

## Energia Nuclear: Importância, Conceitos Químicos e Estrutura das Usinas Nucleares

### *Nuclear Energy: Importance, Chemical Concepts and Nuclear Power Plant Structure*

Daniella Rodrigues Fernandes,<sup>a</sup> Iromar Coelho da Silva Campos Júnior,<sup>a</sup> Marcio Panta da Silva,<sup>a</sup> Vanderson de Oliveira Araujo,<sup>a</sup> Bárbara Vasconcellos da Silva,<sup>a</sup> Nadja Paraense dos Santos,<sup>a</sup> Michelle Jakeline Cunha Rezende<sup>a,\*</sup> 

<sup>a</sup>Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Química, Av. Athos da Silveira Ramos 149, Centro de Tecnologia, Bloco A, Ilha do Fundão, CEP 21941-909, Rio de Janeiro-RJ, Brasil.

Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI)

\*E-mail: [mjcrezende@gmail.com](mailto:mjcrezende@gmail.com)

Recebido: 28 de Março de 2021

Aceito: 28 de Março de 2021

Publicado online: 24 de Maio de 2021

Nuclear fission energy is an important part of the energy matrix of several countries, including Brazil. The use of this energy source has advantages, but it also causes wide discussion and concern regarding the risks of accidents. The knowledge of the concepts that involve the nuclear reaction, the behavior of the particles and their particularities is a first opportunity to understand the relevance of the topic. This work reports some recent data on world production and consumption of nuclear energy, gives a brief historical-conceptual approach of nuclear chemistry and also presents the basic scheme of a nuclear fission plant operation, to chemistry professionals, undergraduate and high school students.

**Keywords:** Energy; nuclear chemistry; nuclear fission reactor; nuclear power plant

### 1. Breve Histórico da Energia Nuclear

Na década de 40, a energia de fissão nuclear tinha relação praticamente restrita ao desenvolvimento de armamentos nucleares, sendo o seu reconhecimento como fonte de energia primária na matriz energética mundial iniciado apenas 20 anos depois.<sup>1,2</sup> No entanto, seu desenvolvimento e aplicação como fonte de energia foi desacelerado na década de 80, em função dos acidentes ocorridos nas usinas de *Three Mille Island* (1979), nos Estados Unidos, e *Chernobyl* (1986), na Ucrânia.<sup>2-4</sup> Mesmo sofrendo duras críticas de ambientalistas e da própria população mundial frente aos riscos ambientais e à saúde humana, em meados da década de 90, pressões políticas e econômicas em diversas partes do mundo impulsionaram o retorno de sua utilização, junto com a previsão de construção de novas usinas nucleares de fissão.<sup>3-5</sup> Não há dúvidas de que aspectos políticos e econômicos, por muitas vezes, são considerados primordiais frente à assuntos relacionados ao meio ambiente e à segurança pública.

Em 2011, o acidente na usina nuclear de Fukushima, no Japão, causou novamente grande repercussão mundial e várias ações políticas foram tomadas por diversos países, principalmente com relação à discussão sobre possíveis falhas nos sistemas de segurança e a manutenção das atividades nucleares para fins energéticos.<sup>3,4</sup> Países como Alemanha, Bélgica, Itália, Suíça e China anunciaram a suspensão de projetos para a ampliação de novos centros nucleares e também desativaram algumas usinas, enquanto países como EUA, Inglaterra, França, Rússia, Coreia do Sul e Índia mantiveram o fluxo de seus projetos, porém com a implementação de regras e investimentos em seus sistemas de segurança.<sup>3,4</sup> Dessa vez, por mais importante que fossem as ações político-econômicas de um país, foi impossível desconsiderar a opinião pública e a ameaça imposta à sociedade frente ao uso da energia nuclear.<sup>5</sup>

A primeira aplicação da energia nuclear no Brasil data do início da década de 50, com o uso de radioisótopos para finalidades biomédicas. Na década de 60, seu uso sofreu uma expansão nas indústrias brasileiras para as áreas de controle de qualidade, produção e detecção de falhas em processos.<sup>6</sup>

A construção da usina termonuclear Angra I foi considerada o maior investimento em energia nuclear do Brasil. A origem de seu nome tem relação com o local de sua construção, o município de Angra dos Reis, no Estado do Rio de Janeiro. O complexo nuclear brasileiro, que entrou em operação em 1985, recebeu o nome de Almirante Álvaro Alberto (CNAAA) e foi considerado um projeto benéfico para o desenvolvimento do país e da região.<sup>7,8</sup> Segundo informações da Eletrobras Eletronuclear, que é uma empresa de economia mista, e responsável

pela operação e construção das usinas termonucleares no Brasil, a capacidade de geração em Angra I é de 640 megawatts de potência, suficiente para abastecer uma cidade contendo um milhão de habitantes.<sup>7</sup> É importante registrar que antes da construção de Angra I, investimentos foram realizados na compra de reatores, ultracentrífugas e outros componentes de centrais nucleares, proporcionando avanços iniciais consideráveis em pesquisa, capacitação e domínio da tecnologia nuclear no Brasil.<sup>9-11</sup>

A construção da usina Angra II iniciou na década de 80, logo após Angra I entrar em operação. No entanto, na mesma época, foi aprovada a lei ambiental e a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o que gerou entraves para a execução da obra, sendo o licenciamento ambiental e a construção do projeto liberado apenas em 2001.<sup>7,8</sup> Atualmente, a usina Angra II é capaz de produzir praticamente o dobro de megawatts de potência de Angra I, ampliando a sua contribuição na matriz energética brasileira.<sup>7</sup> De acordo com a Eletrobras Eletronuclear, a operação de Angra II possibilitou uma economia de água nos reservatórios das hidrelétricas brasileiras, beneficiando a população da região sudeste do Brasil.<sup>7</sup>

Devido às exigências e toda a burocratização existente para obtenção do licenciamento ambiental e relatório de impacto ambiental, a usina nuclear Angra III ainda se encontra em construção. Estima-se que, com sua operação, a energia nuclear passará a gerar o equivalente a 50% do consumo do Estado do Rio de Janeiro.<sup>7,8</sup> A Figura 1 mostra as duas usinas em operação, Angra I e II, e as futuras instalações de Angra III.

A utilização da energia nuclear para gerar eletricidade no Brasil é controversa. Se, por um lado, há quem defenda as vantagens, como a não liberação de gases responsáveis pelo efeito estufa e independência de fatores climáticos,

existe também a argumentação de que o potencial energético renovável do Brasil é incomparável a outro país, podendo tornar-se pioneiro por ter um sistema elétrico que une sustentabilidade econômica à consciência ambiental.<sup>6</sup> O fato é que o Brasil, como já mencionado, abriga duas usinas nucleares e planeja a construção da terceira até 2030, o que torna relevante a compreensão da química nuclear e suas aplicações. O objetivo deste artigo é promover uma divulgação da energia nuclear, descrever os conceitos químicos básicos envolvidos, bem como ilustrar o funcionamento de uma usina nuclear em linguagem acessível para profissionais da Química, estudantes do ensino superior e do ensino médio.

## 2. Produção e Consumo de Energia Nuclear no Mundo e no Brasil

A geração de energia proveniente de fontes nucleares permanece efetiva na matriz energética mundial, mesmo depois da ocorrência de grandes acidentes nucleares e das medidas políticas adotadas por diversos países. No entanto, é perceptível as oscilações na sua geração em países, como por exemplo, o Japão e a Alemanha, que reduziram sua capacidade de produção. Em 2019, o Japão, que ocupava a terceira posição no ranqueamento dos países produtores de energia nuclear, despencou para a nona posição, enquanto a Alemanha desceu de sexta para oitava posição. Por outro lado, a China apresentou uma produção bastante significativa, tornando-se o terceiro maior produtor de energia elétrica nuclear do mundo.<sup>13-15</sup>

Atualmente, a produção total de energia elétrica nuclear é de 2.796 terawatt-hora (TWh), o que equivale a 10% da



**Figura 1.** Imagem aérea do Centro Nuclear Almirante Álvaro Alberto em Itaorna, Angra dos Reis, mostrando as usinas Angra I, II e III (em construção).

Fonte: Google Maps<sup>12</sup>

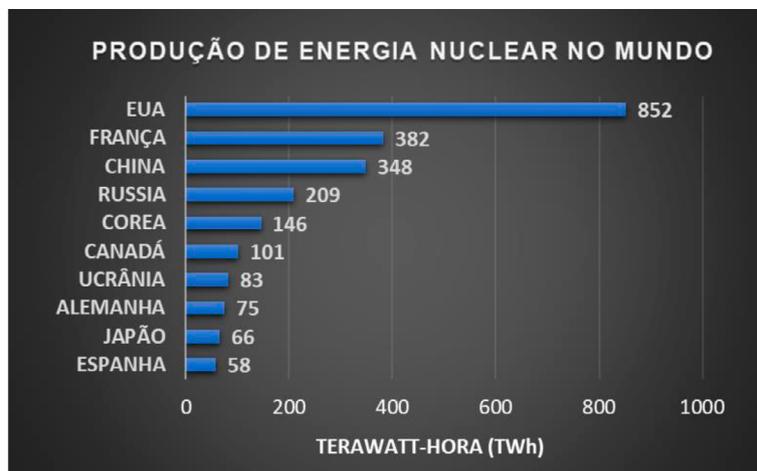
matriz elétrica mundial. A Figura 2 apresenta a capacidade de produção dos dez maiores produtores mundiais, onde os EUA despontam na primeira posição, gerando 852 TWh de potência. Em segundo lugar está a França, país que apresenta uma forte dependência (72%) da energia proveniente das usinas termonucleares. A China manteve sua terceira posição, consequência de suas atitudes políticas e econômicas adotadas nos últimos anos.<sup>14,16</sup>

A capacidade de geração de energia elétrica nuclear para os outros países é inferior a 210 TWh. Importante salientar que o Japão aparece entre os dez maiores produtores mundiais de energia nuclear, mesmo com o trágico acidente de Fukushima e com a adoção de fortes políticas para retardar os investimentos e consequentemente, a produção de energia a partir dessa fonte. A contribuição do Brasil na matriz elétrica mundial é de 16,2 TWh.<sup>13,14,16</sup>

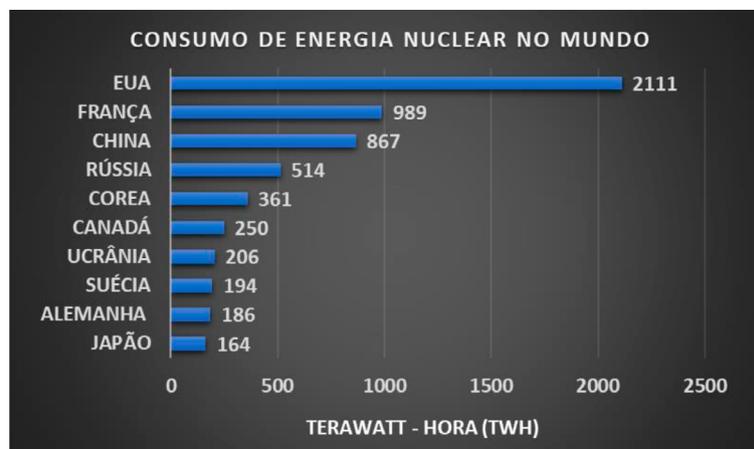
O cenário de consumo de energia nuclear segue uma tendência semelhante ao de sua produção, com pequenas diferenças a partir da oitava posição (Figura 3). Os valores energéticos disponíveis levam em consideração a energia equivalente de entrada, ou seja, a energia associada à quantidade de combustível que seria necessária nas estações de energia termonuclear para gerar a produção de eletricidade relatada.

