



REVISTA ELETRÔNICA  
CIENTÍFICA DA UERGS

## Energia nuclear: uma opinião da sua relação com a sustentabilidade

### **Vinicius Immich**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).  
E-mail: [viniciusimmich@gmail.com](mailto:viniciusimmich@gmail.com), <http://lattes.cnpq.br/3694058499552344>

### **Fernanda Hart Weber**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).  
E-mail: [fernanda-hart@uergs.edu.br](mailto:fernanda-hart@uergs.edu.br), <http://lattes.cnpq.br/8895641923425158>

### **Barbara Estevo Clasen**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).  
E-mail: [barbara-clasen@uergs.edu.br](mailto:barbara-clasen@uergs.edu.br), <http://lattes.cnpq.br/4618772929333729>

### **Luciane Sippert Lanzanova**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).  
E-mail: [luciane-sippert@uergs.edu.br](mailto:luciane-sippert@uergs.edu.br), <http://lattes.cnpq.br/0010806287467881>

### **Mastrângello Enívar Lanzanova**

Universidade Estadual do Rio Grande do Sul (UERGS).  
E-mail: [mastrangello-lanzanova@uergs.edu.br](mailto:mastrangello-lanzanova@uergs.edu.br), <http://lattes.cnpq.br/9256571296288965>

ISSN 2448-0479. Submetido em: 04 abr. 2023. Aceito: 07 jun. 2023.

DOI: <http://dx.doi.org/10.21674/2448-0479.92.143-153>

## Resumo

Com o objetivo de analisar, através de revisão bibliográfica, os aspectos ambientais da utilização da energia nuclear como matriz energética e apresentar a opinião dos autores em base destes, o trabalho foi elaborado contendo o conceito de energia nuclear e o funcionamento de uma usina, bem como aspectos ambientais, segurança e monitoramento, licenciamento ambiental, rejeito e um comparativo com outras unidades geradoras de energia. Em vista do desafio de diminuir as emissões atmosféricas globais e ao mesmo tempo assegurar o atendimento ao crescimento da demanda energética mundial, a energia nuclear apresenta potencial para diversificar a matriz energética global. A utilização isolada de energias tradicionais já desenvolvidas, como petróleo, carvão, gás natural, hidrelétrica, biomassa e energia eólica impacta o planeta pela emissão de gases de efeito estufa, contaminantes, ocupação de grandes áreas e demais impactos ambientais originados pelo seu funcionamento. Como o desafio global é atender ao objetivo de desenvolvimento sustentável nº 7, estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), que busca reduzir as emissões atmosféricas e garantir acesso à energia renovável e sustentável, a energia nuclear apresenta-se como uma ferramenta limpa de diversificação da matriz energética global. Porém, não deve ser vista como a única solução para os problemas energéticos de um país, devendo fazer parte de um programa diverso de produção energética junto com a produção e utilização de outras fontes renováveis de energia, como a eólica e a biomassa.

**Palavras-chave:** Energia nuclear; revisão; sustentabilidade.

## Abstract

### **Nuclear energy: an opinion on its relationship with sustainability**

With the objective of analyzing and presenting through bibliographies the environmental aspects of the use of nuclear energy as an energy matrix and presenting the author's opinion based on these, this article was



written taking into consideration the concept of nuclear energy and operation of a power plant, environmental aspects, safety and monitoring, environmental licensing, waste and a comparison with other energy generating units. In view of the challenge of reducing global atmospheric emissions and at the same time ensuring that the growth in world energy demand is met, nuclear energy has the potential to diversify the global energy matrix. The isolated use of traditional energies already developed such as oil, coal, natural gas, hydroelectric, biomass and wind energy are widely used and produce energy, but on the other hand, they impact the planet through the emission of greenhouse gases, contaminants, occupation of large areas and other environmental impacts caused by its operation. As the global challenge is meeting objective N° 7, sustainable development, established by the United Nations (UN), which aims to reduce atmospheric emissions and ensure access to renewable and sustainable energy, nuclear energy presents itself as a clean tool diversification of the global energy matrix, but it should not be seen as the only solution to a country's energy problems, but should be part of a diverse energy production program together with the production and use of other renewable energy sources, such as wind and biomass.

**Keywords:** Nuclear energy; review; sustainability.

## Resumen

### Energía nuclear: una opinión de su relación con la sostenibilidad

Con el objetivo de analizar, a través de revisión bibliográfica, los aspectos ambientales del uso de la energía nuclear como matriz energética y presentar la opinión del autor basada en estos, se elaboró el trabajo que contiene el concepto de energía nuclear y la operación de una central, además de aspectos ambientales, seguridad y vigilancia, licenciamiento ambiental, residuos y comparación con otras unidades generadoras de energía. Ante el desafío de reducir las emisiones atmosféricas globales y al mismo tiempo asegurar que se satisfaga el crecimiento de la demanda mundial de energía, la energía nuclear tiene el potencial de diversificar la matriz energética global. El uso aislado de energías tradicionales ya desarrolladas, como el petróleo, el carbón, el gas natural, la hidroeléctrica, la biomasa y la eólica impacta al planeta a través de la emisión de gases de efecto invernadero, contaminantes, ocupación de grandes superficies y otros impactos ambientales causados por su operación. Siendo el desafío mundial cumplir con el objetivo de desarrollo sostenible N° 7, establecido por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), que busca reducir las emisiones atmosféricas y garantizar el acceso a energías renovables y sostenibles, la energía nuclear se presenta como una herramienta de diversificación de la matriz de energía global. Sin embargo, no debe verse como la única solución a los problemas energéticos de un país, sino que debe ser parte de un programa diverso de producción de energía junto con la producción y uso de otras fuentes de energía renovables, como la eólica y la biomasa.

