

ESFORÇOS TECNOLÓGICOS PARA CONTROLE DA CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL POR RADIONUCLÍDEOS APÓS ACIDENTE NUCLEAR

Adriana de Souza Medeiros Batista ¹

Resumo – A preocupação com eventual contaminação ambiental por radionuclídeos em decorrência de acidentes nucleares ressurgiu com mais intensidade quando em decorrência de eventos recentes, como o acidente ocorrido em Fukushima Daiichi, no Japão em 2011. Países como o Brasil, que possuem reatores nucleares voltados para obtenção de energia elétrica, devem considerar o cenário de um acidente real para aprendizagem, como forma de prevenção e planejamento quanto a possíveis ocorrências locais. O presente trabalho se baseia na análise de patentes publicadas após o acidente nuclear de Fukushima e em decorrência dele, para uma avaliação quanto a preocupação com a contaminação ambiental e esforços inventivos de enfrentamento. Foi possível estabelecer os radionuclídeos que mais demandaram preocupação quanto a dispersão no meio ambiente: césio, estrôncio, urânio e plutônio. Além destes o trítio é especialmente referenciado quanto à preocupação de contaminação da água do mar e águas subterrâneas. Caracterizou-se os segmentos tecnológicos impactados pelos processos de contenção de contaminantes e remediação dos ambientes já contaminados. Os resultados são discutidos dentro dos ensinamentos proporcionados, de enfrentamento e cuidado, além de uma apresentação do significado prático da dispersão dos radionuclídeos no ambiente.

Abstract – The concern about possible environmental contamination by radionuclides as a result of nuclear accidents reappears with more intensity when as a result of recent events, such as the accident that occurred in Fukushima Daiichi, Japan in 2011. Countries like Brazil, which have nuclear reactors aimed at obtaining electricity, should consider the scenario of a real accident for learning, as a form of prevention and planning for possible local occurrences. The present work is based on the analysis of patents published after the Fukushima nuclear accident and as a result of it, for an assessment of the concern with environmental contamination and inventive efforts to face it. It was possible to establish the radionuclides that most demanded concern regarding dispersion in the environment: cesium, strontium, uranium and plutonium. In addition to these, tritium is especially mentioned in terms of the concern of contamination of seawater and groundwater. The technological segments impacted by the process's containment of contaminants and remediation of already contaminated environments were characterized. The results are discussed within the teachings provided, of coping and care, in addition to a presentation of the practical meaning of the dispersion of radionuclides in the environment.

Palavras-Chave – Acidente nuclear; radionuclídeos; contaminação ambiental.

¹ Eng. Nuclear, PhD, Universidade Federal de Minas Gerais, (31) 99866-3048, adriananuclear@yahoo.com.br

1. INTRODUÇÃO

O acidente nuclear em Fukushima Daiichi no Japão, ocorrido após terremoto de magnitude 9,0 na escala Richter e o subsequente tsunami, ocorreu em 11 de março de 2011, enquanto apenas três das seis unidades de reatores estavam em operação. Segundo relato de Burns *et al.* (2012) a maior parte do combustível nesses reatores era de UO₂, embora também houvesse 32 conjuntos de combustível de óxido misto contendo ~6% de Pu na unidade 3, correspondendo a ~4% da carga do núcleo. Relataram que as unidades operacionais foram fechadas prontamente em resposta ao terremoto. No entanto, quando o tsunami inundou o local a energia elétrica foi perdida, seguida pela perda de energia de reserva no local, resultando em um apagão da estação e na perda de refrigeração no reator. Um evento de fusão parcial do núcleo ocorreu nas unidades 1, 2 e 3. Em uma análise preliminar, a operadora japonesa *Tokyo Electric Power Company* (TEPCO) divulgou a ocorrência de perda quase imediata de resfriamento do núcleo na unidade 1, o que resultou em fusão de quase todos os conjuntos de combustível, ficando acumulados no fundo do vaso de pressão. A fusão parcial dos núcleos nas unidades 2 e 3, danificando aproximadamente um terço dos conjuntos de combustível em cada uma, ocorreu nos dias seguintes. A reação do revestimento do combustível composto de liga de zircônio (Zircaloy) com a água em altas temperaturas gerou gás hidrogênio que se acumulou e explodiu em quatro das unidades. A água do mar foi injetada nos três reatores ativos e pulverizada em piscinas de armazenamento de combustível para resfriá-los (BURNS *et al.* 2012, STEINHAUSER *et al.*, 2014).

