969 decidiu-se por construir uma usina termonuclear no Brasil, iniciando-se em 1972 a construção de Angra 1, que passou a operar comercialmente apenas em 1985. Em junho de 1975, foi assinado o Acordo Nuclear Brasil-Alemanha, que previa a construção de até oito usinas nucleares no país (MARIZ, 2014). Dada a redução da taxa de crescimento de economia brasileira a partir da década de 1980, foi construída Angra 2, que começou a operar em 2001, e Angra 3 está em construção com cerca de 62% de progresso físico global (BARRETTO, 2016).

A potência de Angra 3 é de 1.405 megawatts (MW), fornecendo mais de 11 milhões de megawatts-hora (MWh) anuais. Esta energia é suficiente para abastecer as cidades de Brasília e Belo Horizonte durante um ano inteiro ou o equivalente a cerca de 50 % da eletricidade consumida no estado do Rio de Janeiro. A usina será similar a Angra 2, que vem apresentando excelente desempenho operacional desde a sua entrada em operação, e incorporará diversas melhorias operacionais e de segurança no projeto (MARIZ, 2014). Em notícias recentes constatam-se vários questionamentos acerca da finalização de Angra 3, especialmente no que se refere ao custo demandado para tal feito.

Em estudos recentes divulgados pela Eletronuclear e pelo ONS, a inserção de Angra 3 no SIN possibilitaria o incremento de benefícios energéticos e elétricos derivados da disponibilidade e confiabilidade do suprimento de energia firme e de baixo custo. Na Figura 2 apresentam-se os resultados dos estudos dos impactos de Angra 3 no despacho por ordem de mérito em 2017, representando uma economia de 900 milhões de reais anuais (ELETRONUCLEAR, 2018).

Figura 2 - Custo do Despacho considerando a inserção e a não inserção de Angra 3 em 2017



Fonte: ELETRONUCLEAR, 2018

METODOLOGIA

A avaliação da contribuição da energia nuclear no SIN é feita em relação a benefícios econômicos para a sociedade e um conjunto de critérios considerados importantes para a sustentabilidade dos setores de energia e industrial em geral. Os benefícios econômicos são centrados na função de complementação térmica necessária para que o SIN forneça eletricidade com confiabilidade à sociedade brasileira. Os critérios de sustentabilidade na dimensão socioambiental são emissão de gases do efeito estufa, área imobilizada, consumo de matéria prima na forma de combustível, consumo de água, morbidade e fatalidades em acidentes. Esses critérios são considerados importantes pelos setores de energia, industrial e pela sociedade (SINGH et al., 2010; La ROVERE et al., 2010; VEIGA, 2006, GOLDEMBERG e LUCON, 2008). Estes impactos socioambientais devem ser avaliados em todo o ciclo de vida do empreendimento e de sua cadeia produtiva (GOLDEMBERG e LUCON, 2008; ZIIP et al., 2015).

ANÁLISE A PARTIR DO CMO E CUSTO DE COMBUSTÍVEL

O parâmetro utilizado é o Custo Marginal de Operação (CMO) definido como o custo para atender uma unidade adicional de carga, que possui um valor próximo da última térmica despachada no sistema elétrico (DEUSA e SOUZA, 2008). A disponibilidade de uma fonte como Angra 3 no SIN, que tem um CMO mais baixo do que as demais termoeletricas, significa potencialmente complementação térmica no SIN a custos mais baixos.

A avaliação leva em consideração duas situações. A primeira é que Angra 3 seja despachada considerando o valor de custo de combustível, que evidentemente, estaria muito próximo aos valores encontrados para Angra 1 e Angra 2. A segunda situação é que Angra 3 tenha um custo de despacho igual ao valor da revisão tarifária.

Utilizando a metodologia adotada por (GRAMULIA JUNIOR, 2014) e dados do *deck* do *Newave* (Mês de Maio/2018 como referência), encontra-se o fator de disponibilidade (Fd) e a potência disponível para cada usina do SIN.

Pode-se esperar para Angra 3 um preço de combustível muito próximo àqueles encontrados em Angra 1 e Angra 2 pelo fato de que, no Brasil, a existência de extensas reservas de urânio e a capacidade de fabricação de combustível garantem baixos custos e estabilidade de preço (CARAJILESCOV e MOREIRA, 2008). Para fazer uma análise, neste caso, considerou-se o valor médio do custo de combustível de Angra 2 e 1, resultando em R\$ 25,65/MWh. Considerou-se também que Angra 3 possui os mesmos parâmetros de Angra 2.