**Palabras clave:** Energía nuclear; revisión; sostenibilidad.

## Introdução

A energia que sustenta a atividade humana é principalmente a energia elétrica. Tornou-se indispensável devido às suas incontáveis formas de uso e também pela grande eficiência de geração (ESCANHOELA; GAIANÊ; LIMA, 2019). Historicamente, ocorreu a predominância do uso de combustíveis fósseis e/ou minerais como matriz energética, estes têm gerado efeitos ambientais negativos, como a emissão de gases de efeito estufa (NASCIMENTO; MENDONÇA; CUNHA, 2012). Deste modo, é cada vez mais comum em muitos países, devido às políticas governamentais motivadas normalmente pelas mudanças climáticas e preocupações com a segurança energética, o estímulo aos recentes investimentos em energia renovável (GALLINA, 2011).

Um ponto crucial dentro das políticas públicas é a escolha de uma estratégia de fornecimento de energia eficaz e abrangente (ESCANHOELA; GAIANÊ; LIMA, 2019). Nesse contexto, a diversificação da matriz energética de um país, demonstra-se como um fator decisivo para a implantação de novas usinas geradoras de energia.

Tendo em vista a necessidade de diminuir a quantidade e intensidade dos impactos negativos, deve-se analisar a viabilidade de implantação para cada caso em particular. Uma das opções para essa diversificação



tem sido a fonte nuclear, que já é utilizada em muitos países. No Brasil, existem 3 usinas na cidade de Angra dos Reis, onde apenas duas estão em funcionamento e a terceira ainda prossegue em construção, sem previsão exata de término (MORAES, 2022).

Energia nuclear é aquela proveniente de uma reação nuclear, ou seja, de processos de transformação de núcleos atômicos (CUNHA; ANJOS, 2016), tendo como princípio a modificação da composição do núcleo atômico de um elemento, possibilitando a transformação em outros elementos, sendo o mais interessante iniciar a reação mediante técnicas de bombardeamento de nêutrons (HEILBRON; MORO; XAVIER, 2006).

Para aproveitar a energia nuclear, era necessário aprender a usá-la. Isso poderia ser feito criando uma divisão de um núcleo com muitos prótons e nêutrons, alcançado através da aplicação de nêutrons. Feito isso, os átomos se fragmentariam em dois menores, resultando na liberação de energia térmica (CARDOSO, 2012).

Existem aspectos relevantes que devem ser levados em consideração no momento de um projeto de instalação de uma unidade geradora de eletricidade. Estes devem ser minimamente entendidos para que a forma de produção seja economicamente viável, com baixos custos de implantação, manutenção e operação.

Além disso, emissões de gases, desmatamento, realocação de seres vivos presentes nas áreas de construção e alterações no ecossistema precisam ser mensurados, pois, sabendo das dimensões territoriais dos países, é possível adaptar fontes de geração adequadas às condições de cada um conforme as demandas internas de energia.

Outro grande questionamento sobre energia nuclear, no que diz respeito à segurança e geração de resíduos perigosos, ocorre pela população que teme quaisquer operações que envolvam o termo nuclear em função da utilização desse tipo de energia para fins bélicos e pelo fato de alguns acidentes terem ocorrido em usinas no passado. Logo, existe uma resistência que precisa ser superada através de cuidados rigorosos com qualquer processo que envolva trabalhos de perfil nuclear, como Souza e Lima (2019) comentam em seu estudo.

Guimarães e Mattos (2010), citam algumas contribuições significativas da energia nuclear para o desenvolvimento sustentável, sendo esses: combustível disponível por muitos séculos, resultados em termos de desempenho e segurança operacional excelentes e com tendências à melhoria contínua, impacto ambiental limitado, seu uso preserva recursos fósseis de grande valor para as gerações futuras, custos competitivos e declinantes com o avanço tecnológico e baixo volume de rejeitos, permitindo um gerenciamento seguro, isto é, podem ser isolados do público e do ambiente a longo termo. Para estudar este tema desenvolveu-se este trabalho que teve o objetivo de apresentar uma opinião baseada em revisão bibliográfica dos aspectos ambientais da utilização da energia nuclear como matriz energética.

## Material e Métodos

Utilizou-se como ferramenta de estudo a revisão bibliográfica sobre os aspectos ambientais da utilização da energia nuclear como matriz energética, após elencados os objetivos específicos de: 1) Compreender os pontos favoráveis e desfavoráveis da geração e utilização da Energia Nuclear; 2) Comparar a Energia Nuclear com outras matrizes energéticas, seus aspectos ambientais (principalmente atmosférico) e elencar suas particularidades.