A liberação de produtos de fissão em Fukushima Daiichi se diferenciou do ocorrido em 1986 em Chernobyl pelas circunstâncias de cada um, além de contar com o recurso da água do mar, usada para resfriar os núcleos e piscinas de armazenamento. Em Chernobyl ocorreram explosões que causaram a dispersão de material radioativo, ao passo que no Japão o principal caminho de liberação de contaminação para o ambiente veio através da liberação contínua de radionuclídeos na água. Isso porque uma fração desconhecida dessa água foi liberada para o meio ambiente, juntamente com o acúmulo nos porões e valas dos reatores (STEINHAUSER *et al.*, 2014). O desastre trouxe consequências para a indústria nuclear, principalmente a retomada das discussões sobre a segurança das usinas nucleares (WU, 2017, CHUNG, 2020). Por outro lado, também exigiu ações emergenciais de mitigação de danos, controle da dispersão de radionuclídeos na natureza e a consequente necessidade de monitoramento ambiental (SHEKHAR, *et al.*, 2020) Fomentou, assim, desenvolvimento de novas tecnologias que melhor considerassem as especificidades deste acidente em comparação com anteriores da mesma natureza, gerando impacto nas produções em Pesquisa e Desenvolvimento (P&D).

O contexto recente da pandemia global por Covid-19 levou a uma pesquisa ligando desastres naturais e o crescimento da inovação, apontando os impactos negativos da falta de recursos para investimento, devido aos prejuízos econômicos que excluem os recursos originalmente dedicados às atividades inventivas (CHEN, 2021). Por outro lado, também é possível considerar que situações extremas exigem o desenvolvimento de recursos para seu enfrentamento. Por isso, este estudo visa avaliar o acidente de Fukushima enquanto incentivo ao desenvolvimento tecnológico na área de controle da contaminação ambiental por radionuclídeos. É proposto uma avaliação da publicação de novas patentes após o ano de 2011, diretamente relacionadas a Fukushima e contaminação ambiental. O estudo baseado em patentes é considerado estratégico para a avaliação tecnológica por campo do conhecimento e investimento em P&D (PIRES *et al.*, 2020).

Para este trabalho, há um foco na identificação de áreas do conhecimento científico que ainda estão sendo mobilizadas para o desenvolvimento de novas técnicas de monitoramento da poluição ambiental e dosimetria de radiação. Foi estruturado nos seguintes passos: avaliação da evolução temporal do depósito de patentes que se referenciam a Fukushima Daiichi, em consideração a hipótese de que o acidente fomentou esforços tecnológicos de enfrentamento da situação emergencial que se estabeleceu; verificação dos principais conceitos constantes neste portfólio de patentes, em consideração a hipótese de que parte relevante das patentes tenham relação com a contenção dos radionuclídeos e remediação de ambientes contaminados; avaliação dos segmentos tecnológicos movimentados pelas tecnologias propostas, para verificação da presença daqueles voltados ao meio ambiente e, também, às usinas nucleares, proporcionando a

relação entre eles; avaliação da abrangência mundial do desenvolvimento destas tecnologias, para verificação do impacto deste tipo de acidente no mundo.

2. PATENTES PUBLICADAS APÓS ACIDENTE NUCLEAR DE FUKUSHIMA DACHII

2.1. Pesquisa por patentes

Utilizou-se o sistema de informação de patentes *Questel Orbit*, plataforma privada de pesquisa que permite busca em diversos sistemas de classificação de patentes e em quatro idiomas: inglês, francês, alemão e espanhol. Disponibiliza análise estatística e construção de gráficos abrangendo até 20 mil famílias de patentes por vez. A pesquisa foi realizada por análise semântica utilizando o termo “Fukushima Daiichi”, com cobertura de textos integrais, mesmo em patentes que originalmente estavam em idiomas distintos, como chinês ou japonês, utilizando tradução para inglês de múltiplos idiomas. Por estas e outras funcionalidades o sistema é considerado adequado para uso empresarial, governamental e acadêmico, inclusive sendo o mais adequado para programas de pós-graduação (PIRES *et al.*, 2020). Para verificar a assertividade da plataforma de busca em retornar um cenário voltado ao acidente ocorrido em 2011, observou-se a evolução das submissões de patentes relacionadas ao evento ao longo do tempo. Isso porque, para uma representação voltada ao foco do presente trabalho, ou seja, reflexos do acidente nuclear em Fukushima, espera-se uma evolução iniciada no ano de ocorrência do fato alvo do estudo.