ANÁLISE DE SUSTENTABILIDADE

Uma avaliação de sustentabilidade requer que se defina o objeto, objetivo, escopo de avaliação e os domínios espaciais e temporais envolvidos (ZIIP et al., 2015). O objeto desta análise é a complementação térmica do setor de geração elétrica do Brasil e o objetivo é contribuir para uma tomada decisão sobre alternativas de complementação por parte de todos os stakeholders a partir de critérios de sustentabilidade. O escopo de avaliação inclui apenas as

características gerais das tecnologias nucleares e de fontes fósseis comparadas com tecnologia hidrelétrica que é dominante no país. O domínio espacial seria o Brasil; não se discute sítios ou a localização de empreendimentos, mas suas características gerais. O domínio temporal é levado em conta dado que os impactos de algumas fontes se estendem por centenas e até milhares de anos. O intervalo considerado é de até 10.000 anos para se considerar a estocagem de rejeitos radioativos. Dado que não se tem um sítio bem definido este estudo é apenas uma avaliação de alternativas de complementação térmica quanto a sustentabilidade. Os impactos socioambientais são avaliados em todo o ciclo de vida do empreendimento e de sua cadeia produtiva e quando não for possível é claramente informado.

O método adotado é aquele descrito em MOREIRA et al., (2015) baseado na construção de indicadores e pesos para diferentes critérios a partir de uma análise multicritério (LOKEN, 2007). Este método foi escolhido por ser simples e permitir ao analista identificar os fatores que afetam o resultado final de forma simples e transparente.

Os critérios escolhidos para a análise de sustentabilidade incluem variáveis socioambientais consideradas importantes pela sociedade brasileira, o setor de energia e setores industriais (SINGH et al., 2010; VEIGA, 2006). Os setores de energia e industrial considera importante índices de intensidade energética, intensidade de massa (uso de matéria prima), riscos à saúde e ao meio ambiente, conservação de recursos naturais, reciclagem e eficiência energética. Os danos à saúde incluem doenças respiratórias e carcinogênicas e patologias causadas por mudanças climáticas, perda da camada de ozônio, exposição à radiação etc. Essas preocupações também são compartilhadas pela sociedade que também se preocupa com as consequências de acidentes, particularmente na geração termonuclear (MOREIRA et al., 2015; CESARETTI, 2010; GOLDEMBERG e LUCON, 2008).

ESCOLHA DE CRITÉRIOS DE SUSTENTABILIDADE

Para cobrir esta extensão de preocupações socioambientais escolhemos um grupo de 6 critérios apresentados na Tabela 1. Esses critérios estão distribuídos entre as dimensões ambiental e social. Os dados utilizados para avaliar esses critérios encontram-se nas Tabelas A1 e A2 das Notas. Esses dados são baseados em coeficientes de impacto (CESARETTI, 2010; SINGH et al., 2010; MOREIRA et al., 2015). Os dados foram levantados a partir da literatura e apresentam uma dispersão apreciável devido a metodologia utilizada e também às características dos projetos de geração de energia elétrica considerados nas avaliações. Isto significa que os projetos de geração de eletricidade de uma mesma fonte podem apresentar coeficientes de impactos muito diferentes. Os dados sobre fatalidades de acidentes são uma coletânea de acidentes reportados na mídia ao longo do século 20 (CESARETTI, 2010; SOVACOOOL, 2008). Estes critérios foram escolhidos por serem considerados relevantes para o setor de energia, setor industrial e também vários setores da sociedade (MOREIRA et al., 2015; VEIGA, 2006; SINGH et al., 2010; La ROVERE, 2010; ZIJP et al., 2010; LOKEN, 2007).

A análise de sustentabilidade é multicritério (LOKEN, 2007; La ROVERE et al., 2010; MOREIRA et al., 2015). Os valores dos pesos ou importância de cada

critério são atribuídos conforme uma árvore de hierarquia (MOREIRA et al., 2015). O peso da dimensão ambiental é 60 % e da dimensão social é 40 %. Os pesos dos respectivos critérios dentro de cada dimensão estão apresentados na tabela e a importância final de cada critério, w_i , é apresentada na última coluna. Privilegiou-se a dimensão ambiental em relação à social porque fazemos uma análise geral para o contexto brasileiro e muitas questões sociais estão associadas a condições socioeconômicas dos locais do empreendimento. Conforme mencionado anteriormente, esses critérios são considerados importantes pelos setores de energia, industrial e pela sociedade (SINGH et al., 2010; La ROVERE et al., 2010; VEIGA, 2006, GOLDEMBERG e LUCON, 2008); ZIJP et al., 2015). Mais detalhes sobre a escolha desses critérios encontram-se em MOREIRA et al., 2015).

Tabela 1 – Dimensões, critérios e pesos adotados na análise de sustentabilidade da complementação térmica do SIN.

