

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CMG (FN) ROBSON TURQUIELLO MACHADO DA SILVA

**SISTEMAS REMOTAMENTE PILOTADOS EM EMERGÊNCIAS:
Lições de Fukushima e oportunidades de aprimoramento no
Programa Nuclear da Marinha**

Rio de Janeiro

2025

ESCOLA DE GUERRA NAVAL

CMG (FN) ROBSON TURQUIELLO MACHADO DA SILVA

**SISTEMAS REMOTAMENTE PILOTADOS EM EMERGÊNCIAS:
Lições de Fukushima e oportunidades de aprimoramento no
Programa Nuclear da Marinha**

Tese apresentada à Escola de Guerra Naval,
como requisito parcial para a conclusão do
Curso de Política e Estratégia Marítimas.

Orientador: CMG (RM1) EMÍLIO

Rio de Janeiro
Escola de Guerra Naval
2025

DECLARAÇÃO DA NÃO EXISTÊNCIA DE APROPRIAÇÃO INTELECTUAL IRREGULAR

Declaro que este trabalho acadêmico: a) corresponde ao resultado de investigação por mim desenvolvida, enquanto discente da Escola de Guerra Naval (EGN); b) é um trabalho original, ou seja, que não foi por mim anteriormente utilizado para fins acadêmicos ou quaisquer outros; c) é inédito, isto é, não foi ainda objeto de publicação; e d) é de minha integral e exclusiva autoria.

Declaro também que tenho ciência de que a utilização de ideias ou palavras de autoria de outrem, sem a devida identificação da fonte, e o uso de recursos de inteligência artificial no processo de escrita constituem grave falta ética, moral, legal e disciplinar. Ademais, assumo o compromisso de que este trabalho possa, a qualquer tempo, ser analisado para verificação de sua originalidade e ineditismo, por meio de ferramentas de detecção de similaridades ou por profissionais qualificados.

Os direitos morais e patrimoniais deste trabalho acadêmico, nos termos da Lei 9.610/1998, pertencem ao seu Autor, sendo vedado o uso comercial sem prévia autorização. É permitida a transcrição parcial de textos do trabalho, ou mencioná-los, para comentários e citações, desde que seja feita a referência bibliográfica completa.

Os conceitos e ideias expressas neste trabalho acadêmico são de responsabilidade do Autor e não retratam qualquer orientação institucional da EGN ou da Marinha do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Escola de Guerra Naval pelo ano de intenso aprendizado, pela valiosa troca de saberes e pelo amadurecimento intelectual, proporcionados no âmbito do Curso de Política e Estratégia Marítimas (C-PEM 2025).

À minha família, pelo apoio incondicional, pela paciência nas horas difíceis e pela presença constante ao longo desta jornada.

Ao Capitão de Mar e Guerra (RM1) Alexandre Motta de Sousa, Encarregado do C-PEM 2025, pela atenção dedicada e pelo incansável apoio prestado aos oficiais-alunos, o que contribuiu de forma decisiva para o êxito do curso.

Ao meu orientador, Comandante Emílio Reis Coelho, pela orientação técnica de alto nível, pela confiança depositada e pelo constante incentivo ao desenvolvimento deste trabalho.

Aos valorosos colegas da Turma C-PEM 2025, com destaque para os camaradas da Turma Almirante Ary Rongel, minha gratidão pelas experiências compartilhadas, que tornaram esse período ainda mais marcante.

RESUMO

Neste trabalho examinam-se as capacidades implementadas por meio de Sistemas Remotamente Pilotados (SRPs) no Japão após o acidente nuclear de Fukushima, com foco em situações de emergência e objetiva-se fomentar a reflexão sobre as possibilidades de aprimoramento do emprego desses sistemas no Programa Nuclear da Marinha (PNM). Com uma abordagem qualitativa, baseada em pesquisa documental e na identificação de contrastes operacionais entre os contextos japonês e brasileiro, estabelecem-se conexões entre a experiência japonesa e a realidade do PNM, com ênfase nas atividades do Centro Experimental de ARAMAR (CEA). O caso Fukushima configurou um marco para o uso de tecnologias emergentes na gestão de crises, ao evidenciar que a integração de plataformas autônomas, como drones aéreos, robôs terrestres e veículos subaquáticos, aos protocolos institucionais de resposta viabiliza missões críticas em áreas de acesso restrito, do mapeamento radiológico ao apoio ao descomissionamento. A experiência japonesa consolidou um modelo de resposta articulado, com incorporação ampla de SRPs e investimentos contínuos em pesquisa, desenvolvimento e capacitação. No Brasil, observou-se um hiato no emprego sistemático de SRPs em apoio ao PNM, apesar de experiências pontuais no CEA, o que indica oportunidades de integração dessas tecnologias às rotinas operacionais, à luz das lições japonesas. Além disso, entende-se que a incorporação planejada e coordenada de SRPs tende a fortalecer preventivamente as capacidades nacionais, alinhando o PNM às melhores práticas internacionais em segurança nuclear.

Palavras-chave: Sistemas Remotamente Pilotados. Fukushima. Emergência Nuclear. Programa Nuclear da Marinha. Segurança Nuclear.

ABSTRACT

SISTEMAS REMOTAMENTE PILOTADOS EM EMERGÊNCIAS: Lições de Fukushima e oportunidades de aprimoramento no Programa Nuclear da Marinha

This study examines the capabilities implemented with Remotely Piloted Systems (SRPs) in Japan after the Fukushima nuclear accident, focusing on emergency situations, and aims to foster reflection on opportunities to improve the use of these systems within the Brazilian Navy's Nuclear Program (PNM). Using a qualitative approach based on documentary research and the identification of operational contrasts between the Japanese and Brazilian contexts, the study establishes connections between the Japanese experience and the reality of the PNM, with emphasis on activities at the Aramar Experimental Center (CEA). The Fukushima case marked a turning point for the use of emerging technologies in crisis management, showing that integrating autonomous platforms—such as aerial drones, ground robots, and underwater vehicles—into institutional response protocols enables critical missions in restricted areas, from radiological mapping to decommissioning support. Japan's experience consolidated an articulated response model with broad incorporation of SRPs and ongoing investments in research, development, and training. In Brazil, a gap is observed in the systematic employment of SRPs in support of the PNM, despite isolated experiences at the CEA, indicating opportunities to integrate these technologies into operational routines in light of Japanese lessons learned. Furthermore, the planned and coordinated incorporation of SRPs is expected to strengthen national preparedness and align the PNM with international best practices in nuclear safety.

Keywords: Fukushima. Remotely Piloted Systems. Fukushima. Nuclear emergency. Brazilian Navy Nuclear Program. Nuclear safety.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Etapas do Ciclo do Combustível Nuclear no CEA.....	23
FIGURA 2 – Centros de Emergência Nuclear.....	35
FIGURA 3 – Relação entre os Planos Nacionais.....	35
FIGURA 4 – Danos Estruturais das Unidades 1 a 4 da Central Nuclear.....	41
FIGURA 5 – Multicóptero Radiológico.....	51
FIGURA 6 – DJI Matrice 600.....	51
FIGURA 7 – DJI Matrice 600 Equipado.....	52
FIGURA 8 – Mapa Tridimensional.....	52
FIGURA 9 – SRP em Inspeção Estrutural.....	54
FIGURA 10 – Método <i>Impact-Echo</i>	54
FIGURA 11 – Packbot.....	55
FIGURA 12 – Quince.....	55
FIGURA 13 – MEISTeR em Teste.....	57
FIGURA 14 – MEISTeR em Operação.....	57
FIGURA 15 – SRP “Fuji”	58
FIGURA 16 – SRP “ <i>Boat-type A</i> ”	58
FIGURA 17 – Estrutura Organizacional Subordinada ao CTMSP	66
FIGURA 18 – Vista Aérea do Centro Experimental de ARAMAR.....	69
FIGURA 19 – Representação Esquemática do SisPF no CEA.....	71
FIGURA 20 – Áreas de Segurança Física no CEA	72
FIGURA 21 – Força de Reação de Serviço no CEA.....	73

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Principais SRPs Aéreos Empregados em Fukushima Daiichi.....	45
TABELA 2 – Principais SRPs Terrestres Empregados em Fukushima Daiichi.....	46
TABELA 3 – Principais SRPs Subaquáticos Empregados em Fukushima Daiichi....	47

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1ºBtlProtDefNBQR	– 1º Batalhão de Proteção e Defesa Nuclear, Biológica, Química e Radiológica
ABACC	– Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares
ABEN	– Associação Brasileira de Energia Nuclear
ABIN	– Agência Brasileira de Inteligência
ABP	– Ameaça-Base de Projeto
AIEA	– Agência Internacional de Energia Atômica
AMAZUL	– Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A.
ANSN	– Autoridade Nacional de Segurança Nuclear
BID	– Base Industrial de Defesa
BTLDEFNBQR-ARAMAR	– Batalhão de Defesa Nuclear, Biológica, Química e Radiológica de ARAMAR
CASLON	– Comitê de Articulação nas Áreas de Segurança e Logística do SIPRON
CCCEN	– Centro de Coordenação de Controle de Emergência Nuclear
CCGEN	– Centro de Coordenação Geral de Emergência
CCLE	– Centro de Coordenação Local de Emergência
CDS	– Centro de Desenvolvimento de Submarinos
CEA	– Centro Experimental de ARAMAR
CEL/UPE	– Coordenador de Emergência Local da Unidade de Planejamento de Emergência

CESTGEN	– Centro Estadual de Gestão de Emergência Nuclear
CINA	– Centro Industrial Nuclear de ARAMAR
CNAGEN	– Centro Nacional de Gerenciamento de Emergência Nuclear
CNEN	– Comissão Nacional de Energia Nuclear
CNI	– Complexo Naval de Itaguaí
COGEPE	– Coordenador-Geral do Plano de Emergência
COPESP	– Coordenadoria para Projetos Especiais
COPRON	– Coordenadoria de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro
COS	– Centro de Operações de Segurança
CPFMN	– Convenção sobre Proteção Física de Materiais Nucleares
CTEMSP	– Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo
DCNUC	– Departamento de Coordenação Nuclear
DDNM	– Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha
DGDNTM	– Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha
END	– Estratégia Nacional de Defesa
EPR	– Equipe de Proteção Radiológica
EPREV	– <i>Emergency Preparedness Review</i>
FINEP	– Financiadora de Estudos e Projetos
GEL/UPE	– Grupo de Emergência Local da Unidade de Planejamento de Emergência
GPS	– <i>Global Positioning System</i>

GPS/RTK	– <i>Global Positioning System/Real-Time Kinematic</i>
GSG	– <i>General Safety Guides</i>
GS/PR	– Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República
GSR/PART 7	– <i>Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency/Part 7</i>
IAEA	– <i>International Atomic Energy Agency</i>
ICRP	– <i>International Commission on Radiological Protection</i>
INB	– Indústrias Nucleares do Brasil
INES	– <i>International Nuclear and Radiological Event Scale</i>
INFCIRC	– <i>Information Circular</i>
INFCIRC/225/REVISION5	– <i>The Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities/Revision 5</i>
IRID	– <i>International Research Institute for Nuclear Decommissioning</i>
IRRS	– <i>Integrated Regulatory Review Service</i>
JAEA	– <i>Japan Atomic Energy Agency</i>
JSDF	– <i>Japan Self-Defense Forces</i>
LABGENE	– Laboratório de Geração Nucleoelétrica
LABMAT	– Laboratório de Material Nuclear
LARE	– Laboratório Radioecológico
LEI	– Laboratório de Enriquecimento Isotópico
3D LIDAR	– <i>Three-Dimensional Light Detection and Ranging</i>
MB	– Marinha do Brasil
MD	– Ministério da Defesa

MEISTeR	– <i>Maintenance Equipment Integrated System of Telecontrol Robot</i>
MME	– Ministério de Minas e Energia
NBQR	– Nuclear, Biológica, Química e Radiológica
NEA	– <i>Nuclear Energy Agency</i>
NIOs	– Níveis de Intervenção Otimizados
NN/CNEN	– Norma Nuclear da CNEN
NRA	– <i>Nuclear Regulation Authority</i>
NSS	– <i>Nuclear Security Series</i>
OM(s)	– Organização(ões) Militar(es)
ONU	– Organização das Nações Unidas
OSP	– Órgãos de Segurança Pública
PCV	– <i>Primary Containment Vessel</i>
PEL(s)	– Plano(s) de Emergência Local
PEM	– Plano Estratégico da Marinha
PNASEN	– Plano Nacional de Ação para Situações de Emergência Nuclear
PNB	– Programa Nuclear Brasileiro
PNE(s)	– Planta Nuclear Embarcada
PNM	– Programa Nuclear da Marinha
PNRIESFN	– Plano Nacional de Resposta Integrada a Evento de Segurança Física Nuclear
POPs	– Procedimentos Operacionais Padronizados
PPF(s)	– Plano(s) de Proteção Física

PROSUB	– Programa de Desenvolvimento de Submarino com Propulsão Nuclear
PSO	– Plano de Segurança Orgânica
PSO/CEA	– Plano de Segurança Orgânica do Centro Experimental de ARAMAR
PV	– Posto de Vigilância
RANET	– <i>Response and Assistance Network</i>
SecNSNQ	<i>Secretaria Naval de Segurança Nuclear e Qualidade</i>
SeçDAE	– Seção de Desativação de Artefatos Explosivos
SIPRON	– Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro
SISPF	– Sistema de Proteção Física
SMiRT	– <i>Structural Mechanics in Reactor Technology</i>
SNCA	– Submarino Nuclear Convencionalmente Armado
SP	– São Paulo
SRPs	– Sistema(s) Remotamente Pilotado(s)
TEPCO	– <i>Tokyo Electric Power Company</i>
UNSCEAR	– <i>United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation</i>
UPE	– Unidade de Planejamento de Emergência
USEXA	– Unidade Produtora de Hexafluoreto de Urânio
WINS	– <i>World Institute for Nuclear Security</i>
ZPE(s)	– Zona(s) de Planejamento de Emergência

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	CONCEITOS: SEGURANÇA FÍSICA E EMERGÊNCIA NUCLEAR.....	17
2.1	ESTRUTURA NORMATIVA DO SETOR NUCLEAR BRASILEIRO.....	17
2.2	O SETOR NUCLEAR NA MARINHA DO BRASIL.....	21
2.3	FUNDAMENTOS DA SEGURANÇA FÍSICA NUCLEAR.....	25
2.4	EMERGÊNCIA NUCLEAR: CONCEITUAÇÃO E RESPOSTA.....	30
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
3	EVOLUÇÃO DO EMPREGO DE SRPs APÓS O ACIDENTE DE FUKUSHIMA.....	38
3.1	CONTEXTO DO ACIDENTE E DESAFIOS OPERACIONAIS.....	40
3.2	A ADOÇÃO DE SRPs COMO ESTRATÉGIA DE RESPOSTA.....	44
3.3	CAPACIDADES IMPLEMENTADAS COM SRPs.....	49
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	63
4	O EMPREGO DE SRPs EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA NO CEA: EXPERIÊNCIA DO AUTOR.....	65
4.1	O CEA E SUA INSERÇÃO NO PNM.....	66
4.2	ESTRUTURA DE RESPOSTA: SEGURANÇA FÍSICA, EMERGÊNCIA NUCLEAR E SRPs.....	70
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	84
5	POSSIBILIDADES DE EMPREGO DE SRPs EM EMERGÊNCIAS NO PNM.....	85
5.1	DIAGNÓSTICO: LIÇÕES DE FUKUSHIMA E REALIDADE VIVENCIADA..	85
5.2	POSSIBILIDADES DE APRIMORAMENTO DO EMPREGO DE SRPs NO PNM.....	91
5.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
6	CONCLUSÃO.....	99
	REFERÊNCIAS.....	103

1 INTRODUÇÃO

A crescente complexidade das ameaças contemporâneas relacionadas ao setor nuclear tem exigido dos Estados não apenas o fortalecimento de suas estruturas normativas, mas também o aperfeiçoamento de suas capacidades operacionais de prevenção, mitigação e resposta a emergências. Nesse cenário, destaca-se o papel estratégico dos Sistemas Remotamente Pilotados (SRPs)¹, cujas aplicações têm se ampliado significativamente nas últimas décadas, inclusive em ambientes de alta sensibilidade, como as instalações nucleares, nas quais se exigem elevados padrões de segurança física e proteção radiológica. O desenvolvimento desses sistemas, impulsionado por avanços tecnológicos nos campos da automação, da robótica e do sensoriamento remoto, permite realizar tarefas críticas em áreas de risco elevado, com potencial para preservar vidas humanas, ampliar a consciência situacional e otimizar processos de comando e controle em situações de crise.

A experiência japonesa, consolidada após o acidente nuclear de Fukushima Daiichi, ocorrido em março de 2011, revelou-se um marco nesse processo evolutivo. A utilização de SRPs por instituições japonesas, tanto para o monitoramento radiológico quanto para inspeções estruturais, missões de reconhecimento e apoio logístico em ambientes contaminados, contribuiu para a mitigação de danos, a elevação da segurança operacional e a aceleração das atividades de descomissionamento. Essa conjuntura despertou o interesse de comunidades técnico-científicas e setores estratégicos de diferentes países quanto às possibilidades de incorporação desses sistemas às suas respectivas infraestruturas nucleares críticas. Nesse contexto, sobressai o papel da Agência Internacional de Energia Atômica (*International Atomic Energy Agency* – IAEA) no fomento à cooperação internacional e ao compartilhamento de boas práticas sobre o uso de tecnologias emergentes, como os SRPs, em apoio à segurança nuclear, à segurança física e à resposta em situações de emergência.

No caso brasileiro, a Marinha do Brasil (MB) conduz, há décadas, o Programa Nuclear da Marinha (PNM), com destaque para o desenvolvimento de instalações

¹ Plataformas remotamente operadas são utilizadas no setor nuclear para ampliar a segurança e reduzir a exposição humana.

localizadas no Centro Experimental de ARAMAR (CEA), em Iperó, São Paulo (SP). Nesse ambiente, que abriga unidades classificadas como instalações nucleares, observa-se a convergência entre exigências normativas rigorosas e a necessidade de capacidades operacionais compatíveis com os desafios da segurança física e da resposta a emergências nucleares.

Entre 2019 e 2020, durante a atuação do autor como Assessor de Segurança do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP) e, posteriormente, como Comandante do 1º Batalhão de Proteção e Defesa Nuclear, Biológica, Química e Radiológica (1º BtlProtDefNBQR), foram realizados testes operacionais com SRPs aéreos e terrestres no CEA, com o objetivo de avaliar a aplicação em cenários reais de emergência, em articulação com as equipes de resposta do CTMSP e do 1º BtlProtDefNBQR. Essa experiência permitiu observar o potencial de contribuição dos SRPs na mitigação de riscos e na ampliação da eficácia das ações de resposta em situações críticas.

A análise da experiência japonesa após o acidente de Fukushima evidenciou o papel transformador dos SRPs na gestão de crises nucleares, particularmente em atividades de vigilância, detecção, mapeamento radiológico, inspeções técnicas, transporte de cargas em zonas contaminadas, restabelecimento de comunicações e apoio ao descomissionamento de instalações danificadas. A diversidade de aplicações observada no Japão, associada ao alto grau de integração institucional desses sistemas com os protocolos de resposta, representa um referencial internacional de boas práticas, passível de adaptação a outras realidades nacionais.

Nesse sentido, torna-se relevante investigar o conjunto de capacidades implementadas por meio da utilização de SRPs no Japão, para refletir sobre sua possível aplicabilidade no contexto do PNM. Considerando-se o elevado grau de complexidade das instalações nucleares, bem como os riscos inerentes a possíveis cenários de emergência, o uso de plataformas remotas revela-se uma alternativa promissora para melhorar a eficácia da resposta, proteger as equipes de resposta e garantir a continuidade das funções críticas de comando e controle.

No entanto, verifica-se no PNM a ausência de uma doutrina consolidada e o uso limitado de SRPs em apoio à resposta a emergências nucleares, o que configura um hiato operacional. A partir dessa constatação, impõe-se a necessidade de

aprofundar o conhecimento sobre essas capacidades e identificar possíveis caminhos para o aprimoramento das ações, no âmbito do PNM, em consonância com a legislação nacional, as recomendações da IAEA e as especificidades do setor nuclear brasileiro.

Na presente pesquisa tem-se como objetivo geral sintetizar as competências implementadas por SRPs no Japão, após o acidente nuclear de Fukushima, com foco em situações de emergência nuclear, e fomentar a reflexão sobre oportunidades de aprimoramento do emprego desses sistemas no âmbito do PNM. Para alcançar esse propósito, a pesquisa foi estruturada em quatro objetivos intermediários complementares. O primeiro consiste em apresentar os principais conceitos e aspectos normativos inerentes à segurança física e às emergências nucleares, conforme as diretrizes estabelecidas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e pela IAEA. O segundo busca identificar as capacidades efetivamente implementadas no Japão com o uso de SRPs, após o acidente de Fukushima. Em seguida, descrever a experiência do autor no emprego desses sistemas no CEA, no período compreendido entre 2019 e 2020. Por fim, o quarto objetivo consiste na identificação de eventuais lacunas operacionais, bem como propor oportunidades de aprimoramento da adoção de SRPs no contexto das instalações nucleares do PNM.

O objeto de estudo deste trabalho corresponde ao conjunto de capacidades implementadas pelo Japão por meio do uso de SRPs em apoio às instalações nucleares afetadas pelo acidente de Fukushima Daiichi, com ênfase nas ações voltadas à resposta a situações de emergência nuclear. A partir da aprovação do Plano de Ação para a Segurança Nuclear pela IAEA (2011), estruturado com base nas vulnerabilidades reveladas pelo referido acidente, esta pesquisa parte da premissa de que a experiência japonesa constitui um referencial técnico-operacional valioso, capaz de subsidiar o desenvolvimento de alternativas aplicáveis ao PNM no tocante ao monitoramento, à resposta e à mitigação em cenários de risco nuclear.

A metodologia adotada é de natureza qualitativa, baseada em pesquisa documental e no contraste de capacidades operacionais entre o âmbito japonês e a realidade brasileira. Foram examinadas fontes institucionais nacionais e internacionais, como relatórios da IAEA, publicações técnicas da CNEN, documentos da MB e estudos acadêmicos especializados. Além disso, incorporam-se as vivências do autor no CTMSP e no 1º BtlProtDefNBQR (2019–2020), bem como sua atuação,

posteriormente, como Coordenador de Segurança Física Nuclear no Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República (GSI/PR). Essa abordagem integra a análise normativa e conceitual às experiências operacionais, de modo a proporcionar uma reflexão aplicada sobre o uso de SRPs no CEA.

A estrutura da tese está organizada em seis capítulos. O primeiro corresponde à introdução do tema, com apresentação da motivação, justificativa, problema, objetivos, objeto de estudo, metodologia e estrutura do trabalho. No segundo capítulo trata-se dos conceitos e aspectos inerentes à segurança física nuclear e às emergências nucleares, com base nas normas da CNEN e recomendações da IAEA. No terceiro capítulo examina-se a evolução do emprego de SRPs no Japão, a partir do acidente de Fukushima, sistematizando as capacidades tecnológicas e operacionais desenvolvidas. No quarto capítulo descreve-se a experiência do autor no emprego de SRPs em situações de emergência no CEA, caracterizando as capacidades institucionais da época (respeitados os limites de sigilo) e integrando essas experiências aos marcos normativos nacionais e aos referenciais da AIEA no campo da segurança nuclear. No quinto capítulo identificam-se possíveis lacunas e oportunidades de aprimoramento relativas ao uso desses sistemas no âmbito do PNM, a partir da confrontação entre o caso japonês e a realidade brasileira. Por fim, no sexto capítulo reúnem-se as conclusões do estudo, destacando as principais contribuições e possíveis desdobramentos futuros da pesquisa.

2 CONCEITOS SOBRE SEGURANÇA FÍSICA E EMERGÊNCIA NUCLEAR

Neste capítulo apresentam-se os fundamentos conceituais e normativos essenciais à compreensão do tema central da tese. Inicialmente, discute-se o marco legal e regulatório do setor nuclear brasileiro, seguido pela análise da participação da MB nesse setor, com ênfase nas diretrizes e estruturas associadas ao PNM. Na sequência, são abordados os principais conceitos relacionados à segurança física nuclear, à segurança nuclear e à gestão de emergências, com destaque para o planejamento e a resposta em situações de emergência nuclear. As análises desenvolvidas estão alinhadas às recomendações e definições da IAEA e da CNEN, atendendo ao objetivo intermediário de identificar os principais aspectos normativos e doutrinários associados à segurança física e às emergências nucleares.

2.1 ESTRUTURA NORMATIVA DO SETOR NUCLEAR BRASILEIRO

O Brasil estrutura sua atuação no setor nuclear por meio do Programa Nuclear Brasileiro (PNB)², composto por duas vertentes interdependentes, uma de caráter civil, voltada à utilização pacífica da energia nuclear, e outra de natureza militar, conduzida pela MB, com foco na propulsão naval nuclear. Ambas são amparadas por um conjunto normativo robusto, que assegura o uso exclusivamente pacífico da energia nuclear, garante a soberania sobre os recursos minerais e preserva o monopólio estatal sobre as atividades estratégicas (Brasil, 2018).

Nesse contexto, o Decreto nº 9.600/2018 consolida a Política Nuclear Brasileira ao estabelecer princípios que orientam as ações no setor. Reafirma-se, nesse marco, a centralidade do Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro (SIPRON)³, responsável pela coordenação das ações permanentes de proteção física e resposta a emergências, em alinhamento com compromissos internacionais. Com base nesse ordenamento, o PNB viabiliza programas de relevante complexidade tecnológica,

² Política de Estado que visa ao domínio do ciclo do combustível nuclear e à aplicação da energia nuclear para fins pacíficos (Brasil, 2018).

³ Sistema coordenado pelo GSI/PR para proteção e segurança das atividades nucleares no Brasil, conforme a Lei nº 12.731/2012 que instituiu o SIPRON (Brasil, 2012).

como o Programa de Desenvolvimento de Submarinos (PROSUB)⁴ e o PNM, ambos sob responsabilidade da MB (Brasil, 2012, 2018, 2024). A seguir, serão analisados os aspectos normativos, institucionais e operacionais desses programas, bem como os papéis da CNEN, da Autoridade Nacional de Segurança Nuclear (ANSN)⁵ e do SIPRON.

2.1.1 O Arcabouço Jurídico Nacional e os Papéis da CNEN, da ANSN e da IAEA

O arcabouço jurídico do setor nuclear brasileiro passou por importantes atualizações para atender aos compromissos internacionais e aos princípios da segurança nuclear. A criação da ANSN, pela Lei nº 14.222/2021, estabeleceu um ente regulador independente, vinculado ao Ministério de Minas e Energia (MME), com competências nas áreas de segurança nuclear, proteção radiológica e segurança física. Antes disso, tais atribuições eram exercidas pela CNEN, criada pela Lei nº 4.118/1962 e reforçada pela Lei nº 6.189/1974, o que gerava críticas pela ausência de separação entre funções regulatórias e operacionais. Com a nova configuração, a CNEN concentra-se em pesquisa, desenvolvimento e prestação de serviços voltados ao uso pacífico da energia nuclear, em conformidade com as boas práticas da IAEA (Brasil, 1962, 1974, 2021).

A ANSN tem como finalidade institucional regular, licenciar e fiscalizar a segurança nuclear e a proteção radiológica das atividades e das instalações nucleares, materiais nucleares e fontes de radiação no território nacional, nos termos do disposto na Política Nuclear Brasileira e nas diretrizes do governo federal (Brasil, 2021).

Diante dos riscos associados ao uso indevido de materiais nucleares ou radioativos, é responsabilidade de cada Estado assegurar a proteção permanente desses materiais, incluindo o uso, o armazenamento e o transporte. Para apoiar esse compromisso, a IAEA desenvolve um regime normativo abrangente que contempla a

⁴ Programa estratégico da Estratégia Nacional de Defesa (END) voltado à construção de submarinos convencionais e de propulsão nuclear (Brasil, 2024).

⁵ Entidade reguladora independente criada pela Lei nº 14.222/2021, responsável pela fiscalização da segurança nuclear, proteção radiológica e segurança física no território nacional (Brasil, 2021).

aplicação de instrumentos legais relevantes, a salvaguarda de informações sensíveis, a segurança física de materiais e instalações, a contabilidade e o controle de materiais nucleares, além de mecanismos para detectar e responder a eventuais remoções não autorizadas, incluindo planos de resposta e medidas de contingência (IAEA, 2011a).

Nesse contexto, destaca-se a Série de Segurança Nuclear (*Nuclear Security Series – NSS*)⁶ da IAEA, composta por fundamentos, recomendações e guias técnicos que definem os elementos essenciais de um regime nacional de segurança. Essa série é complementada pelas coleções Requisitos Gerais de Segurança (*General Safety Requirements – GSR*)⁷ e Guias Gerais de Segurança (*General Safety Guides – GSG*)⁸, com o objetivo de harmonizar os padrões de cada Estado aos parâmetros internacionais (IAEA, 2011a).