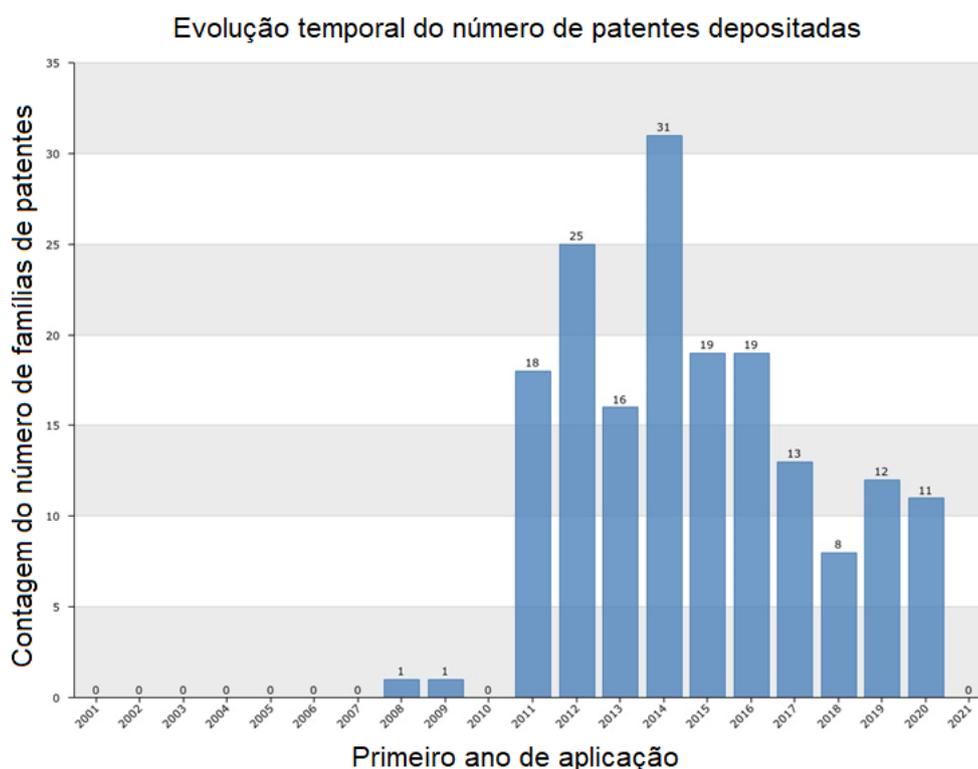


Figura 1. Distribuição das patentes depositadas por ano que mencionam o termo “Fukushima Daiichi”.

Criado no aplicativo de Inteligência de Negócios – *Questel Orbit Intelligence*.

Observa-se na Figura 1 que as patentes que compõem o escopo do presente estudo estão no espaço temporal esperado, ou seja, entre os anos de 2011 a 2020. A ausência de patentes referenciadas ao ano de 2021 pode ser entendida em função da lacuna nas informações atuais sobre patentes, devido ao atraso de 18 meses entre o depósito de um pedido e sua publicação.

As duas patentes depositadas em 2008 e 2009 foram excluídas do estudo por estarem vinculadas ao contexto da Usina de Fukushima Daiichi, mas não ao acidente nuclear ocorrido em 2011. A evolução das publicações indica o aparecimento de novas patentes voltadas às condições impostas pelo acidente nuclear, com pico em 2014. Estas patentes foram analisadas em relação ao propósito do trabalho: de avaliar as preocupações quanto à contaminação ambiental; e com foco nos esforços em desenvolvimento tecnológico. Assim, buscou-se configurar o papel do acidente na produção em P&D voltada ao controle da contaminação ambiental por radionuclídeos, tendo aplicação tanto específica quanto geral, no que se refere aos recursos técnicos desenvolvidos.

2.2. Cenário patentário

A Figura 2 ilustra a distribuição dos principais termos contidos no portfólio de patentes estudado, selecionado a partir da utilização de filtro considerando menção ao acidente em Fukushima Daiichi (2011). Demonstra graficamente os conceitos mais utilizados, permitindo ideação do cenário de esforços tecnológicos e/ou identificação de tecnologias protegidas, voltadas aos desafios apresentados pelo acidente. Traz termos em inglês por terem sido pesquisados neste idioma. A Tabela 1 traz os termos em português, desdobrando os conceitos principais em termos específicos.