Os três maiores consumidores de energia elétrica proveniente de fonte nuclear são EUA, França e China. Os EUA ocupam a primeira colocação, com alta capacidade de consumo (2111 TWh), seguido pela França (989 TWh) e China (867 TWh). Um consumo inferior a 520 TWh é observado para os outros países que figuram entre os dez maiores consumidores do mundo. A Suécia, embora não apareça entre os maiores produtores de energia nuclear, apresenta-se como o oitavo maior consumidor (194 TWh). O Brasil apresenta um consumo de 39 TWh, superior a países como México, Argentina, Romênia, Irã, África do Sul e Paquistão.<sup>13-15</sup>

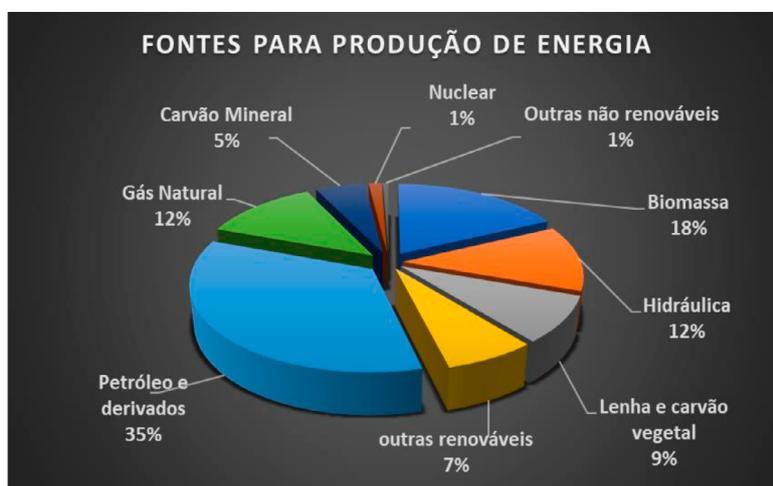
A matriz energética brasileira é bastante diversificada e inclui fontes de matérias-primas renováveis e não renováveis. O percentual de energia proveniente de fontes renováveis é de 46%, enquanto das fontes não renováveis é de 54%, uma distribuição bem equiparada, o que coloca o Brasil entre os países que mais empregam fontes renováveis para produção de energia.<sup>17</sup> A Figura 4 mostra a distribuição das matérias-primas empregadas para produção de energia no Brasil. Importante ressaltar que essa matriz energética considera várias formas de produção de energia, como por exemplo, a energia utilizada para movimentar veículos e no uso doméstico, como o preparo de alimentos e aquecimento de água.<sup>17</sup>



**Figura 2.** Dados de produção de energia elétrica nuclear para os dez maiores produtores no mundo (ano base 2019). Fonte: World Nuclear Association e BP<sup>15,16</sup>



**Figura 3.** Dados de consumo de energia elétrica nuclear para os dez maiores consumidores no mundo (ano base 2019). Fonte: BP<sup>15</sup>



**Figura 4.** Distribuição das fontes utilizadas para produção de energia no Brasil (ano base 2019). Fonte: Ministério de Minas e Energia<sup>17</sup>

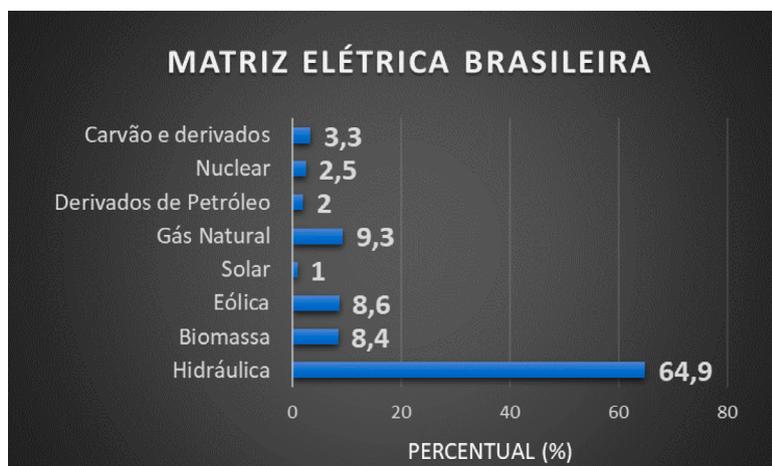
Ao considerar as fontes de energia empregadas apenas para produção de energia elétrica, percebe-se, conforme apresentado na Figura 5, que mesmo com o funcionamento das usinas Angra I e II, a contribuição da energia elétrica de origem nuclear ainda é pequena. A matéria-prima nuclear corresponde a 2,5% da produção nacional, com um total de geração bruta de 16,2 TWh. No entanto, há uma tendência que esse percentual cresça cerca de 2% até 2030, devido aos investimentos no setor.<sup>17,18</sup>

Em 2019, a oferta total de energia elétrica no Brasil foi de 651,3 TWh (incluindo importação), sendo a maior parte proveniente da fonte hídrica (422,8 TWh). De acordo com a Figura 5, a utilização das fontes renováveis (hídrica, biomassa, eólica e solar) foi equivalente a 82,9% da produção de eletricidade. Esse percentual, comparado à matriz elétrica mundial (22% apenas), mostra uma menor dependência das fontes não renováveis, incluindo a fonte nuclear, para produção de energia elétrica no Brasil.<sup>17</sup> A matriz elétrica mundial tem maior dependência nas fontes não renováveis (78%), principalmente as que utilizam carvão e gás natural.<sup>17</sup>

As atividades industriais de geração de energia elétrica são as maiores responsáveis pelas emissões de CO<sub>2</sub> na

atmosfera, contribuindo fortemente para o aquecimento global. Há um esforço mundial no sentido de reduzir essas emissões, tanto as provenientes da produção de energia elétrica quanto de outras atividades industriais. A fonte nuclear, embora não seja considerada uma fonte de energia renovável, é a mais limpa dentro da categoria das fontes não renováveis. A produção de 1 KWh de eletricidade a partir da fonte nuclear emite entre 90 e 140 g de CO<sub>2</sub> para a atmosfera, bem inferior ao emitido a partir da queima de gás (330 a 360 g CO<sub>2</sub> por KWh) e carvão (1000 a 1100 g CO<sub>2</sub> por KWh).<sup>19,20</sup> O cálculo da quantidade de CO<sub>2</sub> liberada pela indústria nuclear considera todo o ciclo de vida da usina, incluindo sua construção, funcionamento e descomissionamento (desativação da usina nuclear ao final de sua vida útil). O cálculo também inclui o ciclo do combustível nuclear, o transporte e o descarte de combustível usado. Na verdade, a fissão de urânio no reator nuclear é a única etapa da cadeia da indústria nuclear que não emite CO<sub>2</sub>.<sup>21</sup>

Atualmente, a contribuição da energia nuclear para produção de eletricidade mundial é de 10% e diversos países visam aumentar sua parcela na matriz elétrica, principalmente



**Figura 5.** Distribuição das matérias-primas para produção de energia elétrica brasileira (ano base 2019). Fonte: Ministério de Minas e Energia<sup>17</sup>

em função da pegada de baixo carbono. Esforços têm sido realizados para intensificar os investimentos em usinas termonucleares, mesmo considerando os riscos ambientais relacionados aos rejeitos radioativos.<sup>2</sup> O Brasil, juntamente com a Rússia, Índia, China e África do Sul, formam um bloco de países de economias emergentes – o BRICS – que são os protagonistas na intensificação dos investimentos em energia nuclear.<sup>22,23</sup> O BRICS detém 23,7% das usinas termonucleares em operação do mundo, além de outros percentuais significativos de usinas em construção (52,7%), reatores nucleares planejados (54,3%) e propostos (58,7%) para futuros investimentos.<sup>22</sup> A Figura 6 mostra um panorama dos reatores nucleares nos países que compõem o BRICS.