2.1.2 O Sistema de Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro

O SIPRON é o principal mecanismo de coordenação interinstitucional voltado à segurança física nuclear e à resposta a emergências. Criado pelo Decreto nº 2.210/1997 e reafirmado como estrutura estratégica permanente pela Lei nº 12.731/2012, integra a Política Nuclear Brasileira e articula-se com órgãos civis e militares. Entre suas principais atribuições estão a coordenação de ações permanentes de proteção ao PNB, a salvaguarda do conhecimento e das tecnologias sensíveis desenvolvidas por instituições vinculadas ao programa, além do planejamento e da coordenação da proteção de pessoas, do meio ambiente, de materiais e instalações em situações de emergência nuclear (Brasil, 1997, 2012).

A coordenação compete ao GSI/PR, conforme previsto na Lei nº 13.844/2019, que define a organização básica dos órgãos da Presidência da República e dos Ministérios. Destacam-se, entre suas iniciativas, a implementação do Plano Nacional

⁶ Série de publicações da IAEA com fundamentos, diretrizes e recomendações sobre segurança física nuclear e proteção contra atos ilícitos envolvendo materiais nucleares (IAEA, 2011a).

⁷ Conjunto normativo da IAEA com requisitos de segurança para atividades com radiações ionizantes, materiais radioativos e energia nuclear (IAEA, 2011a).

⁸ Guias da IAEA sobre proteção radiológica, emergências, instalações, transporte e resíduos radioativos, baseados em padrões internacionais (IAEA, 2011a).

de Resposta Integrada a Evento de Segurança Física Nuclear (PNRIESFN)⁹, aprovado pela Portaria nº 75-GSI/PR/2020, e do Plano Nacional de Ação para Situações de Emergência Nuclear (PNASEN)¹⁰, instituído pela Portaria nº 112-SCS/GSI/PR/2022 (Brasil, 2019a; GSI/PR 2020, 2022).

A atuação do SIPRON é conduzida por colegiados, conforme previsto no Decreto nº 9.865/2019. No contexto do PNM, têm papel de destaque a Comissão de Coordenação da Proteção ao Programa Nuclear Brasileiro (COPRON)¹¹, que funciona como instância superior do sistema, e o Comitê de Articulação nas Áreas de Segurança e Logística do SIPRON (CASLON), responsável por coordenar ações conjuntas de segurança e logística nuclear entre órgãos federais e estaduais (Brasil, 2019b).

2.1.3 Conclusão Parcial

A estrutura normativa e institucional do setor nuclear brasileiro está em constante evolução, destacando-se a criação da ANSN, que assegura a independência regulatória alinhada às boas práticas internacionais. O arcabouço legal vigente, harmonizado com as diretrizes da IAEA, fortalece a segurança física, a proteção radiológica e a capacidade de resposta a emergências.

Nesse cenário, o SIPRON consolida-se como o principal eixo de articulação multissetorial do Estado brasileiro, promovendo a proteção permanente do PNB e a gestão coordenada de incidentes, por meio de colegiados. Sob coordenação do GSI/PR, operacionaliza planos estratégicos como o PNRIESFN e o PNASEN, que definem responsabilidades, níveis de resposta e medidas integradas entre órgãos civis e militares.

⁹ Define níveis de resposta, papéis institucionais e mecanismos de articulação interagências para eventos intencionais com materiais ou instalações nucleares no território nacional (Brasil, 2020).

¹⁰ Estabelece diretrizes para ações de preparação, resposta, recuperação, remediação e encerramento em situações de emergência nuclear no âmbito do SIPRON (GSI/PR, 2022).

¹¹ Responsável por avaliar demandas e propostas relacionadas à proteção e segurança do PNB (Brasil, 2019b).

2.2 O SETOR NUCLEAR NA MARINHA DO BRASIL

Essa seção aborda a inserção estratégica da MB no campo nuclear, relacionada ao desenvolvimento do Submarino Nuclear Convencionalmente Armado (SNCA)¹² no âmbito do PROSUB e sua integração ao PNM. Destacam-se as funções do CTMSP, da Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM) e do CEA¹³ na concepção do reator de propulsão nuclear e no domínio do ciclo do combustível nuclear. Nesse contexto, são apresentadas as principais instalações nucleares do CEA, com ênfase na segurança física e na resposta a emergências. Também são tratados os marcos normativos que garantem a conformidade internacional do programa, como o Acordo Quadripartite¹⁴ e a atuação da ANSN e da CNEN (ABEN, 2018; Brasil, 2024; DGDNTM, 2021; IAEA, 1992).

2.2.1 O PROSUB e o Desenvolvimento da Propulsão Nuclear Naval

O PROSUB constitui uma iniciativa estratégica da Marinha do Brasil voltada à consolidação da capacidade nacional de projetar, construir e operar submarinos convencionais e com propulsão nuclear. Formalizado em 2008 por meio de parceria com a França, o programa prevê a construção de quatro submarinos da classe Riachuelo, baseados no modelo Scorpène, além do desenvolvimento do primeiro SNCA (PROSUB, 2025).

O SNCA representa o ápice tecnológico do PROSUB e do PNM, sob coordenação da DGDNTM. Está inserido nos projetos estratégicos da MB, conforme a Estratégia Nacional de Defesa (END) e o Plano Estratégico da Marinha (PEM). O Complexo Naval de Itaguaí (CNI), no Rio de Janeiro, abriga estaleiros, base naval e

¹² Submarino de propulsão nuclear e armamento convencional, considerado vetor da dissuasão estratégica brasileira, conforme previsto na END (Brasil, 2024).

¹³ Complexo naval localizado no município de Iperó (SP) que abriga as principais instalações do PNM (ABEN, 2018).

¹⁴ Firmado entre a Argentina, o Brasil, a ABACC e a AIEA, estabelece a aplicação de salvaguardas integrais nas atividades nucleares dos dois países, em conformidade (IAEA, 1992).

centros logísticos. O reator nuclear embarcado, com tecnologia nacional, está sendo desenvolvido pelo CTMSP, com apoio das Organizações Militares (OMs) localizadas no CEA, em Iperó (SP). No plano de ciência e tecnologia da MB (DGDNTM-2100), o SNCA integra a área temática “Nuclear e Energia”, cuja ação estratégica busca o domínio de tecnologias sensíveis, a autonomia estratégica e a articulação com a Base Industrial de Defesa (BID), com orçamento próprio e política de transferência de tecnologia (ABEN, 2018; DGDNTM, 2022).

A viabilidade do SNCA requer o domínio do Ciclo do Combustível Nuclear¹⁵, cuja operação estratégica é regulada pela Lei nº 4.118/1962. Tal domínio inclui o projeto de reatores e a integração de sistemas de segurança física e proteção radiológica embarcada, em consonância com as normas da IAEA. Essa complexidade reforça a cultura de segurança¹⁶ e a evolução normativa do setor (Brasil, 1962; CNEN, 2021).

No plano internacional, o uso de material nuclear para propulsão impõe desafios ao Tratado de Não Proliferação de Armas Nucleares (TNP)¹⁷. Embora o Brasil seja signatário desde 1968, mantém diálogo técnico-diplomático com a IAEA para assegurar transparência e conformidade sem comprometer o sigilo operacional. Ao articular dissuasão estratégica, domínio tecnológico e compromisso com a não proliferação, o PROSUB consolida-se como projeto estruturante. Sua integração ao PNM constitui a base científica e industrial do reator de propulsão, projetando ganhos institucionais e fortalecendo o regime de segurança física e nuclear nacional (ABEN, 2018; Brasil, 1998; PROSUB, 2025).

2.2.2 O Programa Nuclear da Marinha e suas Instalações Estratégicas

O PNM, conduzido desde 1979 pela DGDNTM por meio do CTMSP, visa ao domínio do ciclo do combustível nuclear e ao desenvolvimento do reator de propulsão

¹⁵ Etapas industriais que englobam desde a mineração até o reprocessamento do material irradiado (Brasil, 1962).

¹⁶ Conjunto de valores e práticas organizacionais que garantem prioridade à segurança nuclear (CNEN, 2021).

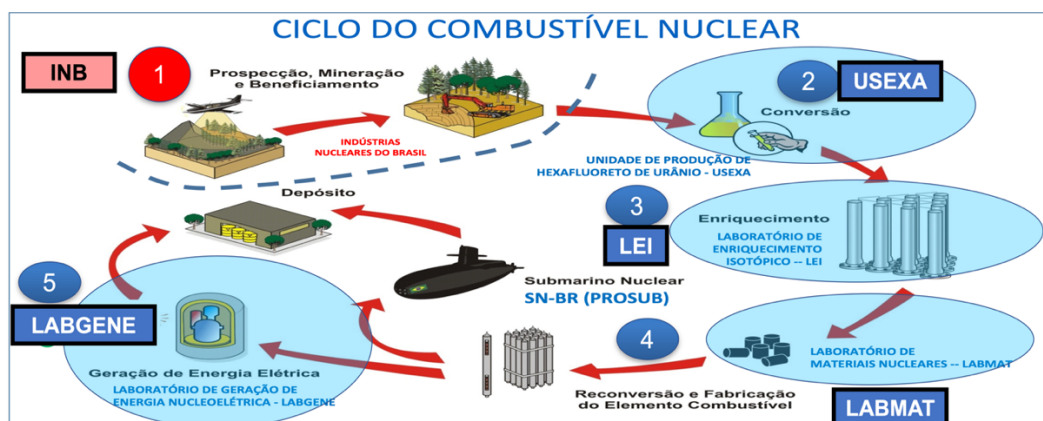
¹⁷ Tratado internacional (Decreto nº 2.864/1998), voltado à não proliferação de armas nucleares, ao desarmamento e ao uso pacífico da energia nuclear (Brasil, 1998).

do SNCA, com uso exclusivamente pacífico. As atividades concentram-se no CEA, onde estão instaladas OM's e unidades classificadas como instalações nucleares, conforme Glossário da CNEN. Essas unidades conduzem etapas críticas do ciclo do combustível sob rigorosa observância normativa (ABEN, 2018; Brasil, 1998; CNEN, 2021).

O CTMSP coordena o Centro Industrial Nuclear de ARAMAR (CINA), responsável pelas etapas industriais do ciclo do combustível e do reator de propulsão. Além disso, no âmbito da proteção física e resposta a emergências, supervisiona o Batalhão de Defesa Nuclear, Biológica, Química e Radiológica de ARAMAR (BtlDefNBQR-ARAMAR), que teve sua denominação alterada, em 2025, para 1º BtlProtDefNBQR. Este batalhão, sediado no próprio CEA, atua no isolamento de áreas contaminadas, medições radiológicas, descontaminação e proteção do pessoal e das instalações (CGCFN, 2023; CINA, 2025; CTMSP, 2025).

Entre as instalações nucleares estratégicas do CEA vinculadas ao ciclo do combustível nuclear, incluem-se a Unidade de Produção de Hexafluoreto de Urânio (USEXA), responsável pela conversão do concentrado de urânio em hexafluoreto de urânio (UF_6); o Laboratório de Enriquecimento Isotópico (LEI), onde se realiza o enriquecimento por meio do processo de ultracentrifugação; e o Laboratório de Materiais Nucleares (LABMAT), encarregado da fabricação dos elementos combustíveis. Integrando essa cadeia, destaca-se ainda o Laboratório de Geração Nucleoelétrica (LABGENE), que abriga o protótipo em terra do reator de propulsão naval, operado em ambiente controlado que simula as condições de operação embarcada (AMAZUL, 2025). A Figura 1 ilustra a sequência integrada dessas etapas.

Figura 1 - Etapas do Ciclo do Combustível Nuclear no CEA (em azul)



Fonte: O autor, adaptado de AMAZUL (2025).

As unidades industriais supracitadas estão sujeitas à supervisão do órgão regulador e devem atender às normas técnicas da CNEN, em especial à NN 2.01/CNEN, que trata da proteção física de instalações nucleares, e à NN 3.01/CNEN, voltada à proteção radiológica em situações de emergência (CNEN, 2019, 2024).

A conformidade internacional do PNM é reforçada pela adesão ao Acordo Quadripartite, firmado entre Brasil, Argentina, a Agência Brasileiro-Argentina de Contabilidade e Controle de Materiais Nucleares (ABACC) e a IAEA, e promulgado pelo Decreto nº 1.065/1994, que institui sistema integrado de salvaguardas, inclusive para instalações militares, sem comprometer o sigilo operacional necessário (Brasil, 1994).

Nesse escopo, cabe destacar que o desenvolvimento do reator no LABGENE impõe elevados requisitos técnicos, regulatórios e operacionais, exigindo a integração entre proteção física, resposta a emergências e conformidade normativa em todas as fases de sua construção (ABEN, 2018).

2.2.3 Conclusão Parcial

O setor nuclear da MB caracteriza-se pela singularidade no contexto nacional, articulando objetivos estratégicos de defesa com o domínio soberano do ciclo do combustível nuclear e com o desenvolvimento da propulsão naval nuclear. Enquanto o PROSUB representa a vertente operacional da dissuasão estratégica, o PNM constitui sua base científica e tecnológica, viabilizando a construção do SNCA por meio do pleno domínio das etapas industriais e das tecnologias associadas à conversão, ao enriquecimento e à fabricação de elementos combustíveis.

Sob a coordenação do CTMSP, as atividades desenvolvidas no Centro Experimental de ARAMAR envolvem instalações de alta complexidade técnico-operacional, cuja operação segura depende da integração entre proteção radiológica, segurança física nuclear e resposta a emergências, em estrita observância às normas da ANSN e da CNEN, bem como aos compromissos internacionais assumidos pelo Brasil.

2.3. FUNDAMENTOS DA SEGURANÇA FÍSICA NUCLEAR

A segurança física nuclear, no contexto contemporâneo, passou a ser tratada como um dos pilares da governança global em matéria nuclear, em função da crescente complexidade do ambiente internacional e dos riscos decorrentes do uso malicioso de materiais nucleares ou radioativos. Em resposta a esse cenário, a IAEA estabeleceu, por meio de seu Programa de Segurança Nuclear, um conjunto de orientações para que os Estados implementem regimes nacionais eficazes, voltados à prevenção, detecção e resposta a atos não autorizados. Tais programas devem ser conduzidos por autoridades competentes ou operadores licenciados e contemplam políticas, procedimentos, recursos humanos e técnicos compatíveis com os requisitos internacionais de proteção física de materiais e instalações nucleares (IAEA, 2021a).

Nesse mesmo escopo, o Plano de Ação da IAEA sobre Segurança Nuclear, aprovado em 2011, após o acidente de Fukushima Daiichi, contribuiu decisivamente para o fortalecimento dos marcos nacionais e internacionais sobre o tema. A iniciativa estabeleceu doze áreas prioritárias, entre as quais se destacam a resposta a emergências, a atuação dos órgãos reguladores, a revisão de normas e o desenvolvimento de capacidades técnicas. A implementação do plano mobilizou mais de 180 especialistas de 42 países e resultou em lições valiosas que continuam orientando os esforços mundiais para o aprimoramento da segurança nuclear. Embora as ações específicas do plano tenham sido concluídas, seus princípios e aprendizados continuam sendo incorporados às atividades permanentes da IAEA e de seus Estados Membros, inclusive por meio de plataformas como o Portal de Gestão do Conhecimento sobre Fukushima (IAEA, 2011b).

2.3.1 Definição, Fundamentos e Princípios da Segurança Física Nuclear

A segurança física nuclear é definida, segundo a CNEN, como o conjunto de medidas destinadas à prevenção, detecção e resposta a atos não autorizados, como o furto, a sabotagem, o acesso indevido ou a transferência ilícita de materiais nucleares ou radioativos, bem como das instalações que os manipulam. Essa

definição converge com a abordagem da IAEA, segundo a qual os regimes nacionais de proteção física devem integrar elementos legais, regulatórios, técnicos e administrativos voltados à neutralização de ameaças, tendo como base requisitos internacionais consagrados (CNEN, 2021; IAEA, 2022).

O regime brasileiro de proteção física fundamenta-se na NN 2.01/CNEN, que define os requisitos mínimos para a proteção de instalações e materiais nucleares contra atos ilícitos intencionais. Essa base normativa é reforçada por diretrizes internacionais da IAEA, especialmente o documento Proteção Física de Materiais e Instalações Nucleares (*The Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities* – INFCIRC/225/Revision 5), também publicado como IAEA Nuclear Security Series nº 13 (NSS nº 13). Tal referência apresenta princípios, objetivos e medidas aplicáveis ao planejamento, implementação e avaliação dos sistemas de proteção física, ao mesmo tempo em que reconhece a responsabilidade primária do Estado na segurança dessas estruturas. A diretriz recomenda a adoção de medidas técnicas, administrativas e organizacionais robustas, devidamente integradas a planos de contingência¹⁸, a fim de assegurar respostas eficazes frente a situações inesperadas que possam comprometer a integridade de instalações ou atividades nucleares (CNEN, 2019, 2021; IAEA 2011a).

Nesse contexto, destacam-se dois fundamentos estruturantes: o fortalecimento da cultura de segurança física e o emprego da Ameaça-Base de Projeto (ABP)¹⁹. A cultura de segurança física é definida pela IAEA como o conjunto de atitudes, valores e comportamentos institucionais que sustentam e aprimoram continuamente a segurança nuclear. A NN 3.01/CNEN reforça essa cultura ao enfatizar a importância da comunicação aberta, do aprendizado organizacional e da vigilância compartilhada. Já a ABP, de caráter sigiloso e prevista na própria NN 2.01/CNEN, serve de base estratégica para o desenho e manutenção do Sistema de Proteção Física (SisPF), descrevendo cenários plausíveis de ataque com base em capacidades e intenções de adversários potenciais. Sua elaboração compete ao Estado brasileiro, com a participação de órgãos como ANSN, CNEN, GSI/PR, Agência Brasileira de

¹⁸ Parte do plano de segurança ou um documento independente que identifica eventos de segurança previsíveis, fornece ações planejadas iniciais e atribui responsabilidades (CNEN, 2021).

¹⁹ Descrição documentada das capacidades e intenções de adversários contra os quais uma instalação nuclear deve ser protegida (CNEN, 2021).

Inteligência (ABIN), órgãos de segurança pública (OSP) e demais entidades competentes integrantes do sistema de proteção ao programa nuclear brasileiro (CNEN, 2019, 2024; IAEA 2022).

A proteção física nuclear também é respaldada por instrumentos multilaterais, reconhecidos internacionalmente, como a Convenção sobre a Proteção Física de Material Nuclear (CPFMN)²⁰ e sua Emenda de 2005, que ampliou seu escopo para abranger instalações e materiais em uso, armazenamento ou transporte doméstico.

No plano interno, essa proteção é operacionalizada por meio do sistema de proteção física, cujo funcionamento está alinhado com o plano nacional de resposta integrada a evento de segurança física nuclear. Este plano estabelece diretrizes claras e abrangentes para a atuação coordenada dos órgãos do sistema de proteção ao programa nuclear brasileiro, acionando as instâncias competentes quando a resposta do operador nuclear for insuficiente para interromper e neutralizar a ameaça (Brasil, 2022; GSI/PR, 2020).

2.3.2 Elementos e Funções de um Sistema de Proteção Física

O SisPF é formado por um conjunto de medidas técnicas, organizacionais e humanas destinadas a proteger materiais e instalações nucleares contra ações não autorizadas, conforme os requisitos definidos pela norma NN 2.01/CNEN. Dentre suas principais funções, destaca-se a detecção, que consiste no reconhecimento de ameaças por meio da utilização de sensores, sistemas de vigilância ou barreiras físicas. Inclui-se também o retardo, que tem como propósito dificultar o avanço de possíveis agressores para permitir uma resposta eficaz. Por fim, há a função de resposta, que compreende a execução de ações destinadas a neutralizar ameaças, restabelecer a segurança e reduzir eventuais danos (CNEN, 2019; IAEA, 2011a).

A eficácia do SisPF depende da aplicação consistente de princípios internacionalmente reconhecidos, como a responsabilidade primária do titular da

²⁰ O Decreto nº 11.188/2022 promulgou a Emenda à CPFMN, a qual estabelece medidas de proteção física para o uso, armazenamento e transporte internacional de material nuclear (Brasil, 2022).

instalação, a abordagem gradual²¹ e a defesa em profundidade. Esta última baseia-se na existência de múltiplas camadas de proteção independentes e redundantes, capazes de manter a segurança mesmo diante de falhas ou eventos adversos. Outros princípios incluem a supervisão regulatória independente exercida pelo órgão regulador, a integração com sistemas de resposta a emergências e a salvaguarda de informações sigilosas, como a própria ABP (CNEN, 2021; IAEA, 2011a).

Nesse contexto, o SisPF organiza-se em áreas de segurança com diferentes graus de proteção. A área vigiada corresponde à zona periférica da instalação, sob controle de acesso e vigilância contínua. A área protegida, localizada no interior da área vigiada, abriga materiais nucleares em quantidade significativa e exige medidas de segurança reforçadas. Por sua vez, a área vital concentra equipamentos e sistemas cuja sabotagem poderia causar sérias consequências radiológicas, sendo submetida ao mais alto grau de proteção do sistema (IAEA, 2018).

Para cumprir suas funções, o SisPF deve incorporar um conjunto integrado de barreiras físicas e eletrônicas, sistemas redundantes de detecção e alarme, videomonitoramento, controle rigoroso de acesso, forças de segurança²² e estações centrais de alarme²³, principal e secundária, com comunicações independentes e permanentes. Cada instalação nuclear deve dispor de um Plano de Proteção Física (PPF), cuja elaboração e aprovação perante o órgão regulador constituem condição indispensável para seu licenciamento. Esse plano detalha os objetivos, critérios de desempenho, recursos humanos e materiais disponíveis, além dos meios de detecção, retardo e resposta empregados no SisPF, incluindo ainda os procedimentos de operação, manutenção e avaliação contínua do sistema (CNEN, 2019, 2021; IAEA 2011a).

Complementarmente, o PNRIESFN estabelece ações escalonadas de resposta a ameaças, estruturadas em níveis de segurança que variam do nível zero (normalidade) ao nível quatro (operações de recuperação), garantindo a

²¹ Aplicação de requisitos de segurança nuclear de forma proporcional às características das instalações, atividades ou das fontes radioativas e aos riscos associados (CNEN, 2021).

²² Pessoal treinado para garantir a proteção física das instalações nucleares, radiativas e para atender à eventos de segurança física nuclear (CNEN, 2021).

²³ Instalação responsável por receber, registrar e monitorar continuamente os alarmes provenientes dos SisPF, devendo dispor de pessoal autorizado e meios de pronta resposta (CNEN, 2021).

interoperabilidade entre operadores, órgãos reguladores, forças de segurança e o GSI/PR, com apoio dos colegiados do SIPRON. Essa estrutura reforça a capacidade do Estado brasileiro de responder a eventos de segurança física quando as forças de segurança do operador não forem suficientes para interromper e neutralizar a ameaça (GSI/PR, 2020).

Em síntese, o SisPF materializa a implementação prática do regime nacional de proteção física nuclear. Sua eficácia depende não apenas da infraestrutura tecnológica e da resposta armada, mas também da articulação normativa, da atuação institucional coordenada e da adoção de instrumentos estratégicos de resposta. No contexto do PNM, a atuação conjunta do CTMSP e do 1º BtlProtDefNBQR representa um exemplo de prontidão e adaptação operacional, sendo crescente o interesse na aplicação de tecnologias emergentes, como os SRPs.

2.3.3 Conclusão Parcial

A segurança física nuclear articula normas, medidas técnicas, procedimentos e cultura institucional voltados à prevenção, detecção, retardo e resposta a atos não autorizados. Seus fundamentos estão consolidados nas diretrizes da IAEA. No Brasil, o arcabouço normativo é estruturado pelo órgão regulador e complementado pelo PNRIESFN, este último sob coordenação do GSI/PR. Esse arranjo integra a proteção física aos mecanismos de resposta do SIPRON, assegurando atuação multissetorial e escalonada.

A efetividade do regime depende da aplicação dos princípios normativos, da revisão da ABP e da integração dos SisPF com os sistemas de resposta a emergências, o que constitui a principal interface entre segurança física e segurança nuclear. Os SisPF devem exercer, de forma integrada, as funções de detecção, retardo e resposta, considerando riscos internos e externos. Inicialmente, a contenção cabe ao operador, com seus próprios meios. Superada essa capacidade, acionam-se os planos de contingência, com participação gradual das instituições do SIPRON, conforme diretrizes do PNRIESFN.

A consolidação de uma cultura de segurança física é essencial à robustez do regime de proteção. Trata-se de um processo dinâmico, que demanda articulação entre marcos legais, maturidade operacional e aprimoramento institucional. Essa cultura integra fatores técnicos e humanos, promovendo vigilância compartilhada, responsabilização e aprendizado organizacional.

Nesse cenário, tecnologias emergentes, como os SRPs, têm potencial para desempenhar papel estratégico de apoio aos SisPF das instalações nucleares. Essas possibilidades serão aprofundadas nos capítulos seguintes, com base nas lições aprendidas, após o acidente nuclear de Fukushima (2011), e na experiência do autor junto ao CTMSP, ao 1º BtlProtDefNBQR e ao GSI/PR.

2.4 EMERGÊNCIA NUCLEAR: CONCEITUAÇÃO E RESPOSTA

Esta seção aborda os principais conceitos normativos relacionados às emergências nucleares, com base em normas da CNEN, documentos da IAEA e diretrizes do PNASEN.

Situações de emergência nuclear ou radiológica são cenários de alto potencial disruptivo, exigindo atuação imediata de sistemas articulados, sustentados em normas robustas e harmonizadas internacionalmente. Embora raros, esses eventos podem gerar exposições à radiação ionizante²⁴ acima dos níveis de referência, com sérios impactos à saúde, ao meio ambiente e à segurança nacional (CNEN, 2021; IAEA, 2015a).

No plano internacional, um importante referencial é o documento intitulado *Preparação e Resposta para Emergências Nucleares ou Radiológicas (Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency – GSR Part 7/IAEA)*, que consolida princípios operacionais e lições de eventos como Fukushima Daiichi (2011), e está em consonância com a Comissão Internacional de Proteção Radiológica (*International Commission on Radiological Protection – ICRP*). Esse documento estabelece fundamentos para preparação, classificação e resposta a emergências,

²⁴ Trata-se da radiação com energia suficiente para provocar a ionização da matéria (CNEN, 2021).

cobrindo todas as fases do ciclo de vida de instalações nucleares e fontes radiológicas (IAEA, 2015a).

2.4.1 Definições e Conceitos Gerais segundo a CNEN e a IAEA

Conhecer o conceito de segurança nuclear (*nuclear safety*)²⁵, de emergência e suas variantes é fundamental para o adequado planejamento e a estruturação dos sistemas de preparo e resposta. Conforme o Glossário da CNEN, emergência é uma situação anormal que, a partir de determinado momento, escapa ao controle planejado e desejado pelo operador, exigindo a adoção de medidas especiais para a retomada da normalidade. A emergência nuclear, por sua vez, caracteriza-se como uma situação na qual existe, ou se prevê que existirá, risco associado à liberação de energia proveniente de uma reação em cadeia nuclear ou do decaimento dos produtos dessa reação. Já a emergência radiológica refere-se a eventos nos quais há, ou se projeta que haverá, perigo decorrente da exposição à radiação ionizante (CNEN, 2021).

De modo convergente, o Glossário da IAEA define emergência nuclear ou radiológica como situação ou evento não rotineiro que exige ação imediata, principalmente para mitigar um risco ou consequências adversas à vida humana, à saúde e ao meio ambiente. Em complemento, a norma GSR Part 7/IAEA reforça essa conceituação ao introduzir o conceito de “situação de exposição de emergência”, isto é, qualquer ocorrência inesperada que demande proteção imediata a pessoas ou ao meio ambiente. Essa abordagem está alinhada às recomendações da ICRP, que orienta a gestão das exposições planejadas, de emergência e existentes (IAEA, 2015a, 2022).

A NN 3.01/CNEN²⁶ estabelece parâmetros regulatórios para preparação e resposta a emergências, como a definição de categorias, níveis de referência para

²⁵ *Nuclear Safety*: proteção contra acidentes e exposições não intencionais (CNEN, 2021).

²⁶ Norma que trata sobre Requisitos Básicos de Radioproteção e Segurança Radiológica de Fontes de Radiação (CNEN, 2024).

intervenção e Zonas de Planejamento de Emergência (ZPEs)²⁷ ao redor das instalações, visando otimizar as ações protetoras²⁸. A articulação conceitual entre os marcos da CNEN e da IAEA proporciona uma base normativa coerente para avaliação de riscos, dimensionamento da resposta e coordenação entre os atores institucionais (CNEN, 2024).

2.4.2 Tipologia, Categorização e Estrutura de Resposta a Emergências

Emergências nucleares ou radiológicas variam conforme a fonte de radiação, o estágio da instalação e os possíveis impactos sobre pessoas e meio ambiente. Sua correta identificação e categorização são essenciais para dimensionar respostas proporcionais e definir zonas de proteção adequadas (IAEA, 2015a).