Principais conceitos presentes nos textos consultados

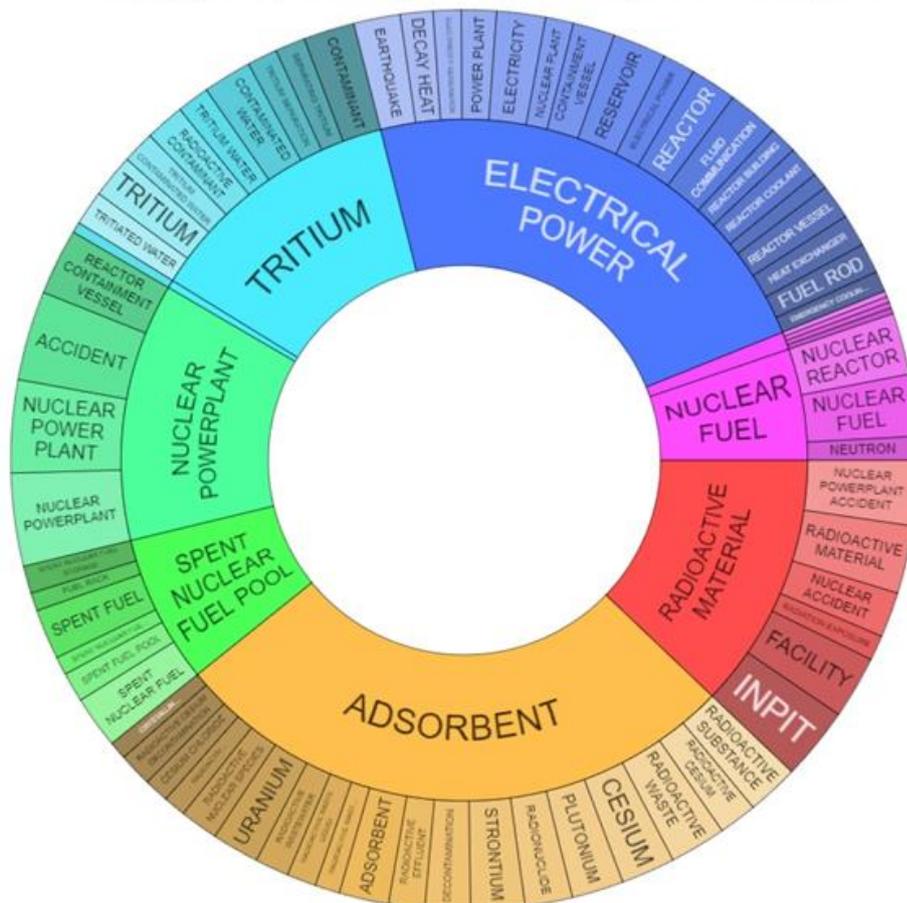


Figura 2. Ilustração gráfica dos conceitos contidos no portfólio de patentes voltadas ao acidente de Fukushima Daiichi.

Criado no aplicativo de Inteligência de Negócios – Questel Orbit Intelligence.

Na Figura 2 é possível identificar sete conceitos principais que apareceram no portfólio de patentes estudado e seus desdobramentos. Na Tabela 1 são especificados os termos em português: absorvente, combustível nuclear, energia elétrica, material radioativo, piscina de combustível nuclear gasto, trítio e usina nuclear. Os conceitos demonstram que as patentes selecionadas estão no escopo da pesquisa, uma vez que fazem referência a acidente nuclear, radionuclídeos e materiais radioativos. Além da citação direta ao *National Center for Industrial Property Information and Training* (INPIT), sistema japonês que oferece serviços de informações sobre direitos de propriedade intelectual, serviços de consultoria em propriedade intelectual, serviços de apoio à inovação aberta, bem como serviços de treinamento educacional sob a supervisão do Escritório de Patentes do Japão (JPO), país de ocorrência do acidente.

Tabela 1. Principais conceitos presentes no portfólio de patentes estudado.

Conceitos Principais	Conceitos relacionados
Absorvente	Césio radioativo Descontaminação Efluente radioativo Estrôncio Plutônio Radionuclídeo Resíduo radioativo Substância radioativa Urânio
Combustível nuclear	Espécies radioativas nucleares Nêutron Reator nuclear
Energia elétrica	Calor de decaimento Eletricidade Haste de combustível Planta nuclear Refrigerante Reservatório Terremoto Usina elétrica Vaso contaminado Vaso do reator
Material radioativo	Acidente nuclear INPIT Instalação Material radioativo
Piscina de combustível nuclear usado Trítio	Combustível nuclear usado Água tritiada Água contaminada por trítio Contaminante radioativo Separação, remediação
Usina Nuclear	Acidente Recipiente de contenção do reator

Dados obtidos com aplicativo de Inteligência de Negócios – *Questel Orbit Intelligence*.

Em consulta aos textos das patentes pode-se notar, em relação ao termo absorvente e os seus relacionados, que se trata do desenvolvimento de técnicas de remediação de ambientes contaminados por substâncias radioativas, em especial os radionuclídeos césio e estrôncio, assim como técnica para tratamento de efluentes e resíduos radioativos. Cita-se também estudos voltados a adsorção de urânio e plutônio. A técnica de descontaminação por adsorção utilizando materiais adsorventes é bastante conhecida, tendo aplicação na retirada de contaminantes do meio ambiente e efluentes industriais. Trata-se de um processo altamente eficaz e econômico,

desde que os adsorventes corretos sejam aplicados em ambiente que favoreça a adsorção (LIU, 2014).