Assim, este artigo de opinião foi dividido em quatro fases, sendo elas: (1) conceito de energia nuclear e funcionamento de uma usina geradora de energia; (2) aspectos ambientais, segurança e monitoramento; (3) licenciamento ambiental, rejeito; (4) comparativo com outras unidades geradoras de energia.

Foram selecionados artigos entre os anos de 2006 e 2022, sendo utilizados como descritores os termos: energia nuclear, sustentabilidade, impactos ambientais, emissão de carbono, comparativo e segurança.

Então todos os artigos foram revisados, selecionadas as informações relevantes referentes a conceitos, impactos ambientais e segurança, dados das matrizes energéticas, como forma de nortear as discussões abordadas neste trabalho. Dessa maneira, houve uma adequação de todos os tópicos abordados.

## Revisão Bibliográfica

### Obtenção da energia nuclear

A energia nuclear é extraída a partir de dois principais processos, um deles é a fissão nuclear, que é caracterizada como um processo de quebra dos núcleos de átomos fisséis (átomos que se rompem com facilidade) após serem atingidos por nêutrons em alta velocidade. Os nêutrons liberados podem atingir outros núcleos e originar novos nêutrons. Assim, tem início uma reação em cadeia, ou seja, um processo contínuo que libera uma grande quantidade de energia na forma de calor (GONÇALVES; RUIZ, 2016).

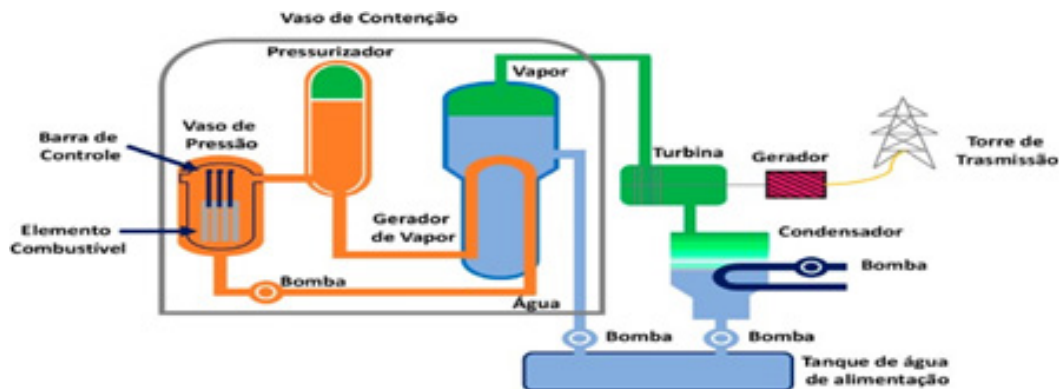
O outro método para geração de energia nuclear é a fusão nuclear, que consiste na ligação covalente de dois elementos químicos isolados para a formação de um novo elemento. A liberação de energia na fusão nuclear é muito superior àquela que ocorre na fissão nuclear. Para ocorrência deste processo é necessária uma energia térmica muito alta para vencer a repulsão dos elementos, gerar a colisão e produzir a energia (ROCHA; DELFINO, 2013).

### Funcionamento de uma usina de fissão nuclear

Como mencionado anteriormente, a energia nuclear pode ser gerada por dois processos, fusão e fissão nuclear. Porém, apesar das notícias, ocorridas em dezembro de 2022, de que cientistas americanos conseguiram produzir energia através de fusão nuclear (STALLARD, 2022) a única tecnologia completamente desenvolvida são as usinas de fissão nuclear, que geralmente utilizam urânio enriquecido como energia térmica para gerar energia elétrica.

Um reator de energia nuclear do tipo água pressurizada (Figura 1), usa água para resfriar o reator que está em alta temperatura e a envia para geradores de vapor (sistema primário). Este aquece a água de uma outra corrente, pertencente ao circuito secundário, ou seja, há uma troca de calor entre os circuitos primário e secundário. A água radioativa menos quente que continua a circular no circuito primário passa por uma bomba, a qual é responsável pela refrigeração do reator (PWR, 2007).

**Figura 1 - Esquema de uma usina nuclear tipo PWR**



Fonte: Fernandes et al. (2021).

### Aspectos ambientais, segurança e monitoramento

Uma das questões ambientais mais discutidas atualmente é a poluição atmosférica, estudos recentes do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) e da Agência Internacional de Energia (IEA), têm colocado a energia nuclear como uma importante alternativa na redução de emissões de Gases de Efeito Estufa, os chamados GEE (LOVERING; YIP; NORDHAUS, 2016).

