

## AVALIAÇÃO AMBIENTAL INTEGRADA DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA VIA ENERGIA NUCLEAR

Joana Rohr Etges (\*), Tiago Oscar da Rosa, Gabriel Fernandes Sales, Taís Soares de Carvalho, Elias Lira dos Santos Júnior

\* Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, [joanaetges@alunos.utfpr.edu.br](mailto:joanaetges@alunos.utfpr.edu.br)

### RESUMO

A energia elétrica gerada por fonte nuclear é obtida pela fissão de átomos de urânio que geram calor para o aquecimento da água em uma caldeira, que a partir do vapor gerado aciona as turbinas da usina dando partida a um gerador elétrico. Contudo, para que esse processo ocorra é necessário um conjunto de etapas/fases para a obtenção da matéria prima, que no caso o urânio é denominado ciclo do combustível nuclear. Essas etapas consistem na extração em reservas naturais - mineração, conversão, enriquecimento, reconversão, fabricação de pastilhas e combustível e a geração da energia elétrica, ou seja, em cada uma dessas etapas tem como entrada matéria prima e energia e como saída a geração de resíduos. Desta forma, esse trabalho objetivou a avaliação de impactos ambientais nas etapas de produção e seus efeitos cumulativos na atividade como um todo. Para isso, foram levantados e classificados os impactos ambientais pela expertise de especialistas e por estudos anteriormente desenvolvidos em áreas similares, para cada uma das fases da atividade e em cada meio (físico, biótico e socioeconômico). Como resultado, foram identificados 204 impactos ambientais para atividade sendo 30,4% na mineração; 13,2% na conversão; 22,5% nas atividades de enriquecimento, reconversão, fabricação de combustível e pastilhas; 21,1% na operação e 12,7% na desativação. Considerando o efeito cumulativo dos impactos a atividade apresentou 83,3% de impactos negativos e uma intensidade de impacto ambiental da ordem de -66,7% atribuindo a mesma um significativo potencial degradador/poluidor.

**PALAVRAS-CHAVE:** Energia nuclear, impactos ambientais, etapas, cumulativos.

### INTRODUÇÃO

A Teoria Atomística foi originada, inicialmente, no século V antes de Cristo, pelos filósofos gregos Leucipo e Demócrito, com toda a exploração da química por trás, contendo a descoberta das moléculas, átomos, elétron, raios de Becquerel, raios gama, partículas beta, radiações eletromagnéticas e todas as contribuições necessárias para chegar aos conhecimentos atuais (CNEN, 2015).

Sabe-se ainda que a energia nuclear não é vista com bons olhos atualmente, em parte devido ao grande acidente ocorrido em Hiroshima e Nagasaki em 1945, e pelo uso inadequado de bombas nucleares em interesses políticos e militares. Entretanto, muitos ainda buscam mostrar que a energia nuclear ainda pode ser vista como uma proposta que tem mais benefícios do que malefícios, com o objetivo de melhorar cada vez mais sua segurança.

A produção de energia nuclear basicamente tem dois meios de ocorrer, fusão nuclear ou fissão nuclear. A primeira é a junção de dois núcleos e a segunda ocorre com a quebra do núcleo de um átomo em menores que liberam grande quantidade de energia. Porém, para o urânio produzir energia, ele deve ser enriquecido e, para isso, utiliza-se a tecnologia da ultracentrifugação (SILVA E MARQUES, 2006).

O combustível nuclear passa por um ciclo na qual transforma o minério de urânio em energia nos reatores nucleares. Esse ciclo é formado por sete etapas e processos. A primeira etapa é a mineração e beneficiamento que resulta na concentração de urânio (*yellowcake*). A segunda etapa é a conversão, nessa fase o concentrado de urânio é dissolvido e purificado, e então convertido para o estado gasoso (INB, 2020).

