

FUNDAMENTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA PARA CONDUÇÃO DE SUBMARINOS NUCLEARES



Capitão de Corveta Roberto Gazola Ortiz
Capitão de Corveta Luciano Ondir Freire
Dr. Gian Maria A. A. Sordi*
Dr. Delvonei A. Andrade*
Dra. Linda V. E. Caldas*

* Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Comissão Nacional de Energia Nuclear, São Paulo (IPEN/CNEN/SP)

1 INTRODUÇÃO

A Proteção Radiológica nada mais é do que uma série de medidas que têm por finalidade proteger o ser humano e seus descendentes contra os efeitos indesejados oriundos da radiação ionizante (CNEN, 2014). Ao fornecer proteção ao ser humano, significa também proteger todo o seu meio ambiente, uma vez que deverá estar protegida toda a sua fonte de alimentação, tanto sólida como líquida, incluindo, portanto, a fauna, a flora, bem como os sistemas aquífero e atmosférico. A radiação, por sua vez, representa energia em movimento, podendo ser feita por uma partícula ou onda eletromagnética, tanto no espaço (meio material) como no vácuo. As radiações podem ser classificadas como ionizantes e não ionizantes, quando se levam em consideração os efeitos gerados. A diferença entre elas está no fato de que a radiação ionizante é aquela que tem energia suficiente para ionizar um átomo ou uma molécula, ou seja, torná-la eletricamente carregada (SAPRA LANDAUER, 2000). Para efeito de estudo em Proteção Radiológica, somente é levada em consideração a radiação ionizante; sendo assim, todas as vezes que for citado o termo radiação, neste trabalho, trata-se da radiação ionizante.

Os submarinos com propulsão nuclear são embarcações navais dotadas de um reator de potência, do tipo PWR (Power Water Reator), cujos produtos diretos da fissão são os nêutrons, as radiações beta e gama (TAVARES, 2019). Essas radiações necessitam de medidas protetivas que são o fruto do estudo da

Proteção Radiológica. Este artigo tem por objetivo fornecer os fundamentos da proteção radiológica que serão de interesse dos futuros tripulantes do Submarino Nuclear Brasileiro (SN-BR) com o intuito de esclarecer e criar uma mentalidade de segurança que deverá ser desenvolvida de forma a consolidar não só a construção e o ciclo de manutenção, mas também a operação em segurança destas embarcações, futuro da Força de Submarinos do nosso país.

2 EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES

Os malefícios oriundos da radiação podem ser descritos pelos efeitos biológicos das radiações e podem ser divididos em reações do tecido e estocásticos. Os efeitos das reações do tecido, também chamados agudos, são aqueles que possuem um limiar de dose absorvida necessário para sua ocorrência, e a gravidade aumenta com o aumento da dose; como exemplo, tem-se o eritema, a descamação seca, a necrose etc. Os efeitos estocásticos, também conhecidos por tardios graves, por sua vez, não possuem um limiar de dose para ocorrerem, e sua gravidade independe da dose recebida; o câncer é um exemplo de um efeito biológico estocástico.

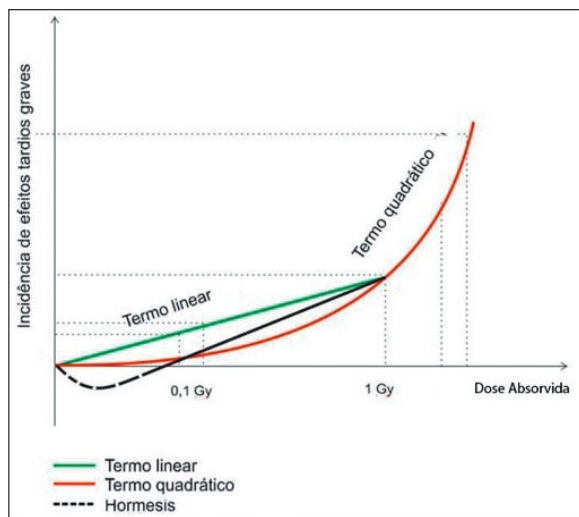


Figura 1: Incidência de efeitos tardios graves em função da dose absorvida (UNIPRO-RAD, 2015).

