



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENERGIA NUCLEAR
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE ENERGIA

CARLOS AMORIM PONTUAL NETO

DIREITO NUCLEAR NO BRASIL: Geração Nuclear e Previsão Legal entre o Brasil e
França

Recife

2025

Autor: _____
Carlos Amorim Pontual Neto

**DIREITO NUCLEAR NO BRASIL: Geração Nuclear e Previsão Legal entre o Brasil e
França**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia, do Centro de Tecnologia e Geociências - Escola de Engenharia de Pernambuco, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Orientador(a): _____

Prof. Dr. José Araújo dos Santos Júnior
Universidade Federal de Pernambuco

Recife

2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do programa de geração automática do SIB/UFPE

Pontual Neto, Carlos Amorim.

Direito nuclear no Brasil: geração nuclear e previsão legal entre o Brasil e França / Carlos Amorim Pontual Neto. - Recife, 2025.

41

Orientador(a): José Araujo dos Santos Junior

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Engenharia de Energia - Bacharelado, 2025.

1. Direito nuclear. 2. Energia nuclear. 3. Legislação comparada. 4. Reator PWR. 5. Segurança jurídica. I. Santos Junior, José Araujo dos. (Orientação). II. Título.

620 CDD (22.ed.)

CARLOS AMORIM PONTUAL NETO

DIREITO NUCLEAR NO BRASIL: Geração Nuclear e Previsão Legal entre o Brasil e França.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Energia, do Centro de Tecnologia e Geociências - Escola de Engenharia de Pernambuco, da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Energia.

Aprovado em: 11/08/2025.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre Carlos Araujo da Costa
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jair de Lima Bezerra
Universidade Federal de Pernambuco

À Deus e a minha mãe, pai e irmã, pois em muitos momentos na minha vida me faltaram forças ou confiança nas minhas capacidades, mas nunca me faltou apoio, nunca me faltou cuidado, nunca me faltou graça e benção.

É graças a eles que não apenas construí este trabalho de conclusão de curso, mas que eu existo e sou como sou. A eles dedico não apenas este trabalho como tudo que tenho feito em minha vida.

Dedico.

AGRADECIMENTOS

A realização deste Trabalho de Conclusão de Curso marca o encerramento de uma importante etapa da minha formação acadêmica, e, por isso, é com profunda gratidão e alegria que registro meus agradecimentos.

Agradeço primeiramente à Deus, cuja voz ouvi e que me trouxe ao curso de Engenharia de Energia, que não me permite esquecer do valor que tenho, não por minha conta, mas pelo seu amor.

Agradeço então a minha família, que em tudo foi suporte, rede de segurança, catapulta, abraço, ou o que mais fosse necessário. Agradeço em especial à minha avó materna, única avó que me restou, por ensinar (talvez mesmo sem perceber) que existem momentos em que devemos ser fortes e não há alternativa a isto, então sejamos fortes, mas nunca percamos o amor.

Agradeço à Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), instituição pública e de excelência, pela oportunidade de formação gratuita e de alta qualidade. Estendo meus agradecimentos ao Centro de Tecnologia e Geociências (CTG) e, em especial, ao Departamento de Energia Nuclear (DEN), pela infraestrutura, condições de trabalho e ambiente acadêmico que em tanto contribuíram para o desenvolvimento deste estudo e para minha formação como engenheiro.

É mister agradecer ao meu orientador, Professor Dr. José Araújo dos Santos Júnior, que em todo o tempo deste trabalho foi, como já sugere o título, um orientador de direção, mas também precisou ser motor em alguns momentos. Nesta metáfora, professor Araujo foi leme e motor, o que me parece justo pois, sem sua ajuda, eu certamente estaria à deriva.

Somam-se a ele o Coordenador de TCC, Prof. Dr. Alexandre Carlos Araújo da Costa, o Coordenador e Vice-Coordenador do Curso de Engenharia de Energia, Prof. Dr. Emerson Tôrres Aguiar Gomes e o Prof. Dr. Jair de Lima Bezerra, assim como a banca de avaliação, expresse minha sincera gratidão pela orientação dedicada, pelas valiosas contribuições científicas, pelo apoio constante e pela confiança depositada durante todas as etapas deste trabalho. Vossas atuações foram fundamentais para o amadurecimento deste projeto e para o meu crescimento intelectual.

Sou grato também a todos(as) os(as) docentes da UFPE com quem tive o privilégio de assistir as aulas, dentro e fora do Departamento de Energia Nuclear, que, com competência,

compromisso e muitas vezes apesar das adversidades, participaram e enriqueceram significativamente minha formação técnica e científica.

Agradeço também aos(às) colegas e amigos(as) que estiveram comigo nesta caminhada, em especial àqueles que durante o curso me ajudaram a entender assuntos que por algum motivo não compreendi diretamente com os professores(as) ou nos livros, assim como àqueles que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, seja por meio de discussões, incentivo ou companheirismo.

Por fim, agradeço aos(às) servidores(as) da UFPE, que são como a hemoglobina para o corpo que é a universidade, com seu zelo e profissionalismo, garantem o pleno funcionamento das atividades institucionais, assim como o foi ao longo de todo o meu percurso universitário.

A todos e todas, o meu “muito obrigado” mais sincero, e que toda honra e toda glória sejam dadas ao Pai.

Bem sei que a montanha é alta,
mas passo após passo, terei minha vez.
Quero ser como dizia o ditado
“Não sabia que era impossível, foi lá e fez”
(O autor, 2016).

“Toda atividade nuclear em território nacional somente será admitida para fins pacíficos e mediante aprovação do Congresso Nacional”. (Constituição Federal, art. 21, XXIII, alínea a).

RESUMO

O Brasil utiliza, em suas usinas nucleares atualmente em operação, Angra 1 e Angra 2, a tecnologia de Reator de Água Pressurizada (PWR – *Pressurized Water Reactor*), considerada uma das mais seguras e amplamente difundidas no mundo. Essa mesma tecnologia é adotada por países como França, Coreia do Sul e Estados Unidos, que possuem ampla tradição no uso da energia nuclear para fins pacíficos. A escolha dessa tecnologia coloca o Brasil em sintonia com padrões internacionais no que se refere à engenharia e à operação de reatores, mas não necessariamente quanto ao arcabouço normativo e regulatório que disciplina esse setor estratégico e sensível. O trabalho objetivou examinar, sob uma perspectiva jurídico-comparativa, o estágio atual da geração nuclear no Brasil, com foco na análise das normas constitucionais e infraconstitucionais que regulamentam o setor. Para isso, foi realizado, em um primeiro momento, uma exposição didática sobre o ciclo do combustível nuclear, desde a mineração e o enriquecimento de urânio até a fabricação dos elementos combustíveis, e o funcionamento técnico das usinas do tipo PWR, presentes no parque nuclear brasileiro. Posteriormente, seguiu-se para a identificação e discussão das principais lacunas normativas observadas no ordenamento jurídico brasileiro, particularmente quanto à regulação da segurança, responsabilidade civil por danos nucleares, licenciamento ambiental, transparência pública e fiscalização da atividade nuclear. A comparação com os marcos legais de um país como a França permitiu evidenciar boas práticas regulatórias e estratégias institucionais que têm contribuído para a confiabilidade e a segurança desse programa nuclear. Por fim, observou-se que, embora o Brasil conte com instituições como a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Eletronuclear, ainda existe carência de normas específicas e atualizadas, bem como de um sistema de fiscalização robusto e independente, o que compromete a governança do setor e a segurança jurídica das atividades relacionadas à energia nuclear. Dessa forma, o estudo demonstra que, para além da dimensão tecnológica, o pleno desenvolvimento do setor nuclear brasileiro depende de avanços significativos no campo normativo e institucional. A consolidação de um direito nuclear eficaz, moderno e alinhado aos parâmetros internacionais é indispensável para garantir a proteção ambiental, a segurança da população, a prevenção de acidentes e a ampliação da confiança pública. Conclui-se que o Brasil deve adotar uma postura mais proativa no aperfeiçoamento de seu marco regulatório nuclear, de modo a compatibilizar sua capacidade técnico-operacional com um sistema jurídico à altura dos desafios e riscos inerentes à atividade nuclear.

Palavras-chave: direito nuclear; energia nuclear; legislação comparada, reator PWR; segurança jurídica.