Do ponto de vista ambiental, a preocupação quanto à contaminação por radioisótopos de céσιο e estrôncio vem de suas características nucleares (alto rendimento de fissão e meia-vida longa). Além disso, possuem semelhanças químicas com o potássio e o cálcio, respectivamente, ampliando as vias de contaminação através de sua inserção em processos biológicos. Já a contaminação ambiental por plutônio e urânio não é de natureza exclusivamente radioativa, pois possuem meia-vida extremamente longa, resultando em baixa exposição à radiação. Porém, são elementos quimicamente tóxicos ao ambiente, mesmo em mínimas quantidades (AWUAL *et al.*, 2014). A origem destes radionuclídeos no contexto do acidente nuclear é o núcleo do reator, sendo produtos esperados. Assim, justifica-se a frequência dos termos usina nuclear, núcleo do reator e outros componentes do sistema como a própria haste de combustível, vaso do reator e reservatório de água.

Por outro lado, percebe-se destaque ao trítio enquanto contaminante e foco de ações de remediação. O trítio é um isótopo radioativo do hidrogênio que contém em seu núcleo um próton e dois nêutrons. Embora esteja presente de forma vestigial na água, está presente como contaminante em decorrência do acidente. Citando o resumo de uma das patentes consultadas, voltada à separação e remoção da água contendo trítio, está sinalizado que uma grande quantidade de água radioativa (tritiada) foi produzida como resultado dos derretimentos nucleares em Fukushima Daiichi. Chama atenção para o fato de terem sido tomadas medidas de contenção na tentativa de evitar contaminação das águas subterrâneas. Porém salienta que, mesmo com as ações de prevenção concluídas, água contaminada ainda está sendo produzida diariamente. Justifica a patente considerando que a purificação da água contaminada atualmente realizada permite remoção de 62 tipos de radionuclídeos, mas que nenhuma solução definitiva para o trítio tinha sido proposta até aquele momento. Propõe invenção baseada em método de processamento de água contaminada que compreende: uma etapa para resfriar água contaminada compreendendo água tritiada misturada com água normal em um tanque; uma etapa para soprar bolhas carregadas negativamente na água contaminada; e uma etapa para coletar gelo de água tritiado do topo do tanque de água. A temperatura de resfriamento é ajustada para uma temperatura entre os pontos de congelamento da água tritiada e da água normal (JPWO2020085046 A1). Outras patentes descrevem métodos de contenção da água tritiada, procurando evitar contaminação do oceano e das águas subterrâneas (JP2016089140 A, P2015086676 A).

2.3. Segmentos tecnológicos mobilizados

A pesquisa por inventário de patentes traz informações quanto aos segmentos tecnológicos mobilizados pelo acidente nuclear estudado. Proporciona visão daqueles que tiveram esforços envolvidos no processo de enfrentamento à dispersão de radionuclídeos no ambiente. Observa-se que existem segmentos principais e outros também relevantes. As categorizações por domínio de tecnologia são baseadas em agrupamentos de códigos da Classificação Internacional de Patentes (CIP) contidos no conjunto de patentes em análise. Os códigos CIP foram agrupados em 35 campos de tecnologia, que estão representados na Figura 3. Nota-se que, de fato, há destaque nas tecnologias ambiental, engenharia química e para o agrupamento de motores, bombas e turbinas (inclui as usinas nucleares). Demonstra que os inventos também geram impactos de menor destaque em vários segmentos tecnológicos, o que indica relevância dos esforços de enfrentamento do acidente. De fato, existem catástrofes que geram impactos negativos, mas, assim mesmo, proporciona avanços em P&D.

Este resultado possibilita associação entre os segmentos de maior destaque, ou seja, cita-se a usina nuclear enquanto presente no agrupamento de motores, bombas e turbinas e, também, a tecnologia ambiental. Neste sentido, observa-se que as patentes selecionadas estiveram dentro do escopo proposto, de inventos com foco na contaminação ambiental decorrente do acidente nuclear. A tecnologia médica, por exemplo, aparece com menor destaque e se relaciona aos

aspectos de radioproteção humana, o que não necessariamente inclui o ecossistema. Assim, é compreensível que apareça com menos destaque do que a tecnologia ambiental.