As duas próximas etapas são constituídas pelo enriquecimento e reconversão, onde ocorre o aumento da concentração do urânio, e, conseqüentemente, o gás enriquecido é reconvertido em pó de dióxido de urânio (UO<sub>2</sub>). O quinto e sexto processo são definidos pela fabricação de pastilhas e respectivamente a formação de combustíveis nucleares. Por fim, a última etapa é responsável pela geração de energia que ocorre através da fissão dos átomos de urânio que estão contidos no combustível nuclear dentro do núcleo do reator que gera calor, aquecendo a água, e transformando-a no vapor que faz movimentar as turbinas (INB, 2020).



**Figura 1: Ciclo do combustível nuclear. Fonte: INB (2020).**

Entretanto, existem desvantagens neste processo, sendo a mais preocupante delas a geração de resíduos, pois ainda não existe nenhum plano definitivo para o mesmo, sendo que podem permanecer no ambiente por até 300 anos tendo um alto e baixo nível de radioatividade, dependendo da linha de produção (ALVIM et. al., 2007).

Não existe nenhum programa nuclear para dar um destino adequado e ambientalmente correto para o rejeito nuclear. Deve-se ainda considerar o fato de que tanto desastres naturais como falhas humanas podem acontecer, como também podem ser alvo de ataques terroristas com interesses políticos, militares e territoriais.

Atualmente, no mundo, estão em operação 442 reatores nucleares voltados para a geração de energia em 31 países, cerca de 17% da geração elétrica mundial é de origem nuclear, a mesma proporção do uso de energia hidroelétrica e de energia produzida por gás (GONÇALVES E RUIZ, 2016).

O Brasil é um dos poucos países do mundo a dominar todo o processo de fabricação de combustível para usinas nucleares (BIODIESELBR, 2006). As reservas de  $U_3O_8$  chegam a 245.188 toneladas e estão distribuídas pelos estados da: Bahia, Ceará, Paraná e Minas Gerais, entre outros. Mas este valor pode evoluir, pois apenas 33% do território nacional foi pesquisado.

Ainda de acordo com Gonçalves e Ruiz (2016), “uma usina nuclear gera mais que o dobro de energia do que uma eólica com a mesma capacidade instalada. Além disso, a energia gerada por uma usina nuclear raras vezes sofre com flutuações imprevisíveis e, por isso, tem capacidade de fornecer energia de base, que deve ser contínua, barata e de alta confiabilidade”.

Segundo Valera (2012), Avaliação Ambiental Integrada (AAI) é um estudo capaz de conhecer especificamente os efeitos sinérgicos e cumulativos resultantes dos impactos ambientais ocasionados pelo conjunto de empreendimentos em planejamento, implantação e operação em uma determinada área (uma bacia hidrográfica, exemplo mais comum).

Esses efeitos sinérgicos e cumulativos são previstos na Resolução nº 01/1986 (Artigo 6, inciso II) do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA dentro da Avaliação de Impacto Ambiental. O termo integrado da expressão AAI refere-se à interação dos efeitos dos diferentes empreendimentos e/ou atividades e à interação entre as diferentes variáveis que caracterizam os impactos ambientais, visando identificar e avaliar os efeitos sinérgicos e cumulativos resultantes dos impactos ambientais ocasionados pelo conjunto de fases de uma cadeia produtiva (VALERA, 2012).

A cumulatividade dos impactos refere-se à interação aditiva dessas alterações em um dado espaço ao longo do tempo. O processo de acumulação pode ser interativo ou aditivo, com acumulação no tempo e/ou no espaço (VALERA, 2012).

## OBJETIVO

Avaliar o processo produtivo da energia nuclear no Brasil, desde a extração do material radioativo até a geração de energia elétrica. Possibilitando mensurar especificamente os impactos ambientais gerados em toda cadeia produtiva e o potencial poluidor/degradador dessa importante atividade econômica, sendo capaz de apontar a contribuição benéfica e/ou maléfica das fases produtivas sobre o meio ambiente e seus efeitos cumulativos.