ABSTRACT

Brazil employs, in its currently operating nuclear power plants, Angra 1 and Angra 2, the Pressurized Water Reactor (PWR) technology, considered one of the safest and most widely adopted in the world. This same technology is used by countries such as France, South Korea, and the United States, which have a long-standing tradition in the peaceful use of nuclear energy. The choice of this technology aligns Brazil with international standards regarding the engineering and operation of reactors, though not necessarily with the normative and regulatory framework that governs this strategic and sensitive sector. This study aimed to examine, from a legal-comparative perspective, the current stage of nuclear power generation in Brazil, focusing on the analysis of constitutional and infra-constitutional norms that regulate the sector. To this end, an initial didactic presentation was conducted on the nuclear fuel cycle, from uranium mining and enrichment to the manufacture of fuel elements, as well as the technical operation of PWR-type plants present in the Brazilian nuclear park. Subsequently, the study identified and discussed the main regulatory gaps observed in the Brazilian legal framework, particularly regarding safety regulations, civil liability for nuclear damages, environmental licensing, public transparency, and oversight of nuclear activities. The comparison with the legal frameworks of countries such as France highlighted good regulatory practices and institutional strategies that have contributed to the reliability and safety of their nuclear programs. Finally, it was noted that although Brazil has institutions such as the National Nuclear Energy Commission (CNEN) and Eletronuclear, there remains a lack of specific and updated regulations, as well as a robust and independent oversight system, which undermines the governance of the sector and the legal certainty of nuclear-related activities. Thus, the study demonstrates that, beyond the technological dimension, the full development of the Brazilian nuclear sector depends on significant advancements in the normative and institutional fields. The consolidation of an effective, modern nuclear legal framework aligned with international standards is essential to ensure environmental protection, population safety, accident prevention, and increased public trust. It is concluded that Brazil must adopt a more proactive stance in improving its nuclear regulatory framework, to harmonize its technical-operational capacity with a legal system capable of addressing the challenges and risks inherent to nuclear activity.

Keywords: nuclear law; nuclear energy; comparative legislation; PWR reactor; legal certainty.

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	14
2.1 Geral	14
2.2 Específicos.....	14
3 CONCEITOS PRELIMINARES	15
3.1 A energia nuclear e sua viabilidade.....	15
3.2 O ciclo do combustível nuclear	16
3.3 As usinas do tipo PWR.....	19
3.3.1 <i>Primeiro Circuito: Circuito do Reator (Primário)</i>	20
3.3.2 <i>Segundo Circuito: Circuito do Vapor (Secundário)</i>	21
3.3.3 <i>Terceiro Circuito: Circuito de Resfriamento (Terciário)</i>	21
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
4.1 Material radioativo e geração nuclear na legislação brasileira.....	23
4.1.1 <i>Regulação Constitucional</i>	23
4.1.2 <i>Leis Infraconstitucionais</i>	24
4.1.3 <i>Acordos Internacionais e Decretos</i>	25
4.2 Energia Nuclear na legislação estrangeira.....	25
4.2.1 <i>Conceito e abrangência legal das instalações nucleares francesas</i>	26
4.2.2 <i>Responsabilidade jurídica do operador</i>	26
4.2.3 <i>Regime jurídico de autorização</i>	27
4.2.4 <i>Revisões periódicas e atualização da segurança</i>	27
4.2.5 <i>Encerramento e desmantelamento</i>	27
4.2.6 <i>Padrões de emissão e proporcionalidade econômica</i>	27

<i>4.2.7 Medidas excepcionais e controle estatal</i>	28
5 MATERIAL E MÉTODO	29
5.1 Tipo de Pesquisa.....	29
5.2 Fontes e Critérios de Seleção.....	29
5.3 Método Comparativo	30
5.4 Tratamento dos Dados e Interpretação	31
6 RESULTADOS	32
6.1 Marco constitucional e infraconstitucional.....	32
6.2 Estrutura institucional e regulação independente	32
6.3 Responsabilidade civil e reparação de danos	33
6.4 Participação pública e transparência.....	33
6.5 Planejamento de encerramento e descomissionamento.....	34
6.6 Comparação entre o marco legal nuclear do Brasil e da França	34
7 CONCLUSÃO E PERSPECTIVA	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A energia nuclear ocupa posição estratégica na matriz energética de diversos países, sendo considerada uma fonte confiável, de alta densidade energética e com baixas emissões de gases de efeito estufa.

No Brasil, as usinas de Angra 1 e Angra 2 utilizam a tecnologia de Reator de Água Pressurizada (PWR - *Pressurized Water Reactor*), a mesma adotada por países como França, Coreia do Sul e Estados Unidos, onde o uso da energia nuclear é respaldado por arcabouços jurídicos consolidados e em constante aprimoramento (IAEA, 2020; KIM, 2019).

Entretanto, apesar de o Brasil utilizar uma tecnologia consolidada e reconhecida internacionalmente, o país ainda apresenta fragilidades no que se refere à governança normativa do setor nuclear, tanto que a usina nuclear Angra 3, projeto e construção, se arrasta desde 1984, com aproximadamente 41 anos de existência marcada por paralisações e reinícios intermitentes, dos quais apenas parte do período envolveu trabalho ativo de construção física (World Nuclear Association, 2025; World Nuclear News, 2025).

Embora a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) atue como órgão regulador e executor de políticas públicas, a literatura especializada aponta para a necessidade de uma revisão e atualização profunda do marco legal vigente, com vistas à construção de um ambiente regulatório mais moderno, transparente e alinhado às melhores práticas internacionais (FERREIRA, 2021; MARCELLO, 2020).

A ausência de um sistema regulatório robusto impacta diretamente na segurança jurídica, elemento essencial para a operação de um setor tão sensível como o nuclear.

De acordo com Zullo (2007), a falta de uma legislação clara e sistematizada no Brasil compromete tanto a atração de investimentos quanto a adoção de medidas preventivas e de responsabilização em caso de acidentes.

Neves (2011) reforça que o ordenamento jurídico brasileiro carece de especificidade e de compatibilidade com os compromissos internacionais assumidos pelo país.

Ademais, como destaca Rech (2013), a complexidade dos riscos associados à atividade nuclear exige a adoção de um regime jurídico especial, que integre normas constitucionais, infraconstitucionais, tratados internacionais e diretrizes técnicas.

A comparação com um país como a França revela uma abordagem mais integrada e dinâmica no trato jurídico da energia nuclear, com destaque para a atuação de agências

independentes, marcos legais atualizados e instrumentos eficazes de controle social e fiscalização.

Na França, por exemplo, a Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) atua de forma independente do governo e da indústria, assegurando o cumprimento rigoroso das normas de segurança (IAEA, 2020; OECD/NEA, 2021). Na Coreia do Sul, a Korea Nuclear Safety and Security Commission (NSSC) é exemplo de um órgão regulador tecnicamente capacitado e institucionalmente autônomo, características ainda frágeis no contexto brasileiro (KIM, 2019).

Diante desse cenário, torna-se indispensável refletir sobre os limites e possibilidades do direito nuclear no Brasil, não apenas como instrumento de controle e responsabilização, mas também como meio de promoção da segurança energética, proteção ambiental e confiabilidade institucional.

O presente estudo, busca contribuir para esse debate por meio de uma primeira análise jurídico-comparativa, evidenciando os caminhos para o fortalecimento do arcabouço normativo e institucional brasileiro frente aos desafios atuais da geração nuclear (SILVA, 2012; IAEA, 2022).

2. OBJETIVOS

2.1 Geral

Analisar, sob uma perspectiva jurídico-comparativa, o estágio atual da geração nuclear no Brasil, com ênfase na identificação das lacunas normativas que comprometem a segurança jurídica do setor, e propor diretrizes para o aprimoramento do marco regulatório à luz das boas práticas internacionais.

2.2 Específicos

1. Apresentar o funcionamento técnico da tecnologia de reator PWR e o ciclo do combustível nuclear no Brasil;
2. Identificar e discutir as principais normas constitucionais e infraconstitucionais que regulamentam a atividade nuclear no país;
3. Investigar as lacunas e fragilidades do ordenamento jurídico brasileiro em relação à segurança, licenciamento e fiscalização nuclear;
4. Comparar o marco normativo brasileiro com os modelos regulatório da França;
5. Sugerir medidas jurídicas e institucionais para o fortalecimento do direito nuclear brasileiro, com foco na segurança jurídica, transparência e governança do setor.

3 CONCEITOS PRELIMINARES

3.1 A energia nuclear e sua viabilidade

A energia nuclear representa uma das mais relevantes fontes alternativas para a produção de eletricidade, especialmente diante do aumento da demanda energética global e da urgência em mitigar as emissões de gases de efeito estufa. Neste diapasão, o poder calorífico do urânio, que não demanda combustão para ser liberado e está na casa dos GJ/Kg, mais de mil vezes superior ao de combustíveis de queima tradicionais como lenha, carvão ou diesel, se torna uma solução não apenas muitíssimo poderosa como aliada da redução de emissões de gases poluentes.