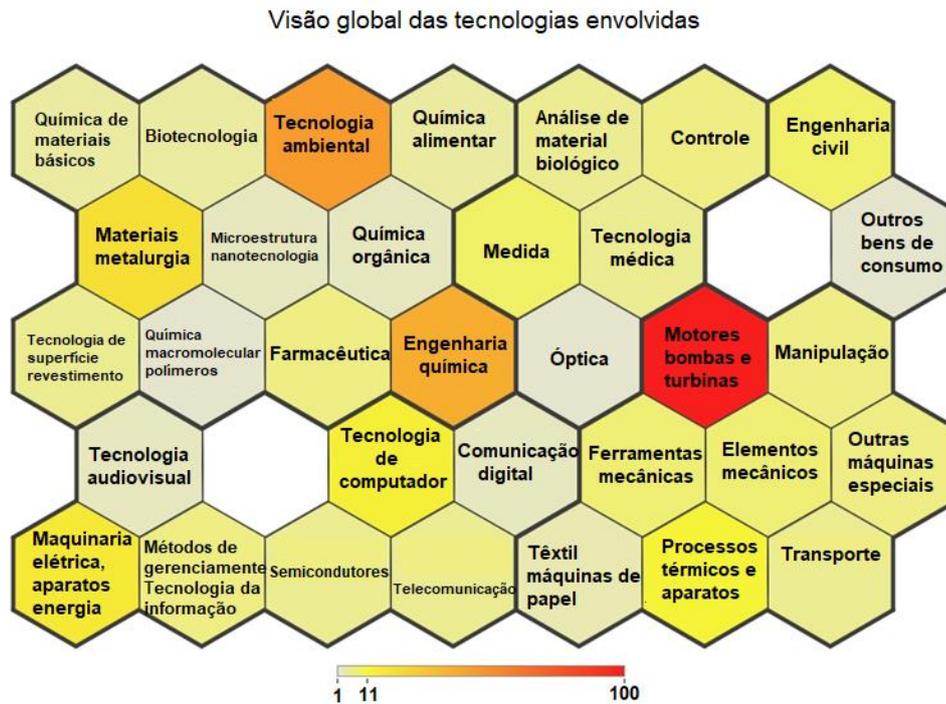


Figura 3. Segmentos tecnológicos mobilizados pelos inventos direcionados ao enfrentamento do acidente em Fukushima Daiichi.

Criado no aplicativo de Inteligência de Negócios – *Questel Orbit Intelligence*.

2.4. Repercussão em P&D no mundo após o acidente em Fukushima Daiichi

A Figura 4 apresenta ilustração do número de patentes ativas protegidas em diversos escritórios nacionais. Isso porque a patente garante ao seu titular a exclusividade ao explorar comercialmente a sua criação, mas somente na região delimitada por esta proteção. Sendo assim, para uma proteção ampla há necessidade de publicação nos escritórios nacionais de interesse. Neste sentido, permite visão da estratégia de proteção adotada pelas cessionárias e identificação de mercados-alvo. No que se refere ao escopo do presente trabalho, pode-se associar a áreas geográficas em que estão presentes ou inventores, ou regiões em que seus eventos possam ter utilidade. Assim, é utilizado como indicador da abrangência de interesse pelos inventos direcionados a proteção ambiental em casos de acidentes nucleares. Percebe-se utilidade dos inventos e conseqüente interesse comercial nos Estados Unidos, Canadá, União Europeia, China e Japão. Outras localidades que aparecem incluem o grupamento dos países emergentes Brasil, Rússia, Índia, China e África do Sul – BRICS. Além deles vemos também a Argentina, Austrália e alguns outros na Ásia e Europa.

Segundo dados de maio de 2019 da Associação Nuclear Mundial (WNA, na sigla em inglês), existem 447 reatores nucleares em operação no mundo, em 30 países. No entanto, a preocupação no que se refere aos recursos para enfrentamento da ocorrência de contaminação por radionuclídeos, em decorrência de eventuais acidentes nucleares, não se limita a países que possuem reatores nucleares em operação, uma vez que a dispersão desses materiais tem grande alcance geográfico. Estudos realizados no Oceano Ártico, por exemplo, apontam contaminação das águas em decorrência do acidente em Fukushima (HUANG, *et al.*, 2020). Assim, observa-se que os inventos e estudos científicos voltados a remediação e controle de áreas contaminadas por radionuclídeos é de interesse mundial, pois já existe um legado importante do uso das usinas

nucleares para obtenção de energia que não deve ser negligenciado. Aponta-se para a necessidade do desenvolvimento de conhecimentos direcionados para diminuir a dependência dos países em relação aos grandes atuadores na área.