A China é o país com a melhor atuação no BRICS, com 44 reatores em operação, 14 em construção, 43 planejados e 136 propostos. Já o Brasil, conta com 2 reatores em operação (Angra I e II), 1 em construção (Angra III) e quatro em análise, que são propostas contempladas no Plano Nacional de Energia, que prevê mudanças na produção de energia nacional, até o ano de 2030.<sup>22</sup>

O envolvimento do Brasil no BRICS reflete a necessidade de mudança da matriz energética brasileira, que é predominantemente hídrica. O país vem atravessando momentos de chuvas irregulares e esvaziamento de seus reservatórios, o que ocasiona o racionamento hídrico, cada vez mais típico, devido às atuais mudanças climáticas. A tendência de crescimento do setor hidrelétrico é pequena, cerca de 1,5%, e gera uma grande preocupação com o esgotamento dos recursos hídricos no Brasil. Nesse contexto, as termoelétricas, principalmente àquelas provenientes da energia nuclear, aparecem como solução para expandir a matriz energética brasileira. O uso da energia nuclear apresenta vantagens mais competitivas que as outras fontes de energia, como a estabilidade, a disponibilidade, a garantia de suprimento de combustível e o domínio completo do ciclo do combustível nuclear.<sup>5,18</sup>

### 3. Conceitos Químicos

#### 3.1. Radioatividade e partículas radioativas

Em 1901, o alemão Wilhelm C. Röntgen foi agraciado com o Prêmio Nobel de Física pela observação da transparência de alguns objetos pela emissão de raios desconhecidos, denominados como raios X. Impulsionado pelas descobertas de Röntgen, Antoine H. Becquerel tentou demonstrar, mas sem sucesso, que as substâncias fluorescentes poderiam emitir raios X. Não satisfeito com seus resultados negativos, Becquerel realizou outros experimentos utilizando o urânio e mostrou que não havia correlação da radiação penetrante com o fenômeno da fluorescência, e que a correlação da radiação era com o próprio elemento urânio. A radiação, na época denominada radiação de Becquerel, foi posteriormente reconhecida como o fenômeno da radioatividade.<sup>1</sup>

Marie Curie, a primeira e única mulher a ganhar o Prêmio Nobel em duas áreas diferentes (física e química), deu continuidade às pesquisas de Antoine H. Becquerel. Ao lado de seu marido, físico francês, Pierre Curie, descobriu um novo elemento radioativo em 1897, o polônio, assim chamado em homenagem à Polônia, país natal de Marie.<sup>24,25</sup> O polônio é encontrado em minérios de urânio em pequenas quantidades, cerca de 100 microgramas em cada tonelada de minério. Em 1902, o casal conseguiu extrair 1 mg de rádio de dez toneladas de pechblenda de minério de urânio (óxido de urânio,  $U_3O_8$ ), uma grande conquista, considerando os poucos métodos químicos de separação disponíveis na época. Esse novo elemento foi identificado porque seu espectro atômico revelava novas linhas e suas amostras brilhavam com uma luz azul fraca no escuro, causada pela intensa radioatividade que excitava o ar ao redor. Em 1911, o metal rádio foi isolado por Marie Curie e André Debierne, por meio da eletrólise de cloreto de rádio.<sup>26</sup>

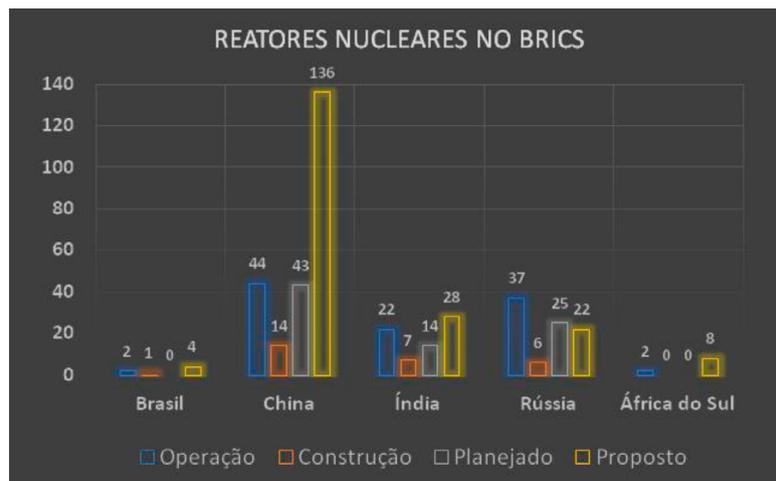


Figura 6. Número de reatores em cada país do BRICS. Fonte: World Nuclear Association<sup>14</sup>

A existência de partículas radioativas alfa e beta foram comprovadas por Ernest Rutherford, que devido a esse trabalho, foi agraciado com o Prêmio Nobel de Química em 1908.<sup>17</sup> Rutherford notou que partículas alfa emitidas pelo material radioativo eram levemente deslocadas no sentido da placa carregada negativamente e, conseqüentemente, exibiam carga positiva.<sup>16</sup> Atualmente, as partículas alfa ( ${}^4\alpha_2$  – onde 4 corresponde ao número de massa atômica ou a soma do número de prótons e nêutrons; e 2 consiste no número atômico ou número de prótons) são conhecidas por possuírem dois prótons e dois nêutrons.<sup>27</sup> A ausência de elétrons provoca uma alta capacidade de ionização do meio, ou seja, no momento em que a partícula alfa é emitida, é possível reter dois elétrons do meio, gerando um átomo de hélio.<sup>27,28</sup> Por essa razão, pode-se enunciar que a partícula alfa é um núcleo de hélio ou um átomo de hélio com duas cargas positivas.<sup>27,28</sup> A partícula alfa não tem alto poder de penetração em tecidos biológicos e em outros meios, sendo bloqueada por uma mera folha de papel.<sup>1,27,29,30</sup>

No caso das partículas beta ( $\beta$ ), Rutherford verificou um deslocamento elevado no sentido da placa carregada positivamente, o que mostrava a existência de carga negativa e uma massa bem inferior comparada a massa das partículas alfa, sendo sua partícula representada por  ${}^0\beta_{-1}$ .<sup>27,31</sup> Becquerel também demonstrou que a partícula beta era, de fato, elétron emitido a uma velocidade muito alta.<sup>27</sup> A partícula beta ioniza de maneira moderada e seu poder de penetração em tecidos biológicos é superior quando comparado ao da partícula alfa, sendo bloqueada por uma placa de alumínio de 5 mm ou de chumbo de 1 mm de espessura.<sup>1,27</sup>

Baseado nos experimentos de Rutherford, na mesma época, Paul Villard descobriu a radiação gama ( $\gamma$ ) ou emissão gama.<sup>27</sup> Os raios gama emitidos pelos elementos radioativos não são constituídos por partículas, mas por ondas eletromagnéticas e não exibem massa e nem carga elétrica.<sup>31</sup> Quando comparado às partículas alfa e beta, exibem baixa capacidade de ionização e elevada penetrabilidade em objetos espessos e densos.<sup>1,27</sup>

Rutherford evidenciou a existência do núcleo atômico e demonstrou que a radioatividade era um fenômeno proveniente de núcleos instáveis de alguns elementos químicos. Este fenômeno ficou conhecido como decaimento radioativo, em que os átomos do elemento original eram eventualmente transformados, espontaneamente, em novos elementos.<sup>27,29</sup> Outra descoberta foi que a velocidade do decaimento por unidade de massa era fixa para um elemento radioativo específico, não sendo afetada por pressão, temperatura ou estado físico. Porém, variava drasticamente de um elemento radioativo para outro. O decaimento foi expresso em termos de meia-vida, sendo o período de meia-vida ou período de semidesintegração ( $t_{1/2}$ ) o tempo para que o número de núcleos radioativos de um elemento em uma amostra fosse reduzido à metade.<sup>32</sup>

O polônio-210, ou seja, o polônio com massa atômica 210, é um dos 25 isótopos radioativos do polônio, e decai

por emissão de partículas alfa, com meia-vida de 138 dias. O rádio-223 tem meia vida de 11,4 dias, e possui aplicação medicinal, especialmente no tratamento de câncer de próstata disseminado para os ossos. Uma vez que os ossos contêm cálcio e que o rádio é um elemento do mesmo grupo do cálcio, o mesmo consegue atuar nas células ósseas cancerosas através da emissão de partículas alfa.<sup>26</sup> Já, os isótopos urânio-235 e urânio-238 possuem meia-vida de 704 milhões e 4,5 bilhões de anos, respectivamente. O urânio-235 é o isótopo físsil, capaz de, ao absorver um nêutron, estabelecer uma reação de fissão em cadeia, em que há liberação de grande quantidade de energia, formação de produtos radioativos e emissão de nêutrons. Por esse motivo, é empregado como combustível nuclear nas usinas.<sup>33,34</sup>

### 3.2. Energia nuclear e tipos de reações nucleares

Energia nuclear é aquela proveniente de uma reação nuclear, ou seja, de processos de transformação de núcleos atômicos. A reação nuclear tem como princípio a modificação da composição do núcleo atômico de um elemento, possibilitando a transformação em outros elementos. O fator de maior interesse é a possibilidade de iniciar a reação mediante técnicas de bombardeamento de nêutrons ou outras partículas.<sup>4,27,30</sup>

As reações nucleares são classificadas em fissão nuclear e fusão nuclear. A fissão nuclear ocorre quando o núcleo atômico é dividido em duas ou mais partículas, enquanto a fusão nuclear consiste na reação em que ao menos dois núcleos atômicos se combinam para formar um novo núcleo.<sup>4</sup> Quando uma dessas duas reações ocorre, os átomos experimentam uma pequena perda de massa que se transforma em uma grande quantidade de energia, de acordo com o princípio de Albert Einstein, que correlaciona as variáveis de energia (E), massa (m) e velocidade da luz no vácuo (c) através da equação  $E=mc^2$ .<sup>2,27</sup>

A descoberta da fissão nuclear teve seu início a partir dos estudos do físico italiano Enrico Fermi, que demonstrou que o bombardeamento do núcleo de certos átomos com nêutrons produzia elementos transurânicos desconhecidos, mas nenhum elemento foi isolado e identificado.<sup>1</sup> Após realizar experimentos similares com urânio, os alemães Otto Hahn e Fritz Strassmann identificaram a formação de núcleos de bário de massa igual a 139 na amostra.<sup>1,31</sup> A física austríaca Lise Meitner concluiu que a divisão do núcleo de urânio ocorreu por fissão, com produção de nêutrons e liberação simultânea de uma grande quantidade de energia.<sup>1,31</sup> Posteriormente, vários cientistas estudaram as particularidades dessa reação e as explicações foram se aprimorando. Atualmente, sabe-se que o fenômeno da fissão nuclear do urânio consiste na captura de um nêutron pelo urânio-235, que gera urânio-236, que devido à sua instabilidade, sofre fissão, formando dois novos núcleos radioativos, o bário-139 e o criptônio-94, além de três nêutrons e quantidade elevada de energia.<sup>31</sup> Meitner constatou que, sob situações apropriadas, os novos nêutrons poderiam interagir

com outros núcleos de urânio-235, acarretando novas reações de fissão nuclear, produzindo ainda mais energia e originando a denominada reação em cadeia.<sup>1,27,29</sup>

A reação que retrata a fissão nuclear do urânio-235 é um exemplo de transmutação artificial.<sup>27</sup> A transmutação artificial acontece quando um núcleo é transformado em outro através do seu bombardeamento com partículas em laboratório.<sup>27</sup> A primeira transmutação artificial foi reportada por Rutherford e corresponde à transmutação artificial do nitrogênio-14, o qual é bombardeado por uma partícula alfa, e gera um próton e oxigênio-17.<sup>31</sup> Muitas outras transmutações foram executadas possibilitando reconhecer outras partículas subatômicas, como o bombardeamento do núcleo de berílio com partícula alfa e geração de um nêutron e carbono-12; e o bombardeamento do núcleo de alumínio com partícula alfa, para geração de um pósitron. Nessa última reação, há a formação de fósforo-30 instável, que se desintegra e produz o silício-30 mais estável e um pósitron.<sup>35</sup> Exemplos de reações de transmutação artificial podem ser observados na Tabela 1.