Vale lembrar que a viabilidade do combustível nuclear está diretamente ligada à análise técnica, econômica, ambiental e jurídica de sua produção, desde a extração do minério de urânio até a disposição final dos rejeitos radioativos.

O ciclo do combustível nuclear inicia-se com a prospecção e mineração do urânio, um elemento naturalmente radioativo encontrado em diferentes regiões do mundo.

No Brasil, as principais reservas estão localizadas em Caetité (BA) e Santa Quitéria (CE), sendo as Indústrias Nucleares do Brasil (INB) responsável pela mineração e beneficiamento do minério. Após a mineração, o urânio é submetido a processos físico-químicos para a produção do concentrado conhecido como *yellowcake* (U_3O_8) (INB, 2023).

O enriquecimento pode ser realizado por diferentes métodos, como difusão gasosa ou ultracentrifugação, este último sendo utilizado no Brasil por meio da tecnologia desenvolvida pelo Centro Tecnológico da Marinha em Aramar (CTMSP) (CNEN, 2021).

A viabilidade da energia nuclear está condicionada, portanto, não apenas à eficiência do ciclo do combustível, mas também aos aspectos normativos e de segurança.

No Brasil, a Constituição Federal estabelece que as atividades nucleares têm finalidade exclusivamente pacífica, sendo a União responsável por legislar e operar instalações nucleares (BRASIL, 1988, art. 21, XXIII). Já a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é o órgão responsável pelo licenciamento, fiscalização e controle dessas atividades, em consonância com as diretrizes internacionais da Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA).

Do ponto de vista ambiental, a energia nuclear apresenta a vantagem de gerar grandes quantidades de eletricidade com baixíssima emissão de gases de efeito estufa.

Segundo relatório da International Energy Agency (IEA, 2021), a energia nuclear é uma das fontes mais eficazes na mitigação das mudanças climáticas, sendo considerada essencial para uma transição energética segura e sustentável. No entanto, a destinação dos rejeitos radioativos e os riscos de acidentes, como os de Chernobyl (1986) e Fukushima (2011), ainda são pontos sensíveis que exigem rigor técnico, jurídico e institucional.

Em termos econômicos, o alto custo inicial de implantação das usinas é compensado por sua longa vida útil e pela estabilidade da geração energética.

A análise de viabilidade econômica deve incluir não apenas o investimento inicial, mas também os custos operacionais, de manutenção e de descomissionamento das instalações ao final de sua vida útil.

Uma comprovação do nível de estabilidade apresentado pela geração nuclear está nos recordes de fator de capacidade alcançados pelas usinas deste tipo no Brasil.

A usina de Angra 2 alcançou no ano de 2024 um fator de capacidade de 99,4%, o segundo maior valor já alcançado pela usina, atrás apenas da marca de 2016, quando conseguiu 99,5% de fator de capacidade (Eletronuclear, 2024).

Dessa forma, a viabilidade da energia nuclear no Brasil e no mundo depende de uma abordagem multidisciplinar, envolvendo planejamento estratégico, desenvolvimento tecnológico, segurança jurídica e aceitação pública.

Convém destacar que a expansão do uso da energia nuclear, sobretudo em países em desenvolvimento, requer políticas públicas claras, investimentos em capacitação técnica e transparência na gestão dos riscos envolvidos.

3.2 O ciclo do combustível nuclear

Para contextualizar adequadamente os temas abordados neste trabalho, é imperioso compreender todas as etapas do ciclo do combustível nuclear, desde a obtenção do recurso bruto na natureza até a fabricação do elemento combustível utilizado nos reatores das usinas nucleares.

Segundo Monteiro de Lima (2008), entre os anos de 1982 e 1999, o Brasil detinha domínio apenas parcial do ciclo do combustível nuclear, especificamente nas etapas de mineração, beneficiamento (com a produção do *yellowcake*) e montagem do elemento combustível. Foi apenas a partir de 1999 que o país passou a controlar também as etapas de reconversão e fabricação de pastilhas.

Essa ampliação na participação nacional do processo trouxe a necessidade de estabelecer meios eficazes de controle da exposição às doses de urânio, especialmente nas atividades que envolvem fontes abertas. A análise da autora evidencia, portanto, a importância de normas técnicas e legislações que acompanhem os avanços científico-tecnológicos do setor nuclear.

O ciclo do combustível nuclear inicia-se com a prospecção do minério de urânio na natureza. Para isso, são utilizadas aeronaves equipadas com detectores de radioatividade, que realizam voos de baixa altitude sobre áreas potencialmente ricas em minerais. Esse procedimento, denominado aerocintilografia, permite identificar regiões com níveis elevados de radiação. Confirmada a anomalia radiométrica, procede-se à investigação em solo e à avaliação do potencial econômico da jazida (SOUZA, 2010).

Uma vez comprovada a viabilidade econômica da jazida, inicia-se a etapa de extração do minério de urânio. Na natureza, o urânio encontra-se associado a outros elementos, sendo necessário o processo de lixiviação para sua separação. Nesse processo, o minério previamente triturado é submetido à ação de uma solução ácida, resultando em um líquido amarelado conhecido como licor de urânio (PEREIRA, 2014).

O licor é então filtrado e decantado, originando o chamado *yellowcake*, um composto pastoso formado predominantemente por octóxido de triurânio (U_3O_8). Contudo, a composição isotópica do urânio natural apresenta cerca de 99,27% de ^{238}U (isótopo fértil, mas não fissil), apenas 0,72% de ^{235}U (o isótopo fissil utilizado em reatores brasileiros) e traços de ^{234}U , aproximadamente 0,0055% (CNEN, 2021). Assim, torna-se necessário o enriquecimento do urânio, processo que eleva a proporção de ^{235}U para cerca de 5%, tornando o material adequado para uso como combustível nuclear.

Para o enriquecimento, o *yellowcake* passa inicialmente por uma conversão química, sendo transformado em hexafluoreto de urânio (UF_6), um composto gasoso à temperatura ambiente, o que possibilita sua utilização nas ultracentrífugas. No processo de enriquecimento, o UF_6 é introduzido em centrífugas dispostas em cascata. Como o ^{238}U possui massa atômica superior, ele se separa progressivamente do ^{235}U , permitindo o aumento da concentração deste último (INB, 2023).

Alcançado o nível desejado de enriquecimento, o UF_6 é reconvertido novamente em U_3O_8 , agora com concentração adequada de ^{235}U . Esse material, em forma de pó, é submetido a um forno de leito fluidizado e, em seguida, prensado em moldes para formar pastilhas cilíndricas com cerca de 1 cm de diâmetro e altura.

Para garantir resistência mecânica às pastilhas, elas são submetidas à sinterização em forno de alta temperatura, processo que confere densidade e integridade estrutural ao material. Após a sinterização, as pastilhas são retificadas e suas dimensões são rigorosamente inspecionadas (MONTEIRO DE LIMA, 2008).

Concluída essa etapa, tem início a montagem do elemento combustível. As pastilhas são inseridas em varetas metálicas fabricadas com zircaloy, uma liga de zircônio resistente à corrosão e à radiação ionizante, sendo que cada vareta acomoda aproximadamente 335 pastilhas. Em seguida, as varetas são organizadas em estruturas com 236 unidades, formando o conjunto conhecido como elemento combustível. Essa estrutura, que pode atingir até 5 metros de altura, é inserida no núcleo dos reatores nucleares para geração de energia (ELETRONUCLEAR, 2020).

A elevada densidade energética do urânio pode ser ilustrada pelo fato de que duas pastilhas de combustível são capazes de suprir o consumo energético de uma residência com quatro pessoas por cerca de um mês (IAEA, 2018), o que reforça a relevância estratégica do domínio desse ciclo para a soberania energética nacional e mundial.

O domínio do ciclo do combustível nuclear por parte de um Estado não representa apenas um avanço tecnológico e energético, mas também impõe a necessidade de observância de marcos legais nacionais e tratados internacionais que regulam o uso pacífico da energia nuclear.

No Brasil, essa regulação se dá, entre outros instrumentos, por meio da Constituição Federal (art. 21, XXIII), da Lei n.º 4.118, de 27 de agosto de 1962, que dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências, e da atuação da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN, 2021).

No plano internacional, o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP), ao qual o Brasil é signatário, estabelece compromissos rigorosos quanto ao uso pacífico do material nuclear, à transparência do ciclo e à cooperação sob fiscalização da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2018).

Assim, o estudo técnico sobre o ciclo do combustível nuclear assume também relevância jurídica, na medida em que fornece a base factual para análise normativa, controle regulatório, responsabilidade ambiental e obrigações internacionais do Estado brasileiro.