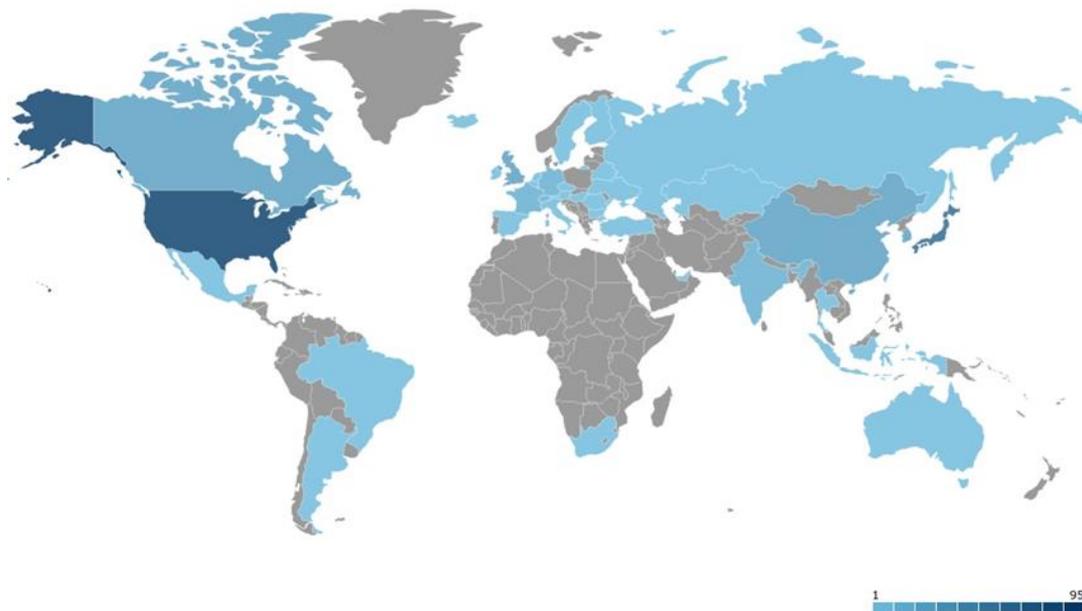


Figura 4. Vista geral das estratégias de proteção dos requerentes das patentes estudadas. Criado no aplicativo de Inteligência de Negócios – *Questel Orbit Intelligence*.

O Brasil possui atualmente duas usinas nucleares em operação e uma em construção, todas localizadas em Angra dos Reis, Rio de Janeiro. Não há ocorrências registradas de contaminação ambiental em decorrência das atividades na Central Nuclear Almirante Álvaro Alberto (CNAAA), embora existam preocupações quanto às vulnerabilidades para o acaso de uma situação de emergência. Silva *et al.* (2018) realizaram um estudo considerando os atributos geológicos, climatológicos e geográficos da região do entorno da CNAAA, analisaram a dinâmica espacial da área sob o ponto de vista de tais aspectos. Consideraram que, em conjunto, estes poderão atuar como um obstáculo ao planejamento da emergência local no caso de acidentes na usina nuclear, fator que desencadearia a evacuação da população. Chamaram atenção para a rota de fuga pela rodovia que corta toda a extensão de Angra dos Reis e cidades vizinhas, considerando um trajeto sujeito a deslizamentos, o regime de chuvas e a densidade populacional concluíram que poderão atuar como obstáculos neste processo.

3. DISPERSÃO DE RADIONUCLÍDEOS NO AMBIENTE EM DECORRÊNCIA DE ACIDENTES

A liberação de radionuclídeos no meio ambiente afeta as condições de saúde humana de várias maneiras, incluindo exposição externa, exposição interna devido à inalação de radionuclídeos e exposição interna devido à ingestão de radionuclídeos com alimentos contaminados. Na fase inicial de contaminação em decorrência de acidentes nucleares a inalação contribui significativamente para a exposição geral. No entanto, com a contaminação do meio ambiente os alimentos passam a serem considerados a via mais importante de entrada de radionuclídeos no corpo humano. Nisso se inclui a contaminação da cadeia alimentar, comprometendo desde o consumo direto de peixes contaminados pela água quanto do leite de vaca que se alimentou de materiais contaminados, dentre outros (STEINHAUSER *et al.*, 2014).

Existiram particularidades do acidente de Fukushima em relação a Chernobyl que vieram da contaminação da água do mar, o que ficou evidenciado pelo número de patentes voltadas ao monitoramento da dispersão dos radionuclídeos na água. Também se mostrou relevante o esforço tecnológico voltado a evitar contaminação das águas subterrâneas. Assim, embora já houvesse experiência anterior de enfrentamento de uma situação de contaminação ambiental pós-acidente nuclear, ainda houve necessidade de mobilização em inventos, para adaptação tanto às especificidades do acidente ocorrido no Japão, quanto da própria evolução dos recursos tecnológicos e conhecimentos científicos desde 1986. Avaliando o portfólio de patentes levantados neste trabalho é possível identificar algumas que vieram descritas com base em novos conhecimentos científicos e avanços técnicos. É um exemplo da inserção de novos conhecimentos o campo da biodosimetria, com aporte em genética, bioquímica e medicina molecular.