Como se pode observar na Figura 1 (UNIPRO-RAD, 2015), são apresentadas três curvas: uma vermelha, quadrática, que representa a relação entre a probabilidade de incidência de efeitos tardios graves (estocásticos) e a dose absorvida, normalmente utilizada somente para doses absorvidas superiores a 1 Gray (1 J/kg); uma verde, linear, representando efeitos estocásticos, utilizada para comparação entre valores de doses absorvidas inferiores a 1 Gy e uma preta para exemplificar o efeito Hormesis. Conforme já informado, os efeitos determinísticos são simples de serem evitados; basta manter a dose do Indivíduo Ocupacio-

nalmente Exposto (IOE) sempre inferior ao limiar de dose referente a cada efeito biológico que se quer evitar. O grande problema está nos efeitos estocásticos, pois, por não possuírem um limiar de dose, fica muito complicado evitá-los; a única alternativa possível é reduzir a dose ao máximo, com o intuito de minimizar a probabilidade da sua ocorrência.

Outro ponto que vale a pena ser levado em consideração, apesar de manter dividida a comunidade científica (JOLLY; MEYER, 2009), é a Hormesis. Como se pode ver na Figura 1, a curva preta pontilhada no gráfico, para doses absorvidas inferiores a 0,1 Gy, em vez de um aumento da probabilidade de ocorrência de um efeito deletério, essa pequena dose o evita. Sendo assim, considerando os estudos realizados a favor da Hormesis (JAWOROWSKI, 2010), pequenas doses (abaixo de 0,1 Gy = 100 mGy) podem ser consideradas benéficas e evitam a ocorrência de efeitos estocásticos.

3 A RADIAÇÃO DE FUNDO/NATURAL

Todas as pessoas estão expostas à radiação ionizante, em virtude da radiação de fundo ou natural, que nada mais é do que a radiação recebida pelo ser humano proveniente de elementos naturais, como: radiação cósmica, terrestre, radônio etc. Segundo Okuno (2018), a dose efetiva anual proveniente da radiação natural é, em média, de 2,42 mSv [J/kg], como se pode ver na Tabela 1.

Tabela 1: Doses Efetivas Anuais do Público devido à radiação proveniente de fontes naturais (OKUNO, 2018)

Fontes naturais de exposição	Forma de exposição	Dose efetiva anual (mSv)	
		Média	Intervalo típico
Radiação cósmica	Exposição externa	0,39	0,3-1,0
Radiação terrestre externa	Exposição externa	0,48	0,3-1,0
Radônio (inalação do ar)	Exposição interna	1,26	0,2-10,0
Ingestão de água e alimento	Exposição interna	0,29	0,2-1,0
Total		2,42	1,0-13,0

A radiação de fundo é diferente de lugar para lugar; em algumas regiões, essa radiação possui intensidade elevada, como a Praia de Cumuruxatiba, no extremo sul do estado da Bahia (BA), onde o valor médio da taxa de dose efetiva anual é de 17,72 mSv/a (VASCONCELOS, 2010), bem próximo à média anual estabelecida pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) para um IOE, que é de 20 mSv (CNEN, 2014). Os estudos conduzidos pela United Nations Environment Programme (UNEP, 2016) mostram a influência da radiação, levando em consideração somente a altitude no cálculo da dose efetiva: vide Figura 2.