Portanto, compreender a lógica e as etapas do ciclo do combustível nuclear é indispensável para qualquer proposta de reflexão jurídica consistente sobre o tema. Trata-se de um campo em que o conhecimento técnico-científico e jurídico se entrelaçam, com implicações que transcendem o plano nacional e impactam diretamente a geopolítica e a segurança mundial.

3.3 As usinas do tipo PWR

O Brasil conta atualmente com duas usinas nucleares em operação, a saber: Angra 1 (desde 1985) e Angra 2 (desde 2001), que estão localizadas no município de Angra dos Reis (RJ), além de uma terceira, Angra 3, cuja construção foi iniciada em 1984, interrompida em diversos períodos, e encontra-se atualmente em fase de retomada e previsão de conclusão até 2029 (INB, 2023; CNEN, 2020). Todas pertencem ao modelo de reator conhecido como PWR - *Pressurized Water Reactor*, ou em português, reator de água pressurizada, o mais utilizado comercialmente no mundo.

Os reatores PWR foram desenvolvidos inicialmente para uso naval nos Estados Unidos na década de 1950 e, devido à sua confiabilidade e segurança operacional, foram adaptados para uso civil. (PLANAS, 2016)

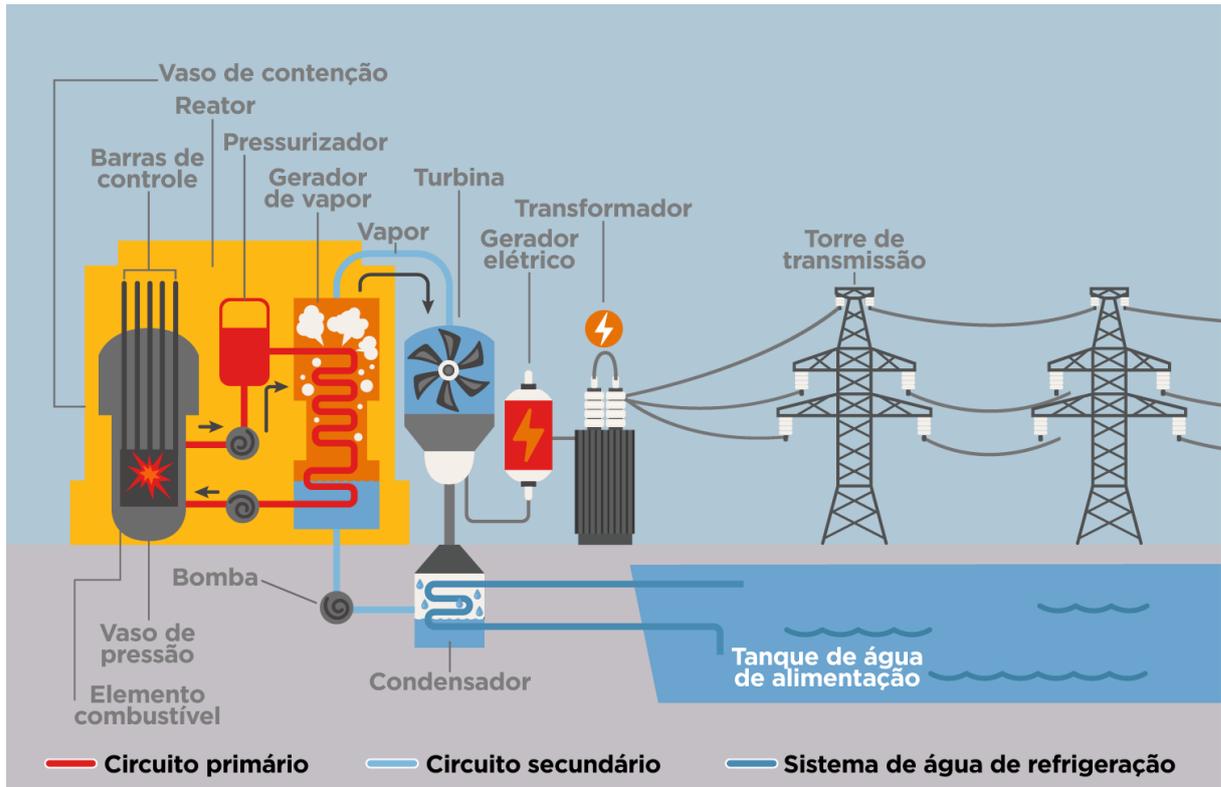
Atualmente, mais de 60% dos reatores em funcionamento no mundo utilizam essa tecnologia (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2023). A escolha do modelo PWR para o parque nuclear brasileiro decorre de sua robustez, estabilidade termodinâmica, facilidade de controle e elevado nível de segurança passiva e ativa. (U.S.NRC, 1990)

A geração de energia elétrica em reatores do tipo PWR é baseada na fissão controlada de núcleos atômicos pesados, geralmente ^{235}U , que ao serem bombardeados por nêutrons, se dividem em dois núcleos menores (chamados fragmentos de fissão), liberando em média 2 a 3 nêutrons adicionais e uma quantidade significativa de energia, da ordem de 200 MeV por reação. Essa energia se manifesta essencialmente como calor, sendo utilizada para aquecer a água no interior do reator (INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2018).

A água desempenha múltiplas funções cruciais, como: moderadora, reduzindo a velocidade dos nêutrons, permitindo maior probabilidade de novas fissões; refrigerante térmico, extraindo o calor do combustível nuclear; e barreira biológica, absorvendo a radiação gerada no núcleo do reator.

O ciclo termodinâmico de uma usina PWR é constituído por três circuitos de água distintos e isolados entre si, quais sejam: Circuito do Reator (Primário); Circuito do Vapor (Secundário) e Circuito de Resfriamento (Terciário), que são apresentados na Figura 1 e detalhados na sequência.

Figura 1 - Esquema de funcionamento de um reator PWR



Fonte: CBIE, 2025.

3.3.1 Primeiro Circuito: Circuito do Reator (Primário)

Neste circuito fechado, a água circula em alta pressão, em torno de 155 atm para evitar que entre em ebulição, mesmo atingindo temperaturas superiores a 300 °C. A água é aquecida diretamente pelo calor gerado no processo de fissão no interior do vaso do reator. O combustível nuclear, geralmente pastilhas de dióxido de urânio dispostas em varetas metálicas, está inserido no núcleo, onde ocorre a reação em cadeia.

Um pressurizador mantém a pressão do circuito em níveis elevados e constantes. Ele funciona como um vaso de expansão térmica, absorvendo variações de volume da água sem permitir que ela vaporize. Essa estabilidade é essencial para o funcionamento contínuo e seguro da planta (CNEN, 2020).

Após ser aquecida no núcleo, a água do circuito primário percorre trocadores de calor denominados geradores de vapor, nos quais transfere energia térmica para o segundo circuito, sem que haja contato físico entre os fluidos.

3.3.2 Segundo Circuito: Circuito do Vapor (Secundário)

No circuito secundário, a água recebe calor do circuito primário no gerador de vapor. Como está sob pressão inferior, entra em ebulição e se transforma em vapor. Este vapor, em alta temperatura e pressão, é direcionado para uma turbina de alta eficiência, cuja rotação aciona um gerador elétrico, convertendo energia térmica em energia elétrica (BARRETO, 2021).

Após movimentar a turbina, o vapor é direcionado ao condensador, onde é resfriado e reconvertido em água líquida. Esse processo de condensação é viabilizado pelo terceiro circuito, que funciona como sistema de refrigeração externa. A água condensada é então bombeada de volta ao gerador de vapor, completando o ciclo secundário.

Esse circuito também é fechado e não entra em contato com material radioativo, o que torna possível sua manipulação e manutenção com menor exigência de proteção radiológica.

3.3.3 Terceiro Circuito: Circuito de Resfriamento (Terciário)

Esse circuito é responsável por resfriar o condensador do segundo ciclo, utilizando água proveniente de uma fonte natural: rio, lago ou mar. Essa água circula por trocadores de calor externos ou por torres de resfriamento, em um sistema aberto ou semiaberto. Sua função é absorver o calor residual do ciclo secundário e dissipá-lo no meio ambiente.

É importante salientar que, em nenhuma etapa, essa água entra em contato com materiais radioativos. O fluxo do terceiro circuito é cuidadosamente controlado para evitar impactos ambientais, especialmente relacionados à poluição térmica, uma vez que a água é devolvida ao meio ambiente com temperatura elevada. Por essa razão, a localização das usinas nucleares costuma ser estrategicamente próxima a corpos d'água de grande porte e com boa capacidade de renovação (FERREIRA, 2022).