Dimensão	Peso da Dimensão (%)	Critério	Peso do Critério na Dimensão (%)	Importância Final do Critério - w_i (%)
Ambiental	60	Emissão de gases do efeito estufa	40	24
		Área imobilizada	20	12
		Consumo de matéria prima na forma de combustível	20	12
		Consumo de água	20	12
Social	40	Morbidade causada durante operação normal	50	20
		Fatalidades causadas devido a acidentes	50	20

Fonte: Autoria Própria

CONTABILIZAÇÃO DE ACIDENTES NUCLEARES E REJEITOS RADIOATIVOS DE LONGA DURAÇÃO

Os acidentes nucleares ocorrem a despeito de cuidados e sistemas especialmente projetados para evitá-los (LAMARSH e BARATTA, 2001; SOUZA e MOREIRA, 2006); BITELLI, et al., 2003; MAIORINO et al., 1989; MOREIRA e LEE, 1988). Nos critérios acima os danos causados pelos acidentes nucleares são contabilizados por dois coeficientes de impacto: fatalidades ocasionadas pelos acidentes e área imobilizada devido à radioatividade espalhada pelo meio ambiente. O número de mortes ou fatalidade causadas por um acidente é

normalmente considerado para dimensionar acidentes graves. Após os acidentes áreas ao redor do local são afetadas e podem ser imobilizadas por tempos longos ou curtos, conforme sua extensão. O material contaminado se transforma em rejeitos radioativos e são monitorados, coletados e enviados para depósitos apropriados. Os tempos de estocagem variam de 30 anos a 500 anos conforme a classificação dos rejeitos e sua contaminação (COCHRAN e TSOULFANIDIS, 1999; LAMARSH e BARATTA, 2001; CARAJILESCOV e MOREIRA, 2008; MAIORINO e MOREIRA, 2014). Esses tempos foram considerados na variável área-ano de imobilização.

A energia nuclear moderna considera fazer a reciclagem do combustível irradiado via reprocessamento em reatores pensados para uso no futuro. Com essas tecnologias seria possível reduzir drasticamente os tempos de estocagem de combustível irradiado.

Esses reatores, embora estudados, não foram ainda implantados comercialmente e incluem reatores rápidos, reatores acoplados a aceleradores e ciclo de combustível a base de tório (Th) (MOREIRA, et al., 2013; MAIORINO e MOREIRA, 2014; MAIORINO et al., 2017).

Neste trabalho considera-se que as alternativas tecnológicas para fazer a reciclagem do combustível irradiado e baixar a necessidade de estocagem para 500 anos estarão disponíveis no futuro próximo (MOREIRA et al., 2015; MAIORINO e MOREIRA, 2014). Para tal, será necessária pesquisa em reatores rápidos com um espectro mais endurecido (energia dos nêutrons mais elevada) com fontes externas de nêutrons que aumentem a probabilidade de fissão dos rejeitos de longa duração como os elementos transurânicos e os produtos de fissão de meia vida longa. Tal consideração é denominada sustentabilidade fraca para o problema do tratamento dos rejeitos radioativos, isto é, que embora a tecnologia ainda não esteja disponível para a reciclagem, ela estará disponível no futuro próximo por meio de realização de pesquisas. Esta suposição é semelhante àquela considerada para as fontes fósseis na qual considera-se que haverá solução para o sequestro de carbono no futuro próximo (MOREIRA et al., 2015).

INDICADOR COMPOSTO DE SUSTENTABILIDADE

A análise multicritério de sustentabilidade inclui a comparação entre as 4 fontes de energia que podem ser utilizadas para a complementação térmica no SIN: gás natural, petróleo, carvão nuclear. Os coeficientes de impacto apresentados nas Tabelas A1 e A2, σ_i , não podem ser comparados diretamente porque têm unidades distintas (MOREIRA et al., 2015; SINGH et al., 2010). Para construir um indicador composto de sustentabilidade que leve em consideração todos os critérios apresentados na Tabela 1 é necessário torná-los comparáveis. Uma forma de fazer isto é torná-los adimensionais. Para tal define-se o coeficiente de impacto adimensional, η_i , como:

$$\eta_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\hat{\sigma}_j} \quad (1)$$

Onde $\hat{\sigma}_j$ é a mediana dos resultados de σ_{ij} para as fontes consideradas. O coeficiente de impacto composto para a j-ésima fonte é definido como:

$$\bar{\eta}_j = \sum_{i=1}^6 w_i \eta_{ij} \quad (2)$$

Onde w_i é a importância final atribuída a cada critério conforme apresentado na Tabela 1. O produto $w_i \eta_{ij}$ fornece a contribuição do critério i ao indicador composto de impacto da j -ésima fonte.

A comparação entre as fontes é feita por meio do indicador composto de impacto definido para as fontes de energia conforme a Eq. 2. Quanto maior o indicador maior é o impacto causado (MOREIRA et al., 2015).

RESULTADOS

RESULTADOS DE BENEFÍCIOS E DE SEGURANÇA ENERGÉTICA

Para comprovar o quanto inserir Angra 3 significa em economia foram criadas 2 situações baseadas nas duas possibilidades, descritas anteriormente na seção de Metodologia. Utilizando os dados do *deck* do *Newave* (Mês de Maio/2018 como referência), encontrou-se o fator de disponibilidade (Fd) e a potência disponível para cada usina.

Encontrou-se também a geração de energia média por mês (em MWh), além do custo de despacho (em R\$) por cada usina. As Tabelas 2, 3 e 4 apresentam esses resultados para as duas situações.