No que se refere aos reflexos de um grande acidente para mobilização de esforços tecnológicos e uso produtivo do conhecimento, temos exemplos de pesquisas desenvolvidas após o acidente de Fukushima que buscaram estudar o contexto para uso prático. Chartin *et al.* (2013) sinalizou que, embora lamentável, o acidente também constituiu uma oportunidade científica para rastrear transferências de partículas no ambiente, possibilitando estudo de ciclos bioquímicos e formas de transferência de contaminantes em geral dentro do ambiente natural. Propuseram realização de estudo em sistemas fluviais montanhosos japoneses no contexto pós-acidental. Procuraram estabelecer métodos alternativos para estimar a dispersão precoce de sedimentos contaminados durante os 20 meses que se seguiram ao acidente nuclear em bacias montanhosas expostas a uma sucessão de eventos: chuva erosiva, queda de neve e degelo. Neste sentido, acabaram por investigar não somente os radionuclídeos enquanto contaminantes, mas também como radiotraçadores, considerando que o acidente produziu registros geológicos, ou seja, propriedades características em camadas de sedimentos. Sinalizaram a utilidade de utilizá-los no futuro para rastreamento e datação de sedimentos.

4. CONCLUSÕES

Eventos nucleares e radiológicos que resultam em contaminação do ambiente são uma preocupação que ressurgue quando uma ocorrência específica mostra que ainda existe questões de segurança a serem consideradas. O acidente nuclear em Fukushima Daiichi, ocorrido em 2011, trouxe consequências severas ao meio ambiente e à população japonesa, mas, por outro lado, não deixou de ser uma oportunidade de revisão dos conhecimentos disponíveis que puderam ser mobilizados para seu enfrentamento. O estudo do portfólio de patentes direcionadas à resolução de questões técnicas de apoio ao monitoramento da dispersão de radionuclídeos no ambiente possibilitou a visualização de segmentos tecnológicos e áreas do conhecimento envolvidos, disponíveis para eventuais ocorrências e que podem, assim, serem requisitados em casos emergenciais. Identificou-se os radionuclídeos que demandam preocupações e as circunstância que os fizeram preocupantes como, por exemplo, a via de contaminação prevalente em Fukushima: dispersão de radionuclídeos na água. A experiência adquirida tem aplicabilidade em outros contextos. O Brasil, por exemplo, também tem sua central nuclear no litoral, com uso da água do mar em processos de refrigeração, embora em circuito secundário. Assim, a observação do cenário patentário possibilita uma visão privilegiada dos esforços em P&D, o que, em certa medida, refletem os recursos mais atuais e possibilita a construção de planos de segurança.

AGRADECIMENTOS

A autora agradece a Axonal Consultoria Tecnológica por possibilitar uso do Sistema *Questel Orbit* para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AWUAL, M.R. et al. (2014) "Radioactive cesium removal from nuclear wastewater by novel inorganic and conjugate adsorbents" in *Chemical Engineering Journal*, nº 242, p.127-135.
- BURNS, P.C. et al. (2012) "Nuclear Fuel in a Reactor Accident" in *Science*, nº 335, p.1184-1188.
- CHARTIN, C. et al. (2013) "Tracking the early dispersion of contaminated sediment along rivers draining the Fukushima radioactive pollution plume" in *Anthropocene*, nº 1, p.23-34.
- CHEN, Y. et al. (2021) "Identifying the influence of natural disasters on technological Innovation" in *Economic Analysis and Policy*, nº 70, p.22-36.
- CHUNG, J. B. (2020) Chung, J. B. "Public deliberation on the national nuclear energy policy in Korea—Small successes but bigger challenges" in *Energy Policy*, nº 145, p.111724.
- HUANG, D. et al. (2020) "The detection of Fukushima-derived radiocesium in the Bering Sea and Arctic Ocean six years after the nuclear accident" in *Environmental Pollution*, nº 256, p.113386.
- LIU, X., et al. (2014) "Adsorption removal of cesium from drinking waters: A mini review on use of biosorbents and other adsorbents" in *Bioresource Technology*, nº 160, p.142-149.
- PIRES, E.A. et al. (2020) "Sistemas de Busca de Patentes: análise comparativa entre Espacenet, Patentscope, Google Patents, Lens, Derwent Innovation Index e Orbit Intelligence" in *Cadernos de Prospecção*, nº 13, Vol. 1, p.13-29.
- SHEKHAR, S.R. et al. (2020) "Online Nuclear Emergency Response System (ONERS) for consequence assessment and decision support in the early phase of nuclear accidents-Simulations for postulated events and methodology validation" in *Progress in Nuclear Energy*, nº 119, p.103177.
- SILVA, C. et al. (2018) "Fatores de Vulnerabilidade ao Planejamento de Emergência do Complexo Nuclear de Angra dos Reis – RJ" in *Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ*, nº 41, Vol. 2, p.448-460.
- STEINHAUSER G. et al (2014) "Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: A review of the environmental impacts" in *Science of The Total Environment*, nº 470, p.800-817.
- WU, Y. (2017) "Public acceptance of constructing coastal/inland nuclear power plants in post-Fukushima China" in *Energy Policy*, nº 101, p.484-491.