O modelo PWR oferece redundância de sistemas de segurança, como sistemas de injeção de emergência, contenção primária em aço e concreto armado, e protocolos automáticos de desligamento em situações de risco. Além disso, esse tipo de reator é projetado para operar com elevado fator de capacidade e possui uma vida útil estimada superior a 40 anos, podendo ser estendida com modernizações (IAEA, 2018).

No caso brasileiro, o reator de Angra 1 tem potência de aproximadamente 640 MWe, enquanto Angra 2 alcança cerca de 1.350 MWe. Angra 3, quando concluída, terá capacidade de 1.405 MWe, totalizando mais de 3.300 MWe de potência instalada nuclear no país (INB, 2023).

A escolha por esse modelo e a manutenção de um parque nuclear com base na tecnologia PWR demonstra um compromisso com a segurança, eficiência e independência energética, especialmente diante da crescente demanda elétrica e da necessidade de diversificação da matriz energética nacional.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho fundamenta-se em uma abordagem metodológica qualitativa, de natureza exploratória e descritiva, com ênfase em revisão bibliográfica e documental.

O estudo tem como abordagem principal analisar criticamente o arcabouço jurídico que regula a geração de energia nuclear no Brasil, à luz de experiências normativas de países considerados referências no setor, como é o caso da França.

A escolha da abordagem qualitativa justifica-se pela natureza jurídico-normativa do tema, cujo objeto não é mensurável numericamente, mas interpretado à luz de critérios de coerência interna, eficácia regulatória e conformidade com princípios internacionais.

4.1 Material radioativo e geração nuclear na legislação brasileira

A produção de energia nuclear envolve riscos significativos, não apenas do ponto de vista técnico, mas também jurídico, ambiental e social. Por essa razão, o ordenamento jurídico brasileiro estabelece uma densa rede normativa que regula a exploração de recursos nucleares e o uso de materiais radioativos, especialmente quando destinados à geração energética.

4.1.1 *Regulação Constitucional*

A Constituição Federal de 1988 consagra diversos dispositivos que tratam especificamente da energia nuclear e do uso de materiais radioativos. O art. 21, inciso XXIII, atribui à União a competência exclusiva para explorar serviços e instalações nucleares de qualquer natureza, bem como exercer o monopólio sobre pesquisa, lavra, enriquecimento e reprocessamento, industrialização e comércio de minérios nucleares e seus derivados (BRASIL, 1988).

Esse monopólio é justificado pelo alto potencial de dano que esses materiais oferecem, tanto em termos ambientais quanto em relação à segurança nacional. Ainda nesse dispositivo, as alíneas estabelecem importantes condições:

- i. alínea “a”: toda atividade nuclear deve ter fins pacíficos e depender de aprovação do Congresso Nacional;

- ii. alíneas “b” e “c”: autorizam, sob regime de permissão, a produção e utilização de radioisótopos para fins industriais, agrícolas e médicos;
- iii. alínea “d”: estabelece a responsabilidade civil objetiva por danos nucleares.

Complementando essa estrutura, o art. 22, inciso XXVI, reserva à União a competência para legislar sobre atividades nucleares. Já o art. 49, inciso XIV, exige que apenas o Congresso Nacional possa aprovar iniciativas do Poder Executivo relativas a atividades nucleares. Isso demonstra o modelo de freios e contrapesos presente no sistema jurídico brasileiro.

Outro dispositivo relevante é o art. 177, inciso V, que reafirma o monopólio da União sobre as atividades nucleares, e o §3º do mesmo artigo, que determina que lei específica tratará sobre transporte e utilização de materiais radioativos.

No campo da saúde pública, o art. 200, inciso VII, atribui ao SUS o papel de fiscalizar e controlar a produção, transporte e uso de substâncias radioativas, incluindo aquelas aplicadas na geração de energia. Já o art. 225, §6º, exige que a localização de usinas nucleares seja definida em lei federal, reforçando o controle sobre a segurança ambiental.

4.1.2 Leis Infraconstitucionais

A Lei nº 4.118/1962 é o marco legal da Política Nacional de Energia Nuclear. Em seu art. 1º, reafirma-se o monopólio da União sobre atividades essenciais ao ciclo do combustível nuclear, incluindo a lavra, industrialização, comércio e controle de materiais físseis e férteis. O art. 2º define termos essenciais como: elemento nuclear (inciso I), mineral nuclear (inciso II) e material físseis especial (inciso VII) (BRASIL, 1962).

O Capítulo IV da CF/88 trata do comércio e responsabilização penal, prevendo penas para importação, exportação ou posse não autorizadas de materiais nucleares. Também permite à CNEN adquirir materiais e contratar serviços no exterior para fomentar o desenvolvimento tecnológico.

A Lei nº 6.189/1974 atualiza dispositivos da Lei 4.118 e cria a Nuclebrás. O art. 2º enumera as competências da CNEN, incluindo a formulação de políticas, estabelecimento de diretrizes, incentivo à formação de recursos humanos, e o licenciamento de projetos (BRASIL, 1974).

Já a Lei nº 14.222/2021 cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), encarregada da regulação, licenciamento e fiscalização das instalações nucleares e do controle de materiais radioativos. O art. 6º dessa lei descreve em detalhes as competências da ANSN,

como editar normas, licenciar atividades, fiscalizar o transporte, e manter cadastro de trabalhadores expostos à radiação (BRASIL, 2021).

4.1.3 Acordos Internacionais e Decretos

O Decreto n.º 2.750/1998 promulga acordo entre Brasil e Rússia para cooperação nos usos pacíficos da energia nuclear. O artigo 1º reafirma a proibição do uso militar da energia nuclear, enquanto o artigo 2º define áreas de cooperação, como proteção radiológica, produção de radioisótopos e desenvolvimento de reatores (BRASIL, 1998).

Esses instrumentos refletem o compromisso do Brasil com a não proliferação e o uso pacífico da energia nuclear, em consonância com os princípios da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), segundo a qual “a confiança do público é tão essencial quanto a tecnologia” (IAEA, 2021).

4.2 Energia Nuclear na legislação estrangeira

A análise da legislação estrangeira se apresenta como uma etapa indispensável para o exame comparativo da regulação da energia nuclear, especialmente por se tratar de uma atividade de elevado risco, exigindo normas técnicas rigorosas, controles institucionais eficazes e compromisso com a segurança pública e ambiental.

Entre os países que mais se destacam no uso da energia nuclear está a França, cuja matriz elétrica é composta, em mais de 70%, por energia de origem nuclear. Tal dependência implicou a construção de um aparato normativo robusto, voltado à governança segura e ao controle permanente das atividades nucleares civis (WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, 2024).

Segundo Delgado (2022), a complexidade do risco tecnológico exige que o direito ambiental contemporâneo opere não apenas com comandos tradicionais de proibição, mas com estruturas de avaliação e gestão institucional permanente do risco. O caso francês evidencia precisamente essa abordagem.

O presente tópico do trabalho examina a legislação francesa vigente, com base especialmente no Code de l'environnement e no Code de l'énergie, ambos codificações que reúnem a normatividade ambiental e energética da República Francesa. O enfoque foi dado à legislação relativa às installations nucléaires de base (INB), isto é, instalações que compreendem reatores, unidades de armazenamento, enriquecimento, tratamento de combustível nuclear e resíduos radioativos.

Trata-se de dispositivos que abordam todo o ciclo da instalação: da sua criação à sua desativação, contemplando os aspectos autorizativos, operacionais, de fiscalização e de desmantelamento.

4.2.1 Conceito e abrangência legal das instalações nucleares francesas

De acordo com o art. L.593-2 do Code de l'environnement (FRANÇA, 2025a), as instalações nucleares de base (INB) são unidades físicas que realizam atividades ligadas diretamente ao ciclo do combustível nuclear ou à produção energética por meio de reações nucleares. Essa classificação detalha e tipifica as estruturas sujeitas ao regime jurídico específico de controle radiológico e ambiental, algo considerado essencial por Ferreira e Leite (2021), que destacam que a definição precisa do objeto regulado é requisito de racionalidade do direito em atividades de alto impacto ambiental.

4.2.2 Responsabilidade jurídica do operador

A legislação francesa adota o princípio da responsabilidade objetiva do operador nuclear, consagrado no artigo L.593-6, impondo-lhe o dever de identificar riscos, documentar medidas de segurança, manter capacidade técnica e apresentar planos de emergência (FRANÇA, 2025a). Tal norma reflete o que Figueiredo (2020) aponta como uma responsabilidade ampliada do operador de atividades perigosas, onde não basta ausência de culpa, mas a comprovação de adoção de todas as salvaguardas possíveis.