Alinhada à CNEN, a IAEA classifica emergências em cinco categorias: instalações nucleares (reatores e unidades de armazenamento); instalações radiológicas (uso médico, industrial ou pesquisa); transporte de materiais nucleares ou radioativos; fontes órfãs ou não autorizadas; e atos maliciosos, como sabotagem ou uso de dispositivos de dispersão radiológica (IAEA, 2015a).

No contexto do PNM, as instalações do CEA são classificadas como nucleares pela CNEN, devido às atividades de produção e armazenamento de material nuclear sob regime de licenciamento. Portanto, emergências podem ocorrer tanto nas operações internas quanto no transporte desses materiais pelo território nacional. Essa distinção entre tipos de emergência fundamenta a definição de categorias e níveis de resposta, orientando a elaboração dos planos nacionais, protocolos de resposta bem como a aplicação das intervenções operacionais correspondentes (GSI/PR, 2022).

A classificação estabelecida pela NN 3.01/CNEN define cinco Categorias de Preparação para Emergência (CPE), de acordo com o risco associado à instalação ou

²⁷ Áreas para as quais é recomendado planejamento de ações imediatas e efetivas a serem implantadas para proteger o público em caso de acidente nuclear ou radiológico (CNEN, 2021).

²⁸ Medidas para evitar ou reduzir exposições radiológicas em situações planejadas, de emergência ou existentes (CNEN, 2021).

atividade nuclear. A CPE I abrange usinas nucleares de potência; a CPE II, reatores de pesquisa; a CPE III, fontes de alta atividade; a CPE IV, transporte de material nuclear ou radioativo; e a CPE V, fontes de baixa atividade, comumente utilizadas em medicina nuclear. Cada categoria determina o nível de complexidade e os requisitos de preparação, orientando o planejamento de emergência a partir de cenários plausíveis e das zonas de proteção correspondentes (CNEN, 2024).

No mesmo escopo normativo, a NN 3.01/CNEN, em consonância com o PNASEN e com o documento GSR-Part 7/IAEA, organiza as ações de resposta conforme a gravidade do evento, desde o estado de alerta (situação monitorada), passando por emergências confinadas à instalação, até cenários com potencial de repercussão externa ou que exijam mobilização nacional. Essa gradação aplica-se tanto a eventos acidentais quanto a ações deliberadas, sendo especialmente relevante em instalações estratégicas do PNM, onde incidentes de segurança física podem evoluir para emergências radiológicas mais amplas (CNEN, 2024; GSI/PR, 2022; IAEA, 2015a).

O PNASEN e o PNRIESFN organizam a atuação articulada de órgãos federais, estaduais e municipais diante de emergências nucleares ou eventos de segurança física, sob coordenação do SIPRON. Ambos os planos estruturam ações graduadas de preparação, resposta, recuperação e encerramento, baseando-se em protocolos compatíveis com boas práticas internacionais e exigências regulatórias (GSI/PR, 2020, 2022).

Complementarmente, a NN 3.01/CNEN define os Níveis de Intervenção Otimizados (NIOs)²⁹, utilizados como referência técnica para acionar medidas protetivas em emergências. Esses parâmetros baseiam-se em dados mensuráveis, como taxas de dose, concentração de radionuclídeos no ambiente e níveis de contaminação, permitindo decisões precisas e proporcionais às condições reais do evento (CNEN, 2024).

Assim, estruturado o arcabouço conceitual e normativo que orienta a categorização e a gradação das respostas, torna-se fundamental abordar a aplicação desses fundamentos nos mecanismos de planejamento e resposta já consolidados no

²⁹ Valores definidos para orientar medidas de proteção em exposições crônicas ou emergências radiológicas (CNEN, 2024).

setor nuclear brasileiro, garantindo a proteção da população e do meio ambiente em situações de emergência.

A resposta eficaz a emergências nucleares ou radiológicas exige um planejamento estruturado e fundamentado em normas técnicas. No cenário internacional, a IAEA define, por meio do GSR/Part 7, os requisitos de segurança aplicáveis a essas situações. No contexto brasileiro, esse papel é desempenhado pela NN 3.01/CNEN, que internaliza as diretrizes internacionais, promovendo a proporcionalidade entre os riscos envolvidos e as medidas adotadas para sua mitigação (CNEN, 2024; IAEA, 2015a).

Os Planos de Emergência Local (PELs), elaborados pelas organizações operadoras³⁰, doravante nominados operadores nucleares, devem refletir os riscos identificados nos relatórios de análise de segurança e reconhecer a ABP. Esses planos contemplam zonas de planejamento, procedimentos de alerta, abrigo e evacuação, controle de acessos, logística, comunicações e articulação com os órgãos de defesa civil. A realização de exercícios e simulações interinstitucionais é essencial para validar o PEL, fortalecer a prontidão operacional e aumentar a confiança da sociedade na capacidade de resposta do sistema (CNEN, 2024).

No caso de eventos de segurança física nuclear, como sabotagem, terrorismo ou remoção ilícita de material nuclear, a resposta inicial compete ao operador, por meio do PPF, aprovado pela CNEN, e do Plano de Segurança Orgânica (PSO). Esses planos preveem a atuação imediata das forças de segurança da instalação para conter a ameaça, proteger vidas e bens, e realizar coordenações externas. Caso a ameaça supere a capacidade de suas forças de segurança, são aplicadas as diretrizes do PNRIESFN, que viabilizam a mobilização coordenada de outras instituições do SIPRON, mediante protocolos previamente acordados (CNEN, 2024; GSI/PR, 2020).

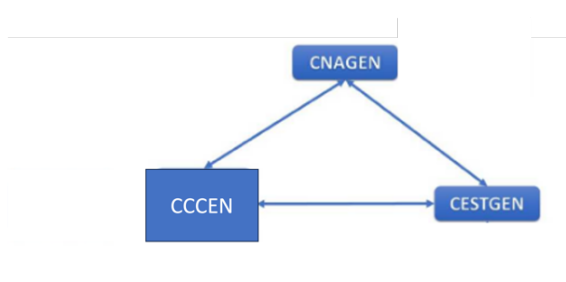
Nas emergências nucleares de origem operacional, o acionamento inicial ocorre por meio do PEL da instalação, instrumento obrigatório que visa organizar e coordenar as ações imediatas de resposta nas áreas internas da instalação. Nessas situações, de forma resumida, a emergência é classificada como situação de

³⁰ Pessoa jurídica licenciada pela CNEN para operar instalação nuclear, responsável por sua segurança em todas as fases da vida útil (CNEN/2021).

emergência local, quando contida dentro da instalação, ou como emergência geral, caso seus efeitos ultrapassem os limites da instalação. O PEL deve contemplar cenários plausíveis, prever medidas protetivas adequadas e estabelecer conexões com o PNASEN e com outros planos nacionais, quando aplicável (CNEN, 2024; GSI/PR, 2022).

Uma vez excedida a capacidade de resposta do operador, aplica-se o modelo escalonado de resposta previsto no PNASEN, por meio da atuação interinstitucional coordenada entre os seguintes Centros de Gerenciamento: o Centro de Coordenação de Controle de Emergência Nuclear (CCCEN), em nível local, responsável pelas ações iniciais e comunicação com instâncias superiores; o Centro Estadual de Gestão de Emergência Nuclear (CESTGEN), responsável pela coordenação regional dos recursos; e o Centro Nacional de Gerenciamento de Emergência Nuclear (CNAGEN), que centraliza a resposta estratégica e promove articulações internacionais, quando necessário (GSI/PR, 2022). As Figuras 2 e 3 ilustram, respectivamente, as relações funcionais entre os centros de emergência nuclear e a forma como se relacionam o PNASEN, o PNRIESFN e os demais planos nacionais relacionados à resposta a situações de emergência.

Figura 2 – Centros de Emergência Nuclear



Fonte: PNASEN, 2022.

Figura 3 – Relação entre os Planos



Fonte: PNASEN, 2022 (adaptado).

O fluxo de informações entre os centros de gerenciamento de emergência nuclear é regido pelo princípio de comando unificado, o que assegura uma atuação integrada e coordenada diante de diferentes cenários. Em situações híbridas, nas quais um evento de segurança física evolui para uma emergência nuclear ou radiológica, torna-se essencial a articulação entre o comando responsável pela resposta ao evento de segurança física e o comando operacional da resposta à

emergência nuclear, de forma a garantir uma resposta institucional coordenada e eficiente (GSI/PR, 2022).

Além das ações iniciais de resposta, o PNASen define fases subsequentes voltadas à mitigação, recuperação e reabilitação das áreas afetadas. Essas etapas abrangem o reconhecimento técnico das zonas impactadas, o isolamento de áreas contaminadas, a coleta e análise de dados ambientais, a vigilância alimentar e o acompanhamento psicossocial das populações atingidas (GSI/PR, 2022).

A estrutura normativa e operacional, baseada nas normas da CNEN e no PNASen, viabiliza respostas coordenadas a eventos nucleares e radiológicos de diferentes magnitudes. O aperfeiçoamento contínuo dessas estruturas é essencial, especialmente diante das boas práticas recomendadas pela IAEA, como a incorporação de tecnologias emergentes.

2.4.3 Conclusão Parcial

Esta seção abordou os principais elementos conceituais e normativos da segurança física nuclear e da gestão de emergências no setor nuclear brasileiro. Foram discutidos o arcabouço jurídico nacional, a atuação do SIPRON, os fundamentos da segurança física, o papel da MB, o PROSUB, o PNM e suas instalações estratégicas. Também foram apresentados conceitos de emergência nuclear, incluindo categorização, estrutura de resposta e instrumentos institucionais.

Diante do exposto, conclui-se que o Brasil dispõe de estrutura normativa compatível com os referenciais estabelecidos pela IAEA. Tal estrutura é capaz de oferecer respostas adequadas diante de diferentes cenários de emergência nuclear ou radiológica. A integração entre a classificação de emergências, os níveis de resposta, os centros de gerenciamento de emergência nuclear e os planos de contingência contribui para a proteção da população, do meio ambiente e das instalações nucleares no CEA. Esses elementos compõem a base sobre a qual se sustentam as capacidades de resposta no país e constituem referência para a reflexão sobre novas possibilidades de emprego de sistemas remotamente pilotados em situações de emergência nuclear.

2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo consolidam-se os fundamentos normativos, conceituais e operacionais que sustentam o regime brasileiro de proteção física e resposta a emergências nucleares e radiológicas, em conformidade com os referenciais da IAEA e com os avanços institucionais promovidos pelo Estado. No plano normativo, destaca-se a existência de base legal consistente, alinhada às melhores práticas internacionais. Nesse contexto, a criação da ANSN representou marco institucional ao conferir maior autonomia à regulação da segurança nuclear no país.

Do ponto de vista operacional, observa-se o papel coordenador do GSI/PR na supervisão das ações integradas, conforme os planos PNASEN e PNRIESFN. Essa arquitetura normativa permite a articulação entre eventos de segurança física e emergências nucleares, com respostas graduais, coordenadas e adaptáveis a contextos híbridos. Ressalta-se a singularidade do setor nuclear da MB. No âmbito do PNM, as atividades técnico-operacionais no CEA envolvem instalações estratégicas, regidas por elevados padrões de segurança e prontidão. A atuação integrada entre o 1º BtlProtDefNBQR e o CTMSP amplia a capacidade de resposta a emergências, articulando ações de segurança física e proteção radiológica conforme as normas nacionais e internacionais. Neste capítulo também apresentaram-se os principais componentes dos SisPF, com destaque para mecanismos de detecção, retardo e resposta, sustentados por cultura de segurança e processos contínuos de avaliação e mitigação de riscos. Nesse cenário, destaca-se a incorporação gradual de tecnologias emergentes, como ferramentas de apoio ao SisPF e às ações de resposta em emergências nucleares, visando reduzir a exposição das equipes de resposta.

Conclui-se que o fortalecimento da cultura de segurança, associado à integração normativa e operacional dos instrumentos nacionais, constitui um pilar da resiliência do setor nuclear brasileiro. Esses fundamentos viabilizam a compreensão das capacidades desenvolvidas pelo Japão, após o acidente em Fukushima, e a experiência prática do autor, concretizando o primeiro objetivo intermediário ao sistematizar os principais conceitos e aspectos inerentes à segurança física e às emergências nucleares.

3 EVOLUÇÃO DO EMPREGO DE SRPs APÓS O ACIDENTE DE FUKUSHIMA

O acidente nuclear ocorrido na Central Nuclear de Fukushima Daiichi, em março de 2011, representou um marco disruptivo para a segurança nuclear global. Classificado no nível sete da Escala Internacional de Eventos Nucleares e Radiológicos (*International Nuclear and Radiological Event Scale – INES*), o evento resultou da combinação de um terremoto seguido de um tsunami, que superaram as barreiras de projeto das unidades da Companhia de Energia Elétrica de Tóquio (*Tokyo Electric Power Company – TEPCO*)³¹, levando à perda de sistemas de resfriamento e à fusão de três núcleos de reatores (IAEA, 2015b).

As consequências diretas do acidente incluíram grande liberação de material radioativo para o meio ambiente, evacuação de dezenas de milhares de pessoas, criação de ZPEs para ações protetoras urgentes³² e colapso da confiança pública nas instituições reguladoras e operadoras. No entanto, além das medidas emergenciais clássicas, o caso japonês se destacou pela rápida incorporação de tecnologias inovadoras no processo de resposta, remediação e monitoramento. Entre essas inovações, os SRPs, especialmente os aéreos, terrestres e subaquáticos, passaram a desempenhar funções relevantes em ambientes de alto risco, nos quais a presença humana direta se tornou inviável (IAEA, 2023a; TEPCO, 2017a).

Conforme o *Mid - and Long -Term Roadmap*³³ aprovado em dezembro de 2011, o processo de descomissionamento da Central Nuclear de Fukushima Daiichi iniciou-se naquele mesmo ano e, segundo estimativas oficiais, deverá prolongar-se por cerca de três a quatro décadas, com término projetado para 2051. Diante da magnitude do desastre, o Japão adotou uma abordagem tecnológica multidimensional, com o emprego de SRPs equipados com sensores de alta precisão para inspeção de áreas contaminadas, mapeamento radiológico, avaliação estrutural dos reatores danificados, coleta de amostras ambientais e apoio direto às operações de descomissionamento. Essas plataformas foram integradas a um sistema de comando

³¹ Operadora da central nuclear de Fukushima Daiichi, no momento do acidente (IAEA, 2015b).

³² Área ao redor de uma instalação nuclear onde se preveem ações protetoras urgentes, com base em monitoramento ambiental ou nas condições da instalação, para evitar exposições fora do sítio, conforme normas internacionais de segurança (IAEA, 2022).

³³ Roteiro de médio e longo prazo: plano que estabelece metas, marcos e fases para o descomissionamento das Unidades 1-4 (TEPCO, 2025).

e controle que reuniu operadores da TEPCO, pesquisadores da Agência de Energia Atômica do Japão (*Japan Atomic Energy Agency – JAEA*), universidades técnicas e empresas privadas, sob a coordenação do recém-criado órgão regulador independente, a Autoridade Reguladora Nuclear do Japão (*Nuclear Regulation Authority – NRA*)³⁴ (IAEA, 2023a; NRA, 2017; METI, 2025).

Esse modelo de atuação demonstrou a viabilidade de se empregar SRPs, não apenas como solução emergencial improvisada, mas como capacidade técnica estruturada e institucionalizada, com funções definidas em protocolos operacionais e planos de resposta. Estudos evidenciaram que o Japão foi o primeiro país a aplicar de forma sistemática e contínua uma arquitetura robótica integrada em todas as fases de uma emergência nuclear, desde o reconhecimento inicial até a remediação de longo prazo (IAEA, 2023a).

No presente capítulo examinam-se, portanto, as capacidades implementadas nas instalações nucleares japonesas, após o acidente de Fukushima, com ênfase na integração dos SRPs em operações de resposta a emergências. Busca-se, especificamente, identificar as principais funcionalidades implementadas no Japão com o uso de SRPs, em apoio às instalações nucleares após o acidente de Fukushima, em consonância com um dos objetivos intermediários desta pesquisa.

Como resposta ao acidente de Fukushima, a IAEA aprovou, ainda em 2011, um Plano de Ação para a Segurança Nuclear, estruturado com base nas vulnerabilidades reveladas pelo ocorrido. O plano foi adotado pelo Conselho de Governadores e endossado pela 55ª Conferência Geral da Agência (IAEA, 2011b).

O documento estabeleceu 12 áreas prioritárias de ação, entre elas a necessidade de avaliações nacionais imediatas das fragilidades das instalações nucleares, especialmente diante de riscos naturais extremos, como terremotos, tsunamis e falhas no fornecimento elétrico. Também propôs o fortalecimento da preparação e da resposta a emergências, a ampliação da Rede de Resposta e Assistência (*Response and Assistance Network – RANET*)³⁵ e a criação de equipes

³⁴ Criada em 2012 com o objetivo de assegurar autonomia regulatória, decisões baseadas em evidências científicas e foco em desempenho operacional (NRA, 2017).

³⁵ Rede de assistência voltada ao fornecimento de apoio técnico especializado a Estados-Membros em situações de emergência nuclear ou radiológica (IAEA, 2011b).

nacionais de pronta resposta, capazes de atuar em cenários domésticos e internacionais (IAEA, 2011b).

O plano também recomendou o fortalecimento da independência, da estrutura técnica e da capacidade operacional dos órgãos reguladores nacionais. No caso japonês, essas diretrizes contribuíram para a criação da NRA, com mandato legal robusto, estrutura própria e foco em inspeções baseadas em desempenho. Além disso, a IAEA orienta revisões sistemáticas nas normas internacionais, oferece apoio técnico a países com programas nucleares emergentes e incentiva a comunicação pública transparente durante crises, com base em evidências científicas e linguagem acessível (IAEA, 2011b).

Entre as medidas de modernização, destacaram-se o incentivo ao uso de tecnologias emergentes em contextos de vigilância e resposta a emergências nucleares. Embora o documento não mencione expressamente os SRPs, suas diretrizes sobre pesquisa, desenvolvimento e uso de tecnologias inovadoras em ambientes hostis abrem espaço normativo e institucional para a incorporação desses sistemas nas ações pós-Fukushima, sobretudo no Japão. Esse movimento é reconhecido em missões internacionais como Serviço Integrado de Revisão Regulatória (*Integrated Regulatory Review Service – IRRS*) e Avaliação da Preparação para Emergências (*Emergency Preparedness Review – EPREV*), que destacam o pioneirismo japonês na integração de SRPs às atividades de inspeção, mapeamento radiológico e descomissionamento (IAEA, 2011b).

3.1 CONTEXTO DO ACIDENTE E DESAFIOS OPERACIONAIS

Em 11 de março de 2011, a costa nordeste do Japão foi atingida por um terremoto de magnitude nove na Escala Richter³⁶, seguido por um tsunami com ondas superiores a 14 metros. Esses eventos comprometeram severamente os sistemas de energia elétrica externa e de emergência das unidades 1 a 4 da Central Nuclear de Fukushima Daiichi, resultando na perda da capacidade de resfriamento dos reatores e subsequente fusão dos núcleos (IAEA, 2015b).

³⁶ Escala logarítmica que mede a magnitude de terremotos com base na energia liberada no epicentro.

Conforme descrito no relatório final da comissão de investigação e verificação de acidentes do governo japonês, os desdobramentos ocorreram em rápida sucessão. Às 14h46, ocorreu o terremoto; às 15h37, o tsunami atingiu o complexo nuclear. Nos dias seguintes, registraram-se três explosões de hidrogênio nos prédios dos reatores: a primeira na Unidade 1, em 12 de março às 15h36; a segunda na Unidade 3, em 14 de março às 11h01; e a terceira na Unidade 4, em 15 de março às 06h02. As condições radiológicas e estruturais tornaram-se extremamente adversas, inviabilizando a atuação presencial de equipes de resposta (IAEA, 2015b).

A Figura 4 apresenta os principais danos estruturais observados nas Unidades afetadas. As explosões nas Unidades 1, 3 e 4 resultaram no colapso dos andares superiores dos prédios dos reatores, agravando a instabilidade das estruturas. Já as Unidades 1, 2 e 3 sofreram danos severos em seus núcleos e vasos de pressão, levando ao vazamento dos sistemas de contenção primária. Segundo o relatório da TEPCO, os níveis de radiação superaram 100 milisieverts por hora (mSv/h) em áreas externas e 500 mSv/h em áreas internas, somando-se aos riscos decorrentes de explosões, vazamentos de água contaminada e instabilidade estrutural. As ocorrências compuseram um cenário de crise sem precedentes, que exigiu respostas rápidas e tecnológicas para mitigar os riscos à saúde humana e ao meio ambiente (IAEA, 2011b; NRA, 2022; TEPCO, 2012).

Figura 4 – Danos estruturais nas Unidades 1 a 4 da Central Nuclear de Fukushima Daiichi.

Damages at Unit 1-4 Reactor Buildings



- Units 1, 3, and 4: Hydrogen explosion damaged the reactor building and the top floor collapsed
- Units 1, 2, and 3 suffered damage to the reactor core and reactor pressure vessel, resulting in leakage from the primary containment vessel (PCV).

Fonte: NRA (2022) e Comissão de Investigação de Acidentes do Governo do Japão.

Diante desse cenário, tornou-se evidente a necessidade de sistemas capazes de viabilizar o reconhecimento de áreas, a realização de inspeções e a coleta de dados sem a exposição direta de pessoas. O emprego de SRPs, especialmente os aéreos, foi rapidamente aceito como uma das soluções tecnológicas mais viáveis para aquele ambiente (IAEA, 2011b; NRA, 2022; TEPCO, 2012).

Importa destacar que o Japão não foi o primeiro país a empregar tecnologias remotamente operadas em ambientes nucleares. Há registros anteriores, como o uso de robôs terrestres no acidente de Chernobyl³⁷ (1986), além de experiências conduzidas nos EUA e na Europa. Contudo, a resposta japonesa representou o primeiro uso sistemático, documentado e em larga escala de SRPs aéreos, terrestres e subaquáticos, com sensores múltiplos e articulação entre órgãos reguladores, operadores nucleares, universidades e Forças Armadas (IAEA, 2021b, 2023a, 2023 b).

Além dos obstáculos físicos e radiológicos, emergiram significativos desafios institucionais. Segundo o *Japan Science Portal*³⁸, observou-se a ausência de diretrizes específicas para o uso de SRPs em áreas contaminadas, falhas na coordenação interagências e escassez de operadores devidamente capacitados (NRA, 2017). Esse quadro foi agravado por uma cultura institucional caracterizada pela complacência tecnológica e pela crença no chamado “mito da segurança”³⁹. O presidente da NRA, Toyoshi Fuketa, afirmou que a confiança excessiva nos sistemas estabelecidos e a fragmentação entre os entes envolvidos contribuíram para falhas de antecipação e resposta à emergência (FUKETA, 2017). Essa constatação conduziu à revisão ampla do arcabouço regulatório japonês, priorizando a redução da exposição humana e a incorporação de tecnologias emergentes a planos de resposta e de contingência (IAEA, 2021b, 2023a, 2023b).

A experiência japonesa, pós-desastre, desencadeou reformas estruturais em três frentes interdependentes: revisão de normas técnicas; fortalecimento da cultura de segurança; e integração estratégica dos SRPs às rotinas de emergência nuclear. Tais mudanças foram institucionalizadas com a criação da NRA, em 2012, que

³⁷ Ocorreu em 1986, na então República Socialista Soviética da Ucrânia. Classificado no nível 7 da escala INES (IAEA, 2023).

³⁸ Portal de ciências do Japão.

³⁹ Descreve a crença institucional de que os sistemas existentes seriam infalíveis (NRA, 2017).

substituiu o modelo anterior de supervisão fragmentada e adotou uma doutrina orientada por transparência, evidências científicas e vigilância contínua (NRA, 2016).

Essas reformas foram impulsionadas pelo reconhecimento de que a tragédia de Fukushima revelou, não apenas deficiências técnicas, mas, também, vulnerabilidades organizacionais e culturais. O emprego dos SRPs emergiu, nesse contexto, como uma resposta estratégica a diversas limitações, consolidando-se como uma capacidade institucionalizada. A experiência japonesa comprova que a resiliência nuclear depende de reformas integradas, capazes de articular inovação tecnológica, fortalecimento regulatório e cultura de segurança (IAEA, 2021b, 2023a, 2023b).

3.1.1 Conclusão Parcial

O acidente nuclear de Fukushima Daiichi evidenciou a complexidade dos desafios operacionais enfrentados em emergências nucleares de grande escala, especialmente em contextos marcados por comprometimento estrutural, elevados níveis de radiação e lacunas de coordenação institucional.

A análise das primeiras 72 horas após o evento demonstrou a inviabilidade da atuação presencial de equipes de resposta em áreas críticas, o que abriu espaço para o emprego de tecnologias que reduzissem a exposição dos envolvidos na resposta. Nesse cenário, os SRPs despontaram como uma solução emergente e promissora. Embora experiências anteriores com tecnologias remotas já existissem em outros países, o caso japonês inaugurou um modelo de resposta sistematizado e multissetorial, com articulação entre órgãos reguladores, operadores nucleares e instituições de pesquisa.

A tragédia também impulsionou reformas regulatórias, conduzindo à criação de uma nova estrutura institucional centrada na resiliência tecnológica e na cultura de segurança. Esses aspectos iniciais servem como base para compreender, a seguir, como os SRPs foram adotados como estratégia de resposta diante dos desafios iniciais do acidente.

3.2 A ADOÇÃO DE SRPs COMO ESTRATÉGIA DE RESPOSTA

A incorporação dos SRPs no contexto da segurança nuclear japonesa não estava previamente estruturada antes do acidente de Fukushima Daiichi, mas emergiu como uma resposta adaptativa e estratégica diante das condições extremas enfrentadas durante a crise e ao longo das etapas subsequentes de remediação. A ausência de diretrizes técnicas específicas para o uso de SRPs em ambientes nucleares, até 2011, contrastava com a celeridade com que o Japão mobilizou, logo após o desastre, setores públicos, privados e acadêmicos para explorar essas tecnologias como instrumentos indispensáveis para operações em zonas contaminadas (IAEA, 2015b; NRA, 2022).

Durante as primeiras horas da emergência, foram empregados helicópteros das Forças de Autodefesa do Japão (*Japan Self-Defense Forces* – JSDF) em sobrevoos de reconhecimento, embora apresentassem limitações operacionais em áreas com altos níveis de radiação. A partir da segunda semana da crise, SRPs aéreos de uso comercial adaptados passaram a ser empregados na inspeção de áreas críticas, especialmente nas Unidades 1 a 3 da usina, fornecendo dados preliminares para avaliação de danos, detecção de fontes emissoras e planejamento de ações emergenciais de resfriamento (IAEA, 2015b).

De acordo com Sato et al. (2020) e Thurnherr et al., (2024), ao menos 12 SRPs aéreos distintos foram utilizados nas fases iniciais, sendo gradualmente substituídos por modelos mais avançados, com estabilização assistida, Sistema de Posicionamento Global (*Global Positioning System* – GPS), sensores espectroscópicos e câmeras térmicas. Entre as diversas plataformas empregadas até 2020, destacaram-se os multirrotores com câmeras compton⁴⁰, capazes de realizar imageamento espectral em tempo real sobre áreas contaminadas. A evolução tecnológica incluiu sistemas com georreferenciamento, detecção radiológica e sensores ópticos para inspeções estruturais (Sato et al., 2020; Thurnherr et al., 2024).

⁴⁰ É um tipo de detector de radiação que gera imagens tridimensionais de fontes radioativas (Sato et al., 2020).

Ao longo do processo de estabilização e descomissionamento da planta, os sistemas remotamente pilotados passaram por sucessivos aprimoramentos técnicos, culminando no desenvolvimento de tecnologias voltadas à detecção radiológica remota, mapeamento tridimensional de *hotspots*, isto é, áreas com níveis de radiação superiores ao ambiente circundante, inspeções estruturais por ultrassom e medição de espessura de materiais em zonas confinadas (IRID, 2024). Tais avanços evidenciam o compromisso do governo japonês em ampliar o escopo de aplicação de plataformas remotas para além da resposta imediata à emergência, promovendo sua consolidação como ferramentas estratégicas nas fases subsequentes de recuperação, monitoramento ambiental e gestão de longo prazo (IAEA, 2023a, 2023b). As principais plataformas aéreas empregadas no período de 2011 a 2024 estão resumidas na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 – Principais SRPs aéreos empregados em Fukushima Daiichi (2011-2024)			
Tipo / Período	Sensores / Equipamentos	Finalidade Operacional	Instituições
Multicóptero Radiológico (Adaptado)/ABR/2011	Sensor <i>Geiger–Müller</i>	Mapeamento radiológico e definição de rotas	Universidade de Chiba
DJI S800 (Adaptado)/ JUL/2012	Sistema de vídeo	Imagens aéreas de danos estruturais	TEPCO/JAEA
DJI Matrice 600 (Adaptado)/ SET/2017	Câmera compton, espectrômetro γ e GPS-RTK	Reconstrução 3-D de <i>hotspots</i>	JAEA/Universidade de Fukushima
SRP Aéreo (Óptico)/ NOV/2018	Câmeras HD, sensores de proximidade e estabilizador	Inspeções visuais em ambientes internos	TEPCO/FlytPath/ Hitachi
SRP Aéreo (END)/ SET/2021	Ultrassom, termografia IR, <i>impact-echo</i> e navegação assistida	Detecção de falhas estruturais em concreto	Nakamura Laboratório/ JAEA/Toshiba
Microdrone PCV/2024	Câmera e módulo Wi-Fi repeater acoplado a robô serpente	Enlace de dados e inspeção visual HD	TEPCO/IRID
Microdrone PCV/2024	<i>End-effector</i> de raspagem e coleta de amostras	Coleta de poeira e microdebris para análise	TEPCO/ IRID
Fonte: Elaborado pelo autor com base em Sanada Y; Torii, T. (2015); TEPCO (2012); Sato, M. et al. (2020); IRID (2024); Iizuka, N. (2024); UNSCEAR (2020).			