A fusão nuclear tem sido reportada como uma tecnologia mais benéfica e de melhor desempenho que a fissão nuclear, porém ainda se encontra em estágio de pesquisa e desenvolvimento. A sua reprodução sustentável e artificial ainda não é viável, de modo que todos os reatores nucleares da atualidade são voltados para fissão.<sup>3</sup> Como sua tecnologia é emergente, apresenta uma cobertura positiva da mídia, principalmente no que se refere ao progresso científico e perspectivas econômicas.<sup>3</sup>

Com base nos estudos realizados até hoje, duas rotas tecnológicas apresentam perspectiva de aplicação em reatores de fusão nuclear. Uma rota envolve a geração de campos magnéticos provocados por potentes eletroímãs e a outra, consiste no bombardeio simultâneo de raios laser de altíssima potência. A rota magnética é a mais promissora, em especial na configuração de uma câmara toroidal com bobinas magnéticas, mais conhecida como tokamak, que possui um maior número de testes e resultados bem sucedidos. Em ambas as rotas, o combustível seria uma mistura de dois isótopos do hidrogênio, o deutério (D) e o trítio (T). O deutério contém um nêutron além do próton, existe em abundância na natureza e pode ser retirado da água do mar. O trítio contém um próton e dois nêutrons e não é de ocorrência natural. Sua produção a partir de lítio pode ocorrer dentro do próprio reator nuclear. Ao contrário do deutério, o trítio é radioativo e possui meia-vida de 12 anos. A fusão desses dois núcleos, também conhecida

como reação D+T, forma hélio, um nêutron e 17,6 MeV de energia.<sup>36,37</sup>

O maior projeto de fusão nuclear do mundo é o Reator Experimental Termonuclear Internacional (ITER -*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Localizado na França, o mesmo ainda se encontra em fase de construção. O projeto é fruto de uma cooperação entre diversos países, incluindo China, União Europeia, Estados Unidos, Rússia e Japão. O acordo foi assinado em 2006 e a previsão é de que esse reator experimental entre em operação em 2025 com expectativa de utilização por aproximadamente 20 anos.<sup>38,39</sup>

#### 4. Usina Nuclear de Fissão

A usina nuclear tem apresentado um papel cada vez mais importante na geração de energia, principalmente a energia elétrica. O sistema de funcionamento de uma usina termonuclear será abordado nesse artigo de forma simplificada. As principais partes que compõem uma usina nuclear serão apresentadas, desde a introdução do combustível nuclear em um reator até os sistemas de segurança necessários à proteção da vida e do meio ambiente. A Figura 7 apresenta o esquema de uma usina termonuclear com reator de água pressurizada (*Pressurized Water Reactor - PWR*).

As usinas termonucleares são aquelas que produzem energia elétrica a partir da geração de energia térmica proveniente das reações nucleares. Normalmente, essas usinas funcionam através de dois circuitos, denominados de circuito primário e circuito secundário, além de um sistema de água de refrigeração.<sup>2,13</sup> Este é o caso das usinas de Angra, as quais também são chamadas de usinas PWR e utilizam a própria água como moderador e como fluido refrigerante, ou seja, o fluido que vai trocar calor com o urânio para em seguida aquecer a água do circuito secundário.<sup>40</sup>

O circuito primário consiste em um vaso de pressão, um pressurizador e uma bomba. O vaso de pressão é um recipiente de chumbo que funciona como um obstáculo de retenção, e em seu interior, há a água de refrigeração do núcleo do reator, assim como o combustível nuclear. Com a reação nuclear, essa água altamente radioativa é aquecida e flui pelo circuito primário no sentido do pressurizador em um sistema fechado.<sup>41,42</sup> A alteração da massa específica desse fluido de arrefecimento, em consequência da mudança de temperatura, ocasiona variações na pressão, a qual é controlada pelo pressurizador, responsável pela manutenção da pressão da

**Tabela 1.** Exemplos de reações de transmutação artificial e suas partículas subatômicas geradas

Elemento	Transmutação	Próton	Nêutron	Pósitron
nitrogênio-14	$^{14}\text{N}_7 + ^4\alpha_2 \rightarrow ^{17}\text{O}_8$	$^1\text{p}_1$	-	-
berílio-9	$^9\text{Be}_4 + ^4\alpha_2 \rightarrow ^{12}\text{C}_6$	-	$^1\text{n}_0$	-
alumínio-27	$^{27}\text{Al}_{13} + ^4\alpha_2 \rightarrow ^{30}\text{P}_{15}$	-	$^1\text{n}_0$	-
	$^{30}\text{P}_{15} \rightarrow ^{30}\text{Si}_{14} + \beta_{+1}$	-	-	$^0\beta_{+1}$

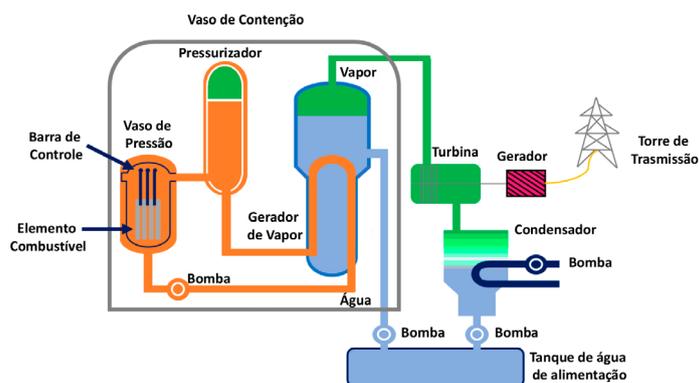


Figura 7. Esquema de uma usina nuclear do tipo PWR. Adaptação do Atlas de Energia Elétrica do Brasil<sup>13</sup>

usina nuclear PWR, em diferentes regimes de operação, dentro dos limites de operação no circuito primário.<sup>43</sup> Este equipamento é instalado na saída do reator nuclear (perna quente) e é constituído por aquecedores elétricos e válvulas de injeção de água. Durante a operação, o pressurizador é preenchido com líquido e vapor de água. Se ocorrer oscilações no sistema elétrico ou na turbina a vapor, influenciando na temperatura do circuito primário e, conseqüentemente, na pressão, o sistema de controle de pressão do pressurizador inicia automaticamente a operação. Por exemplo, se houver uma queda de pressão, o sistema de controle liga os aquecedores do pressurizador, levando à vaporização da água, aumentando assim, a pressão do sistema devido ao maior volume específico ocupado pelo vapor. Se esta ação não funcionar e continuar ocorrendo queda de pressão, o reator nuclear é desarmado pelo sistema de controle. Ao contrário, se houver um aumento de pressão do circuito primário, o sistema abre as válvulas injetando água fria no vapor, ocasionando a sua condensação. O menor volume específico ocupado pela água no estado líquido diminui a pressão.<sup>44</sup> Essa água radioativa aquecida é quem promove o aquecimento da 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.<sup>2,13,30,42</sup>

O circuito secundário é constituído por um gerador de vapor, uma turbina, um condensador, bombas e um tanque de água de alimentação. A água desse circuito já aquecida e presente no gerador de vapor é vaporizada. Esse vapor é o responsável pelo acionamento da turbina para geração de energia elétrica, a qual é distribuída pelas linhas de transmissão. O vapor que desprende da turbina entra no condensador e passa por um sistema de água de refrigeração, que promove o resfriamento da água antes que a mesma entre no tanque de água de alimentação para recirculação no circuito secundário.<sup>2,13,41,42</sup>

#### 4.1. Combustível nuclear

Combustível nuclear é o material usado para gerar as reações nucleares.<sup>1</sup> Uma vez que os reatores atuais usam da

tecnologia da fissão nuclear, o combustível nuclear precisa ser um átomo instável, que ao colidir com um nêutron sofra a fissão e libere energia. A grande maioria dos reatores nucleares usa o urânio enriquecido como combustível, mas outras fontes de combustível, como urânio natural e óxidos mistos também são possíveis.<sup>45</sup>

As reservas de urânio não são ilimitadas e essa questão torna a energia nuclear uma fonte de energia não renovável, diferentemente da energia solar e da energia eólica. No entanto, o combustível nuclear apresenta a maior densidade de energia dentre as fontes práticas de combustível.<sup>1,46</sup> O urânio é um elemento que ocorre naturalmente, mas não chega à usina em estado puro, e muitas vezes, precisa sofrer um processo chamado “Ciclo do Combustível Nuclear - CCN”. Esse ciclo engloba as seguintes etapas: 1. Mineração; 2. Beneficiamento; 3. Refinação; 4. Enriquecimento; 5. Conversão; e 6. Pastilhamento. Além dessas etapas, também fazem parte do CCN, a deposição final dos rejeitos e a reutilização do combustível residual, que volta a ser utilizado na geração de energia, como óxido misto (MOx).<sup>45,47</sup>