4.2.3 Regime jurídico de autorização

O artigo L.593-7 exige autorização prévia para a criação de qualquer INB, condicionando-a à demonstração de segurança técnica, responsabilidade climática e capacidade financeira do operador (FRANÇA, 2025a). Tal estrutura autorizativa, que inclui a consulta pública obrigatória (art. L.593-8), reflete o princípio da precaução, consagrado internacionalmente pela Declaração do Rio/1992, e representa o compromisso do Estado francês com a governança participativa da energia nuclear (SILVA NETO, 2023).

4.2.4 Revisões periódicas e atualização da segurança

No artigo L.593-18, exige-se a realização de revisões periódicas das instalações, geralmente a cada dez anos, considerando as melhores práticas internacionais. Essa prática é considerada um elemento essencial da chamada “gestão dinâmica do risco nuclear”, segundo a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA, 2019). Já o artigo L.593-19 impõe ao operador o dever de encaminhar relatório com as conclusões dessas revisões, sob pena de sanções.

4.2.5 Encerramento e desmantelamento

O encerramento pode ser voluntário ou imposto por decisão estatal (FRANÇA, 2025^a, arts. L.593-23 a L.593-26). A obrigatoriedade de plano de descomissionamento, o dever de transparência pública e a supervisão técnica da ASN demonstram a centralidade da segurança coletiva na gestão de riscos pós-operacionais (FRANÇA, 2025^a; IAEA, 2019).

4.2.6 Padrões de emissão e proporcionalidade econômica

Conforme o artigo L.593-32, os limites de emissão podem, em casos excepcionais, ser flexibilizados mediante justificativa técnica e econômica do operador, desde que respeitados os parâmetros mínimos da Diretiva 2010/75/EU (UNIÃO EUROPEIA, 2010). Trata-se da aplicação do princípio da proporcionalidade, importante instrumento de racionalização do direito ambiental europeu (SANTOS, 2021).

4.2.7 Medidas excepcionais e controle estatal

Os artigos L.593-21 a L.593-24 conferem poderes excepcionais ao Estado e à ASN para suspender ou encerrar a atividade nuclear em casos de ameaça grave à coletividade. Essa prerrogativa institucional reforça o poder de polícia ambiental em matéria nuclear e assegura resposta imediata em situações de crise, conforme aponta Machado (2022): o controle estatal de atividades nucleares exige ferramentas jurídicas aptas a agir com urgência diante da imprevisibilidade do risco.

Dessa forma, a legislação francesa referente à energia nuclear apresenta notável complexidade e rigor técnico, refletindo décadas de acúmulo institucional e amadurecimento regulatório.

As normas analisadas revelam a centralidade da segurança pública, da transparência institucional e da responsabilização objetiva como pilares do modelo francês. A conjugação de medidas preventivas, exigências técnicas e poder regulatório robusto faz da França um referencial jurídico relevante para o debate comparado, sobretudo em países como o Brasil, que ainda enfrentam desafios na consolidação de uma política nuclear estável, transparente e juridicamente segura.

5 MATERIAL E MÉTODO

5.1 Tipo de Pesquisa

Trata-se de uma pesquisa teórica, de base documental, com ênfase em revisão bibliográfica sistemática e análise comparada de sistemas jurídicos.

A revisão de literatura abrangeu obras doutrinárias sobre direito nuclear, artigos científicos publicados em periódicos especializados, relatórios de instituições governamentais e organismos internacionais, além de documentos técnicos que tratam da regulação, fiscalização e operação de usinas nucleares do tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*). O modelo de reator escolhido possui relevância direta para o caso brasileiro, sendo também utilizado por países cuja comparação normativa se mostra pertinente.

5.2 Fontes e Critérios de Seleção

As fontes primárias analisadas contemplaram:

- i. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 (art. 21, XXIII; art. 225, §1º, V);
- ii. a Lei nº 6.189/1974, sobre responsabilidade civil por danos nucleares;
- iii. a Lei nº 10.308/2001, sobre a seleção de locais, a construção, o licenciamento, a operação, a fiscalização, os custos, a indenização, a responsabilidade civil e as garantias referentes aos depósitos de rejeitos radioativos, e dá outras providências;
- iv. a Lei nº 6.938/1981, sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências;
- v. a Lei nº 9.605/1998, sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente;
- vi. tratados internacionais ratificados pelo Brasil, como o Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP);

- vii. atos normativos infralegais da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), da Eletronuclear, e resoluções da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), quando aplicáveis.

As fontes secundárias abrangeram literatura jurídica, relatórios de organismos como a Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA), o Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN) e a Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), na França, e o Korea Institute of Nuclear Safety (KINS), da Coreia do Sul. Os documentos foram selecionados com base em critérios de atualidade, relevância temática e autoridade institucional.

5.3 Método Comparativo

A metodologia comparativa adotada foi inspirada no método funcional de direito comparado, conforme delineado por Zweigert e Kötz (1998). Esse método busca identificar como diferentes sistemas jurídicos enfrentam problemas semelhantes, observando as soluções normativas, institucionais e procedimentais adotadas em contextos jurídicos distintos.

Para operacionalizar a análise, foram definidos cinco eixos temáticos centrais:

1. Regulação constitucional e legal da atividade nuclear;
2. Licenciamento, fiscalização e segurança operacional de reatores;
3. Responsabilidade civil por danos nucleares e mecanismos de reparação
4. Transparência pública, participação social e controle democrático;
5. Estrutura institucional e independência regulatória.

Cada eixo foi analisado de forma descritiva e crítica no contexto brasileiro, sendo posteriormente confrontado com os marcos legais francês e sul-coreano. A análise buscou compreender não apenas os dispositivos legais em si, mas também a estrutura institucional que garante sua efetividade, como a independência das agências reguladoras, a previsibilidade dos processos de licenciamento e o rigor na aplicação de normas de segurança.

5.4 Tratamento dos Dados e Interpretação

O tratamento dos dados consistiu em análise qualitativa de conteúdo jurídico, com leitura sistemática dos textos legais, doutrinários e técnicos. Foram utilizados os seguintes critérios para a interpretação:

- a) Efetividade normativa: capacidade da norma em ser aplicada na prática;
- b) Conformidade com padrões internacionais: aderência às diretrizes da IAEA e outros tratados multilaterais;
- c) Consistência institucional: existência de agências técnicas independentes, com autonomia decisória;
- d) Abrangência e atualidade do marco legal: cobertura normativa das diversas etapas do ciclo nuclear;
- e) Mecanismos de transparência e accountability: controle social, acesso à informação e participação da sociedade civil.

Os resultados obtidos foram organizados em quadros comparativos que sintetizam os principais aspectos legais e institucionais entre os países analisados, possibilitando a visualização das convergências, divergências e potenciais pontos de aprimoramento para o Brasil.

6 RESULTADOS

A análise comparada entre o arcabouço jurídico brasileiro e o francês em matéria de geração nuclear permite observar discrepâncias significativas no modo como os dois países abordam a segurança, o controle e a responsabilidade institucional no setor nuclear. A seguir, destacam-se os principais aspectos discutidos ao longo do trabalho, com ênfase nos pilares constitucionais, na legislação infraconstitucional, na estrutura institucional, na responsabilidade civil e nos mecanismos de participação pública e controle social.

6.1 Marco constitucional e infraconstitucional

No Brasil, a Constituição Federal de 1988 centraliza a competência sobre a atividade nuclear na União, determinando que todas as ações nesse campo devem ter finalidades exclusivamente pacíficas e serem autorizadas pelo Congresso Nacional (art. 21, XXIII, alínea “a”) (BRASIL, 1988). Além disso, a Carta Magna impõe responsabilidade objetiva por danos nucleares (art. 21, XXIII, alínea “d”) e estabelece a necessidade de legislação federal específica para a localização de usinas nucleares (art. 225, §6º).

No entanto, em que pese esse arcabouço constitucional razoavelmente sólido, a legislação infraconstitucional brasileira permanece dispersa e defasada. A principal norma, a Lei nº 4.118/1962 (que dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências), carece de atualização para incorporar avanços tecnológicos e institucionais.

Em contraste, a legislação francesa está sistematizada em códigos específicos, com destaque para o Code de l’environnement, que reúne as normas relativas à criação, operação, fiscalização e desativação das installations nucléaires de base (INB) (FRANÇA, 2025a).

6.2 Estrutura institucional e regulação independente

No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) é, até recentemente, a principal responsável pela regulação e fiscalização da atividade nuclear. Entretanto, tal estrutura foi objeto de críticas, por concentrar, simultaneamente, funções de promoção, licenciamento e fiscalização, comprometendo sua imparcialidade e efetividade (FERREIRA, 2021).

A criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), pela Lei n.º 14.222/2021, representa um passo em direção à separação funcional entre promoção e fiscalização, mas sua implementação ainda é recente e carece de consolidação prática (BRASIL, 2021).

Na França, a Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN) é uma agência independente, dotada de autonomia técnica, administrativa e financeira. Suas competências estão definidas no Code de l'environnement e incluem desde o licenciamento até o monitoramento permanente das atividades nucleares (FRANÇA, 2025a). A ASN também presta contas diretamente ao Parlamento e à sociedade, o que reforça seu compromisso com a transparência.

6.3 Responsabilidade civil e reparação de danos

A responsabilidade civil objetiva por danos nucleares é princípio comum ao ordenamento brasileiro e francês. No entanto, enquanto a legislação francesa prevê instrumentos concretos de prevenção, seguros obrigatórios e garantias financeiras para o operador, o Brasil carece de regulamentação detalhada sobre os mecanismos de indenização e sobre o fundo de garantia para acidentes nucleares.

O artigo L.593-6 do Code de l'environnement francês impõe ao operador o dever de antecipar riscos, manter planos de emergência e demonstrar capacidade técnica e financeira para operar uma instalação nuclear (FRANÇA, 2025a). Já no Brasil, apesar da previsão da responsabilidade objetiva no texto constitucional, não há dispositivos infraconstitucionais suficientes para garantir a reparação adequada, especialmente em grandes desastres.

6.4 Participação pública e transparência

Outro ponto crítico é a ausência de mecanismos eficazes de controle social e participação pública no licenciamento e operação de instalações nucleares no Brasil. Embora a Lei nº 6.938/1981 preveja o direito à informação ambiental e a realização de audiências públicas no processo de licenciamento ambiental, tais exigências não são específicas nem suficientes para o setor nuclear (BRASIL, 1981).

Na França, o artigo L.593-8 do Code de l'environnement estabelece a obrigatoriedade de consulta pública para a criação de qualquer INB, incluindo a divulgação de relatórios

técnicos e pareceres de risco. A cultura de participação pública é fortalecida também por iniciativas da ASN, como audiências regulares e fóruns consultivos regionais.

6.5 Planejamento de encerramento e descomissionamento

A legislação francesa impõe ao operador a obrigação de apresentar um plano de desmantelamento desde o licenciamento inicial da usina (arts. L.593-23 a L.593-26), com revisões periódicas, transparência e controle externo. No Brasil, a ausência de uma política nacional de descomissionamento impede a consolidação de regras claras e seguras para o fim de vida útil das instalações nucleares.

6.6 Comparação entre o marco legal nuclear do Brasil e da França

A Tabela 1 apresenta um comparativo entre a regulação nuclear do Brasil e da França. A Constituição brasileira estabelece com clareza o monopólio da União sobre as atividades nucleares (art. 21, XXIII), impõe o uso exclusivo para fins pacíficos, submete as atividades à aprovação do Congresso Nacional e prevê responsabilidade objetiva por danos nucleares (BRASIL, 1988).

No entanto, o ordenamento jurídico infraconstitucional não acompanhou a evolução tecnológica e institucional do setor. Lei como a n.º 4.118/1962 (que dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a Comissão Nacional de Energia Nuclear, e dá outras providências), embora pioneira, apresenta lacunas e desatualizações que comprometem a governança nuclear, não oferecendo bases normativas consolidadas para questões contemporâneas, como descomissionamento de instalações, segurança cibernética, revisão periódica de licenças, fundos de responsabilidade civil ou mecanismos detalhados de participação social.

Na França, por outro lado, o arcabouço normativo é amplamente sistematizado no Code de l'environnement e no Code de l'énergie, os quais tratam com profundidade desde a definição legal das instalações nucleares até os procedimentos para sua criação, operação, fiscalização e encerramento. Tal codificação promove maior previsibilidade e coerência normativa, em consonância com o princípio da legalidade e com as exigências de segurança jurídica.

Tabela 1 - Comparativo entre as legislações nuclear do Brasil e da França

ASPECTO	BRASIL	FRANÇA
Marco Constitucional	CF/88, art. 21, XXIII; art. 225, §6º	Constituição da República e o <i>Code de l'environnement</i>
Legislação Infraconstitucional	Dispersa e desatualizada (ex.: Lei 4.118/1962)	Codificação no <i>Code de l'environnement</i> e <i>Code de l'énergie</i>
Agência Reguladora	CNEN (com conflito de funções); ANSN (recente)	ASN – Autoridade independente, autônoma e transparente
Responsabilidade Civil	Objetiva, prevista na CF (art. 21, XXIII, "d"); sem regulamentação suficiente	Responsabilidade objetiva com garantia de fundos, planos de risco e seguros (art. L.593-6)
Licenciamento	Sem norma específica para instalações nucleares	Exige autorização formal, consulta pública e análise técnica rigorosa (arts. L.593-7 e 8)
Transparência Pública	Audiência pública genérica (Lei 6.938/1981)	Participação obrigatória e contínua, com canais públicos de consulta
Encerramento e Descomissionamento	Não regulamentado em lei específica	Plano obrigatório desde o licenciamento, revisado periodicamente (arts. L.593-23 a 26)
Controle Estatal em Emergências	Ausência de regime excepcional claro	ASN pode suspender operação imediatamente por risco à coletividade (arts. L.593-21 a 24)

Outro ponto de destaque na comparação diz respeito à estrutura institucional responsável pelo licenciamento e fiscalização das atividades nucleares. No Brasil, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) acumulou por décadas as funções de regulação, promoção e fiscalização, o que gerou críticas por conflitos de interesse e por fragilidade em sua autonomia decisória (FERREIRA, 2021).

Com a criação da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN) pela Lei nº. 14.222/2021, buscou-se solucionar esse impasse, conferindo à nova autarquia a responsabilidade exclusiva pela regulação e fiscalização da segurança nuclear e radiológica. No entanto, a consolidação institucional da ANSN ainda está em curso, e sua independência técnica e orçamentária permanece incerta.

Em contrapartida, a França opera com a Autorité de Sûreté Nucléaire (ASN), uma agência reguladora independente que possui plena autonomia técnica e jurídica, estrutura

própria e vinculação direta ao Parlamento. Essa autonomia garante maior isenção no processo decisório e maior credibilidade institucional, além de atender às exigências da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA) quanto à independência das entidades reguladoras (IAEA, 2019).

A responsabilidade civil por danos nucleares é, nos dois países, regida pelo princípio da objetividade, o que dispensa a comprovação de culpa por parte do operador da instalação. Contudo, enquanto o ordenamento francês detalha instrumentos jurídicos e econômicos para garantir a efetivação dessa responsabilidade, como seguros compulsórios, exigência de fundos de reserva, plano de contingência e auditoria pública (FRANÇA, 2025a), o Brasil carece de regulamentação sobre os meios concretos de assegurar a reparação integral em caso de acidente nuclear.

Outro contraste relevante é o tratamento conferido à transparência pública e ao controle social. A legislação francesa exige, como pré-requisito à autorização de qualquer instalação nuclear, a realização de consulta pública obrigatória, com ampla divulgação de documentos técnicos e pareceres ambientais (art. L.593-8 do Code de l'environnement). Além disso, a ASN promove audiências regulares e mantém canais permanentes de interlocução com a sociedade civil.

No Brasil, embora a legislação ambiental preveja a possibilidade de audiências públicas (Lei n.º 6.938/1981), essa prática ainda não está institucionalizada no setor nuclear de forma sistemática ou vinculante, o que compromete a legitimidade das decisões e enfraquece a governança democrática do setor.

Quanto ao encerramento e descomissionamento de instalações, a legislação francesa obriga o operador a apresentar, já na fase de licenciamento, um plano de desativação técnica, financeira e ambiental, com revisões periódicas e supervisão contínua por parte da ASN (FRANÇA, 2025a). No Brasil, não há norma específica que regule o descomissionamento de usinas nucleares, tampouco exigência de fundo vinculado ou de planejamento prévio, o que representa um risco latente à segurança ambiental e à sustentabilidade institucional da atividade nuclear.

7 CONCLUSÃO E PERSPECTIVA

O estudo comparativo entre a legislação nuclear brasileira e francesa evidenciou que o Brasil possui um arcabouço jurídico insuficiente para lidar com a complexidade técnica, ambiental e institucional da atividade nuclear. Apesar de contar com dispositivos constitucionais que reconhecem a gravidade e sensibilidade do tema, como o art. 21, XXIII, e o art. 225, §6º, da Constituição Federal (BRASIL, 1988), a ausência de normas infraconstitucionais atualizadas, específicas e integradas fragiliza a governança do setor.