## METODOLOGIA

Este trabalho foi dividido em quatro fases, sendo elas: (1) identificação das etapas da matriz de energia nuclear brasileira; (2) caracterização das localidades onde ocorrem as etapas da produção de energia nuclear no Brasil; (3) identificação, classificação e avaliação dos impactos ambientais gerados nas etapas produtivas de energia nuclear; e, por último, (4) avaliação integrada dos impactos levantados, cabendo, especificamente nesse trabalho a avaliação de impacto ambiental em cada uma das fases e a avaliação integrada das fase considerando, assim, a integralidade da atividade poluidora.

As etapas da produção de energia nuclear, no território nacional são: mineração, conversão, enriquecimento, reconversão, fabricação de pastilhas e fabricação de combustível nuclear, geração e produção de energia elétrica.

As fases de enriquecimento, reconversão, produção de pastilhas, fabricação do combustível nuclear, como ocorrem em um mesmo local, e por assim sendo mesma área, a avaliação se deu de maneira conjunta, sendo aqui denominada de atividades múltiplas.

Os impactos de cada etapa foram listados por especialistas em cada área e por convergência de estudos ambientais em atividades similares, em seguida os mesmos foram classificados quanto ao tipo: positivo e negativo.

Após a classificação os dados foram tabulados em planilha eletrônica de Excel®, organizados por etapa do processo de produção/geração e descritos o percentual de ocorrência em cada uma das fases da cadeia produtiva de energia nuclear, em cada meio e em cada compartimento.

Em seguida foram considerados os impactos, positivos e negativos, em cada etapa de produção, compartimento ambiental e seus respectivos componentes, sendo mensurados de forma integrada contabilizando-os ao arcabouço total dos impactos gerados pela atividade produtiva nas suas mais diferentes etapas e fases.

A graficação se deu na proporcionalidade dos impactos (percentual negativo e positivo), sendo esses: impactos do meio avaliado em relação a ele mesmo para cada uma das fases de produção e impactos em relação ao meio, de cada fase produtiva, sobre a atividade de geração de energia com um todo

## RESULTADOS OBTIDOS

Dentre os dados coletados e os resultados obtidos por meio da análise de gráficos, o primeiro fator explorado foi a avaliação dos impactos ambientais das etapas de geração de energia elétrica via energia nuclear no território nacional, apresentados na Figura 2.

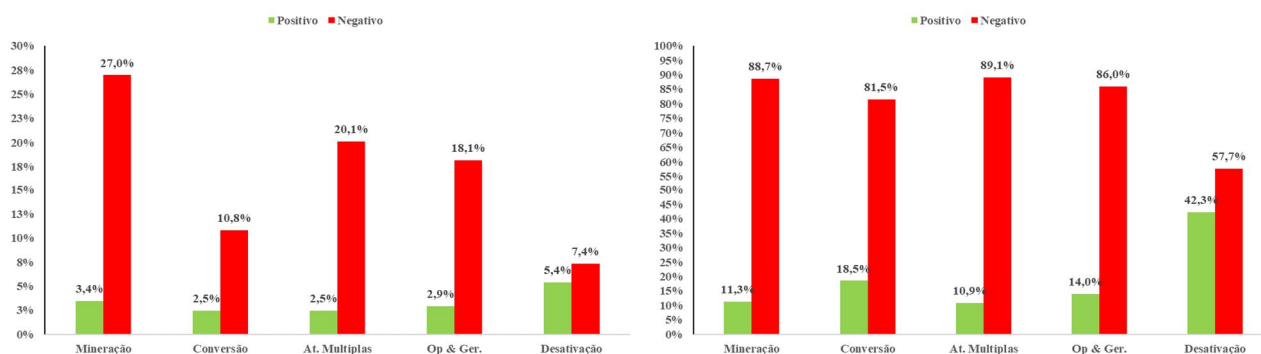


Figura 2: IA da Cadeia Produtiva de Energia Nuclear Brasileira. Fonte: Autoria própria (2020).