Legenda: HD (Alta Definição); PCV (*Vaso de Contenção Primário*).

Segundo a IAEA (2023), o uso inicial de SRPs reduziu a exposição humana e impulsionou o desenvolvimento de plataformas para o contexto nuclear japonês. Com o agravamento da crise, o uso institucionalizou-se em funções de inspeção, medição e monitoramento. Após estabilização, intensificou-se o emprego de SRPs terrestres com sensores de radiação, câmeras e braços mecânicos para inspeção, dosimetria, contenção e desobstrução. Coordenados por JAEA e operador nuclear, foram desenvolvidos por consórcios de centros de pesquisa, universidades e empresas, como parte de ações de remediação e estabilização. A evolução dos SRPs terrestres agregou mobilidade, controle remoto e resistência a ambientes hostis, requisitos às operações internas nos reatores. Sua diversidade e sofisticação, sintetizadas na Tabela 2, refletem esforço conjunto de governo, indústria e comunidade científica para adaptar plataformas à radiação ionizante (HITACHI-GE, 2014; IAEA, 2023a, 2023b; IRID, 2014, 2017; Nagatani et al., 2014; TEPCO, 2011).

Tabela 2 – Principais SRPs Terrestres empregados em Fukushima Daiichi (2011-2024)

Tipo / Período	Sensores / Equipamentos	Finalidade Operacional	Instituições
PackBot/ MAR-ABR/2011	Câmeras, braço articulado, Detector γ (gama) e rádio	Inspeções estruturais e de dose (fase inicial)	JSDF/ TEPCO
Quince/ MAI-JUL/2011	Sistema de vídeo, detector γ reforçado e tração	Inspeções internas e levantamento de dose	JAEA/Univ. Tohoku
MEISTeR/ 2012-2013	Câmeras HD, Detector γ (gama) e garras duplas	Corte e remoção de detritos pesados	JAEA
Four-Leg Walking Robot/ MAR/2013	Câmeras HD e Detector γ (gama)	Inspeção de tubulações	Toshiba
ASTACO-SoRa/ JUL/2013	Garras hidráulicas, câmeras e dosímetro	Remoção/corte de detritos no 1º andar	Hitachi GE
High-Access Robot/ JUL/2013	Mastro telescópico, câmera articulada e dosímetro	Inspeção de espaços altos/estreitos	Honda/AIST
Sakura/ MAI/2014	Câmera HD e Detector γ (gama)	Localização de fontes em andares superiores	NEDO/ Chiba Tech/Hitachi GE
Rosemary/ MAI/2014	Câmeras, descontaminação e dosímetro	Descontaminação remota e inspeção complementar	Chiba Tech./ Hitachi GE
Kanicrane/ MAI/2014	Braço-guindaste, câmera HD e Detector γ (gama)	Mapeamento de radiação em altura	Hitachi/GE
Scorpion-shaped Robot/ FEV/2017	Câmera panorâmica e dosímetro	Inspeção ótica/dosimétrica no PCV	IRID/Toshiba
PMORPH/ MAR/2017	Câmeras, dosímetro e segmentos articulados	Levantamento do subsolo do PCV	IRID/Hitachi GE

Fonte: Elaborado pelo autor com base em Honda R&D CO. (2014); IRID (2014, 2017); Nagatani, K. et al. (2014); HITACHI-GE (2014); TEPCO (2011).

Paralelamente, o avanço das operações submersas exigiu o desenvolvimento de SRPs subaquáticos capazes de operar no interior dos vasos de contenção e reatores danificados, em ambientes com alta turbidez, radiação intensa e estruturas colapsadas. Essas plataformas foram projetadas para executar mapeamentos tridimensionais, inspeções visuais e coleta de dados radiológicos em áreas inundadas, viabilizando o planejamento das ações de recuperação e futura remoção dos detritos fundidos. A integração de tecnologias como sonar, ultrassom, espectrometria e amostragem robotizada tornou os SRPs subaquáticos instrumentos centrais na transição das operações de emergência para as etapas de descomissionamento. Essa evolução tecnológica está resumida na Tabela 3 e foi documentada por instituições como a Hitachi-GE, a IAEA, o IRID, o Ministério da Indústria do Japão e a TEPCO (HITACHI-GE, 2023; IAEA, 2023a; IRID, 2024; METI, 2025; TEPCO, 2025a).

Tabela 3 – Principais SRPs subaquáticos empregados em Fukushima Daiichi (2011-2024)			
Tipo/ Período	Sensores / Equipamentos	Finalidade Operacional	Instituições
ROV-“Fuji” (Little Sunfish)/JUL 2017	Câmeras subaquáticas HD e dosímetro	Reconhecimento visual e radiológico no PCV	IRID/ Toshiba/ TEPCO
Boat-type ROV-A/ OUT/2019	Câmera óptica e sensor de proximidade	Instalação de anel-guia e inspeção da lâmina-d’água	IRID/Hitachi GE
ROV-A2/ MAI/2022	Câmera panorâmica, estabilizador e termômetro	Varredura visual ampla do pedestal	TEPCO/IRID
ROV-B/ MAR/2023	Scanner ultrassônico 3-D e termógrafo	Mapeamento 3-D e <i>fuel debris</i>	Hitachi GE/IRID
ROV-C/ 2023	Ultrassom de baixa frequência	Medição de espessura de depósitos submersos	Hitachi GE/IRID
ROV-D/ 2023	Espectrômetro γ (gama) e detector de nêutrons	Identificação de combustível fundido submerso	Hitachi GE/IRID
ROV-E/ 2023	Amostrador cilíndrico selado	Coleta de amostras subaquáticas para análise	Hitachi GE/IRID

Fonte: Elaborado pelo autor com base em HITACHI-GE Nuclear Energy (2023); IRID (2024); *Ministry of Economy, Trade and Industry* – METI (2025); TEPCO (2017a, 2017b, 2025a).

Legenda: ROV - *Remotely Operated Vehicle* (Veículo subaquático operado remotamente).

Além da evolução técnica, o Japão promoveu reformas institucionais significativas para consolidar o uso de SRPs no setor nuclear. A criação da NRA, em

2012, foi acompanhada da revisão dos planos de contingência, com a inclusão de diretrizes específicas para o emprego desses sistemas em emergências nucleares e radiológicas. Órgãos como o Ministério do Meio Ambiente, o Gabinete do Primeiro-Ministro e a própria TEPCO criaram setores técnicos especializados para planejar, operar e integrar os SRPs às ações de segurança e resposta. Esse processo transformou o Japão em referência internacional no uso integrado de SRPs voltados à segurança nuclear. Seu emprego extrapolou o escopo emergencial, estendendo-se ao monitoramento de rotina das estruturas, à proteção física e à gestão ambiental em áreas próximas. A experiência japonesa evidenciou que o sucesso na adoção dessas tecnologias depende de planejamento estratégico, capacitação técnica, coordenação interinstitucional e apoio normativo (IAEA, 2023a, 2023b; NRA, 2017).

A adoção de SRPs no Japão, após o acidente de Fukushima, representou um ponto de inflexão na forma como tecnologias emergentes passaram a ser incorporadas em cenários de crise nuclear. Inicialmente utilizados de forma improvisada e emergencial, os SRPs evoluíram rapidamente para uma capacidade operacional consolidada, com aplicações multifuncionais em ambientes de alto risco radiológico. Sua efetividade na redução da exposição humana, aliada à capacidade de coleta de dados e inspeção em tempo real, viabilizou a continuidade segura das ações de resposta, estabilização e descomissionamento da planta. Esse processo foi caracterizado por elevada integração entre setores governamentais, acadêmicos e industriais, além da criação de um arcabouço regulatório que institucionalizou o uso de SRPs no contexto da segurança nuclear japonesa. A experiência acumulada evidenciou que a eficácia desses sistemas não reside apenas na tecnologia, mas na existência de um ecossistema normativo e organizacional capaz de sustentar sua aplicação estratégica e segura (IAEA, 2023a, 2023b).

3.2.1 Conclusão Parcial

A adoção dos SRPs no contexto do acidente de Fukushima representou um “divisor de águas” na evolução da segurança nuclear japonesa, o que evidencia a transição de soluções improvisadas para capacidades consolidadas e integradas, organizacional e tecnologicamente. Inicialmente empregados como resposta

emergencial para reduzir a exposição humana, os SRPs demonstraram eficácia imediata em inspeções estruturais, levantamentos radiológicos e a coleta de dados em áreas inacessíveis, o que abriu caminho para seu uso cada vez mais especializado nas fases de recuperação e descomissionamento. A rápida institucionalização desse emprego foi acompanhada por investimentos em pesquisa, adaptação de plataformas, desenvolvimento de sensores específicos e reformas regulatórias que viabilizaram o uso coordenado desses sistemas por operadores nucleares e órgãos governamentais.

A análise apresentada nesta seção, complementada pelas Tabelas 1, 2 e 3, demonstrou que a consolidação do uso de SRPs em Fukushima ocorreu por meio de uma estratégia gradual, multidisciplinar e interinstitucional, envolvendo o setor público, centros de pesquisa e empresas privadas. O Japão tornou-se, assim, uma referência internacional na aplicação de tecnologias robóticas em ambientes nucleares críticos, não apenas pela sofisticação dos equipamentos empregados, mas também pela criação de um ecossistema normativo, técnico e operacional robusto e resiliente. A próxima seção fornecerá informações sobre algumas capacidades operacionais e técnicas que foram implementadas ao longo das diferentes fases da resposta.

3.3 CAPACIDADES IMPLEMENTADAS COM SRPs

A resposta japonesa ao acidente nuclear de Fukushima Daiichi não se restringiu à adoção emergencial de SRPs, mas resultou na consolidação de um conjunto abrangente de capacidades técnicas e operacionais voltadas ao aprimoramento da gestão de crises nucleares. Diversas instituições japonesas, incluindo operadores nucleares, universidades, centros de pesquisa, empresas privadas e órgãos governamentais atuaram de forma coordenada na busca por soluções que reduziram a exposição humana, aumentaram a eficiência operacional e ampliaram o controle ambiental (IAEA, 2023a, 2023b; TEPCO, 2017a).

Nesse contexto, os SRPs passaram a ser empregados sistematicamente em cinco grandes campos de aplicação: mapeamento radiológico e monitoramento ambiental; inspeções estruturais e avaliação de danos; apoio técnico-operacional ao descomissionamento; funções auxiliares de transporte, comunicação e

reconhecimento; e desenvolvimento institucional de doutrinas e protocolos integrados aos sistemas de comando e controle (Ardiny et al., 2024; IAEA, 2023a, 2023b).

A sistematização dessas funções permitiu ao Japão não apenas superar os desafios imediatos do pós-acidente, mas também, consolidar um modelo de referência para o uso de SRPs em instalações nucleares sob risco radiológico elevado, com potencial de adaptação a outras realidades (IAEA, 2023a, 2023b; JAEA, 2015).

3.3.1 Mapeamento Radiológico e Monitoramento Ambiental

Uma das primeiras e mais críticas demandas operacionais, após o acidente de Fukushima Daiichi, foi a obtenção de dados confiáveis sobre os níveis de radiação em áreas internas e externas às instalações danificadas. As condições de extrema exposição radiológica registradas nas áreas de acesso primário inviabilizaram a atuação direta de técnicos e bombeiros, impondo severas restrições ao reconhecimento visual e à obtenção de amostras no local (IAEA, 2015b; TEPCO, 2012).

Diante desse cenário, os SRPs, especialmente os aéreos, tornaram-se ferramentas centrais para o mapeamento radiológico de áreas contaminadas. Essas plataformas, equipadas com sensores embarcados (como câmeras compton acopladas a helicópteros), possibilitaram a coleta remota de dados do ambiente e a identificação de *hotspots* com altos níveis de radiação, reduzindo significativamente a exposição humana direta (Sato et al., 2020).

Segundo a IAEA (2023), os SRPs aéreos empregados nos estágios iniciais do acidente eram, em sua maioria, helicópteros comerciais adaptados, como o ilustrado na Figura 5, equipados com sensores do tipo *Geiger-Müller*, cintiladores e espectrômetros gama, todos integrados a sistemas de georreferenciamento de alta precisão (Sistema de Posicionamento Global – Cinemática em Tempo Real - *Global Positioning System – Real-Time Kinematic* - GPS-RTK) para garantir acurácia centimétrica nas inspeções radiológicas (IAEA, 2023a).

Posteriormente, foram incorporados drones de maior complexidade tecnológica, como o modelo DJI Matrice 600, representado na Figura 6, equipado com

câmera compton, espectrômetro γ (gama) e Sistema de Posicionamento Global, Cinemática em Tempo Real (GPS-RTK). Tais sistemas possibilitaram a identificação tridimensional de fontes emissoras de radiação e a obtenção de imagens espectrais integradas, o que viabilizou análises precisas de áreas contaminadas (Sato et al., 2020).

Figura 5 – Multicóptero Radiológico



Figura 6 – DJI Matrice 600



Fonte: Laboratório da IAEA – Viena.

Fonte: SATO et al., 2020.

A evolução desses sistemas não se limitou ao contexto de Fukushima. Estudos experimentais realizados em reatores de fusão demonstraram que multicópteros com sensores radiológicos são capazes de realizar inspeções, em ambientes confinados, logo após o desligamento do reator. A obtenção precoce de informações críticas permite o planejamento eficaz da sequência de operações, otimizando tempo, segurança e alocação de recursos, além de apresentar uma relação custo-benefício vantajosa. Essa constatação reforça a vocação dos SRPs como plataformas estratégicas mesmo em cenários pós-acidente (Vale; Ventura; Carvalho, 2017).

O monitoramento ambiental realizado por SRPs também passou a integrar rotinas institucionais de avaliação da evolução da contaminação nas áreas adjacentes à instalação nuclear, especialmente nas zonas de ações preventivas⁴¹ e em áreas agrícolas afetadas. Estudos publicados na revista *Remote Sensing* (Choi et al., 2019) documentaram o uso de plataformas aéreas com sensores multiespectrais⁴² e hiperespectrais⁴³ para detectar alterações fisiológicas na vegetação, infiltração de

⁴¹ Área situada ao redor da instalação, incluída no plano de emergência, para a qual são previstas ações urgentes e preventivas em caso de emergência nuclear ou radiológica (CNEN, 2021).

⁴² Em diferentes bandas do espectro eletromagnético, permitindo monitorar alterações ambientais e rastrear radionuclídeos em áreas contaminadas (Choi et al., 2019).

⁴³ Capaz de detectar centenas de bandas espectrais simultaneamente, permitindo análises detalhadas de solo, vegetação e contaminantes (Choi et al., 2019).

radionuclídeos⁴⁴ no solo e migração de partículas radioativas para cursos d'água. Essas informações foram essenciais para a delimitação de áreas de acesso restrito e para estratégias de descontaminação ambiental (Choi et al., 2019).

Segundo artigo da revista de ciência e tecnologia nuclear do Japão (2020), a JAEA desenvolveu um sistema que integra sensores, processadores embarcados e *Three-Dimensional Light Detection and Ranging* (3D LiDAR), possibilitando reconstruções radiológicas com correções espaciais e temporais. A Figura 7 apresenta a arquitetura integrada do *DJI Matrice 600*, e a Figura 8 ilustra o mapeamento tridimensional de áreas críticas com análise de trajetória e dados de radiômetros. Essa solução consolidou os SRPs como ferramentas estratégicas para resposta emergencial, monitoramento contínuo e descontaminação (Sato et al., 2020).

Figura 7 - *DJI Matrice 600*

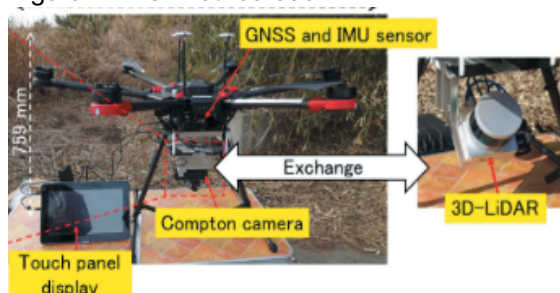
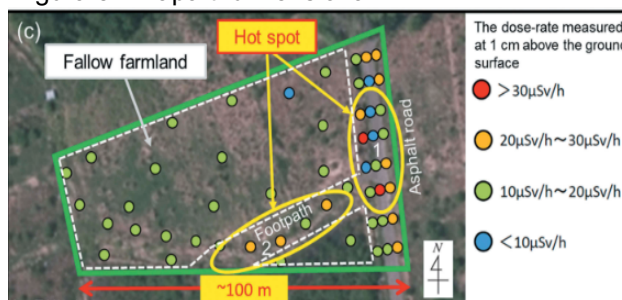


Figura 8 - Mapa tridimensional



Fonte: Revista de ciência e tecnologia nuclear do Japão v. 57, n. 6, p. 734–744, 2020.

Além das plataformas aéreas, a resposta em Fukushima empregou SRPs terrestres e subaquáticos, equipados com sensores ambientais e adaptados ao ambiente nuclear, permitindo a medição de doses e a realização segura de inspeções estruturais (Sato et al., 2020; TEPCO, 2011).

Segundo relatório da JAEA, o avanço dos algoritmos embarcados e a miniaturização de sensores ampliaram o alcance e a precisão das missões, permitindo o mapeamento em tempo real com transmissão direta ao centro de emergência nuclear. Essa evolução consolidou os sistemas remotamente pilotados como ferramentas estratégicas para vigilância ambiental e monitoramento pós-acidente (JAEA, 2020).

⁴⁴ Elementos instáveis que emitem radiação ionizante (IAEA, 2022).

3.3.2 Inspeções Estruturais e Avaliação de Danos

A sequência de explosões⁴⁵ de hidrogênio que acometeu as Unidades 1, 3 e 4 da Central Nuclear de Fukushima Daiichi provocou danos estruturais severos nos prédios dos reatores, nas passagens internas, nos sistemas de contenção secundária e em diversas áreas críticas de operação. A combinação entre instabilidade física e contaminação radioativa impossibilitou o acesso humano às áreas comprometidas, criando a necessidade urgente de inspeção remota⁴⁶ para avaliação de integridade e planejamento de intervenções técnicas (IAEA, 2015; TEPCO, 2011).

De acordo com o relatório técnico da TEPCO as inspeções visuais revelaram colapsos dos andares superiores das estruturas, erosão do concreto, acúmulo de detritos radioativos e perda de integridade em vasos de contenção primária. As fotografias aéreas capturadas nos primeiros dias após o acidente documentaram o grau de destruição externa nas Unidades 1 e 3, contribuindo para a análise da propagação de hidrogênio no interior das edificações (TEPCO, 2011).

Adicionalmente, foram testados e empregados SRPs aéreos em ambientes internos amplos e não obstruídos, equipados com sensores ópticos e sistemas de estabilização embarcados. Essas plataformas incorporaram sensores de proximidade e sistema de navegação assistida, possibilitando a realização de inspeções visuais em estruturas parcialmente colapsadas (Thurnherr; Muller; Algernon, 2024).

A inovação mais expressiva nesse domínio, conforme registrado por Thurnherr et al. (2024), foi a adaptação de técnicas de Ensaio Não Destrutivo (END)⁴⁷ para plataformas aéreas não tripuladas. Sistemas embarcados de ultrassom, termografia infravermelha e *impact-echo*⁴⁸ foram empregados na detecção remota de rachaduras em paredes de contenção, infiltrações de umidade em concreto e falhas estruturais ocultas em áreas de difícil acesso, sem a necessidade de contato humano direto. Esses procedimentos, anteriormente restritos a métodos convencionais, passaram a

⁴⁵ Ocorrem devido à reação entre zircônio e água em altas temperaturas (TEPCO, 2011).

⁴⁶ É a técnica de avaliação técnica de estruturas, condições radiológicas ou materiais feita à distância com o uso de SRPs, em locais inacessíveis ou perigosos para seres humanos (TEPCO, 2011).

⁴⁷ Métodos como ultrassom e termografia, embarcados em drones, para identificar falhas estruturais (Thurnherr et al., 2024).

⁴⁸ Técnica de END baseada na propagação de ondas mecânicas, utilizada para detectar fendas ou vazios em estruturas de concreto, por meio da análise do eco refletido (Thurnherr et al., 2024).

ser executados de forma semiautônoma, ampliando a segurança e a eficiência das intervenções técnicas (Thurnherr; Muller; Algernon, 2024).

Nesse escopo, as operações de inspeção estrutural avançaram com o emprego de SRPs aéreos capazes de manter orientação horizontal por períodos prolongados em ambientes internos. Durante a 27ª Conferência Internacional sobre Mecânica Estrutural em Reatores (*International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology – SMiRT 27*), realizada em Yokohama em março de 2024, foram apresentadas evidências do uso de SRPs com sensores acústicos embarcados na execução da técnica *impact-echo*. A Figura 9 ilustra um desses SRPs empregados na detecção remota de falhas estruturais, equipado com sensores acústicos, térmicos e de navegação assistida para operar com precisão em áreas colapsadas, enquanto a Figura 10 apresenta o registro espectro acústico gerado durante a detecção de descontinuidades estruturais. Essa abordagem permitiu avaliar a integridade de elementos de concreto armado sem a necessidade de contato direto, viabilizando o planejamento de reforços e contenções com base em dados técnicos seguros (Thurnherr; Muller; Algernon, 2024).

Figura 9 – SRP em inspeção estrutural



Figure 3: Drone horizontally tilted inspecting a building

Fonte: SMiRT 27 (2024).

Figura 10 – Método *impact-echo*

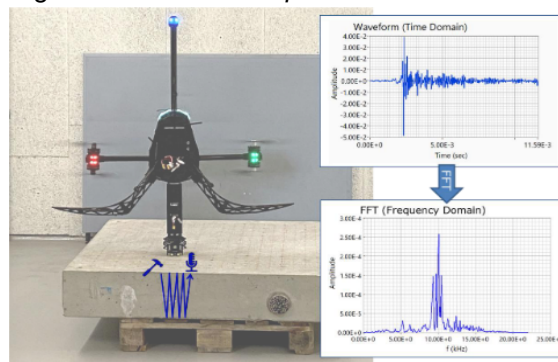


Figure 5: Measurement principle of impact-echo

Fonte: SMiRT 27 (2024).

Além dos sistemas aéreos, a resposta emergencial em Fukushima utilizou SRPs terrestres projetados para atuar em ambientes confinados, obstruídos e submetidos a níveis elevados de radiação. Esses SRPs foram essenciais para missões de inspeção estrutural e dosimétrica em locais inacessíveis à presença humana. Um dos primeiros modelos utilizados foi o robô *PackBot*⁴⁹, inicialmente concebido para operações militares urbanas e, posteriormente, adaptado ao contexto

⁴⁹ Robô originalmente desenvolvido para uso militar pelos EUA, adaptado no Japão para operar em zonas com elevados níveis de radiação, com sensores visuais e radiológicos (IRID, 2014).

nuclear. Desenvolvido pela empresa norte-americana *iRobot*, foi empregado nas fases iniciais do acidente, sendo equipado com câmeras térmicas, sensores de radiação e um braço mecânico articulado, permitindo a realização de inspeções visuais e dosimétricas em áreas com visibilidade limitada e escombros estruturais. A Figura 11 apresenta o *PackBot* operando na Unidade 1, adaptado para ambientes de alto risco radiológico e integrante do primeiro grupo de plataformas remotas que viabilizaram o acesso seguro às instalações gravemente danificadas (Japan, 2014).

Na sequência, o Japão passou a empregar robôs terrestres com maior grau de especialização, como o Quince, desenvolvido pela Universidade de *Tohoku* em parceria com a JAEA. Projetado para inspeções em túneis e áreas confinadas, o Quince, ilustrado na Figura 12, foi adaptado ao ambiente nuclear para executar missões em zonas com escombros, radiação intensa e riscos estruturais, conforme. Equipado com sistema de tração robusto, câmeras de alta definição, sensores de temperatura e detectores cintiladores, o robô ingressou nos corredores danificados das Unidades 2 e 3, realizou inspeções visuais e aferiu taxas de dose em áreas de risco. Seu desempenho operacional, em ambientes confinados e radiologicamente contaminados, foi posteriormente documentado em artigo técnico detalhado sobre a atuação do Quince (Nagatani et al., 2014).

Figura 11 – PackBot



Fonte: TEPCO - Photo & Video Library.

Figura 12 – Quince



Fonte: NAGATANI, Yoshito/Tohoku University.

O *PackBot* e o Quince exemplificam a diversidade tecnológica dos sistemas terrestres empregados ao longo da resposta ao acidente de Fukushima. As capacidades evidenciadas por essas plataformas refletem a evolução contínua das soluções robóticas no contexto do descomissionamento e da remediação técnica da planta, destacando o papel estratégico dos SRPs na mitigação de riscos e na ampliação da segurança operacional (JAEA, 2020).

As capacidades de inspeção implementadas permitiram ao Japão reduzir, significativamente, a exposição humana nas fases iniciais de estabilização, garantir a coleta de dados confiáveis para análise de engenharia estrutural e planejar ações de reforço, contenção e remoção de entulhos com base em evidências técnicas. Segundo relatórios técnicos da JAEA, publicados após 2016, o modelo operacional japonês, ao integrar diferentes tipos de SRPs em ambientes colapsados e radiologicamente contaminados, estabeleceu um referencial técnico para resposta em instalações nucleares sob condições extremas (JAEA, 2020).

3.3.3 Apoio ao Descomissionamento e Operações Internas

Concluída a fase aguda da emergência nuclear em Fukushima Daiichi, o Japão passou a enfrentar um novo e complexo desafio técnico de longo prazo: o descomissionamento seguro e gradual das unidades comprometidas. Esse processo inclui a remoção de combustível nuclear fundido⁵⁰, a desmontagem de estruturas danificadas, a descontaminação de ambientes internos e o gerenciamento de resíduos altamente radioativos. Para viabilizar tais ações em cenários de alta complexidade e risco, foi necessário adotar tecnologias emergentes de alta precisão, capazes de operar por longos períodos em áreas críticas, com mínima exposição humana direta (IAEA, 2023a, 2023b; METI, 2025).

Para essas tarefas, os SRPs assumiram, novamente, papel central, uma vez que grande parte das áreas internas ainda apresentava níveis de radiação elevados incompatíveis com a atuação humana direta. A exposição prolongada, o risco de colapsos estruturais e a complexidade dos trajetos internos tornaram inviável o uso de técnicas convencionais de inspeção e amostragem. Além disso, a heterogeneidade das áreas afetadas demandou o emprego de diferentes tipos de plataformas terrestres, aéreas e subaquáticas, customizadas para cada tipo de tarefa (IAEA, 2015a, 2015b; TEPCO, 2018).

Nesse contexto, o Japão desenvolveu e empregou uma ampla variedade de SRPs terrestres concebidos para atuar em ambientes internos radiologicamente

⁵⁰ Resultado da fusão parcial ou total do núcleo de um reator (IAEA, 2023).

hostis. Esses sistemas combinaram versatilidade de locomoção, câmeras HD, braços manipuladores de precisão e detetores γ (gama) integrados. Entre eles, destaca-se o Sistema Integrado de Equipamentos de Manutenção por Telecontrole (*Maintenance Equipment Integrated System of Telecontrol Robot – MEISTeR*), projetado pela JAEA, capaz de cortar detritos, remover obstáculos e preparar áreas para instalação de blindagens. O robô MEISTeR, Figuras 13 e 14, permitiu operar em zonas com risco de colapso estrutural e doses superiores a 500 mSv/h, reduzindo a exposição humana. Além do MEISTeR, outros SRPs terrestres foram incorporados às rotinas de descomissionamento (IAEA, 2023a; IRID, 2014). A diversidade funcional dessas plataformas está sistematizada na Tabela 2, incluída na seção 3.3 desta tese.

Figura 13 – MEISTeR em teste



Fontes: JAEA e TEPCO.

Figura 14 – MEISTeR em operação



Fontes: JAEA e TEPCO.