A primeira etapa do CCN é a mineração e o beneficiamento, onde o minério extraído da natureza sofre duas operações de britagem para redução do tamanho de suas partículas. Em seguida, o urânio é extraído da rocha por lixiviação com solução de ácido sulfúrico, gerando um licor de urânio ou, mais cientificamente, uma solução de urânio em ácido sulfúrico. Esse licor sofre uma etapa preliminar de purificação e concentração, dando origem a um sal amarelo de fórmula  $U_3O_8$ , também conhecido como torta amarela (*yellowcake*).<sup>46,47</sup>

Na etapa de refinação, o  $U_3O_8$  é convertido em um sal de hexafluoreto de urânio ( $UF_6$ ), que sofre um processo físico e muda para o estado gasoso à baixas temperaturas. O gás precisa ser enriquecido no isótopo urânio-235 e este processo de enriquecimento foi um dos primeiros obstáculos encontrados pelos cientistas, pois o isótopo urânio-238 apresenta teor superior a 99,3% na natureza, enquanto que o isótopo físsil urânio-235 corresponde a apenas 0,7%.<sup>48,49</sup> O enriquecimento no isótopo físsil só foi possível com o aperfeiçoamento dos métodos de separação, como por exemplo, a ultracentrifugação gasosa.<sup>46,48,49</sup> Através da ultracentrifugação, há a separação entre o urânio-238 de

maior densidade e o urânio-235 de menor densidade. O gás enriquecido em urânio-235 é deslocado para outra centrífuga, onde a separação recomeça. O urânio usado nos reatores nucleares para a produção de energia possui entre 3% e 5% de urânio-235. Para fins de comparação, o enriquecimento para uso de bombas atômicas é de cerca de 90%.<sup>46,48,49</sup>

O gás enriquecido final é convertido em um pó de dióxido de urânio ( $\text{UO}_2$ ), o qual, após um processo de mistura com outros compostos de urânio, como  $\text{U}_3\text{O}_8$  e dicarbeto de urânio ( $\text{UC}_2$ ), é submetido a uma prensa rotativa automática, onde são produzidas as chamadas “pastilhas verdes”, que são encaminhadas para um forno de sinterização e aquecidas a 1750 °C para ganhar rigidez e adquirir a resistência necessária às condições de operação a que serão submetidas dentro do reator de uma usina nuclear.<sup>46</sup> As pastilhas de urânio são empilhadas em varetas revestidas como uma liga de zircônio, que são agrupadas e mantidas rigidamente por grades espaçadoras, formando o elemento combustível (Figura 8). Um elemento combustível tem duração de três ciclos (ou três anos), sendo armazenado após seu uso dentro das usinas em locais apropriados.<sup>46</sup>

#### 4.2. Reator nuclear

O primeiro reator do mundo a realizar uma reação nuclear em cadeia autossustentada, denominado Pilha-1 (pilha Fermi, CP-1) por ser constituído por uma pilha de blocos de grafite e urânio, foi produzido em Chicago, em 1942, por Enrico Fermi e seus discípulos, como um protótipo, visando um projeto de pesquisa na Universidade de Chicago. A reação nuclear empregada foi a transmutação artificial, que consistia no bombardeamento de urânio-238 por um nêutron de baixa energia.<sup>51,52</sup> Já o primeiro reator nuclear que produziu eletricidade a partir de energia atômica, foi o reator EBR-1 (*Experimental Breeder Reactor No. 1*) localizado em Idaho, também nos Estados Unidos. Esse reator entrou em operação em 1951 e sua atividade foi encerrada 12 anos depois. Essa planta de energia nuclear pioneira tornou-se um museu, o *EBR-1 Atomic Museum*, e é aberta à visitação.<sup>53</sup> A Figura 9 mostra fotos da instalação.

Um reator nuclear é classificado de acordo com sua finalidade, que pode ser direcionada ao uso civil, militar ou

de pesquisa. Reatores para uso civil são, normalmente, para geração de energia elétrica, enquanto os militares visam a produção de armamentos nucleares. No caso dos reatores projetados para pesquisa, o foco é o desenvolvimento de tecnologias, tanto para produção de energia quanto para o aperfeiçoamento de armas nucleares.<sup>54</sup> Independente do uso, qualquer reator nuclear é considerado um sistema capaz de iniciar e manter as reações de fissão nuclear em cadeia que ocorrem em seu interior sob controle.

O reator nuclear é a parte central da usina. Os componentes de um reator nuclear são o combustível nuclear, o sistema refrigerante (ou de arrefecimento), as barras de controle, os materiais estruturais e o moderador nuclear, sendo este último, às vezes ausente, dependendo do tipo de reator.<sup>42</sup> Os reatores que usam moderadores são classificados como reatores térmicos, enquanto aqueles que não usam, são conhecidos como reatores rápidos e necessitam da utilização de combustíveis ricos em elementos físeis.<sup>41</sup> Todos esses componentes estão incluídos dentro do vaso de contenção para garantir maior segurança do sistema.<sup>42</sup>

Com relação aos componentes do reator, é possível encontrar combustível nuclear natural, enriquecido ou mistura de óxidos; moderadores como água (leve ou pesada) ou grafite; e fluidos refrigerantes como gases (hélio, dióxido de carbono), água (leve, pesada, vapor), sais fundidos e metais líquidos. Ou seja, há distintas formas de trabalho para um reator, o que possibilita a existência de diferentes tipos de reatores no mundo.<sup>41,42,48,54</sup> Os reatores mais conhecidos são: o reator de água pressurizada (*Pressurized Water Reactor - PWR*); o reator de água fervente (*Boiling Water Reactor - BWR*); o reator natural de urânio, gás e grafite (*Gas Cooled graphite moderated Reactor - GCR*); o reator de gás avançado (*Advanced Gas-cooled Reactor - AGR*); o reator refrigerado a gás de alta temperatura (*High Temperature Gas Cooled Reactor - HTGCR*); o reator nuclear de água pesada (*Pressurized Heavy Water Reactor - PHWR*); e o reator de gerador rápido (*Liquid Metal cooled Fast Breeder Reactor - LMFBR*).<sup>32</sup> Os reatores mais encontrados no mundo são PWR e BWR, sendo PWR, a tecnologia empregada no Brasil, nas usinas Angra I e II. A Tabela 2 apresenta as informações características de cada tipo de reator, assim como a origem de suas tecnologias.

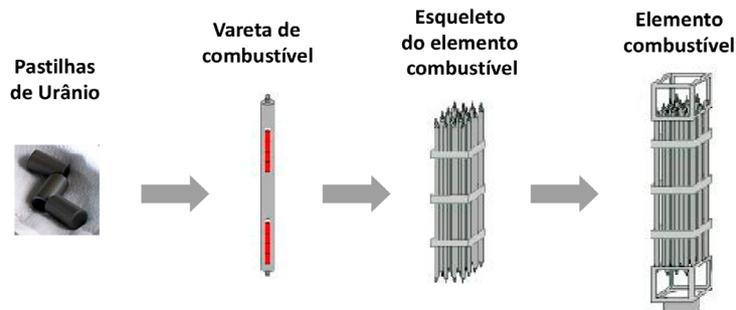


Figura 8. Pastilhas de urânio e elemento combustível. Adaptação da referência 50

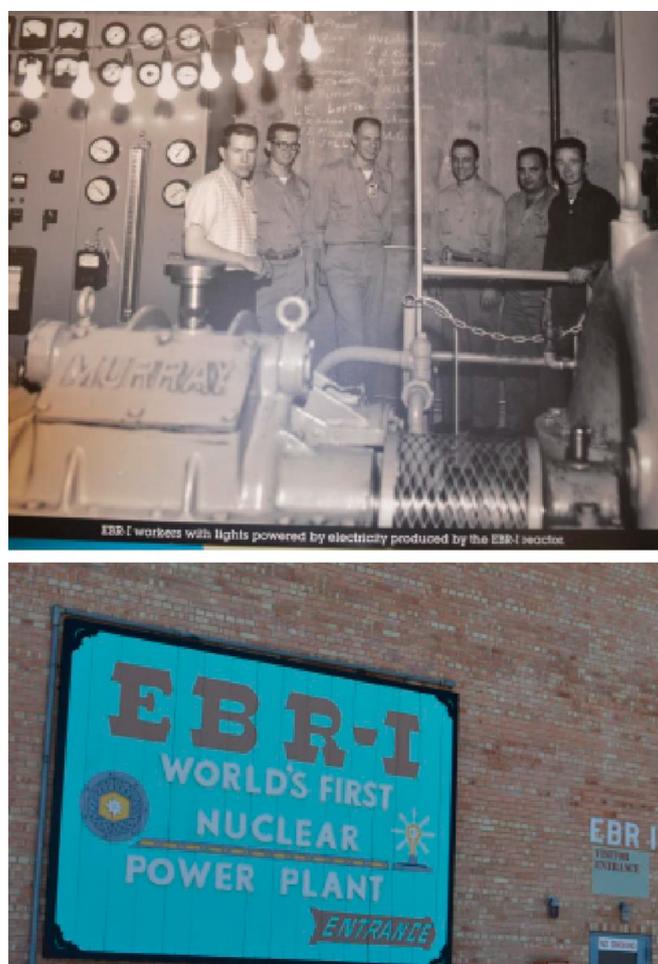


Figura 9. Fotos da instalação do reator EBR-1. Fonte: Acervo pessoal de Daniel Artur Pinheiro Palma

Tabela 2. Tipos de reatores no mundo

Reator	Combustível	Moderador	Refrigerante	Tecnologia
PWR	urânio enriquecido	água ou grafite	água ou grafite	EUA; Alemanha; França; Japão
BWR	urânio enriquecido	água	água	EUA; Suécia; Alemanha
GCR	urânio natural	grafite	dióxido de carbono	França; Reino Unido
AGR	urânio enriquecido	grafite	hélio	Reino Unido
HTGCR	urânio enriquecido	grafite	dióxido de carbono	Alemanha; Reino Unido; EUA
PHWR	urânio natural	água pesada	água pesada	Canadá
LMFBR	urânio natural	-	sódio líquido	Rússia; França