Além de não emitir gases de efeito estufa em sua operação, Gonçalves e Ruiz (2016) abordam em seu livro que pela demanda de área para instalação de uma usina nuclear ser relativamente pequena, torna-se dispensável o desmatamento e desapropriação de áreas para sua construção, não alterando significativamente

o meio ambiente em que são instaladas. A nível de comparação, a maior hidrelétrica do Brasil, a Itaipu, possui um reservatório de 1.359 km<sup>2</sup> de área alagada, e possui uma capacidade instalada de 14.000 MW e um índice de produção de 10,4MW/km<sup>2</sup>, enquanto as usinas nucleares de Angra 1 e 2 ocupam uma área de 3,5 km<sup>2</sup>, com capacidade instalada de 1.990 MW e índice de produção de 570MW/km<sup>2</sup>.

Guená (2007) explica que um dos principais impactos causados ocorre na mineração do urânio, a qual provoca impactos no solo, água e na saúde dos trabalhadores. Isso ocorre pelo fato de que toda a cadeia produtiva do urânio, da extração à destinação dos dejetos derivados da operação, é permeada pela radioatividade. Por isso, os níveis de radiação emitidos durante a fase de extração, processamento do minério e de operação da usina são constantemente monitorados e controlados (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2008).

Aliyu; Ramli e Saleh (2015) explicam que durante seu funcionamento habitual os níveis de poluentes gerados da usina devem estar abaixo dos níveis aceitáveis, que de acordo com a norma CNEN NN 3.01 (2014), a dose anual para um indivíduo público seria até 1mSv, assim não gerando danos à saúde ou ao meio ambiente. Wheatley, Sovacool e Sornette (2016), que realizaram uma análise histórica, concluíram que a partir de 1952 houve uma diminuição considerável da taxa de acidentes nucleares, atingindo uma estabilidade de 0,003 de eventos por planta por ano a partir de 1970. Destes os mais significativos ocorridos em Three Mile Island e Chernobyl, foram decorrentes de falhas de operação, com intervenções equivocadas ou erros em procedimentos de teste do reator (TOLMASQUIM, 2016).

Para fornecer segurança aos trabalhadores e à comunidade local, as usinas ainda contam com o SCA (Sistema de Controle Ambiental) que fornece informações importantes sobre as consequências para as pessoas da área afetada pelo sistema. Se houver possibilidade de acidente nuclear e liberação de material radioativo no meio ambiente, o SCA pode ajudar a decidir sobre a evacuação da população dentro da área (FILHO, 2017).

Ainda segundo Filho (2017), o SCA pode ser ativado de maneira automática quando as seguintes situações ocorrem: 1) sinal de desarme do reator; 2) sinal de injeção de segurança; 3) alarme de alto nível de radiação em qualquer um dos monitores de radiação; 4) alarme de alta atividade nas salas dos compressores do sistema de tratamento de rejeitos gasosos; 5) baixa pressão nos tanques do sistema de tratamento de rejeitos gasosos; 6) alta pressão no tanque de alívio do pressurizador (pressão de ruptura do disco).

## Licenciamento ambiental e monitoramento

Toda atividade que tem impacto significativo no meio ambiente é passiva de licenciamento ambiental para seu funcionamento. Sendo assim, como demonstra o artigo de Silva (2009), instalações nucleares brasileiras somente podem funcionar quando são licenciadas por duas entidades, como demonstra o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), responsável pelo licenciamento ambiental, analisando os impactos que a atividade das instalações possam exercer sobre o meio ambiente; e a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), responsável pelo licenciamento ambiental, pela fiscalização e uso seguro da energia nuclear.

## Rejeitos

De acordo com o Instituto de Radioproteção e Dosimetria (2012, *apud* ALMEIRA *et al.*, 2016), resíduos radioativos são rejeitos de qualquer natureza (sólida, líquida) que contenha teores de radionuclídeos superiores aos determinados em normas da CNEN. Padrões internacionais de segurança definem processos como de transporte, tratamento e armazenamento, e que são normatizados de acordo com a legislação de cada país.

Os principais resíduos radioativos são divididos em dois grupos: (1) de alta radioatividade e atividade, como combustíveis utilizados em usinas nucleares; (2) de média e baixa radioatividade e atividade, como roupas, luvas e produtos que estiveram em contato com elementos radioativos. Resíduos hospitalares também pertencem ao último grupo.

Os resíduos radioativos podem ser oriundos de diferentes processos. Por exemplo, desde o simples contato de uma substância com material radioativo até a mistura de radionuclídeos oriundos do processo de fissão. De acordo com o CNEN - Comissão Nacional de Energia Nuclear (2020, *apud* ROCHA, 2020) os rejeitos são classificados de acordo com a duração do tempo de atividade radioativa. Esses por sua vez são

separados em classes e caracterizados de acordo com os níveis de concentração em relação aos níveis de dispensa estabelecidos.

Rejeitos como o combustível nuclear que perde a eficiência energética desejada no reator, mas ainda radioativo e quente, ele é armazenado em piscinas com água borada existente em cada reator, para decair durante um determinado período. Pode-se citar como exemplo dos LWR - Light Water Reactor, uma tonelada de combustível queimado de 600 MWe de potência, gera aproximadamente 2000 kW de calor de decaimento ao ser retirado e após um ano diminui para 10 kW e após 10 anos para 1kW, é o que afirma Romanato (2005) e este modelo também é o utilizado no Brasil.