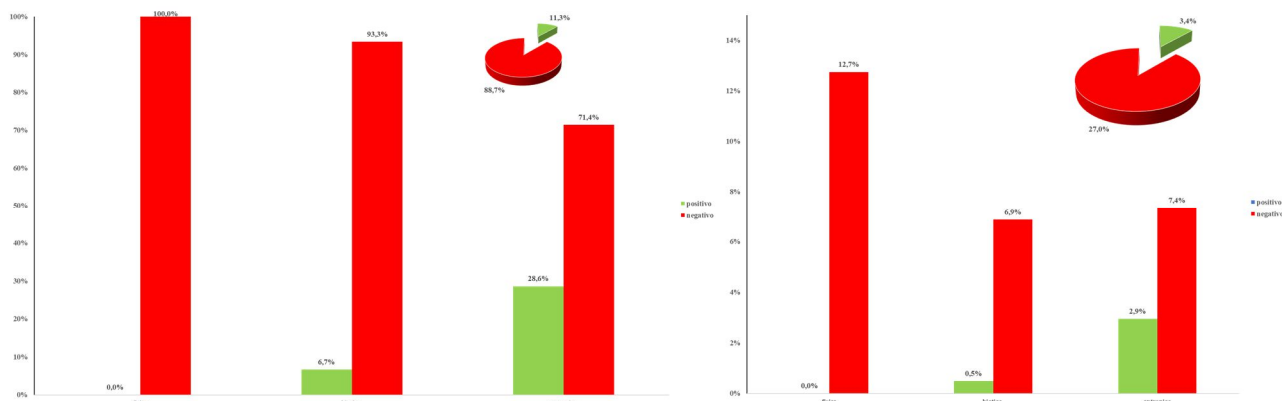
Foram identificados 204 impactos ambientais nas diferentes etapas de produção de energia nuclear, dos quais 30,4% na fase de mineração (62); 13,2% na conversão (27); 22,5% nas atividades múltiplas (46); 21,1% na operação e geração (43) e, finalmente, 12,7% na desativação (26).

A mineração contribui com 27% dos impactos negativos, enquanto a conversão com 10,8%, as atividades múltiplas apresentam 20,1%, a operação/geração entra com 18,1% e a desativação conta com 7,4% dos IA negativos, desta forma, acusa-se a mineração como uma das etapas mais impactantes no processo de geração de energia nuclear.

Isso se deve ao fato das significativas degradações sobre os compartimentos biogeambientais, sobremaneira, ao solo, a água e a alteração do cenário da paisagem. Dos 62 impactos ambientais levantados (IAL) para a mineração 88,7% são negativos, na conversão dos 27 IAL 81,5% são negativos, seguindo essa linha temos 89,1% nas atividades múltiplas de 46 IAL e 57,7% na desativação dos 26 IAL.

Acusa-se à similaridade das etapas quanto a proporcionalidade dos impactos negativos, exceto na etapa de desativação e apresenta um equilíbrio entre positivo e negativo, face a dinâmica da fase que possibilita a recuperação da área e o monitoramento ambiental como ferramenta de controle e preservação do meio.

Um detalhamento dos IA's em cada uma das fases, bem como, a avaliação global do impacto na cadeia produtiva é apresentada a seguir. Assim, a Figura 3 apresenta os impactos ambientais referentes à atividade de mineração no processo de geração de energia nuclear no território brasileiro.