### 4.3. Núcleo do reator

No interior de um reator estão presentes o elemento combustível, o moderador (quando existente) e as barras de controle.<sup>54</sup> A reação de fissão nuclear do combustível radioativo ocorre no núcleo do reator e promove a formação de nêutrons com alta energia cinética (ou velocidade), o que diminui a probabilidade de fissão de outros átomos físséis. O moderador, normalmente água ou grafite, atua na redução da velocidade desses nêutrons, por colisão.<sup>47</sup> Para isso, é necessário que o elemento moderador tenha baixa massa atômica e não absorva os nêutrons, provocando uma maior transferência de energia nas colisões e reduzindo a

velocidade dos nêutrons, ações que estimulam novas fissões ou as reações em cadeia.<sup>42,55</sup>

Para o controle das reações em cadeia se faz necessário acionar as barras de controle, que atuam absorvendo os nêutrons.<sup>47</sup> Nos reatores brasileiros, as barras de controle são constituídas por óxido de gadolínio.<sup>56</sup> O controle ocorre quando as mesmas são elevadas ou abaixadas, dependendo do que se deseja. Quando o funcionamento do reator é normal, as barras estão completamente elevadas e, portanto, fora do núcleo do reator. Quando as barras são abaixadas, e se mesclam com as hastes do combustível, dentro do núcleo do reator, as mesmas atuam diminuindo a velocidade da reação, até que toda a reação seja suspensa.<sup>42,55</sup>

No núcleo também há um fluido refrigerante, que serve para absorver o calor proveniente da reação nuclear e, conseqüentemente, aquecer a corrente de água do ciclo secundário.<sup>42</sup> Nos reatores de Angra, esse fluido de refrigeração contém ácido bórico, que atua como um controle químico da reação nuclear uma vez que o boro é absorvedor de nêutrons. A presença de boro reduz a quantidade de nêutrons, mantendo também a reação em cadeia sob controle.<sup>57</sup> Em alguns reatores, o núcleo pode estar dentro de uma piscina de água com cerca de 10 m de profundidade ou dentro de um vaso de pressão feito de aço.<sup>54</sup>

Os reatores moderados por grafite normalmente utilizam a grafite sólida como moderador de nêutrons e água leve como refrigerante. Um exemplo é o reator de energia nuclear canalizado de alta potência (*Reaktor Bolshoy Moshchnosti Kanalnyy* - RBMK), produzido pelos soviéticos, que foi o reator envolvido no desastre de Chernobyl.<sup>32</sup> Outro exemplo de reator com moderador de grafite é o britânico com refrigeração a gás avançado. O dióxido de carbono apresenta a função de refrigerante e circula pelo núcleo, retirando o excesso de calor. As usinas Angra I e II, em seus reatores de água pressurizada (PWR) não usam a grafite como moderador e sim a própria água, assim como os reatores de água fervente (BWR).<sup>58</sup>

#### 4.4. Gerador de vapor

Os geradores de vapor são grandes trocadores verticais de calor e são utilizados para converter água em vapor a partir do calor produzido em um reator nuclear. Os reatores do tipo PWR comumente utilizam esse sistema, que são responsáveis por cerca de 25% das paralisações de emergência nas usinas nucleares, principalmente devido a problemas relacionados ao controle do nível de água do gerador de vapor.<sup>59</sup>

Normalmente, os geradores de vapor usam tubos de níquel como trocadores de calor e apresentam em sua parte superior um separador água-vapor e um separador de umidade. O fluido refrigerante aquecido proveniente do circuito primário transfere calor para esses tubos de níquel. A água de alimentação do circuito secundário, que é fornecida por uma tubulação proveniente do tanque de água de alimentação, circula através dos tubos trocadores de calor, absorvendo o calor do fluido refrigerante, e uma parte dessa água se transforma em vapor. Conforme a mistura água-vapor cresce no gerador de vapor, ocorre a separação. A água continua a circular como água de alimentação e o vapor atravessa um separador de umidade e flui em direção a turbina.<sup>42</sup>

Reatores de água fervente (BWR) não necessitam de geradores de vapor, pois o vapor utilizado na turbina é produzido diretamente no núcleo do reator. A ativação radioativa do oxigênio e nitrogênio dissolvido na água acaba tornando a sala da turbina inacessível durante a operação do reator e por algum tempo depois.<sup>41</sup>

#### 4.5. Turbina a vapor e gerador elétrico

Uma turbina a vapor é um equipamento capaz de converter a energia térmica do vapor pressurizado em trabalho mecânico. O princípio que descreve essas turbinas é o mesmo do ciclo termodinâmico de Rankine, o qual foi idealizado para um motor térmico de pressão constante, que converte parte do calor em trabalho mecânico.<sup>60,61</sup> Esse tipo de turbina possui alta eficiência, pois os gases de escape são aproveitados de forma a aumentar o rendimento global do ciclo.<sup>62</sup> No caso da termonuclear, os gases de escape são condensados e reutilizados como água do circuito secundário.

No gerador de eletricidade, a energia mecânica proveniente da turbina é convertida em energia elétrica.<sup>62</sup> O sistema turbina-gerador normalmente empregado em usinas termonucleares é o mesmo utilizado em uma usina térmica convencional. Isso é possível, principalmente em tecnologias tipo PWR, onde os circuitos primários e secundários são separados e o vapor gerado através do gerador de vapor não contém radioatividade. No entanto, é necessário usar muito mais vapor para acionar a turbina, uma vez que o vapor gerado por uma usina termonuclear é de baixa pressão saturada.<sup>42</sup>

### 5. Sistemas de Proteção em Usina Nuclear

Embora a energia nuclear contribua para uma redução significativa das emissões de CO<sub>2</sub>, não se pode ignorar que a atividade da indústria nuclear acarreta em impactos ambientais preocupantes, como a elevação da temperatura da água que retorna ao meio ambiente e diminui a solubilidade dos gases, como o oxigênio, prejudicando a vida aquática; e o resíduo radioativo, que é classificado em baixa, média e alta atividade, e apresenta grande perigo à sociedade e ao meio ambiente. As duas primeiras classificações (baixa e média atividades) exigem processamento e acondicionamentos especiais (chumbo e concreto) até que os núcleos radioativos decaiam e passem a emitir níveis não nocivos de radiação, para serem descartados em áreas confiáveis.<sup>1,41,63</sup> Já os resíduos de alta atividade (combustível nuclear) são provisoriamente estocados em piscinas de resfriamento, cheias de água. Na sequência, parte deles é misturado a outros materiais e solidificado na forma de barras de vidro para facilitar o transporte e a estocagem.<sup>1,41</sup> Outro perigo associado às usinas nucleares é o acontecimento de anomalias no desempenho dos reatores e no sistema de refrigeração, que pode causar vazamentos e, inclusive, explosões, como ocorreu em Chernobyl, em 1986, e em Fukushima, em 2011.<sup>23</sup> As preocupações são enormes e a ampliação do uso da energia nuclear está diretamente associada a atitudes de prevenção dos possíveis impactos negativos à vida e ao meio ambiente.<sup>5,64</sup> Dessa maneira, as usinas nucleares investem em vários sistemas de controle e proteção, principalmente em mecanismos de

segurança como controle de radioatividade, manutenção do refrigerante do núcleo, transporte seguro de combustível gasto e gestão de resíduos radioativos.<sup>19,65</sup> A seguir, serão abordados, de forma simplificada, alguns sistemas de segurança existentes em usinas nucleares.

O sistema de energia de emergência é uma fonte independente de energia elétrica que suporta sistemas elétricos importantes quando há perda de energia nominal, que pode incluir um gerador de reserva, baterias e outros equipamentos. Sua instalação tem por objetivo proteger a vida e evitar a perda de fornecimento de energia elétrica primária. É um tipo de sistema de energia contínuo.<sup>54</sup>

O sistema de proteção do reator (*Reactor Protection System - RPS*) é um conjunto de dispositivos com o propósito de manter a segurança nuclear em uma usina. O sistema é projetado para desligar o complexo nuclear, evitando a liberação de materiais radioativos. O sistema pode ser executado de forma automática (*trip*) ou manual, pela atuação dos operadores. A forma *trip* é acionada quando há descontrole dos parâmetros de limite. Todas as usinas nucleares apresentam alguma forma de RPS, como por exemplo, a inserção total de todas as barras de controle e desligamento do reator.<sup>64</sup>

O sistema de barras de controle consiste em uma série de hastes inseridas no núcleo do reator com o objetivo de controlar as reações nucleares em cadeia. A função das barras é absorver os nêutrons e diminuir o número de fissões do elemento combustível, o que provoca a interrupção rápida da reação nuclear.<sup>54</sup> O material das barras de controle são geralmente ligas, que podem conter compostos actínicos, lantanídeos, metais de transição e boro. Cada tipo de liga apresenta vantagens e desvantagens. A composição da liga deve proporcionar barras com baixo coeficiente de expansão térmica e propriedades de auto lubrificação. Dentre as propriedades nucleares que esses materiais absorvedores de nêutrons devem apresentar, destacam-se a seção de choque de absorção térmica, a seção de choque macroscópica de absorção térmica e as principais ressonâncias (energia dos nêutrons e seção de choque de absorção epitérmica). A seção de choque, por exemplo, expressa a probabilidade de ocorrer reação entre um nêutron e o núcleo em questão. Uma liga de cádmio-113, que possui alta seção de choque de absorção térmica, com índio e prata, que tem alta absorção de ressonância na faixa epitérmica de energia dos nêutrons, constitui-se um material absorvedor altamente eficaz, apresentando efetividade próxima a do háfnio, que é um dos melhores materiais absorvedores para elemento de controle e segurança em reatores térmicos, mas possui custo elevado.<sup>66</sup> As barras de controle são suficientes para interromper imediatamente os reatores do tipo BWR e PWR.<sup>67</sup>

O sistema de injeção de segurança e controle de líquido inclui uma série de sistemas, sendo um deles, os que envolvem os acidentes por perda de fluido de refrigeração (*Loss-of-Coolant Accidents - LOCAs*), que classificam os eventos de perda do fluido refrigerante do reator em grandes