Outro tipo de armazenagem é realizado por via seca, que se difere da úmida pelo uso de um gás ou ar ao invés de um líquido refrigerante. Sendo uma das características a blindagem contra radiação, feita através de grossas paredes de concreto, ferro fundido, aço ou combinações aço e chumbo. Lembrando que para utilizar essa opção de armazenagem, o combustível deve ser armazenado em piscinas com água anteriormente (ROMANATO, 2005).

Materiais que são usados dentro da usina, como roupas, equipamentos, luvas e até pequenos itens como fita adesiva, são considerados resíduos de baixa atividade. Esses materiais podem ser triturados e compactados para diminuir seu volume, classificados como rejeitos compactados. Os resíduos de atividade média são compostos por elementos maiores da planta (ou seja, instrumentos de controle e automação), ou efluentes e filtros dos sistemas de purificação do reator. Alguns concentrados de evaporador também podem se enquadrar na categoria de atividade média (ROCHA, 2020).

## Comparativo com outras fontes de energia

Comparar termoeletricas a carvão com usinas nucleares pode lançar uma nova perspectiva sobre os danos associados ao lixo nuclear. Considerando uma unidade com capacidade instalada de 1.300 MW (tamanho de Angra 3), o consumo médio anual de combustível das usinas a carvão é de 3,3 milhões de toneladas, enquanto as usinas nucleares consomem apenas 32 toneladas de urânio enriquecido (MRS ESTUDOS AMBIENTAIS LTDA, 2005).

Outras diferenças entre a energia nuclear e a carvão são que os resíduos de uma usina a carvão são lançados no ar e as tecnologias de captura ainda são caras, não utilizadas amplamente e capazes de remover somente materiais particulares (TOLMASQUIM, 2016). Por outro lado, todo o rejeito nuclear é armazenado em condições controladas e, por ainda possuir um grande potencial de geração de energia, pode vir a ser reciclado e utilizado por reatores da Geração IV no futuro (GONÇALVES; RUIZ, 2016).

Porém, o 7º Objetivo de Desenvolvimento Sustentável, estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), traz como propósito, garantir acesso à energia de baixo custo, confiável, sustentável e renovável para todos. Deste modo, fontes de energia que geram grandes volumes de emissões de CO<sub>2</sub> e não são sustentáveis em sua operação são descartadas como matriz energética para os 193 países que assinaram o tratado em 2015.

Moreira e Primo (2013) explicam que as fontes de energia podem ser limpas, mas se o espaço em que são produzidas tiver fluxo ruim, essas fontes não seriam consideradas sustentáveis. Portanto, podemos definir que a sustentabilidade é a minimização de perdas e danos, seja no impacto das fontes de energia no meio ambiente, na quantidade de resíduos gerados ou no impacto financeiro e social.

A energia nuclear produz lixo atômico, logo não é limpa, mas pode se tornar sustentável se o país, como a Suécia, propuser condições de manejo do lixo atômico, ou seja, é uma fonte que apesar de produzir rejeitos, pode ser sustentável (MATTSON *et al.*, 2009, apud MOREIRA; PRIMO, 2013).

Paulo Fernando Ferreira Frutuoso e Melo, Coordenador do Programa de Energia Nuclear (PEN/COPPE-UFRJ), explica que atualmente, o Brasil tem sua matriz energética, majoritariamente, composta por hidrelétricas com cerca de 64% da sua capacidade instalada. Isso demonstra claramente um problema, visto que toda a carga do sistema depende basicamente do fornecimento de uma única fonte. Como tratativa, para mudar o cenário, subsídios são oferecidos para fontes renováveis eólica e solar. Com isso, enfrentamos outro desafio: a intermitência dessas formas de geração. É nesse ponto que a energia nuclear apresenta-se como uma alternativa importante, produzindo energia limpa, confiável e de base, garantindo a estabilidade do sistema (PIRES, 2019).

Verifica-se valores mínimos próximos de 190 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh para carvão e 250 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh para gás natural (Quadro 1), este analisando o balanço de sequestro de carbono, atingindo uma considerável redução nas emissões. Mesmo assim, as fontes energéticas fósseis são as que causam os mais graves impactos ao meio ambiente (CESARETTI, 2010). Outras fontes consideradas limpas emitem CO<sub>2</sub> indiretamente, como por exemplo as usinas hidrelétricas que emitem muitas vezes mais dióxido de carbono, devido ao metano gerado nas áreas alagadas da sua represa, se comparadas às usinas nucleares.

**Quadro 1 - Fontes de energia conforme suas emissões de gases de efeito estufa por energia produzida.**

Fonte de energia	kgCO <sub>2</sub> eq/MWh
Carvão	1019,5
Petróleo	823,8
Gás Natural	661,7
Hidrelétrica	120,6
Nuclear	58,2
Solar	44
Eólica	37,6
Biomassa	6,7

Fonte: Baldasano et al. (1999, p.3766,3767,3769,3770); Lee et al. (2004, p.91,96); Weisser (2007, p.1550); Gagnon et al. (2002, p.1271); IPCC (2007, p.269,283); Goldemberg & Lucon (2008, p.191); IAEA (1997); Markandya & Wilkinson (2007, p.982); Rashad & Hammad (2000, p.218); Holdren & Smith (2000, p.103) apud Cesaretti (2010); Schultz (2021).