No contexto das operações de descomissionamento, SRPs aéreos passaram a ser utilizados no interior dos prédios dos reatores, especialmente por meio de protótipos desenvolvidos por empresas como Hitachi e Toshiba. Essas plataformas foram projetadas para atuar em ambientes confinados com geometrias complexas e alta interferência, sendo equipadas com sistemas de navegação assistida, sensores ópticos e espectrômetros γ (gama). Suas capacidades permitiram o levantamento tridimensional de zonas de *corium*⁵¹, a verificação da integridade estrutural e a identificação de caminhos operacionais viáveis para futuras intervenções robóticas em áreas de difícil acesso. A precisão das imagens obtidas e a estabilidade dos voos em ambientes internos foram significativamente aprimoradas com o emprego de tecnologias de detecção e medição por luz (*Light Detection and Ranging – LIDAR*)⁵² e de algoritmos avançados de posicionamento assistido, consolidando essas

⁵¹ Mistura radioativa de combustível nuclear fundido, estruturas metálicas do vaso de pressão e outros materiais, formada durante a fusão do núcleo de um reator em acidentes severos (TEPCO, 2017a).

⁵² LIDAR: Sensoriamento Remoto a Laser (distâncias e imagens tridimensionais) (IAEA, 2021b).

plataformas como ferramentas fundamentais para o planejamento técnico das etapas subsequentes do descomissionamento (IAEA, 2021b, 2023b; Thurnherr et al., 2024; TEPCO, 2017a).

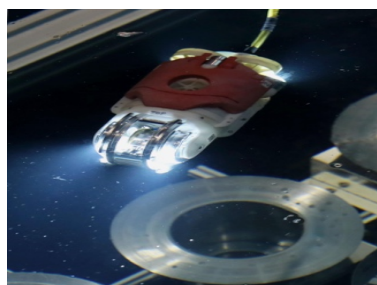
Outro avanço nesta fase foi o emprego de SRPs subaquáticos na inspeção de piscinas de combustível e tanques contaminados, sobretudo nas Unidades 1 e 2 de Fukushima Daiichi. Projetados para operar em ambientes de alta turbidez⁵³ e interferência eletromagnética, essas plataformas incorporaram câmeras de alta definição, sensores químicos, diodo emissor de luz, sonar e braços manipuladores, permitindo caracterizar sedimentos radioativos, localizar detritos e planejar a remoção futura de detritos de combustível⁵⁴. A Figura 15 ilustra o SRP “Fuji” (*Little Sunfish*) documentando depósitos de detritos no vaso de contenção da Unidade 3, enquanto a Figura 16 mostra o SRP “Boat-type A” instalando um anel-guia na lâmina d’água da Unidade 1 (TEPCO, 2017b; HITACHI, 2023; IRID, 2019). A diversidade de plataformas subaquáticas e suas funções técnicas está sistematizada na Tabela 3, na seção 3.3, que reúne soluções especializadas para inspeção visual, mapeamento tridimensional e amostragem remota em condições críticas.

Figura 15 – SRP “Fuji”



Fonte: TEPCO.

Figura 16 – SRP “Boat-type A”



Fonte: TEPCO.

A NRA tem reiterado que o aprimoramento contínuo das capacidades de inspeção robótica e de coleta remota de dados é fator determinante para a revisão dos cronogramas e das diretrizes técnicas do processo de descomissionamento. Conforme relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico/Agência de Energia Nuclear (*Organisation for Economic Cooperation and*

⁵³ Medida da opacidade de um líquido causada pela presença de partículas em suspensão (TEPCO, 2017a).

⁵⁴ *Fuel debris*: Mistura solidificada de combustível nuclear fundido, resultante da fusão do núcleo de um reator durante um acidente severo (IRID, 2024).

Development/Nuclear Energy Agency – OCDE/NEA)⁵⁵, os SRPs passaram a ser incorporados de forma permanente às estações de comando e controle das instalações nucleares japonesas, consolidando-se como ativos operacionais estratégicos ao longo de todo o ciclo de vida das unidades afetadas (OCDE/NEA, 2021).

O emprego sistemático desses equipamentos nas operações de descomissionamento em Fukushima proporcionou ganhos substanciais em termos de redução do risco humano, precisão na aquisição de dados técnicos, agilidade na tomada de decisões operacionais e ampliação do controle ambiental. Além desses benefícios imediatos, a experiência japonesa permitiu consolidar um modelo replicável de descomissionamento em instalações contaminadas, com potencial de aplicação em cenários internacionais de difícil acesso ou risco elevado, reforçando a importância de tecnologias robóticas no contexto da segurança nuclear contemporânea (OCDE/NEA, 2021).

3.3.4 Funções Auxiliares de Comunicação, Transporte e Reconhecimento

Além das funções relacionadas ao mapeamento radiológico, às inspeções estruturais e ao apoio ao descomissionamento, os SRPs também desempenharam em Fukushima funções auxiliares⁵⁶ que ampliaram a eficiência, a coordenação e a segurança das operações de resposta à emergência nuclear. Uma dessas funções foi a restauração de comunicações em áreas isoladas ou blindadas. Segundo a TEPCO (2012), SRPs aéreos foram adaptados como retransmissores móveis para conectar zonas com interferência eletromagnética⁵⁷ aos centros de comando, suprimindo falhas críticas ocorridas nas Unidades 1 a 3 nos primeiros dias do acidente (IAEA, 2015b; TEPCO, 2011).

⁵⁵ Fórum internacional de cooperação entre países com programas nucleares desenvolvidos, promovendo o intercâmbio técnico e a harmonização de boas práticas (OCDE/NEA, 2021).

⁵⁶ Atividades complementares às ações principais de resposta a emergências nucleares (TEPCO, 2012).

⁵⁷ Pode afetar a comunicação em ambientes industriais contaminados (TEPCO, 2012).

Segundo relatórios da TEPCO (2024) e apresentações do Instituto Internacional de Pesquisa para o Descomissionamento Nuclear (*International Research Institute for Nuclear Decommissioning* – IRID), micro-SRPs semiautônomos, com menos de 200 gramas, foram lançados no interior das Unidades, acoplados a módulos *snake-type*⁵⁸, transportando repetidores e restabelecendo comunicação em setores blindados. A tecnologia permitiu transmissão contínua de vídeo, mesmo sob alta radiação e baixa visibilidade. A plataforma com *end-effector*⁵⁹ viabilizou o transporte de amostras ambientais coletadas em áreas de acesso humano restrito e reduziu o tempo de exposição dos operadores (IAEA, 2013b; TEPCO, 2017b, 2024; UNSCEAR, 2020). Externamente à usina, SRPs aéreos com sensores ópticos e multiespectrais, GPS-RTK e sistemas inerciais mapearam acessos e dispersão de radionuclídeos, avaliaram obstáculos e monitoraram em tempo real, contenções, barreiras físicas e postos de controle, com alta precisão garantida pela integração sensorial e pelo georreferenciamento (JAEA, 2021; Sato et al., 2020).

As funções auxiliares dos SRPs mostraram-se vitais para garantir a continuidade das ações principais no cenário pós-acidente, ao viabilizar missões sem exposição direta dos trabalhadores. A consolidação dessas práticas resultou na integração definitiva dos SRPs aos sistemas de comando e controle da TEPCO e da JAEA, fortalecendo a doutrina de resposta com operações logísticas, de reconhecimento e de vigilância. Essa incorporação ampliou a capacidade do Japão diante de cenários extremos, tornando-o referência global no uso de tecnologias robóticas em ambientes nucleares (JAEA, 2015).

3.3.5 Reformas Institucionais e Lições Aprendidas

O acidente de Fukushima Daiichi revelou não apenas vulnerabilidades técnicas e operacionais nas instalações nucleares japonesas, mas também fragilidades⁶⁰ institucionais relevantes, especialmente no que tange à estrutura regulatória, aos

⁵⁸ Dispositivo articulado, utilizado em Fukushima, para transportar câmeras, sensores e repetidores até zonas inacessíveis (TEPCO, 2024).

⁵⁹ Componente final de um manipulador robótico responsável por pinçar, cortar ou raspar (TEPCO, 2024).

⁶⁰ Antes do acidente, a estrutura regulatória apresentava sobreposição de funções (IAEA, 2015b).

protocolos de resposta e à cultura organizacional das entidades envolvidas. Diante desse cenário, o Japão empreendeu um amplo processo de reformas estruturais e doutrinárias, cujas implicações são de interesse estratégico para outros países com programas nucleares consolidados ou emergentes (IAEA, 2015a, 2015b).

Entre as mudanças institucionais mais emblemáticas, destaca-se a criação da Autoridade Reguladora Nuclear (*Nuclear Regulation Authority – NRA*), estabelecida como agência independente, com maior autonomia decisória em relação ao governo. A nova autoridade nuclear substituiu o modelo anterior de regulação fragmentada, no qual coexistiam, em um mesmo órgão, funções de promoção e de fiscalização da atividade nuclear, uma configuração duramente criticada após o acidente (IAEA, 2015b).

No plano operacional, diversas normas, diretrizes técnicas e documentos estratégicos foram atualizados para incorporar a possibilidade de uso de tecnologias remotamente operadas em contextos de emergência nuclear, inspeção remota, proteção física e operações de descomissionamento. A TEPCO, a JAEA, o Ministério do Meio Ambiente e o Gabinete do Primeiro-Ministro passaram a contar com unidades especializadas em SRPs, com atribuições voltadas à pesquisa, doutrina, aquisição, operação e manutenção desses sistemas (IAEA, 2023a, 2023b).

Em paralelo, observou-se uma reorientação profunda da cultura institucional do setor nuclear japonês, consolidada em três eixos fundamentais: antecipação a cenários de ruptura⁶¹; minimização da exposição humana direta em áreas de risco elevado; e adoção de tecnologias de apoio à decisão baseadas em evidências técnicas. Esses princípios foram incorporados a normas operacionais, planos de contingência e protocolos regulatórios, conforme registrado no relatório do Diretor-Geral da IAEA sobre o caso Fukushima (IAEA, 2015b).

Tais lições foram institucionalizadas por meio de instrumentos normativos e operacionais diversos, como manuais, planos de resposta e diretrizes doutrinárias. A JAEA, por sua vez, estruturou capacidades dedicadas à robótica para emergências nucleares, com destaque para a conclusão, em 2015, do prédio de gestão de pesquisa do *Naraha Remote Technology Development Center*, voltado a pesquisa,

⁶¹Após o acidente, o governo adotou a doutrina de “preparação para o inesperado” em seus treinamentos e planos de contingência, priorizando cenários extremos e falhas múltiplas (IAEA, 2015b).

desenvolvimento, testes e capacitação em tecnologias remotamente operadas para ambientes de alta radiação (IAEA, 2015).

Internacionalmente, a experiência japonesa influenciou diretamente a revisão de marcos regulatórios e operacionais da IAEA, incluindo documentos da série de documentos técnicos (*Technical Document* – TECDOC) e diretrizes das séries EPR e NSS, que passaram a incorporar explicitamente o uso de tecnologias não tripuladas e a necessidade de coordenação interinstitucional. Nesse contexto, o caso de Fukushima consolidou-se como referência global na aplicação de lições aprendidas, sendo amplamente discutido em missões e redes da IAEA, como IRRS, EPREV e RANET, e em organizações como o Instituto Mundial para a Segurança Nuclear (*World Institute for Nuclear Security* – WINS) (IAEA, 2023a, 2023b).

Do ponto de vista estratégico, as reformas institucionais e operacionais adotadas pelo Japão, após o acidente de Fukushima, oferecem contribuições relevantes para o fortalecimento da resiliência nuclear em nível internacional. A integração de tecnologias robóticas, a revisão do marco regulatório e a consolidação de uma cultura de segurança orientada por evidências colocaram o Japão na vanguarda da resposta nuclear moderna, servindo como referência para países que operam instalações sob risco elevado ou que enfrentam cenários de recuperação pós-acidente (IAEA, 2023a, 2023b).

3.3.6 Conclusão Parcial

A experiência japonesa demonstrou que o emprego sistemático de SRPs após o acidente de Fukushima Daiichi consolidou-se como um modelo operacional robusto e multifuncional, com aplicações estratégicas em todas as fases de resposta, estabilização e descomissionamento. As capacidades implementadas abrangeram cinco campos principais: o mapeamento radiológico e o monitoramento ambiental; as inspeções estruturais e a avaliação de danos; o apoio técnico-operacional ao descomissionamento de áreas contaminadas; a execução de funções auxiliares de comunicação, transporte e reconhecimento; e o desenvolvimento institucional, com

reformas regulatórias e doutrinárias voltadas à integração de tecnologias emergentes em ambientes nucleares.

Essa trajetória foi acompanhada por inovações significativas, como o uso de sensores *compton* e LIDAR, a miniaturização de plataformas para missões em ambientes blindados e a adoção de sistemas terrestres e subaquáticos com alto grau de automação. A consolidação desses recursos foi viabilizada pela criação de estruturas técnicas permanentes, como as estações de comando e controle da TEPCO e da JAEA, e por reformas institucionais que ampliaram a legitimidade e o escopo do uso de SRPs em cenários radiologicamente hostis.

A sistematização desse conjunto de capacidades permitiu ao Japão superar limitações humanas em áreas de acesso restrito, reduzir a exposição ocupacional, qualificar a coleta de dados técnicos e acelerar a tomada de decisão com base em evidências. Além disso, a articulação entre órgãos governamentais, operadores nucleares, centros de pesquisa e fabricantes privados estabeleceu um ecossistema de inovação tecnológica voltado à segurança nuclear. A experiência japonesa evidenciou que a eficácia dos SRPs depende não apenas da sofisticação dos equipamentos, mas também de um arcabouço normativo e organizacional capaz de sustentar sua aplicação de forma estratégica, segura e contínua.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise das capacidades técnicas e operacionais implementadas pelo Japão no uso de SRPs, após o acidente de Fukushima Daiichi, cumpre o segundo objetivo intermediário desta pesquisa ao ilustrar o emprego de SRPs em situações de emergência no CEA.

O caso japonês revelou um processo acelerado de inovação tecnológica, reestruturação institucional e transformação doutrinária, diante de um cenário de crise sem precedentes. Desde as primeiras 72 horas de emergência até as etapas mais recentes do descomissionamento, os SRPs foram incorporados como ferramentas indispensáveis para inspeções estruturais, mapeamento radiológico, monitoramento ambiental, coleta de amostras e apoio logístico em áreas de acesso restrito. Essas

plataformas, aéreas, terrestres e subaquáticas passaram a integrar protocolos formais de resposta, demonstrando alto grau de adaptabilidade e confiabilidade em ambientes hostis e dinâmicos.

As seções anteriores evidenciaram que a institucionalização dos SRPs decorreu não apenas da demanda operacional imediata, mas de uma abordagem sistêmica voltada à construção de um ecossistema normativo, técnico e organizacional. A criação da NRA, a revisão dos marcos legais e a adoção de diretrizes específicas para o uso de tecnologias emergentes permitiram consolidar a legitimidade e a eficácia dessas soluções no contexto da segurança nuclear japonesa.

Do ponto de vista doutrinário, a experiência japonesa promoveu uma reconfiguração estratégica baseada na antecipação a cenários de ruptura, na redução da exposição humana direta e na tomada de decisão apoiada por dados técnicos em tempo real. Outrossim, os aprimoramentos decorrentes do acidente estabeleceram novo parâmetro para a integração de SRPs nas operações de resposta a emergências nucleares.

No contexto de modernização contínua, visualiza-se a crescente incorporação de inteligência artificial aos SRPs, viabilizando, no futuro, voos autônomos, reconhecimento de padrões radiológicos e geração automática de mapas de dose em tempo real. No entanto, embora persistam desafios relacionados à robustez dos dados e à interoperabilidade entre sistemas, projeções internacionais apontam para uma rápida expansão dessas capacidades, com ganhos expressivos em eficiência, confiabilidade e segurança em cenários de risco nuclear.

No próximo capítulo abordar-se-á o emprego de SRPs em situações de emergência no CEA, com base na experiência do autor, o que permitirá identificar oportunidades de reflexão e de possível aprimoramento no uso dessas plataformas, no âmbito do PNM, à luz das capacidades japonesas observadas neste capítulo.

4 O EMPREGO DE SRPs EM SITUAÇÕES DE EMERGÊNCIA NO CEA: EXPERIÊNCIA DO AUTOR

Neste capítulo tem-se como objetivo apresentar, de forma analítica e ilustrativa, a experiência do autor no emprego de SRPs em situações de emergência no CEA, entre 2019 e 2020. Esse período corresponde ao exercício das funções de Assessor de Segurança do CTMSP e de Comandante do então BtlDefNBQR-ARAMAR, atualmente designado 1º BtlProtDefNBQR, conforme alteração ocorrida em 2025.

Adicionalmente, consideraram-se os conhecimentos técnicos e institucionais adquiridos entre 2021 e 2022, quando o autor desempenhou a função de Coordenador de Segurança Física Nuclear no Departamento de Coordenação Nuclear (DCNUC) do GSI/PR. Nessa função, atuou diretamente na articulação interinstitucional voltada à proteção física nuclear, no contexto do SIPRON.

A abordagem adotada insere-se em uma investigação qualitativa mais ampla, cuja problemática parte da constatação de um hiato na aplicação sistemática de SRPs no contexto do PNM, sobretudo em contraste com as capacidades tecnológicas e operacionais desenvolvidas pelo Japão após o acidente nuclear de Fukushima Daiichi, ocorrido em 2011. Como demonstrado no Capítulo 3, a experiência japonesa evidenciou avanços significativos na integração dessas tecnologias às atividades de monitoramento, inspeção e resposta a emergências, servindo como referencial para reflexão sobre o cenário brasileiro. Diante disso, o foco desta pesquisa concentrou-se no uso de SRPs durante as fases de resposta, estabilização e descomissionamento em Fukushima, com ênfase nas funções desempenhadas em situações de emergência. A partir da identificação dessas capacidades técnicas e operacionais, buscou-se estabelecer conexões com o PNM, com o objetivo de analisar a exequibilidade prática no contexto nacional.

A exposição será conduzida a partir de uma perspectiva pessoal, com base em atribuições efetivamente exercidas no âmbito do PNM, e fundamentada nas diretrizes normativas e estratégicas aplicáveis à segurança nuclear, de acordo com o Capítulo 2 (Conceitual), e com a experiência japonesa descrita no Capítulo 3.

Ao ilustrar o emprego de SRPs em situações de emergência no CEA, visa-se cumprir o terceiro objetivo intermediário da pesquisa, assim como oferecer subsídios para a reflexão sobre o potencial de amadurecimento do tema no PNM, à luz da experiência internacional selecionada.

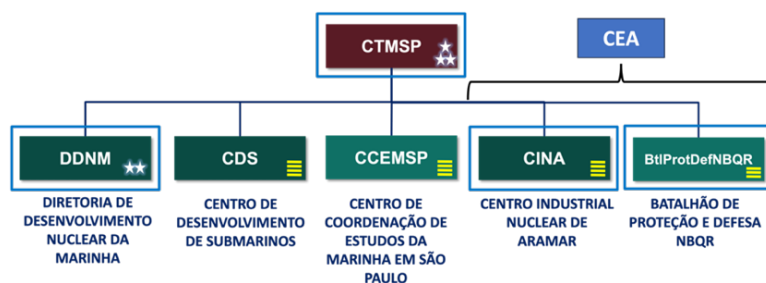
Por fim, embora, por razões metodológicas, se tenha optado por não realizar entrevistas com representantes do CTMSP ou do 1º BtlProtDefNBQR, em respeito ao caráter sigiloso dos dispositivos técnicos, dos procedimentos operacionais e das informações contidas nos PPFs e nos PELs das instalações nucleares do CEA, essa opção metodológica não compromete a validade da análise proposta, ainda que o recorte temporal estabelecido desconsidere os avanços obtidos entre 2021 e 2025, uma vez que a abordagem se fundamenta na experiência direta do autor.

4.1 O CEA E SUA INSERÇÃO NO PNM

A missão do CTMSP é coordenar tecnicamente o PNM, promovendo o desenvolvimento, a implementação e o gerenciamento de atividades técnico-científicas relacionadas à propulsão nuclear naval e à infraestrutura necessária à sua viabilização. Criado pelo Decreto nº 93.439/1986 sob a denominação de Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP), o órgão foi reestruturado em 2017, consolidando-se como núcleo central do PNM e subordinando-se diretamente à DGDNTM (ABEN, 2018; CTMSP, 2025; DGDNTM, 2025).

No desempenho dessa missão, o CTMSP exerce a supervisão de diversas OMs, conforme representado na Figura 17. Suas atribuições abrangem a pesquisa, o desenvolvimento, a concepção, a engenharia, o comissionamento, a operação e a manutenção de instalações nucleares, em articulação com a Diretoria de Desenvolvimento Nuclear da Marinha (DDNM) e demais instituições envolvidas (CTMSP, 2025; DGDNTM, 2025).

Figura 17 – Estrutura organizacional subordinada ao CTMSP



Fonte: Elaborado pelo autor. Adaptado do Informativo da ABEN (2018).

Compete à DDNM desenvolver, projetar, construir, comissionar e contribuir para a gestão do ciclo de vida de instalações, sistemas, equipamentos, materiais e

processos na área nuclear e em tecnologias associadas, a fim de atender às diretrizes da END e objetivos estratégicos da MB. Entre esses projetos estratégicos, destaca-se o PROSUB, no qual está inserido o SNCA, cujo projeto é conduzido pelo Centro de Desenvolvimento de Submarinos (CDS), OM subordinada ao CTMSP (DDNM, 2025).

No contexto do CEA, localizado em Iperó (SP), duas OMs subordinadas ao CTMSP exercem funções estratégicas: o Centro Industrial Nuclear de ARAMAR (CINA) e o 1º BtlProtDefNBQR. O CINA responde pela gestão operacional das unidades industriais e laboratoriais do PNM, abrangendo desde a fabricação e montagem de sistemas até o comissionamento, operação e descomissionamento de equipamentos e estruturas desenvolvidas pela DDNM. Também é responsável pela formação de operadores dos reatores nucleares do LABGENE e do futuro SNCA (ABEN, 2018; CINA, 2025).

Por outro lado, o 1º BtlProtDefNBQR tem por missão assegurar a proteção física das instalações nucleares do complexo, além de executar ações de controle em situações de emergência NBQR. Suas atividades visam preservar a integridade das pessoas, das estruturas operacionais e do meio ambiente, com capacidade de mitigação imediata diante de cenários de risco real ou potencial (1º BtlProtDefNBQR, 2025).

As instalações sob responsabilidade do CTMSP, incluindo o reator do protótipo em terra (LABGENE), são licenciadas e fiscalizadas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear, que se encontra em processo de transição de competências para a Autoridade Nacional de Segurança Nuclear, regulador civil do setor nuclear brasileiro. Essa supervisão abrange a segurança operacional e os requisitos de proteção física aplicáveis às instalações em território nacional.

No âmbito militar embarcado, compete ao Comando da Marinha, por intermédio da Secretaria Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (SecNSNQ), regulamentar, licenciar, fiscalizar e controlar os meios navais dotados de Plantas Nucleares Embarcadas (PNEs). Essa atuação compreende a segurança nuclear naval, a proteção radiológica, a segurança física e o transporte de combustível nuclear nos meios de propulsão embarcada, conforme a página institucional da Marinha do Brasil. Portanto, de forma inédita, o reator a ser embarcado no SNCA contará com duplo

licenciamento: primeiro pelo órgão regulador civil, no protótipo; e, posteriormente, pela SecNSNQ, no uso militar embarcado (ABEN, 2018; DGDNTM, 2025; SECNSNQ, 2025).

O CEA representa, assim, um importante polo tecnológico e nuclear do PNM, reunindo capacidades essenciais para o domínio do ciclo do combustível nuclear e para a viabilização da propulsão nuclear naval. Esse complexo abriga atividades de pesquisa, desenvolvimento, produção e manipulação de materiais nucleares e substâncias químicas, exigindo padrões rigorosos de segurança física e operacional.

Entre os parâmetros operacionais aplicáveis ao CEA, destacam-se: a delimitação das ZPEs; a definição dos recursos envolvidos na resposta; e o grau de articulação interinstitucional exigido para o enfrentamento de cenários emergenciais. Esses elementos refletem o elevado grau de exigência das operações conduzidas no interior do complexo e impõem requisitos elevados de coordenação e prontidão. Essa complexidade operacional se traduz na atuação do CEA como núcleo tecnológico do PNM, viabilizando a operação de instalações nucleares voltadas às etapas do ciclo do combustível nuclear. O papel estratégico do CEA, nesse sentido, está diretamente vinculado à execução de atividades relevantes de pesquisa, desenvolvimento e aplicação prática de tecnologias nucleares (ABEN, 2018; CNEN, 2021; DGDNTM, 2025).

As unidades responsáveis por essas funções, descritas na Figura 1 do Capítulo 2 e representadas na Figura 18, a seguir ilustrada, incluem instalações voltadas à conversão de urânio, ao enriquecimento isotópico, ao desenvolvimento de materiais e à simulação em terra do sistema de propulsão nuclear do Submarino Nuclear Convencionalmente Armado. Sua integração operacional reforça a importância do CEA como eixo estruturante da autonomia tecnológica brasileira no setor nuclear (ABEN, 2018).

O domínio das principais etapas do ciclo do combustível nuclear, da mineração do urânio à geração de energia, assegura ao Brasil o controle soberano sobre essa cadeia estratégica, conforme reconhecido por instituições como as Indústrias Nucleares do Brasil (INB). Nesse contexto, o CEA consolida-se como um dos pilares da autonomia tecnológica nacional no setor nuclear, desempenhando papel central no

desenvolvimento de competências críticas para a segurança energética e a defesa nacional (ABEN, 2018; INB, 2025).

Figura 18 – Vista aérea do Centro Experimental de ARAMAR



Fonte: PNASEN, 2022.

Ressalta-se, ainda, o papel estratégico da Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A. (AMAZUL), empresa pública vinculada ao Ministério da Defesa (MD), na implementação e operação das instalações do CEA. Com corpo técnico altamente especializado, atua em parceria com o CTMSP, desde a engenharia do LABGENE até o licenciamento e comissionamento de sistemas civis e militares, incluindo a planta-piloto de conversão (USEXA). Conforme informativo da Associação Brasileira de Energia Nuclear publicado em 2018, a empresa participa ativamente da operação assistida dessas instalações e da formação de recursos humanos qualificados, muitos oriundos do próprio corpo técnico da MB, reforçando a integração institucional e o caráter dual do PNM (AMAZUL, 2025; ABEN, 2018; CTMSP, 2025).

Dessa forma, a infraestrutura estratégica instalada no CEA, somada ao protagonismo do CTMSP e ao suporte técnico-operacional da AMAZUL, consolida-se como alicerce fundamental para o avanço de soluções inovadoras em segurança nuclear no Brasil, promovendo a integração entre desenvolvimento científico, capacitação tecnológica e soberania nacional (ABEN, 2018; AMAZUL, 2025; CTMSP, 2025).

4.2 ESTRUTURA DE RESPOSTA: SEGURANÇA FÍSICA, EMERGÊNCIA NUCLEAR E SRPs

Esta seção tem por finalidade ilustrar, com base na vivência do autor, o emprego de SRPs no CEA, entre 2019 e 2020. A análise será desenvolvida em cinco subseções complementares e interdependentes: o SisPF vigente no CEA e o papel institucional do 1º BtlProtDefNBQR; os fundamentos normativos e operacionais dos PELs das instalações nucleares; os tipos de SRPs efetivamente utilizados no período e suas aplicações observadas; os principais desafios enfrentados e as soluções técnicas implementadas; e os procedimentos e treinamentos realizados à época, voltados à consolidação do uso dessas plataformas em situações de emergência.

Tal estrutura visa fornecer uma caracterização realista das capacidades institucionais vigentes naquele período, respeitando os limites de sigilo operacional, e, ao mesmo tempo, integrar, de forma criteriosa, as experiências registradas aos marcos normativos nacionais estabelecidos pela CNEN e aos referenciais internacionais da IAEA no campo da segurança nuclear. Essa correlação busca identificar o hiato no emprego sistemático de SRPs no PNM, evidenciar potenciais aplicações e contribuir para a reflexão sobre oportunidades de aprimoramento das práticas institucionais vigentes.