A França, por sua vez, se destaca por possuir um sistema legal robusto, articulado entre códigos temáticos e agências independentes, o que permite enfrentar os riscos inerentes à atividade nuclear com maior eficiência e segurança jurídica. As normas contidas no Code de l'environnement e no Code de l'énergie apresentam requisitos rigorosos de licenciamento, fiscalização contínua, participação social e responsabilização, servindo como referência para países que buscam modernizar sua política nuclear (FRANÇA, 2025a; OECD/NEA, 2021).

Conclui-se que o Brasil necessita urgentemente revisar e consolidar seu marco legal nuclear, por meio da elaboração de uma Lei Geral da Energia Nuclear, que integre normas técnicas, ambientais, civis e penais em um mesmo diploma. É imprescindível também fortalecer a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN), como agência independente, separando funções de regulação, licenciamento e operação. Ademais, recomenda-se a obrigatoriedade de revisões periódicas de segurança, planos de descomissionamento e instrumentos de participação pública, como preconizado pelas boas práticas internacionais (IAEA, 2019; SILVA NETO, 2023).

Por fim, a consolidação de um direito nuclear moderno e eficaz é condição indispensável para garantir a proteção ambiental, a segurança populacional, a previsibilidade jurídica e a confiança pública no uso pacífico da energia nuclear. A evolução tecnológica e operacional da geração nuclear brasileira deve, necessariamente, ser acompanhada por um ambiente regulatório à altura dos desafios do século XXI.

Com vistas a trabalhos futuros, seria de grande enriquecimento ao tema aqui abordado a análise de legislações de outros países, como Coréia do Sul, Alemanha ou Estados Unidos. Tem-se também nestes países uma consolidada e bem estruturada base técnica na geração nuclear, certamente também serão encontrados ordenamentos meticulosos e cuidadosos com esta área tão sensível tanto do ponto de vista energético, quanto de segurança, desenvolvimento econômico, segurança jurídica e governança.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 6024: informação e documentação: numeração progressiva das seções de um documento: apresentação. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. NBR 6027: informação e documentação: sumário: apresentação. Rio de Janeiro, 2012.
- ABNT. NBR 6028: informação e documentação: resumo: apresentação. Rio de Janeiro, 2003.
- ABNT. NBR 10.520 documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002.
- ABNT. NBR 14.724: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.
- AMORIM, Júlio César. A evolução jurídica da energia nuclear no Brasil. *Revista Jurídica da Presidência*, Brasília, v. 18, n. 2, p. 117–138, 2016.
- BARRETO, Ricardo L. A regulação setorial da energia nuclear: limites e perspectivas. *Revista Brasileira de Políticas Públicas*, Brasília, v. 11, n. 3, p. 145–168, 2021.
- BEN – Balanço Energético Nacional. Balanço Energético Nacional 2025: ano base 2024. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2025. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-BEN>. Acesso em: 3 ago. 2025.
- BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 5 out. 1988. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 3 ago. 2025.
- BRASIL. Decreto n.º 2.750, de 26 de agosto de 1998. Regulamenta dispositivos da Lei n.º 9.478/1997. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27 ago. 1998.
- BRASIL. Lei n.º 4.118, de 27 de agosto de 1962. Dispõe sobre a Política Nacional de Energia Nuclear. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 29 ago. 1962.
- BRASIL. Lei n.º 6.189, de 16 de dezembro de 1974. Reorganiza a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 17 dez. 1974.
- BRASIL. Lei n.º 6.938, de 31 de agosto de 1981. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 2 set. 1981.
- BRASIL. Lei n.º 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas lesivas ao meio ambiente. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 13 fev. 1998.
- BRASIL. Lei n.º 10.308, de 20 de novembro de 2001. Dispõe sobre localização, licenciamento, construção, operação e fiscalização de instalações nucleares. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 21 nov. 2001.

BRASIL. Lei n.º 14.222, de 15 de outubro de 2021. Cria a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear - ANSN. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 out. 2021.

ELETRONUCLEAR. Angra 2 encerra vigésimo ciclo com 99,4% de disponibilidade. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br>. Acesso em: 31 jul. 2025.

ELETRONUCLEAR. Caracterização do empreendimento Angra 3. Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://www.eletronuclear.gov.br>. Acesso em: 31 jul. 2025.

EUA. Severe Accident Risks: An Assessment for Five U.S. Nuclear Power Plants — Final Summary Report (NUREG-1150, Volume 1, Chapter 12). Disponível em: [Severe Accident Risks: An Assessment For Five U.S. Nuclear Power Plants — Final Summary Report\(NUREG-1150, Volume 1\) | NRC.gov](https://www.nrc.gov/reading-rm/doc-collections/nuregs/summaries/NUREG-1150_Vol1_Chapter12.pdf). Acesso em 13/08/2025.

FERREIRA, Carlos Eduardo. A regulação da energia nuclear no Brasil: desafios institucionais e propostas de reforma. Revista Brasileira de Direito Público, Curitiba, v. 18, n. 70, p. 89–115, 2021.

FRANÇA. Code de l’environnement. Version consolidée au 1er août 2025. Paris: Legifrance. Disponível em: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000006074220. Acesso em: 3 ago. 2025.

FRANÇA. Code de l’énergie. Version consolidée au 1er août 2025. Paris: Legifrance. Disponível em: https://www.legifrance.gouv.fr/codes/texte_lc/LEGITEXT000023983208. Acesso em: 3 ago. 2025.

IAEA - International Atomic Energy Agency. Governmental, Legal and Regulatory Framework for Safety – General Safety Requirements Part 1. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 1 (Rev. 1). Vienna: IAEA, 2019.

IAEA - International Atomic Energy Agency. Technology Roadmap: Nuclear Power and the Clean Energy Transition. Vienna: IAEA, 2020.

IAEA - International Atomic Energy Agency. Fundamentals of Nuclear Safety. Vienna: IAEA, 2018.

INB - Indústrias Nucleares do Brasil. Relatório Anual de Produção 2023. Resende, 2024. Disponível em: <https://www.inb.gov.br>. Acesso em: 3 ago. 2025.

KIM, Jisung. Regulatory independence in nuclear safety: lessons from South Korea. Journal of Nuclear Law and Policy, Seoul, v. 12, n. 2, p. 45–67, 2019.

MARCELLO, João Henrique. Marco regulatório nuclear brasileiro: uma proposta de modernização. Revista de Energia e Meio Ambiente, São Paulo, v. 15, n. 2, p. 33–49, 2020.

OECD/NEA - Nuclear Energy Agency. Country Nuclear Safety Profile: France. Paris: OECD, 2021. Disponível em: <https://www.oecd-nea.org>. Acesso em: 3 ago. 2025.

PEREIRA, André Luiz. O ciclo do combustível nuclear e os desafios para o Brasil. Revista de Ciências Nucleares, Rio de Janeiro, v. 5, n. 1, p. 11–24, 2014.

PLANAS, Oriol. Pressurized water reactor (PWR): advantages and disadvantages. Nuclear-Energy. Disponível em: <https://nuclear-energy.net/nuclear-power-plants/nuclear-reactor/types/pressurized-water-reactor>. Acesso em: 13/08/2025

SANTOS, Tiago Felipe dos. Aspectos jurídicos da segurança nuclear no Brasil. Revista de Direito Público, Curitiba, v. 19, n. 75, p. 85–108, 2021.

SILVA, Fernando Antônio da. O papel do Estado na regulação da energia nuclear. Revista de Direito Ambiental, São Paulo, v. 23, n. 92, p. 55–74, 2012.

SILVA NETO, Júlio César. Participação pública no licenciamento de usinas nucleares: um estudo comparativo entre Brasil e França. Revista de Direito Ambiental, São Paulo, v. 28, n. 112, p. 73–102, 2023.

SOUZA, Mariana Leal de. Energia nuclear e responsabilidade civil: aspectos jurídicos no Brasil. Revista da Faculdade de Direito da UERJ, Rio de Janeiro, v. 18, n. 2, p. 139–158, 2010.

UNIÃO EUROPEIA. Diretiva 2010/87/UE do Conselho, de 13 de julho de 2010, relativa à segurança das instalações nucleares. Jornal Oficial da União Europeia, Bruxelas, 2010.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power in Brazil. London: WNA, 2023. Disponível em: <https://www.world-nuclear.org>. Acesso em: 3 ago. 2025.

WORLD NUCLEAR NEWS. Brazil's Angra 3 expected to start up in 2029. London, 2025. Disponível em: <https://www.world-nuclear-news.org>. Acesso em: 3 ago. 2025.
025)