Tabela 2 - Custo de Despacho considerando custo de Angra 3 igual ao valor médio do combustível (R\$ 25,65/MWh)

Usina	Potência (MW)	Fd	Potência disponível (MW)	Custo (R\$/MWh)	Energia (MWh)	Custo de Despacho (R\$)
Complementação Térmica com Energia Nuclear						
ANGRA 3 - Combustível	1.405	0,91	1.276,46	25,65	931.812,85	23.900.999,62
Complementação Térmica com Termoelétricas Convencionais						
NORTEFLU-1	400	1,00	400,00	60,60	292.000,00	17.695.200,00
MAUA 3	190	0,87	165,95	66,00	121.143,81	7.995.491,47
NORTEFLU-2	100	0,87	87,05	71,62	63.544,07	4.551.026,44
MARANHAO III	519	0,91	474,85	76,94	346.639,97	26.670.479,18
TOTAL TÉRMICA	1.209	-----	1.127,85	-----	823.327,85	56.912.197,09

Fonte: Autoria Própria

Tabela 3 - Custo de Despacho considerando custo de Angra 3 igual ao valor da revisão tarifária (R\$ 400,00/MWh)

Usina	Potência (MW)	Fd	Potência disponível (MW)	Custo (R\$/MWh)	Energia (MWh)	Custo de Despacho (R\$)
Complementação Térmica com Energia Nuclear						
ANGRA 3 - Revisão Tarifária	1.405	0,91	1.276,46	400,00	931.812,85	372.725.140,29
Complementação Térmica com Termoelétricas Convencionais						
MAUA B3	110	0,87	96,16	411,92	70.197,84	28.915.893,60
MARACANAU I	168	0,62	103,58	441,55	75.615,24	33.387.908,01
VALE DO ACU	368	0,75	275,85	450,86	201.366,93	90.788.292,64
TERMOCABO	50	0,87	43,66	454,78	31.869,32	14.493.528,44
SUAPE II	381	0,81	310,50	455,90	226.663,80	103.336.027,00
GERAMAR I	166	0,90	148,72	460,16	108.562,91	49.956.309,29
GERAMAR II	166	0,88	145,88	460,16	106.492,70	49.003.682,15
VIANA	175	0,90	157,29	460,17	114.821,52	52.837.419,39
TOTAL TÉRMICA	1.584	-----	1.281,64	-----	935.590,26	422.719.060,52

Fonte: Autoria Própria

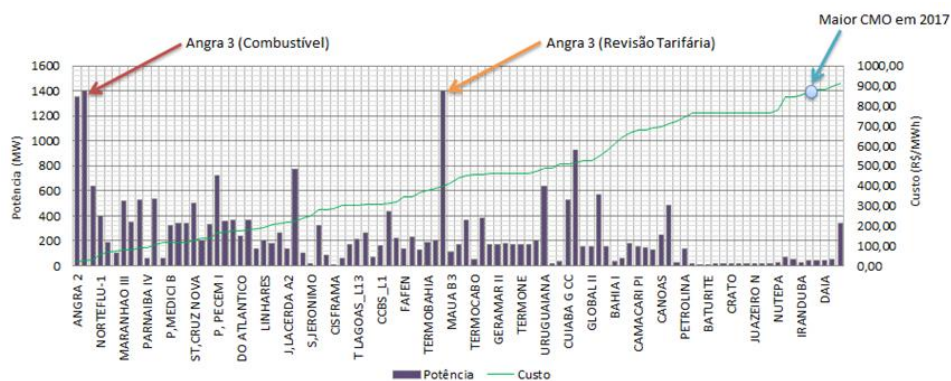
Tabela 4 - Custo de Despacho considerando os custos de combustível e de tarifa para as situações de complementação térmica sem Angra 3 e com Angra 3.

	Metodologia	
	Igual ao valor médio do combustível	Igual ao valor da revisão tarifária
Sem Angra 3		
Custo Total de Despacho (R\$)	56.912.197,09	422.719.060,52
Com Angra 3		
Custo Total de Despacho (R\$)	R\$ 23.900.999,62	R\$ 372.725.140,29
Custo (R\$/MWh)	25,65	400,00

Fonte: Autoria Própria

A Figura 3 compara a potência instalada e o custo da energia elétrica no SIN entre Angra 3 e as usinas termoelétricas atualmente despachadas pelo ONS. As duas situações de custo estudadas são consideradas. De modo geral, a inserção de Angra 3 no SIN poderia substituir a utilização de termoelétricas de custos mais elevados.

Figura 3 - Inserção de Angra 3 no Despacho Termoeletrico



Fonte: Autoria Própria

RESULTADOS DE SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL

Utilizando os dados das Tabelas A1 e A2 das Notas e o fundamento teórico descrito na seção de metodologia obtêm-se os resultados quantitativos de sustentabilidade. Os coeficientes de impacto adimensionais obtidos conforme a Equação 1 são apresentados na Tabela 5. Os indicadores compostos de impacto, obtidos conforme a Equação 2 e os pesos apresentados na Tabela 1 para cada critério de sustentabilidade, são apresentados na Figura 4.