(*Large Break LOCAs - LBLOCAs*), médios (*Medium Break LOCAs - MLOCAs*) e pequenos (*Small Break LOCAs - SBLOCAs*), a depender do tipo de dano.<sup>67</sup> Quando ocorre ruptura na tubulação superior a 0,1 m<sup>2</sup>, o dano é considerado grande, acidentes pequenos são atribuídos quando as quebras são menores que 0,1 m<sup>2</sup>. Outros cenários também são associados à acidentes por perda de fluido refrigerante, não apenas rompimento de tubulação. Quando o fluido refrigerante escapa rapidamente do vaso de pressão, no circuito primário, provocando a despressurização, ocorre risco iminente de um acidente de grande proporção acontecer (LBLOCAs). Nesses casos, quando as medidas de contenção e controle não são imediatamente tomadas, o núcleo do reator pode superaquecer. As ações corretivas envolvem a rápida reposição desse fluido refrigerante, de forma a garantir que o núcleo permaneça coberto, evitando o seu dano. Os acidentes de média e pequena proporção (MLOCAs e SBLOCAs) ocorrem mais frequentemente e são eventos menos drásticos, no entanto, também causam problemas sérios, uma vez que a perda do refrigerante ocorre gradualmente. Os reatores modernos geralmente fornecem meios adicionais de mitigação de LOCA, por exemplo, tubulação menor, o que reduz a probabilidade de rachaduras nas mesmas, além de outras medidas, como a inclusão de tanques adicionais, sistemas de injeção de alta pressão (*High-Pressure Injection - HPI*), sistemas de resfriamento passivo baseados em sistemas de resfriamento de circulação natural e isolamentos projetados para operar indefinidamente.<sup>67</sup>

Outra categorização de acidente no reator é o acidente por perda de dissipação do calor (*Loss of Heat Sink Accidents - LOHA*), que ocorre, por exemplo, por uma falha da bomba de circulação do fluido refrigerante ou perda de fluxo de água de alimentação, este último associado com a função de transferência de calor do circuito secundário.<sup>67</sup>

A função do sistema de resfriamento de emergência do núcleo (*Emergency Core Cooling Systems - ECCS*), em muitas ocasiões, não é tão simples quanto apenas fornecer fluido refrigerante adicional para o núcleo do reator. Dependendo da quantidade e velocidade da perda desse fluido, é preciso usar sistemas de alta (HPI) ou baixa (LPI) pressão para reposição emergencial. Quando a perda não é imediata, a pressão do reator pode permanecer alta, e então, é necessário o uso do sistema HPI, enquanto perdas grandes e rápidas necessitam do LPI, que foi projetado para fornecer água em grandes quantidades para compensar a perda. Além dos dispositivos para injeção de fluido em alta pressão e em baixa pressão, existe também o tanque de inundação como último recurso, instalado acima do núcleo do reator. Todos usam água com alta concentração de boro (7000 ppm) que visa garantir o desligamento do reator e mantê-lo coberto com água para o seu resfriamento. O boro age como um absorvedor de nêutrons.<sup>41,42,67</sup>

Os sistemas RPS e ECCS foram projetados para responder a todas as medidas de contenção em uma usina

nuclear. No entanto, em caso de grandes ações de contenção, há o sistema de controle de líquido em standby (*Standby Liquid Control System - SLCS*). Esse sistema nunca deve ser ativado, a menos que outras medidas falhem. O SLCS consiste em um tanque contendo água borada, que atua como um absorvedor de nêutrons. Esse tanque é protegido por válvulas explosivamente abertas e bombas redundantes operadas por bateria, permitindo a injeção da água borada no reator, desligando-o se o reator estiver fora de controle.<sup>67,68</sup>

Outra forma de proteção e controle é o edifício de contenção (ou vaso de contenção), que é normalmente uma estrutura de aço ou chumbo reforçado que envolve um reator nuclear. O mesmo é desenvolvido com o propósito de conter o escape de vapor ou gás radioativo a uma pressão máxima 40 a 80 psi. A contenção é a última barreira imposta à liberação da radiação e veda o reator do ambiente exterior, a estrutura deve ser projetada para suportar o impacto de um avião de passageiros totalmente carregado e sem ruptura.<sup>54</sup> Embora a contenção desempenhe um papel crítico nos acidentes de reatores nucleares mais severos, cabe ressaltar que ela é projetada apenas para conter ou condensar vapor a curto prazo, necessitando utilizar outros sistemas de controle para remoção de calor a longo prazo. O acidente de *Three Mile Island* é um exemplo que mostra essa observação. O vaso de contenção manteve o limite de pressão, mas em longo prazo, devido ao resfriamento insuficiente, os operadores precisaram liberar os gases radioativos da contenção para evitar pressurização excessiva, sendo liberado para atmosfera cerca de 13 milhões de curies de gás radioativo. Outro exemplo de acidente foi o de *Fukushima*, onde um terremoto e tsunami resultaram em falha de energia nos geradores e baterias que supriam os sistemas de segurança. Como consequência, o combustível não resfriou e resultou na fusão das barras de combustível e vários outros danos, que elevou a pressão dentro da contenção do reator, resultando em sua quebra.<sup>54,67</sup>

## 6. Conclusão

A população mundial cresce em um ritmo acelerado e, com isso, aumenta também a demanda por energia para garantir as atividades essenciais da sociedade. Paralelamente, a preocupação ambiental vem ganhando cada vez mais destaque e a busca por fontes de energia renováveis, ou que produzam menos impacto à vida e ao meio ambiente, tem sido considerada, visando uma mudança positiva na matriz energética mundial. Ainda assim, a composição da nova matriz energética dependerá de muitos fatores, de difícil previsão.

A energia nuclear é uma fonte de energia limpa, com grande potencial de crescimento mundial, e é a segunda maior fonte de eletricidade, depois da energia hidrotérmica. Apesar de todos os riscos ambientais associados, o seu uso em locais de alta demanda energética e que não possuem

condições favoráveis para o emprego de energias renováveis tem sido considerado.

Um maior conhecimento do assunto, por exemplo, da evolução e do uso da energia nuclear ao longo dos anos e das atividades de uma usina, permite um olhar mais crítico frente às vantagens e desvantagens dessa fonte de energia. Aliado a isso, o desenvolvimento da engenharia e o aprimoramento das tecnologias químicas das usinas nucleares possibilitam uma maior segurança das atividades, o que pode garantir um futuro promissor para geração da energia nuclear mundial.

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores gostariam de registrar um agradecimento especial ao Doutor Daniel Artur Pinheiro Palma, Tecnologista Sênior da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), pela cessão das fotos que compõem a Figura 9 do artigo. Os autores agradecem também ao Programa de Mestrado Profissional em Química em Rede Nacional (PROFQUI).

## Referências Bibliográficas

- Xavier, A. M.; De Lima, A. G.; Vigna, C. R. M.; Verbi, F. M.; Bortoleto, G. G.; Goraieb, K.; Collins, C. H.; Bueno, M. I. M. S.; Marcos da História da Radioatividade e Tendências Atuais. *Química Nova* **2007**, *30*, 83. [CrossRef]
- Farias, L. M.; Sellitto, M.; Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. *Revista Liberato* **2011**, *12*, 01. [CrossRef]
- Schmidt, L.; Horta, A.; Pereira, S.; The Fukushima nuclear disaster and its effects on media framing of fission and fusion energy technologies. *Ambiente e Sociedade* **2014**, *17*, 233. [Link]
- Da Cunha, C. P.; Dos Anjos, J. A. S. A.; Análise da matriz energética nuclear mundial e brasileira antes e após o acidente nuclear de Fukushima, Japão. *Revista Eletrônica de Energia* **2015**, *5*, 79. [Link]
- Pastura, V.; Mól, A. C. de A.; Legey, A. P.; Lapa, C. M. F.; *Resumo do X Congresso Regional Latinoamericano IRPA de Protección y Seguridad Radiológica "Radioprotección: Nuevos Desafíos para um Mundo em Evolución"*, Buenos Aires, Argentina, 2015.
- de Carvalho, J. F.; The role of nuclear energy in Brazil. *Estudos avançados* **2012**, *26*, 293. [Link]
- Sítio da Eletrobrás Eletronuclear. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br>>. Acesso em: 23 agosto 2020.
- Silva, G.; Expertise e Participação da População em Contexto de Risco Nuclear: Democracia e Licenciamento Ambiental de Angra 3. *Revista de Ciências Sociais* **2009**, *52*, 771. [CrossRef]
- Sítio da Comissão Nacional de Energia Nuclear. Disponível em: <<http://memoria.cnen.gov.br/manut/ImprimeCrono.asp?Ano=1977&seq=2&unidade=Brasil>>. Acesso em: 30 setembro 2020.