No Quadro 2 estão apresentados os resumos dos principais impactos ambientais das fontes de energia tais como o petróleo, carvão, gás natural, hidrelétrica, nuclear, biomassa e energia eólica.

**Quadro 2 – Fontes de energias e seus impactos ambientais.**

Fontes de energia	Impactos
Petróleo Carvão Gás natural	1) Poluição do ar – Emissão de monóxido de carbono (CO) – Emissão de matéria particulada suspensa (metais pesados) – Destruição da camada de ozônio; 2) Aquecimento global via efeito estufa – Emissão de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) e metano (CH <sub>4</sub> ); 3) Chuva ácida – Emissão de SO <sub>2</sub> formando ácido sulfúrico na atmosfera – Emissão de Nox formando ácido nítrico na atmosfera; 4) Perturbação acústica na fauna (marinha ou terrestre) pela exploração sísmica; 5) Alteração da qualidade do solo e da água; 6) Modificação dos padrões de uso e ocupação do solo; 7) Remanejamento involuntário de comunidades locais para construção de dutos; 8) Geração de apreensão na população local pela possibilidade de acidentes.
Hidrelétrica	1) Formação de grandes represas; 2) Realocação das populações; 3) Aquecimento global via efeito estufa – Emissão de gás metano (CH <sub>4</sub> ) e dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ).
Nuclear	1) Resíduos de nível baixo e médio de radioatividade; 2) Resíduos de nível alto de radioatividade que requerem disposição por 10.000 anos; 3) Desativação das instalações nucleares após término da vida útil.
Biomassa	1) Poluição do ar – Emissão de monóxido de carbono (CO) – Emissão de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) – Emissão de matéria particulada; 2) Uso intensivo do solo e da água; 3) Diminuição da biodiversidade.
Eólica	1) Ruído causado pelos aerogeradores; 2) Colisão de pássaros; 3) Impacto visual; 4) Certa limitação do uso do espaço ocupado.
Solar	1) Impactos na fabricação e mineração; 2) Resíduo após término da vida útil.

Fontes: Brasil (2007), Carajilescov; Moreira (2008), Reis; Cunha (2006), Schultz (2021).



Assim, é possível verificar que todas as fontes de energia possuem impactos ambientais e que as fontes que utilizam combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e petróleo geram impactos maiores principalmente quando se fala em emissões atmosféricas de gases poluidores. As Usinas Hidrelétricas não emitem gases de efeito estufa durante sua operação, ou seja, no momento da geração de energia, porém, apresenta o inconveniente de emitir dióxido de carbono e metano nas formações de represas.

Utilizando a Biomassa como fonte de energia, há geração de gases de efeito estufa, os quais são compensados durante o desenvolvimento da cultura, e seus principais impactos estão relacionados ao uso intensivo de solo e água. Já a energia eólica tem como principal impacto a geração de ruídos e colisão de pássaros, sendo uma das fontes de menor emissão. A energia nuclear, apresenta como passivo o resíduo que é armazenado em um ambiente controlado para que a radiação não se disperse no ambiente. A energia solar apresenta níveis de 44 kgCO<sub>2</sub>eq/MWh, sendo uma das tecnologias com mais baixa emissão, seus impactos estão relacionados à mineração dos componentes dos painéis, fabricação e resíduo no término da vida útil (SCHULTZ, 2021).

Outro fator que deve ser levado em conta é a sazonalidade na produção de energia. Neste caso, hidrelétricas dependem do regime pluviométrico para manter a produção constante, embora a formação das grandes represas também vise a minimização do impacto desta variável. A energia eólica depende de um regime de ventos constantes e o rendimento da produção de energia solar é diretamente influenciado pela formação de nuvens e precipitações (GUENA, 2007). No trabalho de Pires (2019), pode-se verificar que por isso, o futuro do setor elétrico exige um balanço entre as fontes distantes, sazonais e intermitentes com fontes de geração constantes e próximas aos centros consumidores, garantindo, assim, a segurança no sistema. A fonte nuclear não apresenta intermitência ou sazonalidade comum nas fontes renováveis (CESARETTI, 2010).

## Crescimento da economia

Kirikkaleli, Adedoyin e Bekun (2021) trazem em seu estudo o papel indispensável do consumo de energia como impulsionador do desenvolvimento socioeconômico da maioria das economias. O desenvolvimento dos processos de produção precisa de energia para prosperar, por este motivo é que esta é uma preocupação constante em todos os continentes. A energia nuclear ganhou destaque através de muitas economias como parte de uma reforma na política energética devido a se apresentar como uma ferramenta que pode ser utilizada para reduzir as mudanças climáticas globais (SADIQ *et al.*, 2022).