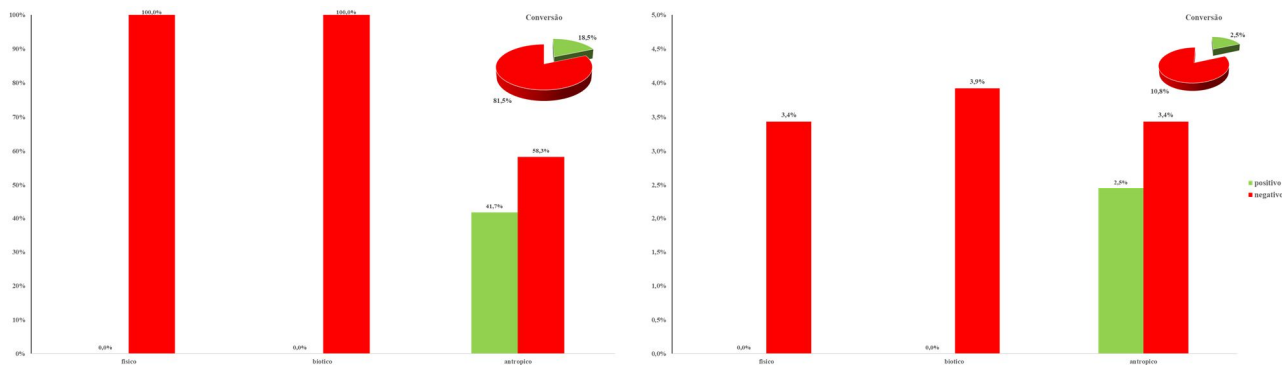
**Figura 3: Impactos ambientais gerados na Mineração. Fonte: Autoria própria (2020).**

Verifica-se que na etapa de mineração mais de 80% dos impactos são classificados como negativos, dos quais o meio físico e biótico apresentam os maiores percentuais, 100% e 93,3%, respectivamente, enquanto o meio antrópico apresenta 88,7% de adversidade.

Quanto ao meio biótico existe apenas um impacto que é considerado positivo (6,7%), sendo esse: a capacidade de resiliência do ambiente, os demais impactos positivos se encontram apenas no meio socioeconômico (28,6%) dado pelo incremento da economia local a partir da geração de emprego e renda. Considerando os aspectos adversos no meio físico o impacto mais relevante é o depósito de moléculas radioativas que são dispostas no solo (DEL REI *et. al.*, 2014).

Quanto ao meio biótico o impacto de maior relevância detectado foi a alteração faunística e florística, ou seja, a partir da supressão de vegetação tem-se o impacto secundário que é a alteração do cenário da paisagem. E no meio socioeconômico a alteração do cotidiano é o impacto com maior significância no compartimento antrópico.

Em seguida é apresentado nos gráficos da Figura 4, os impactos ambientais gerados na etapa de conversão.



**Figura 4: Impactos ambientais gerados na etapa de conversão. Fonte: Autoria própria (2020).**

Dos 13,2% dos impactos gerados na etapa de conversão 81,5% dos impactos são negativos e 18,5% são positivos. Novamente os impactos positivos aqui listados são de origem socioeconômica, sendo a geração de emprego e de tributos os impactos diretamente ocasionados nessa etapa da cadeia produtiva de energia nuclear.

Os impactos negativos listados no meio físico (100%), na conversão, contribuem com 3,4% de adversidade da atividade poluidora (produção de energia nuclear) que tem nas emissões atmosféricas, com lançamento de gases do efeito estufa (GEE) sua maior criticidade.

Em se tratando do meio biótico temos a alteração da população florística com o impacto de maior significância, onde esse compartimento colabora com 3,9% dos malefícios da atividade de geração de energia, enquanto que no meio socioeconômico a contribuição é de 3,4% com maior relevância a modificação do cenário da paisagem, seguido, do aumento do risco de acidentes de trânsito.

Mesmo com o equilíbrio entre as contribuições dos diversos meios para a fase de conversão a contribuição positiva do meio socioeconômico, acaba por reduzir esse fenômeno de equilíbrio tornando-o um compartimento com menor IA.

Nos processos de atividades múltiplas: enriquecimento, reconversão, fabricação de pastilhas e de combustível ocorre a capacitação do urânio para a geração de energia elétrica. A avaliação dos impactos ocorridos nessa etapa produtiva é mostrada na Figura 5.