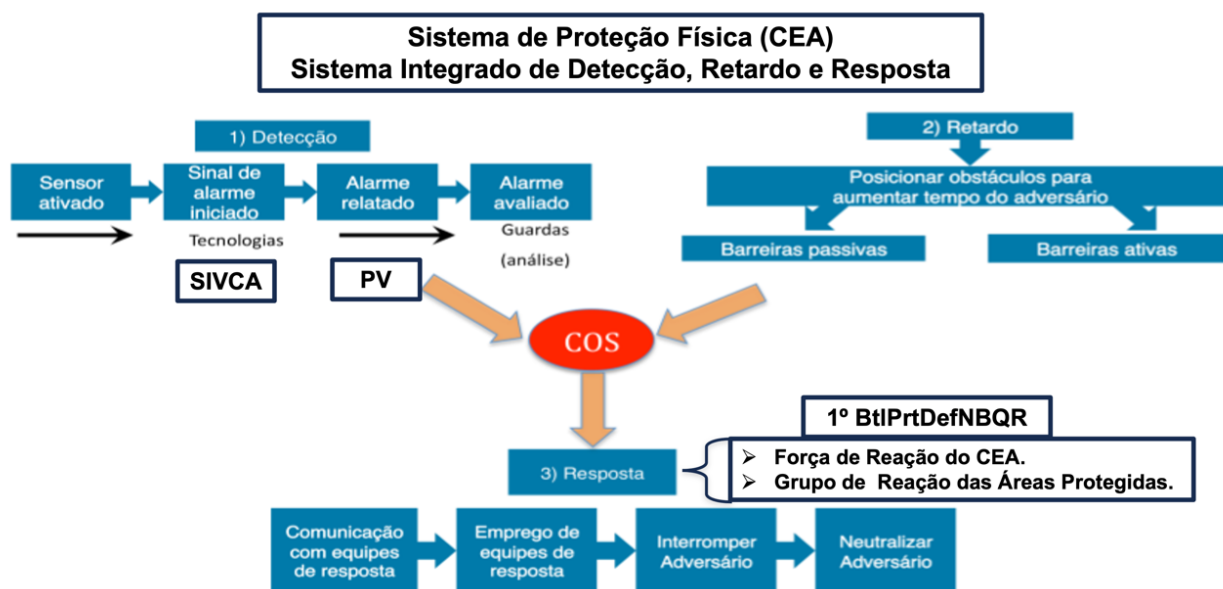
4.2.1 O Sistema de Proteção Física no CEA e o 1º BtlProtDefNBQR

O sistema de proteção física do CEA está estruturado com base nas normas da CNEN e nas diretrizes da IAEA, em especial a NN 2.01/CNEN e o documento INFCIRC/225/Rev.5 (IAEA-INSS nº 13). Esses referenciais definem o SisPF como um conjunto integrado de medidas de natureza normativa, operacional, humana e tecnológica, voltadas à dissuasão, detecção, retardo e resposta frente a atos não autorizados contra materiais e instalações nucleares (CNEN, 2019, 2021; IAEA, 2011a).

O CEA, classificado como instalação estratégica da MB, requer um SisPF robusto, estruturado em múltiplas camadas de defesa. Nesse contexto, as funções de detecção, retardo e resposta são implementadas de forma articulada, compondo uma

arquitetura integrada capaz de mitigar riscos à segurança nuclear. A Figura 19, a seguir, ilustra de forma esquemática a configuração geral do SisPF adotado no CEA, destacando seus principais componentes operacionais.

Figura 19 – Representação esquemática do SisPF no CEA



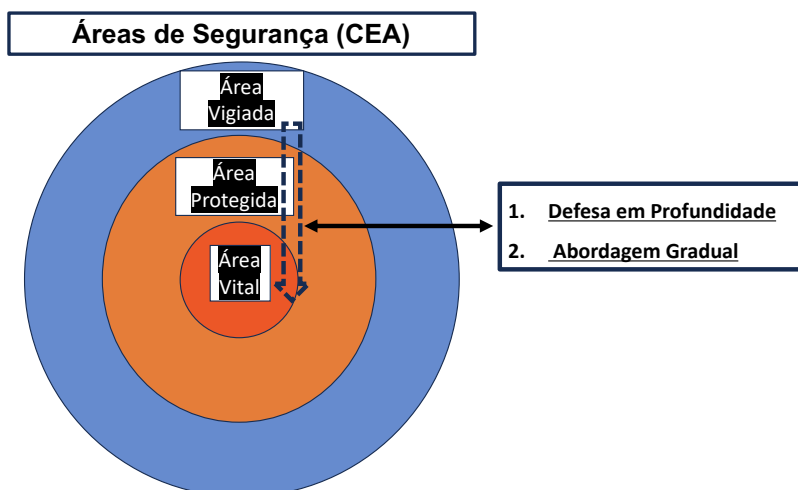
Fonte: O Autor. Adaptado de GARCIA, Mary Lynn. *The Design and Evaluation of Physical Protection Systems*. 2. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2008.

A detecção é realizada por sensores e câmeras, integrados ao Sistema Integrado de Vigilância e Controle de Acesso (SIVCA), com apoio de Postos de Vigilância (PV) e do Centro de Operações de Segurança (COS), estação central de alarme responsável por consolidar alertas e coordenar a resposta. O retardo é assegurado por barreiras físicas passivas e ativas, com crescente robustez à medida que a ameaça se aproxima das áreas vitais. A resposta, por sua vez, é executada pela Força de Reação de serviço no CEA e por Grupos de Reação atuantes no interior das áreas protegidas.

O SisPF no CEA é organizado em três áreas concêntricas de segurança, denominadas área vigiada, área protegida e área vital, que se diferenciam pelo grau de criticidade dos ativos nelas contidos. A área vital, por sua vez, abriga sistemas cuja sabotagem poderia acarretar graves interrupções operacionais ou consequências radiológicas severas. A operacionalização dessas zonas baseia-se em dois princípios estruturantes. O primeiro é a abordagem gradual, que estabelece requisitos de proteção proporcionais ao nível de risco associado a cada setor da instalação. O segundo princípio é a defesa em profundidade, que se traduz na adoção sucessiva de

barreiras físicas e administrativas, com o objetivo de dificultar o avanço de uma ameaça em direção à área vital (CNEN, 2019, 2021; IAEA, 2011a). A Figura 20 ilustra a disposição dessas áreas no interior do CEA, em concordância com as recomendações da IAEA.

Figura 20 – Áreas de segurança física no CEA (vigiada, protegida e vital)



Fonte: O autor.

Em caso de evento de segurança física nuclear, em alguma das instalações do CEA, são imediatamente acionados o Plano de Segurança Orgânica do CEA (PSO/CEA) e o PPF da unidade industrial afetada. Caso a ocorrência evolua para uma emergência nuclear, o PEL da instalação também deverá ser ativado, como será detalhado na próxima subseção (PSO/CTMSP-CEA, 2014).

O 1º BtlProtDefNBQR desempenha papel estratégico no SisPF do CEA, sendo responsável pela vigilância, resposta inicial e apoio técnico-operacional, conforme previsto em sua missão institucional, no PSO/CEA e nos PPFs das instalações. Diante de incidentes que superem a capacidade de reação local, seja pela intensidade da ameaça, seja por demanda de recursos especializados, são ativados planos de contingência previamente elaborados. Esses planos preveem, em um primeiro momento, o reforço com tropas da MB oriundas de fora do CEA e, em situações de maior gravidade, possibilitam a articulação com outras instituições que integram o SIPRON, conforme estabelecido no Plano Nacional de Resposta Integrada a Evento de Segurança Física Nuclear.

O PNRIESFN orienta a atuação coordenada entre órgãos civis e militares em situações que envolvam riscos à integridade do setor nuclear. Entre os cenários

considerados, destacam-se a remoção não autorizada de material nuclear, a sabotagem de instalações ou meios de transporte e a ocorrência de eventos que comprometam a reputação do Programa Nuclear Brasileiro. Além disso, prevê uma escala de cinco níveis de resposta, iniciando no nível zero (situação normal) e avançando até o nível quatro (operação de recuperação), o que permite o acionamento progressivo das instituições envolvidas conforme a gravidade da ocorrência (1º BtlProtDefNBQR, 2025; GSI/PR, 2020). A Figura 21, a seguir, apresenta uma imagem representativa da Força de Segurança de serviço no CEA.

Figura 21 – Força de segurança de serviço no CEA (com SRP aéreo e terrestre)



Fonte: Arquivo pessoal do autor.

4.2.2 Estruturação dos Planos de Emergência

O Plano de Emergência Local é um instrumento normativo elaborado e implementado pelo titular da instalação nuclear, aplicável às áreas sob sua jurisdição. Seu objetivo é estabelecer medidas previamente definidas para proteger pessoas, instalações e o meio ambiente em caso de acidente radiológico ou situação de emergência nuclear (CNEN, 2021).

O Plano de Emergência Local do CEA (PEL/CEA), elaborado pelo CTMSP, constitui o principal plano interno de resposta a situações de emergência no complexo. Seu propósito é atender às necessidades de segurança das atividades, das edificações e das instalações nucleares do CEA e, particularmente, dos seus trabalhadores, da população e do meio ambiente circunvizinho, em caso de ocorrência

de situações de emergência. A Figura 20, apresentada na seção anterior, ilustra a disposição física dessas áreas no interior do complexo (PEL/CTMSP-CEA, 2016).

Para fins operacionais, o CEA encontra-se dividido em Unidades de Planejamento de Emergência (UPE), como, por exemplo, as instalações associadas ao ciclo do combustível nuclear. Cada UPE possui um PEL específico, interligado ao PEL/CEA, o qual define medidas e responsabilidades com base nos riscos e cenários particulares de cada instalação (PEL/CTMSP-CEA, 2016).

A estrutura do PEL/CEA contempla diferentes categorias de emergência, definidas com base em critérios técnicos previamente estabelecidos. Segundo as diretrizes nacionais, essas categorias incluem quatro níveis de gravidade: Evento Não Usual⁶², Alerta⁶³, Emergência de Área⁶⁴ e Emergência Geral⁶⁵. A categorização depende da natureza do incidente, da localização da instalação, das substâncias envolvidas e da gravidade potencial do evento, e tem por objetivo orientar a escalada da resposta e o acionamento proporcional dos recursos (CNEN, 2021).

Resumidamente, uma emergência de pequeno porte no CEA, restrita à UPE afetada, exige resposta imediata sob responsabilidade do Coordenador de Emergência Local (CEL/UPE), a partir do Centro de Coordenação Local da Emergência (CCLE). Nessas situações, atua o Grupo de Emergência Local da UPE (GEL/UPE), composto por equipes de resposta multidisciplinares treinadas para realizar ações iniciais de contenção, estabilização e proteção. Também participam da resposta a Equipe de Proteção Radiológica (EPR) e a equipe médica de emergência, ambas preparadas para atuar em sinergia com as demais estruturas. O PEL/CEA conta, ainda, com subsistemas técnicos de apoio, como a torre meteorológica do CEA, a seção de aquisição de dados meteorológicos e o Laboratório Radioecológico (LARE), responsável pela análise de amostras ambientais e pela emissão de dados críticos para a avaliação da extensão da contaminação durante o incidente (PEL/CTMSP-CEA, 2016).

⁶² Situação que se configura no instante em que se verificar uma condição inicial que indique possível degradação no nível de segurança na instalação (CNEN, 2021).

⁶³ Condição inicial que indique a real ou provável degradação no nível de segurança (CNEN, 2021).

⁶⁴ Nível de emergência que requer ações de proteção no local e nas imediações da instalação (CNEN, 2021).

⁶⁵ Situação que envolve uma degradação substancial iminente ou real do núcleo do reator com a perda potencial da integridade da contenção (CNEN, 2021).

Por outro lado, quando a emergência é caracterizada por eventos com potencial de liberação radiológica para o ambiente externo à instalação, ela é classificada como uma emergência geral. Nesse caso, embora o funcionamento do CCLE instalado em cada UPE continue sendo fundamental para a tomada de decisões imediatas, com base nos dados técnicos e operacionais disponíveis, a coordenação geral da resposta passa a ser exercida pelo Coordenador-Geral do Plano de Emergência (COGEPE), que atua a partir do Centro de Coordenação Geral de Emergência (CCGE), responsável pelo comando e controle da resposta em todo o complexo (PEL/CTMSP-CEA, 2016).

O 1º BtlProtDefNBQR atua como força de apoio direto ao COGEPE e ao GEL/UPE, sendo responsável, entre outras atribuições, pelo emprego das equipes de isolamento, reconhecimento e descontaminação NBQR. Sua atuação abrange o resgate de vítimas, a triagem radiológica, o isolamento de áreas afetadas e o reforço à segurança física das instalações. Uma vez acionado o PEL de uma UPE, o batalhão opera com equipes especializadas em funções previamente designadas, em plena coordenação com as demais estruturas dos planos de resposta (1º BtlProtDefNBQR, 2025; PEL/CTMSP-CEA, 2016).

A estrutura normativa do PEL-CEA fundamenta-se nas normas do órgão regulador nacional, nas recomendações da IAEA e nas diretrizes do PNASEN. Embora seu foco principal esteja voltado à atuação das equipes orgânicas de resposta dentro do complexo, sua concepção deve manter plena compatibilidade com o modelo de resposta escalonada estabelecido em nível nacional. Esse modelo organiza a resposta a emergências nucleares em três níveis progressivos, local, regional e nacional, favorecendo a integração coordenada entre os operadores das instalações, as autoridades públicas e os órgãos integrantes do SIPRON, especialmente em cenários que demandem articulação multissetorial (CNEN, 2024; PEL/CTMSP-CEA, 2016).

Na condição de operador nuclear e integrante do SIPRON, cabe ao CTMSP a responsabilidade por elaborar os planos de emergência, designar representantes institucionais para os colegiados e assegurar a execução dos protocolos de resposta, inclusive em articulação com autoridades civis sempre que necessário. O PNASEN reforça esse papel ao estabelecer que o operador nuclear deve acionar imediatamente a resposta local diante de qualquer evento de emergência, além de notificar o SIPRON

nos casos em que houver necessidade de ampliação da resposta. O plano também prevê mecanismos específicos de notificação, ativação e solicitação de apoio técnico, logístico ou militar, o que torna essencial que a estrutura do PEL/CEA esteja plenamente compatível com esse modelo multissetorial de coordenação (CTMSP, 2025; GSI/PR, 2022). O CTMSP atua, assim, como ator central na condução da resposta a emergências no CEA, apoiado por suas OMs subordinadas e articulado com os demais órgãos do SIPRON (CTMSP, 2025).

4.2.3 O Emprego de SRPs Aéreos e Terrestres no CEA: Vivência do Autor

Boas práticas internacionais demonstram que os SRPs têm sido empregados com êxito no monitoramento técnico de instalações nucleares, sobretudo em áreas de difícil acesso ou com riscos radiológicos elevados. Revisão publicada na revista *Nuclear Engineering and Design* por Ardiny et al. (2024) destaca que essas aplicações incluem medições remotas de radiação, detecção de falhas estruturais e coleta de dados ambientais em ambientes confinados, evidenciando o potencial desses sistemas para ampliar a segurança operacional e a eficácia da resposta em cenários de emergência nuclear (Ardiny et al., 2024).

Entre 2019 e 2020, período em que o autor exerceu as funções de Assessor de Segurança do CTMSP e de Comandante do 1º BtlProtDefNBQR, observou-se o emprego de SRPs aéreos e terrestres no CEA em determinadas atividades. Essas plataformas foram utilizadas de forma coordenada entre o Batalhão e o CTMSP, tanto em ações vinculadas ao SisPF quanto em apoio direto a emergências nucleares.

Por outro lado, embora ainda em estágio inicial, o emprego em emergências nucleares foi reduzido por requerer adaptações às limitações tecnológicas e às particularidades operacionais do complexo vigentes naquele momento. Dessa forma, a experiência acumulada permitiu agrupar essas aplicações em dois eixos complementares: apoio às ações de segurança física; e suporte às atividades previstas nos PELs das UPEs.

No que se refere ao apoio à segurança física, os SRPs aéreos foram empregados, em complemento ao PSO-CEA e aos PPFs das UPEs, principalmente

em missões de patrulhamento e reconhecimento. O objetivo era ampliar a cobertura visual da área vigiada e oferecer suporte tático às Forças de Segurança nas áreas protegidas. As plataformas aéreas disponíveis dispunham de capacidades básicas de voo estabilizado e de câmeras ópticas, permitindo, em alguns casos, sobrevoos noturnos. Esses sistemas permitiam às equipes de resposta do CEA obter consciência situacional em tempo real e antecipar os deslocamentos terrestres para avaliar potenciais ameaças. A eficácia desse emprego era adequada, considerando a extensa área vigiada do CEA, marcada por vegetação e estradas irregulares.

Complementarmente, no campo da neutralização de ameaças específicas, o 1º BtlProtDefNBQR dispunha de um SRP terrestre operado pela Seção de Desativação de Artefatos Explosivos (SeçDAE) utilizado, prioritariamente, em eventos que envolviam artefatos explosivos. Além de ampliar a segurança dos integrantes das equipes de resposta, esse equipamento possibilitava o manuseio remoto de objetos perigosos, em conformidade com os protocolos de resposta a incidentes do SisPF estabelecidos pelo CTMSP e a missão do batalhão (1º BtlProtDefNBQR, 2025).

No tocante ao apoio ao PEL e à resposta a emergências nucleares, o emprego de SRPs também se mostrou viável, embora condicionado às limitações tecnológicas existentes à época. O robô terrestre foi utilizado em adestramentos do 1º BtlProtDefNBQR para reconhecimento de áreas potencialmente contaminadas, especialmente em cenários simulados de incidente NBQR. Mediante a adaptação de detectores radiológicos, orgânicos da própria OM, essa plataforma permitia realizar inspeções visuais, atividades de dosimetria⁶⁶ e triagem remota de objetos suspeitos. Essas ações ocorriam antes da entrada das equipes especializadas do 1º BtlProtDefNBQR e do CTMSP, contribuindo para preservar a integridade física dos respondedores diante da incerteza quanto à presença de contaminantes ou de níveis elevados de radiação ionizante.

Adicionalmente, o robô terrestre mantinha plena capacidade de emprego em cenários NBQR envolvendo artefatos explosivos, reforçando a prontidão da OM para eventos deliberados com potencial de deflagrar emergência nuclear. Embora o uso tenha se concentrado em exercícios e simulações, a experiência acumulada mostrou alinhamento aos princípios da IAEA e às recomendações apresentadas no Capítulo

⁶⁶ Medição direta ou indireta de grandezas radiológicas (CNEN, 2021).

3, sobretudo na redução da exposição de pessoal em áreas de risco. Registre-se, porém, que, quanto ao escopo e à maturidade, o SRP terrestre foi empregado em escala e diversidade inferiores às da experiência japonesa, conforme detalhado na Tabela 2 do Capítulo 3 (SRPs terrestres utilizados em Fukushima).

Ainda que os SRPs não fossem expressamente mencionados nos textos do PSO/CEA, dos PPFs e dos PELs das instalações nucleares do CEA, seu emprego já se consolidava como uma prática operacional efetiva. Essa utilização encontrava respaldo nas recomendações da IAEA, especialmente no tocante à incorporação de tecnologias emergentes aplicadas em situações de emergência. Alinhado a esse referencial internacional, o uso de SRPs no CEA passou a representar não apenas um reforço técnico às estruturas existentes, mas também um vetor de fortalecimento da cultura de segurança física. Ao permitir a redução da exposição humana e ampliar a capacidade de atuação em ambientes potencialmente hostis, essas plataformas contribuíam para a mitigação de riscos operacionais e o aumento da efetividade da resposta. Além disso, essa prática, ainda que pioneira no setor nuclear brasileiro, não apresentava plena aderência às lições aprendidas internacionalmente, com destaque para o caso de Fukushima Daiichi, conforme será explorado no Capítulo 5.

4.2.4 Procedimentos e Treinamentos Implementados

Durante o período em análise, foram conduzidos, no CEA, diversos procedimentos e treinamentos voltados à inicial consolidação do emprego de SRPs em apoio à segurança física e à resposta a emergências nucleares. Ainda que incipientes e restritos a cenários simulados, essas atividades permitiram integrar progressivamente as plataformas remotamente operadas à rotina técnico-operacional do 1º BtlProtDefNBQR, em estreita coordenação com a assessoria de segurança do CTMSP. Essa iniciativa refletia, de forma prática, os fundamentos normativos e operacionais discutidos nos Capítulos 2 e 3 desta tese, ao promover soluções tecnológicas voltadas à redução da exposição das equipes de resposta.

No campo da segurança física nuclear, os SRPs aéreos foram empregados no contexto do SisPF, especialmente em simulações de resposta a intrusões perimetrais

ou ações de sabotagem nas áreas protegidas. Nesses exercícios, as plataformas aéreas eram acionadas para realizar patrulhamento aéreo em apoio às equipes terrestres, ampliando o campo visual das forças de segurança, particularmente em perímetros extensos como o do CEA. Esse emprego complementava os procedimentos previstos no PSO/CEA e nos PPFs das instalações nucleares, contribuindo para as funções de vigilância, detecção e resposta em tempo real.

Ainda no escopo da segurança física, o uso de robô terrestre em cenários simulados envolvendo artefatos explosivos firmou-se como medida estratégica. Os treinamentos buscavam reproduzir eventos deliberados com potencial de comprometer a integridade de instalações sensíveis, como a USEXA, o LEI, o LABMAT e o protótipo do sistema de propulsão nuclear (LABGENE), mediante a liberação de contaminantes químicos ou radiológicos. Nessas ocasiões, o robô era empregado na verificação remota de objetos suspeitos e na simulação de neutralização de artefatos, evitando a exposição direta dos operadores, em conformidade com as lições da AIEA sobre Fukushima (IAEA, 2015b)

No que tange à resposta a emergências nucleares, o emprego de SRPs aéreos mostrou-se limitado, em virtude da ausência de sensores NBQR integrados e da impossibilidade de operação em ambientes confinados. Em contrapartida, o SRP terrestre foi utilizado em exercícios de simulação de eventos NBQR, conduzidos sob a supervisão do Oficial de Operações do 1º BtlProtDefNBQR, em apoio às equipes de reconhecimento e resgate. Nessas situações, o robô terrestre realizava inspeções visuais preliminares, mapeamento técnico de áreas com suspeita de contaminação e dosimetria remota. Para tanto, sensores de radiação foram adaptados aos sistemas já existentes, permitindo a estimativa do nível de dose antes do ingresso das equipes humanas no local afetado. Essa prática resultou em ganhos operacionais relevantes, ao reduzir os riscos às equipes de resposta e qualificar a tomada de decisão em tempo real no interior das UPEs.

Além dos aspectos operacionais, o uso dos SRPs demandou o desenvolvimento de rotinas internas de capacitação e experimentação. À época, ainda não havia doutrina formalizada para o treinamento sistemático de operadores dessas plataformas em contextos de emergência nuclear. Assim, os procedimentos foram conduzidos com base em iniciativas de militares do 1º BtlProtDefNBQR, que, apoiados em suas experiências prévias, acoplaram sensores radiológicos aos equipamentos

disponíveis e adaptaram os protocolos às especificidades locais. Apesar do avanço representado por essas iniciativas, a inexistência de uma estrutura institucional consolidada impunha limites à regularidade, complexidade e abrangência dos adestramentos.

Em síntese, os procedimentos e treinamentos realizados, entre 2019 e 2020, permitiram ao CTMSP e ao 1º BtlProtDefNBQR testar, de forma controlada e adaptada à realidade do período, diferentes cenários operacionais envolvendo o emprego de SRPs. Essas experiências proporcionaram aprendizados importantes no plano técnico, ao possibilitar a adaptação de sensores e a validação de funcionalidades em ambiente real e, no plano institucional, ao impulsionar a integração progressiva dessas tecnologias às rotinas de segurança física e resposta a emergências no CEA. Por outro lado, também revelaram lacunas doutrinárias, limitações estruturais e desafios operacionais que influenciaram diretamente o grau de maturidade dessa capacidade à época, conforme será discutido na seção seguinte.

4.2.5 Desafios Enfrentados e Soluções Visualizadas

A experiência acumulada pelo autor entre 2019 e 2020 evidenciou um conjunto relevante de desafios tecnológicos, doutrinários, logísticos e operacionais relacionados ao emprego de SRPs no contexto do CEA. Parte desses entraves decorreu da fase, ainda em desenvolvimento, da integração dos SRPs às estruturas dos PELs e PPFs das instalações nucleares, enquanto outros refletiam limitações tecnológicas e normativas que, à época, ainda não haviam sido plenamente superadas.

No plano tecnológico, observou-se a ausência de sensores embarcados nos SRPs aéreos com capacidade para realizar medições radiológicas em tempo real. Tais plataformas não dispunham, naquele momento, de recursos que permitissem a coleta remota de dados ambientais em áreas potencialmente contaminadas, internas ou externas. Essa limitação restringia seu emprego a atividades vinculadas exclusivamente ao SisPF, sem capacidade autônoma de atuação em emergências nucleares. Além disso, não havia integração automatizada com os principais sistemas

de comando e controle do CEA, como o SIVCA, o COS, o CCLE e o CCGE, o que contrastava com os padrões de interoperabilidade adotados por países que enfrentaram eventos reais, como demonstrado no Capítulo 3.

Do ponto de vista doutrinário e institucional, o emprego de SRPs ainda não estava explicitamente previsto nos documentos operacionais em vigor, como o PSO/CEA, os PPFs e os PELs das UPEs. A ausência de diretrizes formais sobre acionamento, coordenação e integração desses meios impunha dificuldades à padronização de procedimentos, o que resultava em respostas adaptadas, caso a caso, desenvolvidas na ausência de protocolos integrados ao planejamento institucional.

Complementarmente, a literatura técnica internacional, como destacado pelo Comitê Científico das Nações Unidas sobre os Efeitos da Radiação Atômica (*United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation - UNSCEAR*), enfatiza a necessidade de programas estruturados de capacitação para operadores de SRPs empregados em ambientes radiológicos. Tais programas devem abranger desde o manuseio seguro dos equipamentos até os protocolos de integração com os sistemas de resposta a emergências, com o objetivo de reduzir a exposição humana e aprimorar a eficácia operacional (UNSCEAR, 2020).

No caso do 1º BtlProtDefNBQR, foi identificada a necessidade de ampliação do efetivo de operadores qualificados, para SRPs aéreos e terrestres, de modo a viabilizar o emprego simultâneo em mais de uma instalação, ou em situações híbridas envolvendo evento de segurança física e emergência nuclear. Além disso, os dados gerados pelas plataformas, incluindo imagens e informações técnicas, ainda não estavam integrados aos sistemas do SIVCA e do COS, limitando a consciência situacional dos decisores durante os episódios simulados de emergências envolvendo segurança física e segurança nuclear.

Por fim, do ponto de vista logístico e tecnológico, verificou-se que o número de SRPs aéreos e terrestres disponível à época era limitado e seu uso concentrava-se, majoritariamente, no apoio à segurança física nuclear. Embora o emprego de SRPs no CEA constituísse um diferencial no contexto nacional, o estágio então alcançado contrastava com o observado no Japão após Fukushima, onde se integraram às plataformas sensores e sistemas avançados, câmeras compton, sensores ópticos de

alta resolução, LIDAR, impact-echo e navegação em ambientes confinados, entre outros. Assim, ainda que promissora, a experiência brasileira à época indicava potencial de expansão das capacidades de SRPs para situações de emergência nuclear.

Apesar dos desafios identificados, o período de 2019 a 2020 foi marcado pela implementação de soluções práticas relevantes, fruto da cooperação direta entre o CTMSP e o 1º BtlProtDefNBQR. Essas iniciativas, ainda em fase embrionária, evidenciaram um amadurecimento institucional progressivo, alinhado às boas práticas internacionais, e contribuíram para o fortalecimento da cultura de segurança nuclear no âmbito do PNM. Entre os principais avanços, destaca-se a elaboração de procedimentos operacionais internos que viabilizaram a integração dos SRPs ao fluxo de resposta das forças de segurança do CEA. Tais procedimentos permitiram o emprego coordenado dessas plataformas tanto em ações preventivas quanto em simulações de incidentes, especialmente no contexto do SisPF, conferindo maior autonomia e agilidade às equipes de resposta do 1º BtlProtDefNBQR.

Além disso, embora o ciclo de adestramentos já estivesse institucionalizado no CEA, observou-se, durante o período analisado, uma ampliação qualitativa dos exercícios conjuntos conduzidos pelo CTMSP e pelo 1º BtlProtDefNBQR. Simulações envolvendo cenários de sabotagem e incidentes NBQR passaram a incorporar o uso de SRPs, favorecendo a familiarização gradual das equipes com essas tecnologias e fortalecendo a interoperabilidade tática nas UPEs. Como desdobramento dessas atividades, foram realizados testes com sensores radiológicos adaptados ao robô terrestre, permitindo sua atuação em áreas protegidas com risco de contaminação. Essa adaptação técnica viabilizou a coleta remota de dados críticos nas fases iniciais de uma emergência, contribuindo para a preservação da integridade física das equipes de resposta e para o dimensionamento da resposta institucional. Tais iniciativas, mesmo que restritas a exercícios e simulações, demonstraram o potencial dos SRPs para inserção em rotinas multissetoriais do CTMSP e do 1º BtlProtDefNBQR, incluindo equipes de isolamento, reconhecimento, descontaminação, proteção radiológica e apoio médico e logístico.

Embora o PNRIESFN não mencione explicitamente a adoção de tecnologias emergentes, o documento é enfático quanto à importância de o Brasil seguir as boas práticas internacionais de proteção física nuclear, em consonância com os referenciais

estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) e, especialmente, pela IAEA. Nesse escopo, a norma *IAEA-INSS nº 13* recomenda que os sistemas de proteção física nuclear sejam concebidos com base em tecnologias disponíveis e passíveis de atualização diante de novas ameaças e inovações. Tal diretriz estabelece um fundamento normativo para a incorporação de tecnologias emergentes, como os SRPs, que se configuram como ferramentas promissoras para ampliar a capacidade de detecção, avaliação e resposta em ambientes hostis ou inacessíveis (IAEA, 2011a; GSI/PR, 2020). Portanto, a ausência de dispositivos dessa natureza nas plataformas remotas utilizadas no CEA representa não apenas uma limitação operacional, mas uma oportunidade concreta de modernização institucional e tecnológica do regime nacional de proteção física.