10. Sítio Comissão Nacional de Energia Nuclear. Disponível em: <<http://memoria.cnen.gov.br/memoria/Cronologia.asp?Unidade=Brasil>>. Acesso em: 30 setembro 2020.
11. Patti, C.; *O programa nuclear brasileiro: uma história oral*, 1a. ed., Editora Fundação Getulio Vargas, 2014. Disponível em: <<http://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/bitstream/handle/10438/13733/O%20programa%20nuclear%20brasileiro.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 30 setembro 2020.
12. Google Maps. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/@-23.0067342,-44.4609497,14.87m/data=!3m1!1e3?hl=pt-BR>>. Acesso em: 10 setembro 2020.
13. Sítio da Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas\\_par3\\_cap8.pdf](http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par3_cap8.pdf)>. Acesso em: 19 agosto 2020.
14. Sítio da US Energy Information Administration. Disponível em: <<https://www.eia.gov/totalenergy/data/monthly/pdf/mer.pdf>>. Acesso em: 28 julho 2020.
15. Sítio da BP. Disponível em: <<https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy/nuclear-energy.html>>. Acesso em: 10 setembro 2020.
16. Sítio da World Nuclear Association. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requireme.aspx>>. Acesso em: 23 agosto 2020.
17. Sítio do Ministério de Minas e Energia, Brasil. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 23 agosto 2020.
18. Pedrosa, L. L. A.; Silva, F. F.; Silva, F. F.; Melo, Á. M.; Erthal Junior, M.; Shimoya, A.; Matias, Í. O.; Souza, C. L. M.; Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no BRASIL e no mundo. *Brazilian Journal of Development* **2018**, *4*, 1980. [Link]
19. Sadekin, S.; Zaman, S.; Mshfuz, M.; Sarkar, R.; Nuclear power as foundation of a clean energy future: A review. *Energy Procedia* **2019**, *160*, 513. [CrossRef]
20. Saidi, K.; Omri, A.; Reducing CO2 emissions in OECD countries: Do renewable and nuclear energy matter? *Progress in Nuclear Energy* **2020**, *126*, 103425. [CrossRef]
21. Nuclear CO2 emissions. Disponível em: <<https://www.stormsmith.nl/nuclearco2.html>>. Acesso em: 30 setembro 2020.
22. Polito, R.; No Brics, geração nuclear do país só supera a da África do Sul. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/brasil/3723134/no-brics-geracao-nuclear-do-pais-so-superada-africa-do-sul>>. Acesso em: 3 setembro 2020.
23. Hassan S.T.; Danish; Khan, S.-U.-D.; Baloch, M. A.; Tarar, Z. H.; Is nuclear energy a better alternative for mitigating CO2 emissions in BRICS countries? An empirical analysis. *Nuclear Engineering and Technology* **2020**, *52*, 2969. [CrossRef]
24. Quinn, S.; *Marie Curie: uma vida*, 1a. ed., Scipione: São Paulo, 1997.
25. Sítio da Royal Society of Chemistry. Disponível em: <<https://www.chemistryworld.com/news/polonium-210-a-deadly-element/3003225.article>>. Acesso em: 2 setembro 2020.
26. Sítio da Royal Society of Chemistry. Disponível em: <<https://www.rsc.org/periodic-table/element/88/radium>>. Acesso em: 2 setembro 2020.
27. Franco, D.; *Química: Cotidiano e Transformações*, 1a. ed., FTD: São Paulo, 2015.
28. Rutherford, E.; Chadwick, J.; Ellis, C. D.; *Radiations from Radioactive Substances*, Cambridge University Press: Cambridge, 1951.
29. Cardoso, E. M.; Alves, I. P.; Lima, J. M.; Tahuata, L.; Heilbron Filho, P. F.; Braz, C.; Pestana, S.; Apostila educativa Radioatividade. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01001/radio.pdf>>. Acesso em: 3 setembro 2020.
30. Heilbron, P. F.; Moro, J. T.; Xavier, A. M.; Princípios básicos de segurança e proteção radiológica. Disponível em: <[http://www.cnen.gov.br/images/CIN/PDFs/Seguranca\\_Protecao\\_Radiologica.pdf](http://www.cnen.gov.br/images/CIN/PDFs/Seguranca_Protecao_Radiologica.pdf)> Acesso em: 3 setembro 2020.
31. Brady, J. E.; *General Chemistry Principles & Structure*, 5a. ed., John Wiley & Sons: New York, 1990.
32. Choppin, G.; Liljenzin, J.-O.; Rydberg, J.; Ekberg, C.; *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*. 4a. ed., Elsevier: Amsterdam, 2013. [CrossRef]
33. Sítio da Royal Society of Chemistry. Disponível em: <<https://www.rsc.org/periodic-table/element/92/uranium>>. Acesso em: 3 setembro 2020.
34. Sítio Britannica. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/nuclear-fission>>. Acesso em: 3 setembro 2020.
35. Sítio The Nobel Prize. Disponível em: <<https://www.nobelprize.org/prizes/chemistry/1935/joliot-curie/lecture/>>. Acesso em: 9 setembro 2020.
36. Pestana, A.; ITER Os caminhos da energia de fusão e o Brasil. Fundação Alexandre de Gusmão: Brasília, 2015. Disponível em: <[http://funag.gov.br/biblioteca/download/1132-iter\\_os\\_caminhos\\_da\\_energia\\_de\\_fusao\\_e\\_o\\_brasil.pdf](http://funag.gov.br/biblioteca/download/1132-iter_os_caminhos_da_energia_de_fusao_e_o_brasil.pdf)>. Acesso em: 30 setembro 2020.
37. Cruz, F. F. S.; Marinelli, J. R.; Moraes, M. M. W.; Fusão nuclear em plasma. *Caderno Catarinense de Ensino de Física*, **1989**, *6*, 59. [Link]
38. Muratov, V. P.; Saksagansky, G. L.; Filatov, O. G.; *Fundamentals of Magnetic Thermonuclear Reactor Design*, Woodhead Publishing Series in Energy, 2018.
39. Sítio do International Thermonuclear Experimental Reactor. Disponível em: <<https://www.iter.org/>>. Acesso em: 30 setembro 2020.
40. Sítio da Eletronuclear. Disponível em: <[http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Documents/EIA/v01\\_02\\_caracterizacao.html](http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Documents/EIA/v01_02_caracterizacao.html)>. Acesso em: 3 setembro 2020.
41. Sítio do Ministério de Minas e Energia. Disponível em <<http://www.mme.gov.br/secretarias/planejamento-e-desenvolvimento-energetico/publicacoes/plano-nacional-de-energia-2030>>. Acesso em: 27 agosto 2020.
42. Sítio Educyclopedia – The educacional encyclopedia. Disponível em: <<http://educyclopedia.karadimov.info/library/npp1.pdf>>. Acesso em: 19 agosto 2020.
43. Sítio da Nuclear Regulatory Commission. Disponível em: <<https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/for-educators/04.pdf>>. Acesso em: 3 setembro 2020.
44. Zhang, G.-D.; Yang, X.-H.; Ye, X.-L.; Xu, H.; Lu, D.-Q.; Chen, W.; Research on Pressurizer Water Level Control of Pressurized Water Reactor Nuclear Power Station. *Energy Procedia* **2012**, *16*, 849. [CrossRef]

45. Degueldre, C. A.; Dawson, R. J.; Najdanovic-Visak, V.; Nuclear fuel cycle, with a liquid ore and fuel: toward renewable energy. *Sustainable Energy Fuels* **2019**, *3*, 1693. [CrossRef]
46. Sítio das Indústrias Nucleares do Brasil. Disponível em <<http://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ciclo-do-combustivel-nuclear/Montagem-do-Elemento-Combust%20ADvel>>. Acesso em: 19 agosto 2020.
47. Shreve, R. N.; Brink Jr., J. A.; *Indústrias de processos químicos*, 4a. ed., Guanabara Koogan S.A.: Rio de Janeiro, 1997.
48. Rosa, L. P.; Hydroelectric, thermal and nuclear generation. *Estudos Avançados* **2007**, *21*, 39. [Link]
49. Silva, O. L. P.; Marques, A. L. F.; Enriquecimento de urânio no Brasil: Desenvolvimento de tecnologia por ultracentrifugação. *Economia e Energia* **2006**, *54*, 3. [Link]
50. Sítio da Usina Nuclear. Disponível em <<https://mecausi.blogspot.com/>>. Acesso em: 9 setembro 2020.
51. Fermi, E.; Elementary Theory of the Chain-reacting Pile. *Science* **1947**, *105*, 27. [CrossRef]
52. Gu, Z.; History review of nuclear reactor safety. *Annals of Nuclear Energy* **2018**, *120*, 682. [CrossRef]
53. Sítio do Idaho National Laboratory. Disponível em <<https://inl.gov/experimental-breeder-reactor-i/>>. Acesso em: 30 setembro 2020.
54. Sítio Energia Nuclear. Disponível em <<https://pt.energia-nuclear.net/operacao-usina-nuclear/reator-nuclear/tipos>>. Acesso em: 3 setembro 2020.
55. Sítio da International Atomic Energy Agency. Disponível em <[https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1859\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB1859_web.pdf)>. Acesso em: 3 setembro 2020.
56. Abrão, A.; *Química e tecnologia das terras-raras*, CETEM/CNPq: Rio de Janeiro, 1994. [Link]
57. Sítio da Eletronuclear. Disponível em <[http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Documents/EIA/v01\\_02\\_caracterizacao.html#2531](http://www.eletronuclear.gov.br/Nossas-Atividades/Documents/EIA/v01_02_caracterizacao.html#2531)>. Acesso em: 30 setembro 2020.
58. Rosa, N.; Entenda como funciona uma usina nuclear como a de Chernobyl. Disponível em <<https://canaltech.com.br/ciencia/depois-de-chernobyl-entenda-como-funciona-uma-usina-nuclear-141939/#:~:text=Uma%20usina%20nuclear%20%C3%A9%20basicamente%20uma%20usina%20termoeletrica%2C,no%20estado%20de%20C3%ADquido%20novamente%2C%20podendo%20ainda%20ser%20reaquecida>>. Acesso em: 27 agosto 2020.
59. Tan, W.; Water level control for a nuclear steam generator. *Nuclear Engineering and Design* **2011**, *241*, 1873. [CrossRef]
60. Leyzerovich, A. S.; *Wet-steam turbines for nuclear power plants*, 1a. ed., PennWell Corporation: Oklahoma, 2005.
61. Sítio da Thermal-engineering. Disponível em <<https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-ciclo-rankine-ciclo-da-turbina-a-vapor-definicao/>>. Acesso em: 3 setembro 2020.
62. Sítio da Universidade Estadual Paulista. Disponível em <<http://www.dem.feis.unesp.br/intranet/capitulo12.pdf>>. Acesso em: 3 setembro 2020.
63. Brookins, D. G.; *Geochemical aspects of radioactive waste disposal*, 1a. ed., Springer-Verlag: New York, 1984.
64. Guimarães, A. C. F.; Lapa, C. M. F. Hazard and operability study using approximate reasoning in light-water reactors passive systems. *Nuclear Engineering and Design* **2006**, *236*, 1256. [CrossRef]
65. Zakrzewska-Trznadel, G.; Harasimowicz, M.; Chmielewski, A. G.; Membrane processes in nuclear technology-application for liquid radioactive waste treatment. *Separation and Purification Technology* **2001**, *22-23*, 617. [CrossRef]
66. Perrotta, J. A.; Introdução à engenharia do núcleo de reatores. Disponível em <[https://www.ipen.br/portal\\_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/200906040956360-apperrotta.pdf](https://www.ipen.br/portal_por/conteudo/posgraduacao/arquivos/200906040956360-apperrotta.pdf)>. Acesso em: 30 setembro 2020.
67. Joyce, M.; *Nuclear Engineering. A Conceptual Introduction to Nuclear Power*, 1a. ed., Elsevier: London, 2018.
68. Sítio Nuclear Power Plant. Disponível em <<https://nuclear-powerplants.blogspot.com/2011/05/standby-liquid-control-system-slcs.html>>. Acesso em: 25 agosto 2020.