Países estão aumentando o investimento na produção de energia nuclear com a finalidade de expandir a economia livre de carbono, minimizar a dependência de energia fóssil e melhorar o acesso à energia limpa e renovável (SADIQ *et al.*, 2022), sendo um impulsionador do desenvolvimento econômico para países desenvolvidos e em desenvolvimento.

Como exemplo, Wang e Lee (2022) demonstraram que o uso de energia nuclear tem contribuído progressivamente para o crescimento econômico da China. Além destes fatos, o alto grau de concentração de fontes de fornecimento de energia onde mais de 68% do petróleo está concentrado na região volátil do Oriente Médio, e onde 67% das reservas de gás estão concentradas na Rússia, claramente envolve riscos em termos de confiabilidade do suprimento das necessidades de energia para muitos países importadores de energia (WOLDE-RUFAEL; MENYAH, 2010), fato que se visualizou em 2022, com a guerra entre Rússia e Ucrânia. Antes do conflito a Rússia fornecia cerca de 40% do gás utilizado no continente Europeu, então os preços da energia dispararam e a escassez de suprimentos pode aumentar ainda mais as contas de energia (PLUMMER, 2022).

## Considerações Finais

A geração de eletricidade impacta o ambiente resultando em externalidades sociais, econômicas e ambientais, tanto positivas quanto negativas. A utilização isoladamente de energias tradicionais já desenvolvidas como o petróleo, carvão, gás natural, hidrelétrica e biomassa são utilizadas amplamente e produzem energia, mas por outro lado, impactam o planeta pela emissão de gases de efeito estufa, contaminantes, ocupação de grandes áreas e demais impactos ambientais originados pelo seu funcionamento. Outras como a energia eólica e solar, também geram impactos ambientais, ainda que inferiores, porém sofrem com as sazonalidades.





Como o desafio global é atender ao objetivo de desenvolvimento sustentável n° 7°, estabelecido pela Organização das Nações Unidas (ONU), que é de reduzir as emissões atmosféricas e garantir acesso à energia renovável e sustentável, ao mesmo tempo tendo o desafio de atender ao crescimento da demanda energética mundial para utilização dos indivíduos e para a movimentação econômica, a energia nuclear apresenta-se como uma alternativa de baixa emissão para diversificação da matriz energética global. Os países possivelmente beneficiados com esta energia são principalmente os países que sofrem impactos com sazonalidades e que têm dificuldade ao acesso a energias de fontes renováveis de baixo impacto ambiental. A Energia Nuclear pode contribuir para a expansão da matriz energética mundial, sendo a única fonte térmica capaz de garantir o fornecimento constante de energia com emissão nula de gases de efeito estufa.

Diversificar é tornar o uso sustentável, pois deixa-se de explorar apenas um recurso natural, ou uma tecnologia para a produção de energia, diminuindo a carga sobre ele e sua dependência. No entanto, a geração de energia nuclear não deve ser vista como a única solução para os problemas energéticos de um país, mas deve fazer parte dela, ampliando a diversidade energética junto com a produção e utilização de outras fontes renováveis de energia, como a eólica e biomassa.

## Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 3. Ed. Brasília, 2008.

ALIYU, A. S.; RAMLI, A. T.; SALEH, M. A. Assessment of potential human health and environmental impacts of a nuclear power plant (NPP) based on atmospheric dispersion modeling. **Atmosfera**, v. 28, n. 1, p. 13–26, 2015.

ALMEIRA, A. L. A. DE *et al.* Usina Nuclear: Obtenção De Energia E Resíduos Gerados. **Engenharias On-line**, v. 2, n. 1, p. 21–30, 2016.

BRASIL. **Plano Nacional de Energia 2030**, v. 4, 2007.

CARAJILESCOV, P.; MOREIRA, J. M. L. Aspectos técnicos, econômicos e sociais do uso pacífico da energia nuclear. **Cienc. Cult.**, v. 60, 2008.

CARDOSO, E. DE M. Energia Nuclear. **Comissão Nacional de Energia Nuclear**, v. 0, n. 91, p. 56, 2012.

CESARETTI, M. DE A. **Análise comparativa entre fontes de geração elétrica segundo critérios socioambientais e econômicos**, 2010.

CNEN. NN 3.01. Diretrizes básicas de proteção radiológica, 2014.

CUNHA, C. P. DA; ANJOS, J. A. S. A. DOS. Análise Da Matriz Energética Nuclear Mundial E Brasileira Antes E Após O Acidente Na Central Nuclear De Fukushima, Japão. **Revista Eletrônica de Energia**, v. 5, n. 2, p. 79–89, 2016.

ESCANHOELA, C. M. F. ; GAIANÊ, S.; LIMA, A. C. DE S. Educação ambiental e sustentabilidade: um reator nuclear inovador para o Brasil. **Revista Mais Educação**, 2019.

FERNANDES, D. R. *Et al.* Energia Nuclear: Importância, Conceitos Químicos e Estrutura das Usinas Nucleares. **Revista Virtual de Química**, v. 13, n. 3, p. 635–649, 2021.

FILHO, A. P. **Estimativas de dose devido a acidentes nucleares baseadas em medidas de campo e otimização por enxame de partículas**. [s.l.] Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017.