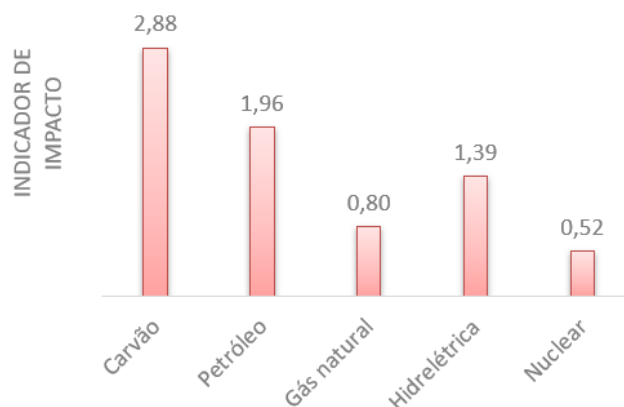
A contribuição de cada critério de sustentabilidade para o indicador de impacto composto é dada pelo produto $w_i \eta_{ij}$ e é apresentada na Tabela 6. Como exemplo desses resultados temos que a contribuição do critério “área-ano imobilizada” para indicador de impacto composto para as hidrelétricas é 0,676. Se tal critério for considerado dispensável por alguma argumentação, o indicador composto será reduzido por esta contribuição. Por exemplo, para a hidrelétrica, dispensando o critério “área-ano imobilizada” o indicador de impacto composto cairia de 1,39 para 0,714.

Tabela 5 – Coeficientes de impacto adimensionais e normalizados dos critérios de sustentabilidade para as diferentes fontes.

	Emissão de CO2	Área-Ano Imobilizada	Uso de Combustível	Consumo de Água	Morbidade	Fatalidades em Acidentes
Carvão	2,200	1,000	1,336	2,190	7,500	1,531
Petróleo	1,694	0,333	1,000	1,000	5,367	1,000
Gás Natural	1,000	0,333	1,148	1,121	1,000	0,221
Hidroelétrica	0,062	5,636	0,000	0,841	0,000	3,003
Nuclear	0,036	2,318	0,000	1,905	0,007	0,030

Fonte: Autoria Própria

Figura 4 – Indicadores compostos de impacto para as fontes de energia utilizadas para a complementação térmica no SIN.



Fonte: Autoria Própria

Tabela 6 – Contribuição de cada critério de sustentabilidade para o indicador de impacto composto.

	Emissão de CO2	Área-Ano Imobilizada	Uso de Combustível	Consumo de Água	Morbidade	Fatalidades em Acidentes
Carvão	0,528	0,120	0,160	0,263	1,500	0,306
Petróleo	0,407	0,040	0,120	0,120	1,073	0,200
Gás Natural	0,240	0,040	0,138	0,134	0,200	0,044
Hidroelétrica	0,015	0,676	0,000	0,101	0,000	0,601
Nuclear	0,009	0,278	0,000	0,229	0,001	0,006

Fonte: Autoria Própria

DICUSSÃO DOS RESULTADOS

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE BENEFÍCIOS E DE SEGURANÇA ENERGÉTICA

Dos resultados obtidos, constata-se que fazer a complementação térmica incluindo Angra 3 apresenta vantagens de segurança energética e econômicas. Baseado na metodologia de que o custo se restrinja àquele do combustível obteve-se uma redução significativa de valor da complementação térmica. A redução foi de 63 % do custo por MWh quando comparado com a situação sem a inclusão de Angra 3. Já para o caso em que se considerou a inclusão de Angra 3, baseado na metodologia de que o custo é igual ao valor da revisão tarifária, obteve-se uma redução de 12% quando comparado com a situação sem a inclusão de Angra 3.

Em suma, quando se considerou que Angra 3 teria um custo médio de R\$ 23.900.999 para entregar 1.276 MW, seria necessário acionar 4 termoelétricas distintas – a custos mais elevados – para se chegar a uma potência relativamente parecida, elevando evidentemente o custo total para isto. Em outras palavras, seria necessário o despacho das usinas termoelétricas Norteflu-1 (a gás), Mauá 3

(a gás), Norteflu-2 (a gás) e Maranhão III (a gás) para equivaler uma potência próxima entregue por Angra 3 ao custo de R\$ 25,65/MWh. Por outro lado, seriam necessárias 8 usinas termoeletricas diferentes para se chegar a uma mesma potência de Angra 3, no caso do custo ser igual ao valor de revisão tarifária (R\$ 400/MWh) – o que implicaria no despacho das usinas Mauá B3 (a gás), Maracanau I (a óleo), Vale do Açu (a gás), Termocabo (a óleo), Suape II (a óleo), Geramar I (a óleo), Geramar II (a óleo) e Viana (a óleo).

É importante reiterar que para a possibilidade de que Angra 3 seja despachada segundo o custo da revisão tarifária, ainda assim haveria um benefício econômico, especialmente em momentos mais críticos e que apresentariam um CMO maior do que o valor de R\$ 400/MWh de Angra 3.