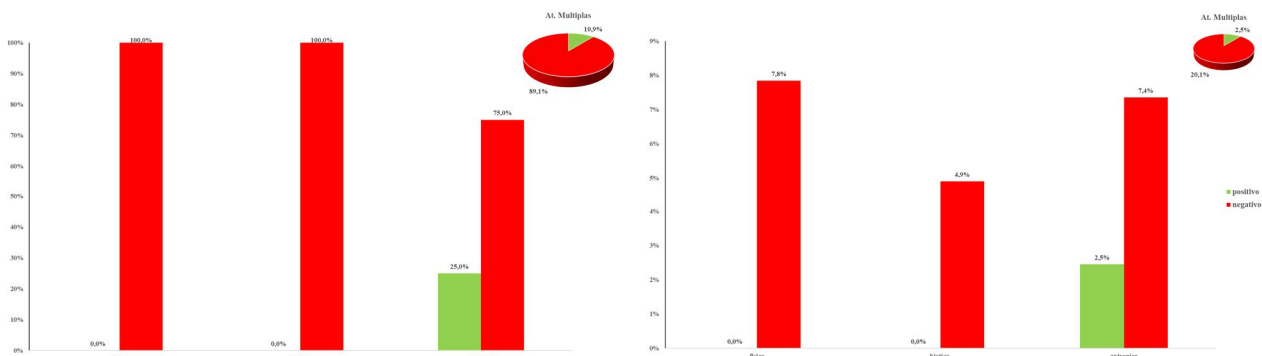


Figura 5: Impactos ambientais gerados na etapa de atividades múltiplas. Fonte: Autoria própria (2020).

Essa etapa apresentou 89,1% dos impactos negativos 10,9% positivos. Apenas o meio socioeconômico apresentou impactos positivos (25%), sendo eles geração de empregos e tributos e incremento da renda local. Os impactos negativos no meio físico, que foram a totalidade dos IAL (100%) - para esse meio nessa fase - cita-se o vazamento de urânio (UF<sub>6</sub>), que pode ocorrer tanto no compartimento ar, quanto água.

Quanto ao meio biótico os impactos de maior relevância estão associados a fauna e flora. Já no meio socioeconômico os impactos negativos (75%) se repetem, modificação do cenário da paisagem, aumento do risco de acidentes de trânsito e alteração do cotidiano, análogo ao obtido em outras etapas da produção.

Por último, a Figura 6, apresenta os impactos ambientais da etapa de geração e produção de energia nuclear, que está localizada na cidade de Angra dos Reis – RJ.

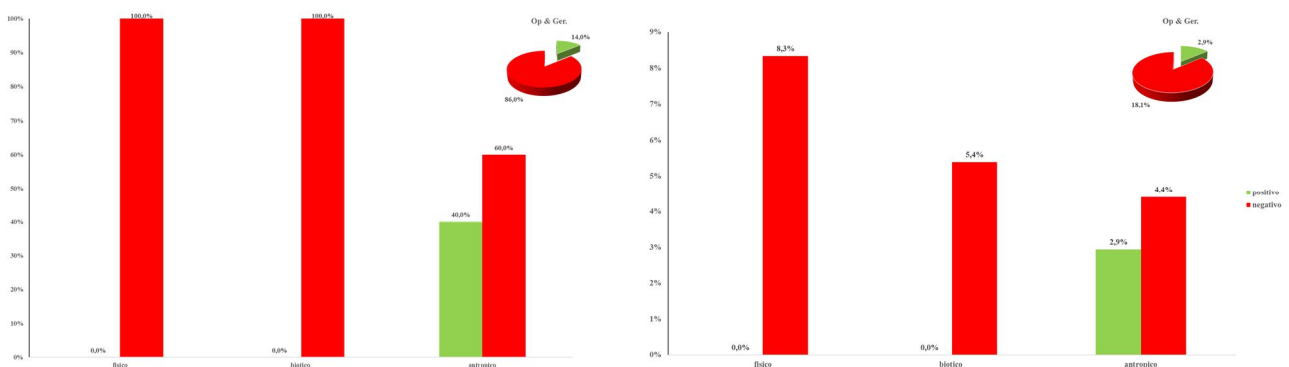


Figura 6: IA's gerados na etapa de operação e geração de energia nuclear. Fonte: Autoria própria (2020).