- GALLINA, A. L. Uma alternativa sustentável para a produção de Biodiesel: *Cyperus esculentus*. P. 104, 2011.
- CESARETTI, M. DE A. **Análise comparativa entre fontes de geração elétrica segundo critérios socioambientais e econômicos.** [s.l.: s.n.].
- GONÇALVES, F.; RUIZ, R. H. DE. **Energia Nuclear**, 2016.
- GUENA, A. M. D. O. Avaliação Ambiental de diferentes formas de geração de energia elétrica. p. 133, 2007.
- GUIMARÃES, L. DOS S.; MATTOS, J. R. L. DE. **Energia nuclear e sustentabilidade**, 2010.
- HEILBRON, P. F. .; MORO, J. T. .; XAVIER, A. M. . Princípios básicos de segurança e proteção radiológica. 2006.
- KIRIKKALELI, D.; ADEDOYIN, F. F.; BEKUN, F. V. Nuclear energy consumption and economic growth in the UK: Evidence from wavelet coherence approach. **Journal of Public Affairs**, v. 21, n. 1, p. 1–11, 2021.
- LOVERING, J. R.; YIP, A.; NORDHAUS, T. Historical construction costs of global nuclear power reactors. **Energy Policy**, v. 91, n. April, p. 371–382, 2016.
- MORAES, R. **Convênio busca locais para a instalação de novas usinas nucleares no Brasil.** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/convenio-busca-locais-para-a-instalacao-de-novas-usinas-nucleares-no-brasil/>>.
- MOREIRA, R.; PRIMO, M. A. M. Framework para análise da sustentabilidade de fontes de energia. v. 38, p. 11, 2013.
- MRS ESTUDOS AMBIENTAIS LTDA. Relatório de Impacto Ambiental - RIMA da unidade 3 da Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto. 2005.
- NASCIMENTO, T. C.; MENDONÇA, A. T. B. B. DE; CUNHA, S. K. DA. Inovação e sustentabilidade na produção de energia: o caso do sistema setorial de energia eólica no Brasil. **Cadernos EBAPE.BR**, v. 10, n. 3, p. 630–651, 2012.
- ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <<https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>. Acesso em: 8 mar. 2023.
- PIRES, A. Entrevistas com especialistas : as diferentes visões a respeito da energia nuclear no Brasil/ Boletim Energetico. **FGV Energia**, p. 7–30, 2019.
- PLUMMER, R. Rússia corta gás à Europa em meio a guerra e disputa por preços. **BBC News Brasil**, 22 set. 2022.
- PWR. Pressurized Water Reactor Power Plant September 2007. **Design**, n. Setembro, 2007.
- REIS, L. B. DOS; CUNHA, E. C. N. **Energia Elétrica e Sustentabilidade: Aspectos tecnológicos, socioambientais e legais.** São Paulo: Manole Ltda, 2006.
- ROCHA, B. DE M. V. Rejeitos Radioativos : um Estudo de Caso para Angra 2. 2020. ROCHA, É. G. DA; DELFINO, M. S. DE C. Fissão e fusão nuclear: presente e futuro do uso da energia nuclear pela humanidade. **Revista CAITITU - aproximando pesquisa ecológica e aplicação**, v. 1, n. 1, p. 125–129, 2013.

ROMANATO, L. S. **Armazenagem de combustível nuclear queimado.** [s.l: s.n.].

SADIQ, M. *et al.* Linking nuclear energy, human development and carbon emission in BRICS region: Do external debt and financial globalization protect the environment? **Nuclear Engineering and Technology**, v. 54, n. 9, p. 3299–3309, 2022.

SCHULTZ, H. S. **Dimensionamento, emissões de gases de efeito estufa e payback ambiental de um sistema de energia solar fotovoltaico.** João Pessoa, 2021.

SILVA, G. Expertise e participação da população em contexto de risco nuclear: Democracia e licenciamento ambiental de Angra 3. **Dados**, v. 52, n. 3, p. 771–805, 2009.

STALLARD, E. Fusão nuclear: como cientistas alcançaram “Santo Graal” da energia limpa. **BBC News**, 2022.

SOUZA, L. E. G. L. DE; LIMA, C. C. Energia Nuclear : Desafio Atual , Universalização E Medo Social. **Dom Helder Revista de Direito**, v. 2, n. 2, p. 63–90, 2019.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termoelétrica: Gás natural, Biomassa, Carvão, Nuclear.** EPE: Rio de Janeiro, 2016.

WANG, E. Z.; LEE, C. C. The impact of clean energy consumption on economic growth in China: Is environmental regulation a curse or a blessing? **International Review of Economics and Finance**, v. 77, n. September 2021, p. 39–58, 2022.

WHEATLEY, S.; SOVACOOOL, B. K.; SORNETTE, D. Reassessing the safety of nuclear power. **Energy Research and Social Science**, v. 15, p. 96–100, 2016.

WOLDE-RUFAEL, Y.; MENYAH, K. Nuclear energy consumption and economic growth in nine developed countries. **Energy Economics**, v. 32, n. 3, p. 550–556, 2010.