A Figura 3 permite comparar Angra 3 com as outras usinas térmicas do SIN utilizadas para a complementação térmica em relação a potência instalada, custo de combustível e custo da energia.

Para uma conjuntura onde o CMO apresenta um valor muito maior do que a tarifa de Angra 3, a inserção de Angra 3 no SIN pode ajudar significativamente na redução do CMO, uma vez que muitas usinas termoeletricas possuem um custo próximo aos R\$ 800/MWh, como é o caso da usina Nutepe (a óleo, ao custo de R\$ 780/MWh), da usina Potiguar III (a diesel, ao custo de R\$ 846,58/MWh), da usina Potiguar (a diesel, ao custo de R\$ 846,59/MWh) e da usina Iranduba (a óleo, ao custo de R\$ 856,49).

DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DE SUSTENTABILIDADE SOCIOAMBIENTAL

Uma análise de sustentabilidade socioambiental que leva em consideração 6 diferentes critérios traz resultados distintos daqueles esperados quando se considera simplesmente a emissão de gases do efeito estufa ou energia renovável versus não-renovável. A tecnologia hidrelétrica apresenta indicador de impacto composto maior que a de gás natural e energia nuclear basicamente devido aos critérios área-ano imobilizada e fatalidades ocorridas durante acidentes. Se a área imobilizada não for considerada importante em um dado local ou região ou se o projeto e a operação da usina hidrelétrica puderem garantir a segurança e confiabilidade de baixíssima probabilidade de ocorrência de acidentes, tais critérios podem ser desconsiderados. A questão de acidentes é uma preocupação importante da sociedade principalmente em relação à energia nuclear. Uma avaliação específica de um projeto pode fazer tais considerações, contudo uma análise comparativa entre fontes de energia requer uma quantidade maior de critérios e um tratamento isonômico entre elas. Outra questão importante é a representatividade do indicador escolhido e a escolha dos pesos para os diversos critérios. Devido a razões como estas é necessário analisar qualitativamente os resultados quantitativos obtidos.

A fonte nuclear apresenta o indicador de impacto composto menor que as fontes fósseis conforme mostra a Figura 4. Os critérios de sustentabilidade de maior contribuição são a área-ano imobilizada e o consumo de água enquanto no critério de acidentes, que é uma grande preocupação da sociedade, o número de fatalidades é baixo. Ressalta-se que foram desconsideradas as mortes indiretas que normalmente são atribuídas ao acidente de Chernobyl para se ter uma

situação isonômica com a desconsideração do acidente de Shimantan para as hidrelétricas.

As principais contribuições para indicador de impacto composto para as fontes fósseis carvão e petróleo são morbidade, emissão de gases do efeito estufa e fatalidades em acidentes. Já para o gás natural, além dos impactos serem aproximadamente a metade em relação ao petróleo e carvão, as principais contribuições são emissão de gases do efeito estufa, morbidade, consumo de água e consumo de matéria prima (combustível). O peso arbitrado para mudanças climáticas foi 24 % e por isso o impacto composto da tecnologia gás natural é menor que o da fonte hidrelétrica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Como se pode constatar, a termoeletricidade nuclear pode contribuir para a complementação térmica do SIN agregando vantagens quanto a segurança energética, aspectos econômicos e de sustentabilidade socioambiental.

Pelo estudo de caso realizado, pode-se notar uma redução expressiva do custo total de complementação térmica quando se inclui Angra 3 no SIN. Com Angra 3 no SIN, temos como consequência segurança energética a um custo de geração mais baixo. A geração termonuclear representa a garantia de uma operação confiável e econômica haja vista a discrepância de valores de custo marginal de operação das usinas termoeletricas de outras fontes.

A fonte nuclear apresenta-se mais sustentável que as fontes fósseis do ponto de vista dos vários critérios considerados e também especificamente quanto a emissão de gases do efeito estufa. Os critérios considerados foram: emissão de gases do efeito estufa, consumo de água, consumo de matéria prima, área-ano imobilizada, morbidade durante a operação normal e fatalidades geradas durante acidentes.

Por estas razões conclui-se que a contribuição da energia nuclear para complementação térmica do SIN é relevante. Finalizando, esperamos que este estudo contribua para que as questões econômicas, estratégicas e de sustentabilidade da termoeletricidade nuclear sejam devidamente consideradas. A energia nuclear pode contribuir bastante para a segurança energética e confiabilidade do SIN.

Analysis of Nuclear Energy within the scope of the Thermoelectric Dispatch and the Sustainability: an overview of Nuclear Thermoelectricity and the insertion of Angra 3 in the National Interconnected System

ABSTRACT

This paper discusses the contribution of nuclear energy to the thermal complementation of the National Interconnected System, the issues related to the Angra 3 plant under construction and analyzes its contribution to the sustainability of the electric system. In this work the strategic value of the energy security provided by the thermoelectric sources and, in particular, by the nuclear alternative is evaluated. The cost analysis is based on the marginal cost of operation. The sustainability analysis considers 6 criteria: emission of greenhouse gases, immobilized area, consumption of raw material (fuel), water consumption, morbidity and fatalities in accidents. These criteria are considered important by the energy and industrial sectors and the society. We conclude that nuclear energy, providing thermal complementation to the Brazilian electric system, ensures energy security, reliable supply, lower marginal cost of operation and relevant contribution to its sustainability.