Dos 43 impactos listados nessa fase 86,0% são negativos e 14% são positivos, sendo esses descritos no meio socioeconômico, especificamente, no compartimento econômico, onde os impactos são similares a fases anteriores. Um importante impacto positivo com ocorrência no meio social é o desenvolvimento tecnológico.

Para a geração e produção da energia nuclear, os impactos negativos que foram listados no meio físico (100%), similar ao meio biótico, e que possuem maior significância são: alteração da dinâmica do relevo original e vazamento das piscinas de armazenamento, sendo respectivamente no compartimento solo e água.

No meio biótico o impacto de maior relevância negativa é a perturbação e afugentamento da fauna e, por fim, no meio socioeconômico tem-se a alteração da paisagem e do cotidiano dos indivíduos da população como impactos que possuem maior significância.

## CONCLUSÃO

A integralidade da avaliação acerca dos impactos ambientais advindos da cadeia produtiva da energia nuclear no Brasil aponta para a mineração como a atividade com maior potencial poluidor (30,4%), seguido das aqui denominadas atividades múltiplas e operação/geração com 22,5% e 21,1%, respectivamente.

A conversão aponta para um potencial de impacto da ordem de 13,2%, ficando a desativação aqui não explicitada nesse trabalho, mas fruto dessa pesquisa, com uma monta de 12,7%.

Ainda na linha cumulativa dos impactos ambientais avaliados na geração de energia nuclear 83,3% dos impactos são negativos e 16,7% são positivos, o que atribui a atividade um grau de intensidade de impacto ambiental de -66,7%, denotando a atividade um significativo potencial degradador/poluidor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alvim, C. F. et al. **Energia nuclear em um cenário de trinta anos**. Estudos avançados, São Paulo, v. 21, n. 59, p. 197-220, abr. 2007. Disponível em: [https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0103-40142007000100016](https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142007000100016). Acesso em: 11 set. 2020.
2. BiodieselBR. **Energia Nuclear no Brasil**. Fev, 2006. Disponível em: <https://www.biodieselbr.com/energia/nuclear/brasil-energia-nuclear>. Acesso em: 27 set. 2020.
3. BRASIL, CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente - Resolução Nº 01. Dispõe sobre critérios básicos e diretrizes gerais para a avaliação de impacto ambiental. 23 de janeiro de 1986.
4. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **A História da Energia Nuclear**. Apostila Educativa. Rio de Janeiro: 2015. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/images/cnen/documentos/educativo/historia-da-energia-nuclear.pdf>. Acesso em: 12 set. 2020.
5. Gonçalves, F., Ruiz, R. H. **Energia Nuclear**. Praia de Botafogo – RJ. FGV Energia, ano 3, n. 6, abr. 2016. Disponível em: [https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/pdf\\_fgv-energia\\_web.pdf](https://fgvenergia.fgv.br/sites/fgvenergia.fgv.br/files/pdf_fgv-energia_web.pdf). Acesso em: 06 set. 2020.
6. Indústrias Nucleares do Brasil (INB). **Ciclo do Combustível Nuclear**. 2020. Disponível em: <https://bit.ly/3jh8W0N>. Acesso: 12 set. 2020.
7. Del Rei, A. G. F. et al. **Contaminação da água por urânio em Caetité-BA**. Educação Pública. 2014. Disponível em: <https://educacaopublica.cecierj.edu.br/artigos/14/7/contaminacao-da-agua-por-uranio-em-caetite-ba-> Acesso em: 09 de set de 2020.
8. Silva, P. L. O., Marques, A. L. F. **Enriquecimento de urânio no brasil. Desenvolvimento da tecnologia por ultracentrifugação**. Economia e energia, março, 2006. Disponível em: [https://ecen.com/eee54/eee54p/enriquec\\_uranio\\_brasil.htm](https://ecen.com/eee54/eee54p/enriquec_uranio_brasil.htm). Acesso em: 11 set. 2020.
9. Valera, Carlos Alberto. **A avaliação ambiental integrada dos impactos cumulativos e sinérgicos dos empreendimentos minerários**. Ministério Público de Minas Gerais. 2012.