Por outro lado, ainda que o PNASen não mencione explicitamente os SRPs, sua estrutura normativa é compatível com o uso de tecnologias emergentes em ações de resposta, especialmente na superação de obstáculos operacionais em ambientes adversos ou inacessíveis. O documento recomenda que os planos institucionais contemplem equipamentos, procedimentos e treinamentos compatíveis com os riscos identificados, podendo incluir recursos de sensoriamento remoto, mobilidade autônoma e transmissão de dados em tempo real. Entretanto, observa-se que tais tecnologias ainda não estão formalmente integradas aos fluxos operacionais previstos nos planos de emergência do CEA, o que sugere uma oportunidade de reflexão e aprimoramento sistêmico e normativo, das capacidades de resposta no PNM (GSI/PR, 2022).

Importa destacar que as constatações aqui descritas foram observadas em um contexto no qual o Brasil ainda não vivenciou um cenário grave de emergência nuclear envolvendo o CEA. Essa realidade reforça a necessidade de manutenção de uma cultura permanente de preparação, aprendizado e inovação, tomando como referência boas práticas internacionais, tais como a experiência japonesa após Fukushima, que impulsionou mudanças doutrinárias, tecnológicas e operacionais por meio do uso intensivo de SRPs.

Como observado no Capítulo 3, o Japão adotou uma abordagem multidimensional, empregando SRPs aéreos, terrestres e subaquáticos dotados de sensores de alta precisão em mapeamento, inspeções, monitoramento ambiental e apoio ao descomissionamento. Paralelamente, desconstruiu o mito da segurança

previamente existente e institucionalizou a doutrina de preparação para o inesperado, incorporando planejamento redundante, cenários extremos e integração rotineira de novas capacidades. Em contraste, a vivência do autor registrou um estágio, ainda em desenvolvimento, com recursos limitados aplicados de forma pontual.

Nesse contexto, os desafios enfrentados e as soluções inicialmente implementadas, entre 2019 e 2020, revelaram não apenas as limitações estruturais então existentes, mas também o potencial de aprimoramento do emprego de SRPs no CEA, sugerindo a necessidade de avançar na consolidação doutrinária, tecnológica e institucional dessas capacidades.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, ilustrou-se, a partir da vivência institucional do autor, o emprego de SRPs em situações de emergência no CEA, entre 2019 e 2020. A análise concentrou-se na atuação conjunta do CTMSP e do 1º BtlProtDefNBQR, evidenciando os usos operacionais e as condições institucionais sob as quais essas plataformas foram utilizadas. Foram abordados aspectos como a integração dos SRPs ao SisPF, sua participação em simulações vinculadas aos PELs, os tipos de plataformas então disponíveis, os desafios enfrentados e as soluções institucionais implementadas, além dos treinamentos conduzidos no período analisado. A descrição desses elementos permitiu evidenciar o caráter embrionário, porém promissor, do emprego dos SRPs no âmbito do PNM.

Embora o escopo tenha se limitado à sistematização da experiência direta do autor, o conjunto de evidências reunido nesta etapa indica a possibilidade de avanços doutrinários, tecnológicos e estruturais no contexto do CEA. A análise também demonstrou que, apesar das restrições do período, foi possível integrar soluções práticas relevantes e alinhar parte das ações observadas às recomendações da IAEA e às experiências internacionais exitosas, como a japonesa. A partir desse panorama, é possível oferecer subsídios relevantes para reflexões propositivas, capazes de orientar o aprimoramento institucional do uso de SRPs no âmbito do PNM, com foco na ampliação de capacidades diante de cenários de emergência nuclear.

5 POSSIBILIDADES DE EMPREGO DE SRPs EM EMERGÊNCIAS NO PNM

Neste capítulo objetiva-se sistematizar as oportunidades de aprimoramento no emprego de SRPs em situações de emergência nuclear no âmbito do PNM, com base na análise de contraste entre as capacidades implementadas pelo Japão após o acidente nuclear de Fukushima Daiichi (Capítulo 3) e a experiência operacional do autor no CEA, entre 2019 e 2020 (Capítulo 4). Conforme evidenciado nos capítulos anteriores, o Japão transformou a tragédia de Fukushima em vetor de inovação tecnológica, promovendo reformas estruturais, revisões normativas e a consolidação de uma cultura de segurança voltada à redução da exposição humana e à incorporação de tecnologias emergentes, entre as quais se destacam os SRPs, às ações de resposta a emergências nucleares.

Por outro lado, observa-se, no contexto brasileiro, um hiato na sistematização e institucionalização do uso de SRPs no setor nuclear, especialmente no PNM, o que sugere reflexão acerca de eventuais fragilidades existentes e potenciais caminhos de evolução. Nesse sentido, neste capítulo busca-se cumprir o quarto objetivo intermediário da pesquisa, ao identificar possíveis lacunas operacionais e novas perspectivas de emprego de SRPs nas instalações nucleares do CEA. A análise proposta está diretamente vinculada ao propósito do estudo, que consiste em apontar oportunidades de aperfeiçoamento da resposta em situações de emergência nuclear, no âmbito do PNM, inspiradas nas capacidades desenvolvidas pelo Japão após o acidente de Fukushima Daiichi. De modo abrangente, o conteúdo do capítulo contribui para o alcance do objetivo geral da tese, ao possibilitar a reflexão sobre o uso estratégico dos SRPs, com base na experiência japonesa. Com esse enquadramento, as seções seguintes apresentarão um diagnóstico das capacidades observadas e das lacunas identificadas, seguido de proposições reflexivas voltadas ao aprimoramento normativo, técnico e institucional do emprego de SRPs no CEA.

5.1 DIAGNÓSTICO: LIÇÕES DE FUKUSHIMA E REALIDADE VIVENCIADA

A análise das lacunas e das oportunidades de evolução do PNM quanto ao uso de SRPs exige a compreensão integrada das capacidades desenvolvidas pelo Japão

após o acidente de Fukushima Daiichi, da realidade operacional verificada no CEA e do arcabouço normativo vigente no Brasil. Com base nesse tripé analítico, esta seção apresenta um diagnóstico qualitativo estruturado em três vertentes complementares: as capacidades implementadas com SRPs no Japão; os desafios identificados no ambiente do CEA; e as lacunas que abrem espaço a reflexões para o aprimoramento do emprego dessas tecnologias no PNM.

5.1.1 Capacidades Estruturadas no Japão

Após o acidente de Fukushima Daiichi, em 2011, o Japão promoveu uma profunda transformação em sua abordagem institucional diante de emergências nucleares. O uso de SRPs, que no início foi adotado de forma emergencial e improvisada, passou a integrar formalmente os planos de resposta, os protocolos de descomissionamento e os sistemas de comando e controle das principais entidades do setor nuclear japonês (IAEA, 2023a).

Essa evolução foi sustentada por um amplo processo de revisão regulatória e organizacional pós-2011. A NRA fortaleceu requisitos e diretrizes de segurança. A TEPCO e JAEA passaram a incorporar, em seus planos de contingência e no planejamento de descomissionamento, a execução remota de tarefas críticas por SRPs aéreos, terrestres e subaquáticos (reconhecimento, monitoramento radiológico, amostragem e inspeções). Em conformidade com as lições da IAEA sobre Fukushima, tais medidas priorizam a proteção dos trabalhadores e a otimização de doses, reduzindo a permanência humana em áreas de risco e preservando a população e o meio ambiente ao longo das fases de resposta, estabilização e descomissionamento (IAEA, 2015b; NRA, 2017; TEPCO, 2017a).

Paralelamente, houve um avanço expressivo na capacitação tecnológica e na ampliação das funcionalidades operacionais dos SRPs. Foram desenvolvidos e empregados diversos modelos de SRPs aéreos, terrestres e subaquáticos, capazes de realizar mapeamento radiológico, inspeções estruturais, transporte leve, reconhecimento visual e intervenções técnicas em áreas com níveis críticos de radiação, conforme detalhado no Capítulo 3 (Sato et al., 2020).

Essas iniciativas foram acompanhadas pelo amadurecimento da cultura de segurança no setor nuclear japonês, marcada pelo fortalecimento da coordenação entre órgãos governamentais, centros de pesquisa e empresas privadas. Essa integração interinstitucional viabilizou respostas mais rápidas, flexíveis e seguras, com base em dados técnicos obtidos remotamente e transmitidos em tempo real (IAEA, 2023a; NRA, 2017).

Como resultado desse processo, os SRPs deixaram de ser apenas uma solução emergencial e passaram a ocupar posição estratégica na doutrina japonesa de resposta a emergências nucleares. Além de seu uso em situações críticas, essas plataformas passaram a integrar rotinas de inspeção, monitoramento ambiental e gestão contínua de riscos, consolidando-se como ferramentas de alta performance operacional.

5.1.2 Lacunas Identificadas no Programa Nuclear da Marinha

Em contraste com o modelo japonês, a realidade brasileira, particularmente no contexto do PNM, apresentava desafios relevantes quanto à sistematização e à institucionalização do uso de SRPs em situações de emergência nuclear. Com base na experiência prática do autor no CEA e na análise normativa consolidada no Capítulo 2, é possível identificar limitações que comprometem a efetividade do emprego dessas tecnologias.

À época, os PELs e PPFs das UPEs não previam o uso formalizado de SRPs como recurso institucional nas ações de resposta. Ainda que tenham sido realizados adestramentos pontuais com essas plataformas, especialmente no âmbito do 1º BtlProtDefNBQR, essas atividades não estavam amparadas por doutrina ou normas específicas, o que limitava sua padronização e restringia a replicação em outras áreas estratégicas do PNM. Essa carência doutrinária também dificultava a antecipação a cenários de ruptura, na medida em que a ausência de diretrizes claras comprometia a prontidão operacional em contextos críticos, sobretudo naqueles que demandam atuação imediata em ambientes contaminados ou de acesso restrito.

Outro ponto observado diz respeito à formação especializada dos operadores. Naquele período, inexistia uma capacitação formal ou certificação específica voltada aos operadores de SRPs em emergências nucleares, o que poderia comprometer tanto a eficácia quanto a segurança das ações em cenários reais envolvendo riscos radiológicos ou químicos. Além disso, do ponto de vista tecnológico, observava-se uma infraestrutura restrita, tanto em quantidade de plataformas disponíveis quanto em termos de desempenho operacional. Havia restrições associadas à autonomia dos equipamentos, à escassez de sensores embarcados especializados como câmeras compton, sensores ópticos de alta resolução, sistemas LIDAR, *impact-echo* e recursos de navegação em ambientes confinados, bem como a limitada capacidade de transmissão de dados em tempo real para o COS, o CCLE e o CCGE. Essas deficiências reduziam não apenas o escopo das aplicações possíveis, como também a velocidade e a qualidade da tomada de decisão por parte dos responsáveis pela resposta.

Essas fragilidades, embora parcialmente compensadas por soluções visualizadas à época, indicavam que o emprego de SRPs no âmbito do PNM ainda carecia de consolidação institucional. Ao mesmo tempo, elas sugerem um campo fértil para reflexão sobre possíveis aprimoramentos nos planos normativo, doutrinário, técnico e logístico, com vistas à construção de uma capacidade robusta e aderente às melhores práticas internacionais de segurança nuclear.

5.1.3 Potenciais de Evolução no Programa Nuclear da Marinha

Apesar das limitações identificadas nos capítulos anteriores, o cenário brasileiro oferece fundamentos promissores para a evolução do uso de SRPs no setor nuclear, especialmente no contexto do PNM. A convergência entre diretrizes normativas internacionais, capacidades institucionais já existentes e aprendizados práticos acumulados no CEA permite vislumbrar um caminho viável de transformação, desde que haja mobilização doutrinária, investimento estratégico e planejamento estruturado.

Do ponto de vista normativo, as normas nacionais, em especial os planos nacionais PNASN e PRIESFN, já reconhecem a importância do emprego de tecnologias emergentes em situações de emergência nuclear e de segurança física. Esses documentos estão alinhados às recomendações da IAEA, especialmente no que tange à redução da exposição das equipes de resposta. Contudo, essa compatibilidade conceitual ainda não se traduziu em diretrizes específicas, protocolos operacionais padronizados ou doutrina consolidada no PNM. A ausência de tais instrumentos normativos pode afetar a capacidade de antecipação a cenários de ruptura, como aqueles enfrentados pelo Japão no acidente nuclear de Fukushima Daiichi.

No plano institucional, o CTMSP e o 1º BtlProtDefNBQR dispõem de efetivos capacitados e acumulam experiências operacionais no emprego de SRPs, sobretudo em apoio ao SisPF. Entretanto, as iniciativas conduzidas entre 2019 e 2020 ocorreram de forma pontual e não sistematizada, apresentando limitações em termos de padronização de procedimentos, replicabilidade de soluções e articulação com os Centros Coordenadores Locais e Gerais de Emergência (CCLE e CCGE), responsáveis pela gestão integrada da resposta a eventos adversos em instalações nucleares.

As ações conduzidas no CEA demonstraram que, embora os SRPs tenham sido utilizados em tarefas de vigilância em áreas vigiadas e protegidas e na desativação de artefatos explosivos, seu emprego em apoio direto à resposta a emergências nucleares permanecia incipiente. A adaptação de plataformas terrestres, ainda que bem-sucedida em testes pontuais, revelou restrições quanto à quantidade de equipamentos disponíveis, à sua capacidade de atuação simultânea em eventos híbridos (segurança física e emergência nuclear) e à versatilidade operacional. Em contraste, as Tabelas 1 e 2 do Capítulo 3 ilustram como o Japão, após o acidente de Fukushima Daiichi, incorporou uma ampla gama de SRPs aéreos e terrestres, com funcionalidades especializadas para mapeamento radiológico, reconhecimento tático e manipulação em ambientes contaminados. Portanto, a ausência de capacidades equivalentes no contexto do PNM indica a possibilidade de ampliação tecnológica e doutrinária no emprego dessas plataformas.

No caso dos SRPs aéreos, sua utilização permaneceu limitada a missões no escopo do SisPF, sobretudo em razão da carência de sensores embarcados

especializados, como espectrômetros γ (gama), câmeras compton, sistemas LIDAR e sensores ópticos de alta resolução, o que inviabilizou sua atuação em áreas contaminadas, confinadas ou de difícil acesso. Esse cenário se estendia às demais categorias de SRPs, pois, à época, não havia capacidade instalada para o emprego sistemático de plataformas aéreas, terrestres ou subaquáticas em missões de resposta, como mapeamento radiológico, inspeções estruturais, monitoramento ambiental, apoio ao descomissionamento, coleta de dados em ambientes confinados ou execução de funções auxiliares de comunicação e transporte.

Ainda que tenham sido realizadas adaptações pontuais de sensores radiológicos no modelo terrestre disponível no 1º BtlProtDefNBQR, tais iniciativas permaneceram restritas a experimentações localizadas, sem respaldo em protocolos operacionais consolidados ou plena integração com os sistemas de comando e controle do CEA. O panorama identificado entre 2019 e 2020 revelou, assim, um estágio ainda em desenvolvimento sobre o emprego técnico e tático dos SRPs, reforçando a necessidade de reflexão institucional para consolidar uma doutrina própria, articulada com os referenciais normativos e as exigências operacionais do PNM.

Em complemento, a inexistência de plataformas subaquáticas adaptadas indica outra lacuna, sobretudo diante das especificidades operacionais do PROSUB e do PNM como um todo. A possibilidade futura de incidentes envolvendo tanque de contenção, sistema de resfriamento e PNE torna relevante refletir sobre a incorporação de SRPs subaquáticos no portfólio de resposta da MB.

Adicionalmente, verificou-se deficiência na integração entre os dados captados pelos SRPs e os centros de comando e controle responsáveis pelas ações emergenciais. A ausência de comunicação dos SRPs com o COS, o CCLE e o CCGE pode dificultar a avaliação, em tempo real, pelos decisores de informações críticas e prejudicar a tomada de decisão.

Diante do exposto, cabe destacar que o PNM dispõe de um conjunto de elementos estruturantes que, se devidamente articulados, permitiriam a construção de uma doutrina própria de emprego de SRPs em situações de emergência nuclear no CEA. Essa doutrina, ao considerar as peculiaridades do ambiente militar e os referenciais internacionais, poderia consolidar o uso dos SRPs como ativos

estratégicos permanentes no ciclo de vida das instalações nucleares sob responsabilidade da MB.

5.2 POSSIBILIDADES DE APRIMORAMENTO DO EMPREGO DE SRPs NO PNM

O diagnóstico apresentado na seção anterior evidenciou um conjunto de limitações operacionais, normativas, doutrinárias e logísticas no emprego de SRPs no PNM, em contraste com o modelo consolidado pelo Japão após o acidente de Fukushima Daiichi. A superação dessas fragilidades exige a adoção de medidas que promovam a institucionalização, a normatização, a capacitação sistêmica das equipes de resposta a emergências nucleares e, igualmente, o fortalecimento da infraestrutura logística por meio da aquisição de plataformas e sensores especializados. Esta seção apresenta propostas de aprimoramento distribuídas em cinco eixos prioritários: planejamento, capacitação, doutrina, articulação interinstitucional e logística operacional.

5.2.1 Planejamento: Inclusão de SRPs nos PELs e PPFs do CEA

A primeira proposta de aprimoramento é a revisão do planejamento para estruturar o emprego de SRPs nos PELs e PPFs do CEA. Essa integração normativa tem por objetivo ampliar a capacidade operacional do PNM diante de incidentes nucleares, radiológicos ou químicos e deve ser conduzida com base em critérios técnicos definidos conforme a natureza da instalação e o nível de risco associado.

Essa atualização dos planos deve contemplar a definição dos tipos de SRPs autorizados para operar em diferentes cenários de risco, incluindo plataformas aéreas e terrestres no CEA e, futuramente, meios subaquáticos, adequados a ambientes confinados e radiologicamente comprometidos no Complexo Naval de Itaguaí. Além disso, é necessário estabelecer as zonas de atuação previstas, que vão desde áreas externas sujeitas a monitoramento, como as ZPEs, até os setores internos de cada

UPE, abrangendo áreas vigiadas, protegidas, de acesso restrito e áreas vitais, as quais demandam maior vigilância e capacidade de resposta em tempo real.

A adequação normativa também exige uma reflexão prévia acompanhada de análise e especificação técnica dos sensores atualmente disponíveis no 1º BtlProtDefNBQR, que poderiam ser integrados (acoplados) aos SRPs existentes ou considerados na aquisição de novas plataformas com essas capacidades de fábrica, de acordo com os objetivos operacionais e os riscos estabelecidos para cada UPE.

Por fim, recomenda-se que os PELs e PPFs do CEA definam, de forma coordenada, os objetivos táticos esperados para cada tipo de SRP disponível, em alinhamento com as particularidades operacionais das distintas instalações nucleares do complexo, com destaque para a USEXA, o LEI, o LABMAT e o LABGENE, este último responsável pelo protótipo em terra do reator de propulsão naval. A formulação desses objetivos, levando em conta o tipo de missão, a natureza do ambiente operacional e os riscos associados poderá considerar tarefas como reconhecimento visual, dosimetria, transporte leve de materiais e mapeamento tridimensional de áreas comprometidas. Esses parâmetros poderiam ser incorporados aos anexos técnicos dos respectivos planos, viabilizando tanto a escolha criteriosa de sensores químicos e radiológicos quanto a integração plena dos SRPs aos centros de comando e controle do CEA, de modo a assegurar um acionamento padronizado, eficiente e tecnicamente fundamentado.

Essa proposta está em conformidade com as recomendações da IAEA, que preconizam a integração de tecnologias emergentes nos planos de resposta a emergências e cita a experiência japonesa como uma referência. Além disso, fortalece a autonomia da MB na condução de ações de contenção, estabilização e avaliação inicial de danos, reduzindo a exposição humana e ampliando a efetividade da resposta institucional.

5.2.2 Capacitação de Operadores de SRPs e Integração com o 1º BtlProtDefNBQR

O segundo eixo de aprimoramento concentra-se na formação continuada e certificação das equipes de resposta especializadas para o emprego de SRPs em

cenários de risco radiológico, químico ou nuclear. A proposta prevê avaliar e, se necessário, ajustar o processo formativo do especialista em NBQR, incorporando o operador de SRPs como competência específica na qualificação técnico-operacional dos militares envolvidos na resposta a emergências, especialmente no 1º BtlProtDefNBQR e no CTMSP.

Como primeira medida, propõe-se a criação de um módulo específico de instrução dentro dos cursos de Defesa NBQR, voltado à operação segura e eficiente de SRPs aéreos, terrestres e, posteriormente, subaquáticos em meios navais com propulsão nuclear. Esse módulo poderá contemplar aspectos normativos, doutrinários e operacionais, com ênfase nas particularidades das instalações do CEA e do CNI.

Além disso, recomenda-se a adoção de um processo estruturado de certificação técnica para os operadores de SRPs vinculados às equipes de resposta do 1º BtlProtDefNBQR e do CTMSP. Essa certificação contemplaria, entre outros conteúdos, a integração de sensores aos diferentes modelos de SRPs disponíveis; a adaptação das plataformas aos requisitos de segurança física e de segurança nuclear de cada UPE; o reconhecimento das especificidades operacionais de cada instalação do CEA; bem como o domínio dos protocolos de segurança e das técnicas de aquisição e análise de dados gerados pelas plataformas remotas.

Além da formação teórica e técnica, recomenda-se a realização periódica de exercícios simulados com emprego operacional de SRPs no CEA, com cenários de emergência local e geral, conforme os parâmetros da NN 3.01/CNEN. Estruturados a partir de hipóteses realistas, como perda de contenção, liberação radiológica ou falhas estruturais, esses exercícios permitiriam avaliar o desempenho dos SRPs em ambientes operacionais degradados. Em termos táticos, validariam as capacidades adquiridas e, ao mesmo tempo, testariam a articulação entre operadores, núcleos de resposta especializada e centros responsáveis pelo processamento e análise das informações. A prática sistemática desses treinamentos fortaleceria o alinhamento dos procedimentos operacionais aos requisitos normativos nacionais, promoveria a interoperabilidade e incentivaria a cultura de melhoria contínua no âmbito da resposta a emergências nucleares.

A consolidação desse processo de formação especializada representaria um passo decisivo para ampliar a autonomia operacional das equipes do PNM e aprimorar

suas capacidades técnicas e logísticas. Ao reduzir a exposição humana em ambientes hostis, essa capacitação também otimizará a coleta, transmissão e análise de dados em tempo real, fortalecendo a cultura de segurança no CEA nas fases de preparação, resposta e recuperação. Nesse mesmo sentido, a experiência obtida no PNM em protocolos, certificações e emprego tático de SRPs pode servir como referência para iniciativas futuras no CNI relacionadas à PNE, favorecendo a padronização de procedimentos e a interoperabilidade entre o PNM e o PROSUB.

5.2.3 Elaboração de Procedimentos Padronizados com Integração de SRPs

A inexistência, naquele período, de doutrina específica ou procedimentos normatizados para o emprego de SRPs em situações de emergência nuclear representa uma fragilidade no contexto do PNM. Para superar essa lacuna, propõe-se a elaboração de Procedimentos Operativos Padronizados, ou o aprimoramento dos já existentes, com vistas a institucionalizar o emprego sistemático dessas plataformas nas instalações do CEA, até que haja normatização doutrinária sobre o tema.

Esses procedimentos podem, inicialmente, contemplar requisitos técnicos e operacionais compatíveis com as capacidades dos SRPs atualmente disponíveis, ajustados aos diferentes cenários de risco radiológicos, químicos ou híbridos. Devem ainda trazer diretrizes de operação segura, padronizar o registro das missões executadas e estabelecer regras para o tratamento e arquivamento dos dados coletados pelas plataformas remotas. Outro ponto central é a vinculação desses instrumentos ao PEL/CEA e ao PSO/CEA, bem como aos PELs e aos PPFs das UPEs. Essa harmonização normativa favorecerá a consolidação do papel dos SRPs como ferramentas de apoio técnico e tático em situações críticas.

Por fim, é fundamental que os POPs voltados ao emprego de SRPs estejam plenamente compatíveis com os sistemas de comando e controle previstos nos planos de emergência e de contingência, tais como o CCGE, o CCLE e o COS. A integração desses elementos favorece a eficiência na tomada de decisão e assegura a continuidade operacional diante de cenários complexos e dinâmicos. A institucionalização de POPs tecnicamente orientados, alinhados à doutrina da MB

para emergências nucleares, também contribuiria para consolidar uma cultura de segurança estruturada na Força, promovendo maior previsibilidade, confiabilidade e segurança nas ações que envolvem o uso de SRPs.

5.2.4 Articulação com o SIPRON para Incorporação Sistêmica dos SRPs

Dada a presença da MB no SIPRON e, em especial, do CTMSP, sugere-se uma articulação institucional que permita integrar o emprego de SRPs às ações conduzidas pelos diversos órgãos envolvidos na resposta a emergências nucleares. Essa integração poderia contemplar tanto aspectos operacionais quanto normativos e estratégicos.

Nesse sentido, recomenda-se avaliar a possibilidade de pautar, nos fóruns e colegiados do SIPRON, discussões específicas sobre as boas práticas internacionais relacionadas ao uso de SRPs em emergências nucleares, nas fases de resposta, estabilização e descomissionamento. O objetivo seria subsidiar propostas de atualização dos planos de emergência do CEA e dos documentos estruturantes do sistema, como o PNASEN e o PNRIESFN, promovendo o amadurecimento institucional sobre o uso dessas plataformas em situações de emergência.

Além disso, sugere-se considerar a inclusão de situações simuladas de emprego de SRPs nos exercícios integrados coordenados pelo GSI/PR, em especial no CEA, permitindo avaliar sua viabilidade e efetividade em cenários reais e multidisciplinares. Tais exercícios poderiam fornecer subsídios para a elaboração de protocolos interinstitucionais, fortalecendo a sinergia entre o CTMSP e as demais instituições do SIPRON.

Adicionalmente, propõe-se refletir sobre a realização de um *workshop* ou exercício conjunto no CEA, com foco no uso de SRPs em emergências nucleares. Essa iniciativa poderia gerar subsídios práticos para futuras revisões dos PEL/CEA e dos PELs das UPEs, atualizando aspectos de monitoramento ambiental na extensa área do CEA, ou antecipando cenários críticos nas instalações do CNI, a partir da prontificação do SNCA.

Ao incorporar essa articulação de forma estruturada, o PNM poderia posicionar-se como polo nacional de inovação doutrinária no uso de tecnologias emergentes para segurança nuclear. Simultaneamente, contribuiria para o fortalecimento da cultura de segurança entre os integrantes do SIPRON, promovendo a harmonização de conhecimentos, práticas e protocolos voltados à proteção do Programa Nuclear Brasileiro.

5.2.5 Propostas de Aquisição Tecnológica e Parcerias com a BID

A consolidação do emprego de SRPs no PNM demanda o estabelecimento de um plano estruturado de aquisição tecnológica, voltado à ampliação das capacidades operacionais e à redução da dependência de soluções estrangeiras. Nesse contexto, destaca-se a importância de fomentar parcerias estratégicas com a Base Industrial de Defesa, visando ao desenvolvimento de plataformas adaptadas às especificidades do ambiente nuclear, contemplando requisitos como mapeamento radiológico, monitoramento ambiental, inspeções estruturais, operações em ambientes confinados e transporte leve de materiais em áreas contaminadas. Tal sugestão está alinhada ao que estabelece a END ao preconizar, como vetor prioritário da capacidade de defesa do Estado brasileiro, a articulação entre instituições militares, centros de pesquisa e a indústria nacional, com vistas à produção autônoma de sistemas e tecnologias sensíveis.

Além da BID, a articulação com a comunidade científica nacional configura-se como elemento estratégico para impulsionar o avanço tecnológico no setor. A adoção de critérios de uso dual, com aplicabilidade tanto no meio civil quanto militar, amplia o escopo das soluções desenvolvidas e estimula sinergias entre as áreas de defesa, os operadores de instalações nucleares e os centros de pesquisa. Para tornar essa integração efetiva, recomenda-se o fortalecimento da pesquisa aplicada, por meio de programas de fomento voltados às OMs com tradição em robótica e tecnologias emergentes, bem como a instituições civis, como universidades, o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), entre outras instituições.

Essa estratégia tecnológica não apenas fortaleceria a autonomia nacional em áreas sensíveis, mas também criaria um ecossistema de inovação voltado às demandas reais do PNM, do PROSUB e de outros programas correlatos de interesse dos operadores nucleares. Ao alinhar a demanda operacional com as capacidades instaladas da indústria e da pesquisa, amplia-se o espectro de soluções viáveis e sustentáveis para o setor nuclear brasileiro.

Por fim, destaca-se a relevância de desenvolver, em parceria com a BID e instituições científicas, plataformas subaquáticas remotamente operadas que possam atuar em emergências envolvendo o SNCA ou seus sistemas de apoio, como tanques de contenção e circuitos de resfriamento. A inexistência de SRPs subaquáticos pode indicar uma lacuna de capacidade diante da futura complexidade operacional do Complexo Naval de Itaguaí.