KEYWORDS: Angra 3. Energy security. Nuclear Energy. Socioeconomic sustainability. Thermoelectric dispatch.

NOTAS

Os coeficientes de impacto são retirados de CESARETTI (2010) e MOREIRA et al. (2015) e são apresentados nas Tabelas A1 e A2. Os valores foram retirados da literatura que apresentavam grande variação devido a origem e metodologia utilizada para a obtenção dos dados e condições de projeto de geração de energia. O valor apresentado é mais provável de acordo com a opinião de CESARETTI (2010). Os valores entre parênteses representam as variações encontradas na literatura para os coeficientes de impacto. Qualquer valor no intervalo pode ocorrer. Os dados levam em conta todo o ciclo de vida e cadeia produtiva das fontes de energia sempre que possível (CESARETTI, 2010; MOREIRA et al., 2015). Tal não ocorreu em dois casos. O uso de recursos naturais leva em conta apenas o combustível utilizado para a geração de energia. As fatalidades ocorridas durante acidentes são uma coleta de dados na mídia ao longo do século 20 para acidentes de proporções maiores.

Tabela A1 – Coeficientes de impacto para os critérios ambientais para as fontes de energia fósseis e nuclear (CESARETTI, 2010).

Tecnologia	σ_1 (kgC _{eq} /MWh)	σ_2 (m ² year/MWh)	σ_3 (kg/MWh)	σ_4 (m ³ /MWh)
Carvão	1100 (190 - 1300)	33 (5 - 140)	334 (334 - 654)	69 (60 - 78)
Petróleo	847 (520 - 1160)	11 (-)	250 (250 - 355)	31.5 (-)
Gás Natural	500 (250 - 1234)	11 (-)	287 (-)	35.3 (1 - 78)
Hidroelétrica	31 (0 - 410)	186 (2 - 2280)	0 (-)	26.5 (17 - 36)
Nuclear	18 (2 - 437)	346 (300 - 500)	0.02 (0.0003 - 0.02)	60 (-)

Fonte: CESARETTI, 2010

Legenda: σ_1 - Carbono Equivalente; σ_2 - Área-ano Imobilizada; σ_3 - Uso de Recursos Naturais; σ_4 - Uso de Água.

Tabela A2 – Coeficientes de impacto para os critérios sociais para as fontes de energia fósseis e nuclear (CESARETTI, 2010).

Tecnologia	σ_5 (Morbidade/TWh)	σ_6 (Fatalidade em Acidentes)
Carvão	225 (60 - 900)	0.32 (0.19 - 0.58)
Petróleo	161 (40 - 650)	0.47 (0.22 - 0.91)
Gás Natural	-	0.89 (0.23 - 0.94)
Hidroelétrica	30 (5 - 120)	0.28 (0.14 - 0.41)
Nuclear	0.22 (-)	0.19 (0.15 - 0.28)

Fonte: CESARETTI, 2010

Legenda: σ_5 - Morbidade; σ_6 - Fatalidade em Acidentes.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Dezembro terá bandeira tarifária vermelha no patamar 1**. In: Sala de Imprensa – ANEEL, 11 dez 2017. Disponível em:< http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/dezembro-tera-bandeira-tarifaria-vermelha-no-patamar-1/656877?inheritRedirect=false>, 2017.

BARRETTO, B. **Implantação da usina termonuclear de Angra 3**, Eletronuclear, Congresso Nacional Comissão Mista de Planos, Orçamentos Públicos e Fiscalização, 2016.

BITELLI, U., SANTOS, A., JEREZ, R., DINIZ, R., FANARO, L. C. C. B., ABE, A. Y., MOREIRA, J. M. L., FER, N., GIADA, M., FUGA, R. Experimental utilization of the IPEN/MB-01 reactor. **IGORR 9: Proceedings of the 9th Meeting of the International Group On Research Reactors**, (INIS-XA-C-030). International Atomic Energy Agency (IAEA), 2003.

CARAJILESCOV, P., MOREIRA, J. M. L. Aspectos técnicos, econômicos e sociais do uso pacífico da energia nuclear. **Ciência e Cultura**, 60, 33-36, 2008.

CESARETTI, M. A. **Comparative analysis among sources of electricity generation according to environmental, social and economic criteria**. Master Dissertation (em Português). Universidade Federal do ABC, Santo André, SP, Brazil, 2010.

COCHRAN, R. G.; TSOLFANIDIS, N. **The nuclear fuel cycle: analysis and management**. Ed. American Nuclear Society. La Grange Park, IL, USA, 1999.

DEUSA M. L. D. ; SOUZA, R. C. **Séries temporais aplicadas ao planejamento da operação do sistema interligado nacional – SIN**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica)-Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

ELETRONUCLEAR. **Angra 3: estudo demonstra que reajuste da tarifa irá reduzir preço da energia para consumidor**, 2018.

EPE. **Matriz Energética e Elétrica**. Empresa de Pesquisa Energética, 2018. Disponível em:<<http://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acessado em 2018.

GOLDEMBERG, J., LUCON, O. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento**, 3^o ed. Ed. USP, São Paulo, SP, Brazil, 2008.

GRAMULIA JUNIOR, J. **Uma abordagem baseada em Algoritmos Genéticos para gerenciamento e controle de transferência não natural de água entre rios em contribuição ao Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos**. Tese de doutorado – Universidade Federal do ABC – UFABC. Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas – CECS. Programa de pós-graduação em Energia, 2014.

LAMARSH, J. R., BARATTA, A. J. **Introduction to Nuclear Engineering**, 3rd ed. Prentice Hall, USA, 2001.

La ROVERE, E. L., SOARES, J. B., OLIVEIRA, L. B., LAURIA, T. Sustainable expansion of electricity sector: Sustainability indicators as an instrument to support decision making. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 14, 422–429, 2010.

LOKEN, E. Use of multicriteria decision analysis methods for energy planning problems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 11, 1584-1595, 2007.

MAIORINO, J. R., MOREIRA, J. M. L. Recycling and transmutation of spent fuel as a sustainable option for the nuclear energy development. **Journal of Energy and Power Engineering** 8, 1505-1510, 2014.

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. **Annals of Nuclear Energy**, 102, 47-55, 2017.

MAIORINO, J. R., PERROTTA, J. A., YAMAGUCHI, M., MOREIRA, J. M. L., NAKATA, H., YORIYAZ, H., KOSAKA, N., COELHO, P. R. P., MENDONÇA, A. G., FANARO, L. C. C. B., Projeto nuclear da unidade critica IPEN/MB-01. In: **Encontro Nacional de Física de Reatores e Termo-hidráulica - 1989**, Recife, PE, Editora Universitária UFPE, v. 1. p. 311-323, 1989.

MARIZ, C. H. C. “Novas Usinas Nucleares no Brasil: Uma necessidade para o desenvolvimento do país”. In: **Publicações Técnicas - Associação Brasileira de Energia Nuclear** (Aben), 2014.

MOREIRA, J., LEE, J. C. Accuracy of the modal-local method for reactivity determination. **Nuclear Science and Engineering**, 98,3,244-254, 1988.

MOREIRA, J. M. L., GALLINARO, B., CARAJILESCOV, P. Construction time of PWRs. **Energy Policy**, 55, 531-542, 2013.

MOREIRA, J. M. L.; CESARETTI, M. A.; CARAJILESCOV, P.; MAIORINO, J. R. **Sustainability deterioration of electricity generation in Brazil**. *Energy Policy*, 87, 334-346, 2015.

MOREIRA, J. M. L., PINTO, R. T. S. Instituições para fomentar a integração do setor elétrico na América do Sul. **Revista Carta Internacional**, 13, 148-173, 2018.

ONS. **Histórico da Operação: Custo Marginal de Operação (CMO)**. Disponível em: <<http://ons.org.br/Paginas/resultados-da-operacao/historico-da-operacao/cmo.aspx>>, Acessado em 2018.

QUINTELLA, C. O. V. **Energia Nuclear**, FGV Energia, ISSN 2358-5277, Ano 3, nº6, Abril de 2016.

SINGH, R. K., MURTY, H. R., GUPTA, S. K., DIKSHIT, A. K. An overview of sustainability assessment methodologies. **Ecological Indicators** 9, 189-212, 2010.

SOUZA, R. G.P., MOREIRA, J. M. L. Power peak factor for protection systems—experimental data for developing a correlation, **Annals of Nuclear Energy**, 33, 609-621, 2006.

SOVACOOOL, B. K. The costs of failure: A preliminary assessment of major energy accidents, 1907–2007. **Energy Policy** 36, 1802–1820, 2008.

VEIGA, J. E. **Desenvolvimento Sustentável, o desafio do século XXI**. Ed. Garamond, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2006.

ZIJP, M. C., HEIJUNGS, R., van der VOET, E., van de MEENT, D., HUIJBREGTS, M. A. J., HOLLANDER, A., POSTHUMA, L. An identification key for selecting methods for sustainability assessments. **Sustainability** 7, 2490-2515, 2015.

Recebido: 10 mar. 2019.

Aprovado: 26 jun. 2019.

DOI: 10.3895/rts.v15n37.9802

Como citar: OTOBE JUNIOR, R. F.; *et al.* Análise da energia nuclear no âmbito do despacho termoeletrônico e da sustentabilidade: um panorama da termoeletricidade nuclear e a inserção de Angra 3 no sistema interligado nacional. **R. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 15, n. 37, p. 576-594, jul./set. 2019. Disponível em: <<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/9802>>. Acesso em: XXX.

Correspondência:

Reinaldo Fugitaro Otobe Junior

-

Direito autorial: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