5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo identificaram-se oportunidades de aprimoramento no emprego de SRPs no contexto do PNM, a partir de uma análise entre a experiência japonesa no pós-Fukushima e a realidade vivenciada no CEA. Com base nessa pesquisa, foi possível construir um diagnóstico integrado que indicou possíveis lacunas operacionais, normativas e institucionais, as quais podem limitar a adoção sistemática dessas tecnologias em situações de emergência nuclear no PNM.

A análise confirmou, ainda, a existência de um hiato entre as capacidades tecnológicas e doutrinárias consolidadas no Japão, sustentadas por protocolos bem definidos, forte integração interinstitucional e ampla aplicabilidade dos SRPs, e o estágio em desenvolvimento, então verificado no PNM, caracterizado por iniciativas pontuais, com pendências de padronização e limitadas capacidades acopladas às plataformas remotas.

Por outro lado, constatou-se que o Brasil já dispõe de uma base normativa compatível de capacidades técnicas instaladas e arcabouço institucional que, se devidamente articulados, podem viabilizar a consolidação de um modelo próprio de

resposta, no PNM, com uso sistemático e institucionalizado de SRPs em ambientes com risco radiológico, nuclear e químico.

Nesse contexto, foram delineadas cinco propostas estratégicas para o fortalecimento das capacidades institucionais no PNM. A primeira consiste na inclusão dos SRPs nos PELs e nos PPFs das UPEs do CEA. A segunda propõe a capacitação técnica e a certificação dos operadores, com foco em treinamentos simulados baseados em cenários de emergência local e geral. A terceira sugere a elaboração de POPs que integrem os SRPs aos sistemas de resposta já existentes, até que haja adequado amadurecimento doutrinário sobre este tema. A quarta recomenda a articulação da MB com o SIPRON, visando à inserção sistêmica de debates sobre tecnologias emergentes no CEA e nos colegiados do SIPRON. Por fim, a quinta proposta enfatiza o estímulo ao desenvolvimento tecnológico, por meio de parcerias público-privadas com a BID. Todas essas proposições se alinham ao objetivo geral da pesquisa, ao promoverem a reflexão sobre oportunidades de aprimoramento do emprego de SRPs em emergências nucleares no Programa Nuclear da Marinha.

Por fim, conclui-se que a institucionalização do uso de SRPs no PNM poderia ser tratada não como uma alternativa eventual, mas como um vetor estruturante da estratégia de segurança nuclear. Os resultados desta pesquisa apontam caminhos para o aprimoramento doutrinário, técnico e logístico do PNM. Dessa forma, a adoção planejada e coordenada dessas tecnologias configura-se como uma possibilidade para fortalecer a capacidade de resposta da MB em situações de emergência nuclear no CEA, alinhando-se às melhores práticas internacionais observadas, por exemplo, no caso japonês.

6. CONCLUSÃO

Na presente pesquisa teve-se por objetivo central sistematizar as capacidades implementadas pelo Japão, a partir do uso de SRPs, em situações de emergência nuclear após o acidente nuclear de Fukushima Daiichi, em 2011, e refletir sobre as possibilidades de aprimoramento do emprego desses sistemas no contexto do PNM. A partir de uma abordagem qualitativa, ancorada em pesquisa documental e na identificação de contrastes operacionais entre os contextos japonês e brasileiro, foi possível estabelecer conexões entre a experiência japonesa e a realidade institucional do PNM, vivenciada pelo autor no CEA.

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, constatou-se que a crescente complexidade das ameaças ao setor nuclear, sejam elas intencionais ou não, exige dos Estados não apenas o fortalecimento de suas estruturas normativas, mas também a permanente modernização de suas capacidades operacionais. Nesse escopo, as plataformas remotas despontam como instrumentos estratégicos para ampliar a efetividade das ações de vigilância, monitoramento, inspeção e resposta em ambientes de risco elevado, especialmente nas instalações nucleares de interesse do PNM. O acidente de Fukushima representou, nesse sentido, um marco transformador para o uso de tecnologias emergentes na gestão de crises, ao evidenciar como a integração entre plataformas autônomas, como drones aéreos, robôs terrestres e veículos subaquáticos e os protocolos institucionais de resposta pode viabilizar missões de elevado risco e bem-sucedidas em instalações comprometidas, desde o mapeamento radiológico até o apoio ao descomissionamento de estruturas danificadas

No Brasil, embora o PNM represente um dos pilares estratégicos da soberania nacional no campo da energia nuclear, observa-se um hiato quanto ao emprego de SRPs em situações de emergência. Essa percepção decorre da experiência do autor, no exercício das funções de Assessor de Segurança do CTMSP, Comandante do 1º BtlProtDefNBQR e, posteriormente, Coordenador de Segurança Física Nuclear do GSI/PR. Durante a vivência no CEA, foram realizados testes operacionais com plataformas aéreas e terrestres, integrados a ações simuladas com equipes de resposta do CTMSP e do 1º BtlProtDefNBQR. Os resultados desses adestramentos

demonstraram a aplicabilidade dos SRPs em apoio à segurança física e à resposta a emergências nucleares, ainda que de forma pontual e sem doutrina consolidada.

Apesar do potencial demonstrado, a experiência operacional do autor permitiu identificar possíveis fragilidades. Observou-se, à época, a inexistência de protocolos padronizados que orientassem o uso dos SRPs em cenários de emergência, o que gerava incertezas quanto aos procedimentos a serem adotados e comprometia a integração com os demais atores do sistema de resposta a emergências no CEA. Essa ausência de padronização estava associada à carência doutrinária, que dificultava a antecipação a cenários de ruptura e limitava a prontidão operacional em ambientes de alta complexidade. Além disso, não se identificou capacitação específica para operadores de SRPs, tanto no que se refere ao manuseio técnico dos equipamentos quanto à articulação desses meios com os planos de resposta a emergências vigentes no CEA. Do ponto de vista tecnológico, a infraestrutura disponível era restrita, com número reduzido de plataformas aéreas e terrestres e desempenho operacional limitado por ausência de sensores e sistemas acoplados. Tais fragilidades, embora parcialmente compensadas por soluções adaptadas localmente, indicavam que o emprego de SRPs no âmbito do PNM carecia, à época, de consolidação institucional.

A contraposição entre o caso japonês e a experiência brasileira permitiu, ainda, identificar lições relevantes e oportunidades de aprimoramento. Enquanto o Japão estruturou, em pouco mais de uma década, um ecossistema integrado de resposta a emergências nucleares com uso abrangente de SRPs, incluindo reformas institucionais, investimentos em pesquisa e desenvolvimento, parcerias com o setor privado e capacitação especializada, o modelo nacional observado encontrava-se, naquele momento, em fase embrionária. Essa assimetria, contudo, não invalida o potencial do Brasil em avançar nesse campo. Pelo contrário, o PNM já dispõe de atributos institucionais e operacionais que favorecem a adoção ampliada de SRPs, como a existência de unidades militares especializadas (caso do 1º BtlProtDefNBQR), infraestrutura técnico-científica na DGDNTM e representatividade ativa nos colegiados do SIPRON. Essas condições constituem uma base favorável à construção de um modelo adaptado, capaz de incorporar boas práticas internacionais sem perder de vista as especificidades do ambiente brasileiro.

Dessa forma, a pesquisa conclui que o emprego de SRPs em situações de emergência no CEA configura-se como uma alternativa viável e compatível com os objetivos do PNM. Para consolidar essa perspectiva, propõe-se a adoção de um conjunto de medidas integradas, a começar pela institucionalização do emprego sistemático de SRPs no CEA, com a devida integração dessas plataformas aos principais instrumentos de planejamento e resposta, como os PELs e PPFs das UPEs e o PSO/CEA. Também se recomenda a capacitação de operadores de plataformas autônomas vinculados ao 1º BtlProtDefNBQR, com a adoção de um processo estruturado de qualificação e certificação técnica. Outra medida importante consiste na elaboração de POPs que incorporem o uso dessas plataformas em distintos cenários de emergência no CEA, até que se efetive uma doutrina de emprego de SRPs em situações de emergência nuclear na MB. Paralelamente, torna-se essencial articular com o SIPRON a incorporação progressiva desses sistemas aos documentos estruturantes do setor, incluindo o PNASEN e o PNRIESFN, bem como promover a realização de exercícios integrados de emergência nuclear e segurança física que explorem as capacidades dos SRPs nas fases de resposta, de estabilização e de descomissionamento. Por fim, recomenda-se a formulação de propostas de aquisição tecnológica, com apoio da BID, a fim de ampliar as capacidades operacionais das plataformas remotas, reduzir a dependência externa e desenvolver soluções específicas para o PNM, abrangendo mapeamento radiológico, monitoramento ambiental, inspeções estruturais, operações em ambientes confinados e funções auxiliares de comunicação, transporte e reconhecimento em áreas contaminadas. A adoção de critérios que viabilizem o uso dual, tanto em contextos civis quanto militares, pode contribuir para ampliar o escopo das soluções desenvolvidas e fortalecer as sinergias entre o setor de defesa, os operadores de instalações nucleares e os centros nacionais de pesquisa.

Como principais contribuições, neste estudo apresentaram-se as capacidades desenvolvidas pelo Japão no emprego de SRPs em emergências nucleares e promoveu a reflexão sobre possibilidades de aprimoramento no âmbito do PNM. Os resultados indicam que tecnologias emergentes, quando inseridas de forma planejada e adequada ao contexto institucional, podem transformar significativamente a forma como se conduzem ações de resposta em ambientes nucleares, químicos e radiológicos. Em termos operacionais, verificou-se que os SRPs representam um

recurso promissor para ampliar a efetividade das medidas de contenção, reduzir a exposição de equipes de resposta a riscos radiológicos e assegurar a continuidade das funções essenciais de comando e controle em situações de emergência, contribuindo para o fortalecimento da prontidão institucional e para o aumento da resiliência das instalações nucleares sob responsabilidade da MB.

Como possibilidades futuras de desdobramento, recomenda-se o aprofundamento dos estudos, no âmbito do PROSUB, sobre o emprego de SRPs subaquáticos no contexto do SNCA, cuja PNE estará sediada no CNI. Nesse cenário, os SRPs podem assumir papel relevante em ações de inspeção estrutural, detecção de anomalias, monitoramento ambiental e resposta a incidentes envolvendo áreas confinadas ou de difícil acesso. Além disso, sugere-se a integração progressiva desses sistemas às rotinas de simulações e treinamentos das equipes de resposta da MB, com vistas à consolidação doutrinária e ao fortalecimento das capacidades institucionais frente a cenários de emergência nuclear.

Por fim, o estudo das capacidades implementadas pelo Japão após o acidente de Fukushima oferece subsídios para fortalecer as competências de preparação e resposta da MB. A incorporação gradual de SRPs ao PNM contribui para aperfeiçoar as estratégias de resposta a emergências, ampliar a resiliência das instalações nucleares e manter a MB alinhada às melhores práticas internacionais de segurança nuclear. Ao transpor referências técnicas consolidadas para a realidade operacional do PNM, esta pesquisa fomenta uma cultura de inovação, antecipação e prontidão na Marinha do Brasil diante dos desafios contemporâneos do setor nuclear.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR (ABEN). **Brasil Nuclear: informativo da Associação Brasileira de Energia Nuclear**. Rio de Janeiro: ABEN, ano 25, n. 49, dez. 2018.

ARDINY, H.; BEIGZADEH, A.; MAHANI, H. *Applications of unmanned aerial vehicles in radiological monitoring: a review*. Nuclear Engineering and Design, v. 422, 2024, art. 113110. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2024.113110. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113110>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Glossário do Setor Nuclear e Radiológico Brasileiro**. Rev. maio 2021. Rio de Janeiro: CNEN, 2021.

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN NN 2.01: Proteção Física de Materiais e Instalações Nucleares**. Aprovada pela Resolução CNEN nº 253, de 11 nov. 2019. Rio de Janeiro: CNEN, 2019. Publicação: DOU 13 nov. 2019; retificação: DOU 26 nov. 2019.

BRASIL. Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN). **Norma CNEN NN 3.01: Requisitos básicos de radioproteção e segurança radiológica de fontes de radiação**. Aprovada pela Resolução CNEN nº 323, de 28 mar. 2024. Rio de Janeiro: CNEN, 2024. Publicação: DOU 18 abr. 2024.

BRASIL. Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República (GSI/PR). **Portaria nº 75-GSI/PR, de 28 de outubro de 2020**. Aprova o Plano Nacional de Resposta Integrada a Evento de Segurança Física Nuclear. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 nov. 2020. Seção 1. Disponível em: <https://pesquisa.in.gov.br/imprensa/jsp/visualiza/index.jsp?data=04/11/2020&jornal=515>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República (GSI/PR). **Portaria SCS/GSI/PR nº 112, de 13 de setembro de 2022**. Aprova o Plano Nacional para Situações de Emergência Nuclear. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 16 set. 2022. Edição 177, Seção II, p. 14. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/portaria-scs/gsi/pr-n-112-de-13-de-setembro-de-2022-430023738>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A. (AMAZUL): Ciclo do Combustível Nuclear**. Brasília, DF: Marinha do Brasil, [s.d.]. Disponível em: <https://www.amazul.mar.mil.br/explore-a-amazul/ciclo-do-combustivel-nuclear>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Amazônia Azul Tecnologias de Defesa S.A. (AMAZUL): portal institucional**. Brasília, DF: Marinha do Brasil, [s.d.]. Disponível em: <https://www.amazul.mar.mil.br/>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Centro Industrial e Nuclear de Aramar – CINA**. Brasília, DF: Marinha do Brasil, [s.d.]. Disponível em: portal institucional do CTMSP – seção CINA (intranet). Acesso em: jun. 2025.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo – CTMSP**. Brasília, DF: Marinha do Brasil, [s.d.]. Disponível em: portal institucional do CTMSP (intranet). Acesso em: jun. 2025.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Comando-Geral do Corpo de Fuzileiros Navais (CGCFN). Manual de Defesa Nuclear, Biológica, Química e Radiológica (CGCFN-338)**. 1. rev. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2018. Aprovado em 24 maio 2018.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Diretoria-Geral de Desenvolvimento Nuclear e Tecnológico da Marinha (DGDNTM). Plano de Ciência, Tecnologia e Inovação da Marinha do Brasil (PCT&I) – DGDNTM-2100 (2022–2025)**. Rev. 1. Brasília, DF: Marinha do Brasil, DGDNTM, 2022.

BRASIL. Marinha do Brasil. **PROSUB | Programa de Submarinos**. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2025. Disponível em: <https://www.marinha.mil.br/programas-estrategicos/prosub>. Acesso em: 16 ago. 2025.

BRASIL. Marinha do Brasil. **Secretaria Naval de Segurança Nuclear e Qualidade (SecNSNQ). Missão e Visão de Futuro da SecNSNQ**. [S.l.]: Marinha do Brasil, 2025. Disponível em: Intranet MB › SecNSNQ › Institucional › Missão e Visão de Futuro. Acesso em: 16 ago. 2025.

BRASIL. Ministério da Defesa. **Estratégia Nacional de Defesa (END)**. Brasília, DF: Ministério da Defesa, 2020. Aprovada pelo Decreto Legislativo nº 61, de 23 maio 2024. Disponível em: https://www.gov.br/defesa/pt-br/assuntos/copy_of_estado-e-defesa/pnd_end_congressonacional_22_07_2020.pdf. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 1.065, de 24 de fevereiro de 1994**. Promulga o Acordo entre o Brasil, a Argentina, a ABACC e a AIEA para a aplicação de salvaguardas. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 25 fev. 1994. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1990-1994/d1065.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 2.210, de 22 de abril de 1997**. Regulamenta o Decreto-Lei nº 1.809/1980 (SIPRON). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 23 abr. 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1997/d2210.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 2.864, de 7 de dezembro de 1998**. Promulga o Tratado sobre a Não-Proliferação de Armas Nucleares. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 8 dez. 1998. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d2864.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 9.600, de 5 de dezembro de 2018**. Consolida as diretrizes sobre a Política Nuclear Brasileira. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 dez. 2018. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Ato2015-2018/2018/Decreto/D9600.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 4.118, de 27 de agosto de 1962.** Dispõe sobre a política nacional de energia nuclear, cria a CNEN e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 19 set. 1962. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/lei/1960-1969/lei-4118-27-agosto-1962-353840-publicacaooriginal-12828-pl.html>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 6.189, de 16 de dezembro de 1974.** Altera a Lei nº 4.118/1962 e a Lei nº 5.740/1971... Diário Oficial da União, Brasília, DF, 17 dez. 1974. Retificada no DOU de 20 dez. 1974. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L6189.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 12.731, de 21 de novembro de 2012.** Institui o SIPRON e revoga o Decreto-Lei nº 1.809/1980. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 22 nov. 2012. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Atos2011-2014/2012/Lei/L12731.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Lei nº 13.844, de 18 de junho de 2019a.** Estabelece a organização básica dos órgãos da Presidência da República e dos Ministérios. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 jun. 2019. Edição 116-A, Seção 1 (Extra), p. 4. Disponível em: <http://www.in.gov.br/web/dou/-/lei-n-13.844-de-18-de-junho-de-2019-164135236>. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 9.865, de 27 de junho de 2019b.** Dispõe sobre os colegiados do SIPRON. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 28 jun. 2019. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Atos2019-2022/2019/Decreto/D9865.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Presidência da República. **Decreto nº 11.188, de 5 de setembro de 2022.** Promulga a Emenda à Convenção sobre a Proteção Física do Material Nuclear. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 6 set. 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/atos2019-2022/2022/decreto/D11188.htm. Acesso em: 14 ago. 2025.

BRASIL. Marinha do Brasil. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP). **Plano de Emergência Local do Centro Experimental de ARAMAR (PEL/CTMSP-CEA).** Iperó: CTMSP, 2016. Documento interno; circulação restrita.

BRASIL. Marinha do Brasil. Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo (CTMSP). **Plano de Segurança Orgânica do Centro Experimental de ARAMAR (PSO/CTMSP-CEA).** Iperó: CTMSP, 2014. Documento interno; circulação restrita.

CHOI, Y.; LEE, W.; TAKAKUWA, M.; KANESUE, T.; NAKASHIMA, Y. **Remote detection of radioactive contamination and physiological changes in trees using UAV-based hyperspectral imagery.** Remote Sensing, Basel, v. 11, n. 20, 2019.

GARCIA, M. L. **The Design and Evaluation of Physical Protection Systems.** 2. ed. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2008. Adaptado pelo autor.

HITACHI-GE NUCLEAR ENERGY, LTD.; HITACHI, LTD. ***Development of New Technology for Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Reconstruction.*** Hitachi Review, v. 63, n. 4, p. 184–191, 2014. Disponível em: https://www.hitachihyoron.com/rev/pdf/2014/r2014_04_all.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

HITACHI, LTD.; HITACHI-GE NUCLEAR ENERGY, LTD. ***Progress on Decommissioning Fukushima Daiichi Nuclear Power Station and Use of Remotely Operated Equipment.*** Hitachi Review, 2023. Disponível em: https://www.hitachihyoron.com/rev/archive/2023/r2023_04/04c02/index.html. Acesso em: 15 ago. 2025.

INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL (INB). **Ciclo do combustível nuclear.** Resende: INB, 2025. Disponível em: inb.gov.br > Nossas Atividades > Ciclo do combustível nuclear. Acesso em: 15 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Nuclear security recommendations on physical protection of nuclear material and nuclear facilities (INFCIRC/225/Revision 5).*** Vienna: IAEA, 2011a. (IAEA Nuclear Security Series, No. 13; STI/PUB/1481). ISBN 978-92-0-111110-4. Disponível em: www.iaea.org/books. Acesso em: 16 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Action Plan on Nuclear Safety.** Vienna: IAEA, 2011b. Disponível em: <https://library.iaea.org/data/b7/ActionPlan.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Agreement of 13 December 1991 between Argentina, Brazil, the Brazilian-Argentine Agency for Accounting and Control of Nuclear Materials and the International Atomic Energy Agency for the Application of Safeguards.*** Vienna: IAEA, 1992. (INFCIRC/435, 4 mar. 1992). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/documents/infcircs/435>. Acesso em: 16 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Nuclear Safety and Security Glossary: 2022 (Interim) Edition.*** Vienna: IAEA, 2022. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/15236/iaea-nuclear-safety-and-security-glossary>. Acesso em: 14 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Nuclear Security Plan 2022–2025: Report by the Director General.*** GC (65)/24. Vienna: IAEA, 2021a. Disponível em: <https://www.iaea.org/sites/default/files/gc/gc65-24.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (Implementation of INFCIRC/225/Revision 5).*** (IAEA Nuclear Security Series, no. 27-G. Implementing Guide). Vienna: IAEA, 2018. STI/PUB/1760.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency: general safety requirements.***

Vienna: IAEA, 2015a. (IAEA Safety Standards Series, GSR Part 7). ISBN 978-92-0-105715-0. STI/PUB/1708.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Preparedness and response for a nuclear or radiological emergency in the light of the accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant***. Vienna: IAEA, 2013a. Disponível em: <https://conferences.iaea.org/event/ans2013/report.pdf>. Acesso em: 14 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Ten Years of Remediation Efforts in Japan***. IAEA-TECDOC-2020. Vienna: IAEA, 2023a. Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/15193/ten-years-of-remediation-efforts-in-japan>. Acesso em: 15 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***The Fukushima Daiichi Accident: Report by the Director General***. Vienna: IAEA, 2015b. (STI/PUB/1710). ISBN 978-92-0-107015-9 (set). Disponível em: <https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub1710-reportbythedg-web.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***A decade of progress after Fukushima-Daiichi: safety evaluation and emergency preparedness***. Vienna: IAEA, 2023b. (IAEA Proceedings Series, P2061). Disponível em: <https://www.iaea.org/publications/2061>. Acesso em: 14 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Now Available: New Drone Technology for Radiological Monitoring in Emergency Situations***. Vienna: IAEA, 2021b. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/now-available-new-drone-technology-for-radiological-monitoring-in-emergency-situations>. Acesso em: 15 ago. 2025.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). ***Using Unmanned Aerial Vehicles for Environmental Monitoring***. Vienna: IAEA, 17 maio 2013b. Disponível em: <https://www.iaea.org/newscenter/news/using-unmanned-aerial-vehicles-environmental-monitoring>. Acesso em: 15 ago. 2025.

INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR NUCLEAR DECOMMISSIONING (IRID). ***“MEISter” Remote Control Robot Completes Demonstration Testing at Fukushima Daiichi Nuclear Power Station***. Tokyo: IRID, 25 mar. 2014. Disponível em: <https://irid.or.jp/en/topics/%E5%8E%9F%E5%AD%90%E7%82%89%E5%BB%BA%E5%B1%8B%E5%86%85%E3%81%AE%E9%81%A0%E9%9A%94%E9%99%A4%E6%9F%93%E4%BD%9C%E6%A5%AD%E3%83%AD%E3%83%9C%E3%83%83%E3%83%88%E3%80%8Cmhi%E5%BC%8Dmeister%E5%BC%88%E3%83%9E/>. Acesso em: 15 ago. 2025.

INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR NUCLEAR DECOMMISSIONING (IRID). ***Boat-type submersible access devices to investigate the situation inside the Unit 1 PCV***. Tokyo: IRID, 25 out. 2019. Disponível em: <https://irid.or.jp/en/topics/%E7%A6%8F%E5%B3%B6%E7%AC%AC%E4%B8%80%E5%8E%9F%E5%AD%90%E5%8A%9B%E7%99%BA%E9%9B%BB%E6%89%80>

[%EF%BC%91%E5%8F%B7%E6%A9%9F%E5%8E%9F%E5%AD%90%E7%82%89%E6%A0%BC%E7%B4%8D%E5%AE%B9%E5%99%A8%E5%86%85%E9%83%A8/](#). Acesso em: 15 ago. 2025.

INTERNATIONAL RESEARCH INSTITUTE FOR NUCLEAR DECOMMISSIONING (IRID). **Current status and challenges of R&D for fuel debris retrieval**. Tokyo: IRID, 2024. Disponível em: <https://irid.or.jp/wp-content/uploads/2024/08/20240731%E3%80%90IRID%E3%80%91%E6%9D%B1%E5%B7%A5%E5%A4%A7NICC2024.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

JAPAN. *Secretariat of the Team for Countermeasures for Decommissioning and Contaminated Water Treatment. Progress Status and Future Challenges of the Mid-and-Long-Term Roadmap toward the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1–4 (Outline)*. Tokyo, 28 ago. 2014. Disponível em: https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/roadmap/images/d140828_01-e.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY (JAEA). **JAEA R&D Review 2020 — Research and Development Related to the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Station**. Tokai: JAEA, 2020a. Disponível em: https://rdreview.jaea.go.jp/review_en/2020/pdf/e2020_all.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

JAPAN ATOMIC ENERGY AGENCY (JAEA). **TOPICS Fukushima No. 71 — Research Management Building of the Naraha Remote Technology Development Center completed**. Tokyo: JAEA, 24 dez. 2015. Disponível em: <https://fukushima.jaea.go.jp/en/pamphlet/topics/pdf/topics-fukushima071e.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

MINISTRY OF ECONOMY, TRADE AND INDUSTRY (METI). **Mid- and Long-Term Roadmap towards the Decommissioning of TEPCO's Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Units 1-4**. Revision of Mar. 2025. Tokyo: METI, 2025. Disponível em: <https://www.meti.go.jp/english/earthquake/nuclear/decommissioning/>. Acesso em: 8 ago. 2025.

NAGATANI, K. et al. **Emergency response to the nuclear accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plants using mobile rescue robots**. Journal of Field Robotics, v. 31, n. 1, p. 1–20, 2014. DOI: 10.1002/rob.21401.

NUCLEAR REGULATION AUTHORITY (NRA). **Outline of nuclear regulation of Japan**. Tokyo: NRA, 2016. Disponível em: <https://www.nra.go.jp/data/000148578.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2025.

ORGANIZAÇÃO PARA A COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. Agência de Energia Nuclear (OCDE/NEA). **Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident, Ten Years On: Progress, Lessons and Challenges**. Paris: OECD Publishing, 2021. Disponível em: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/03/fukushima-daiichi-nuclear-power-plant-accident-ten-years-on_3cad6e48/124c2774-en.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

SATO, I.; YOSHIKAWA, S.; YAMASHITA, T.; SHIMOMURA, K.; CIBULA, M.; MIZOKAMI, S. **MAAP code analysis for the in-vessel phase of Fukushima-Daiichi Nuclear Power Station Unit 1 and comparison of the results among Units 1 to 3.** Nuclear Engineering and Design, v. 422, 2024, art. 113088. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2024.113088. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113088>. Acesso em: 16 ago. 2025.

SATO, Y.; OZAWA, S.; TERASAKA, Y.; MINEMOTO, K.; TAMURA, S.; SHINGU, K.; NEMOTO, M.; TORII, T. **Remote detection of radioactive hotspot using a compton camera mounted on a moving multi-copter drone above a contaminated area in Fukushima.** Journal of Nuclear Science and Technology, v. 57, n. 6, p. 734–744, 2020. DOI: 10.1080/00223131.2020.1720845. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00223131.2020.1720845>. Acesso em: 16 ago. 2025.

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY (TEPCO). **Fukushima Daiichi Nuclear Power Station decommissioning report.** Tokyo: TEPCO, 2017a. Disponível em: https://www.tepco.co.jp/en/wp-content/uploads/hd03-02-03-001-d170831_01-e.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY (TEPCO). **Fukushima Nuclear Accident Analysis Report (Summary).** Tokyo: TEPCO, 2012. Disponível em: https://www.tepco.co.jp/en/press/corpcom/release/betu12_e/images/120620e0102.pdf. Acesso em: 8 jul. 2025.

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY (TEPCO). **Photo & Video Library: Fukushima Daiichi Nuclear Power Station.** 2011–2024. Tokyo: TEPCO, 2025b. Disponível em: <https://photo.tepco.co.jp/en/>. Acesso em: 8 jul. 2025.

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY (TEPCO). **Progress of Unit 3 PCV internal investigation (Preliminary report of July 22, 2017).** Tokyo: TEPCO, 2017b. Disponível em: https://www.tepco.co.jp/en/nu/fukushima-np/handouts/2017/images/handouts_170722_01-e.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY HOLDINGS (TEPCO). **Nuclear Safety Reform Plan: FY2018 First Quarter Progress Report.** Tokyo: TEPCO, 2018. Disponível em: https://www.tepco.co.jp/en/wp-content/uploads/fix_FY2018-1Q-Progress-ReportFull.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

TOKYO ELECTRIC POWER COMPANY HOLDINGS (TEPCO). **Research and Development — Decommissioning Project.** Tokyo: TEPCO, 2025a. Disponível em: <https://www.tepco.co.jp/en/hd/decommission/progress/technology/index-e.html>. Acesso em: 8 jul. 2025.

UNITED NATIONS SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC RADIATION (UNSCEAR). **Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation — UNSCEAR 2020/2021 Report, Volume IV: Scientific Annex D – Evaluation of occupational exposure to ionizing radiation.** New York: United Nations, 2022. Disponível em: https://www.unscear.org/unscear/uploads/documents/unscear-reports/UNSCEAR_2020_21_Report_Vol.IV.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

WORLD INSTITUTE FOR NUCLEAR SECURITY (WINS). ***The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in Nuclear Security***. Vienna: WINS, 2023.