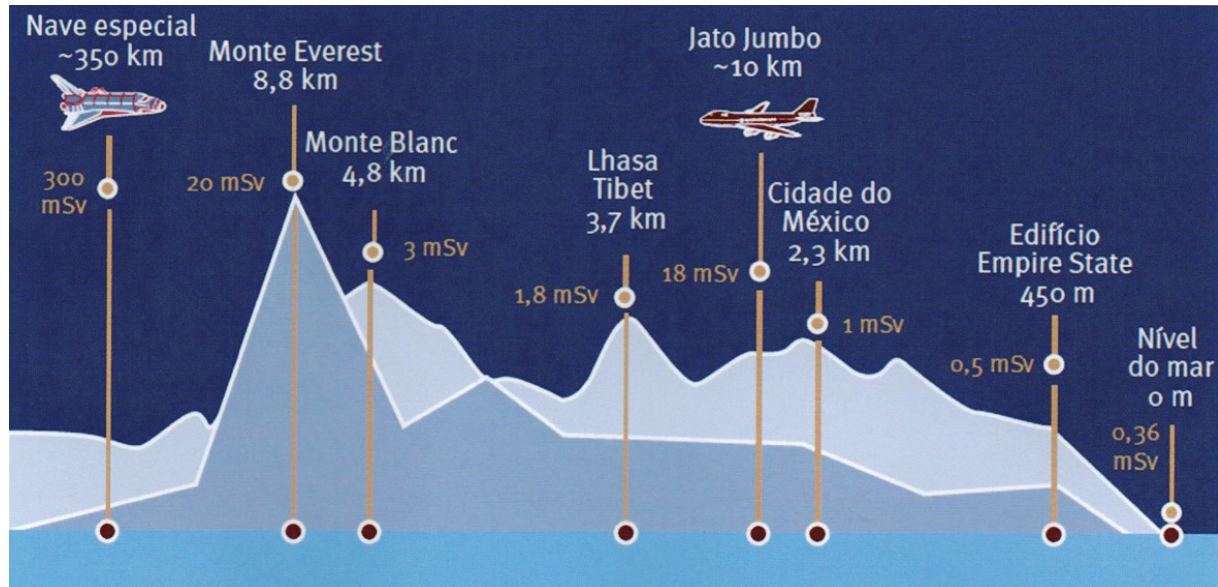


Figura 2: Doses anuais para radiação cósmica (com base na suposição de exposição nesses locais por um ano) (UNEP, 2016).

4 EXPOSIÇÃO OCUPACIONAL

Para o Serviço de Proteção Radiológica de uma instituição, somente tem interesse a dose recebida pelo IOE durante o desempenho de sua função. Sendo assim, não é levada em consideração a radiação natural, nem outras fontes às quais o IOE porventura poderá ter sido exposto fora do seu local de trabalho, como nas doses recebidas para tratamentos de saúde ou de radiodiagnóstico.

5 PRINCÍPIOS DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA

Com o intuito de evitar os efeitos biológicos ao IOE, levando em conta exclusivamente a exposição ocupacional, a Proteção Radiológica possui alguns princípios que norteiam a atividade nuclear (TAUHATA et al., 2013):

- **Justificativa da prática**

A atividade que envolve radiação deverá ser justificada, ou seja, a dose recebida por um IOE deverá

trazer benefícios tangíveis ou intangíveis para ele ou para a sociedade, que seja superior à dose recebida para o desenvolvimento desta prática.

- **Otimização**

As doses recebidas pelo IOE devem ser tão baixas quanto racionalmente exequíveis. Esse termo é conhecido como ALARA, do inglês As Low As Reasonably Achievable. Para que esse princípio seja aceito, deverá ser realizado um estudo com o levantamento das Opções de Proteção em que o Tomador de decisão deverá aplicar técnicas previstas na Publicação 55 (ICRP, 1989) da Comissão Internacional de Proteção Radiológica, a fim de verificar a melhor opção de segurança. Essa análise deverá ser encaminhada à CNEN para aprovação ou solicitação de um novo estudo.

- **Monitoramento**

Basicamente, o monitoramento é dividido em Monitoramento Individual e Monitoramento do Local de Trabalho. O Monitoramento do Local de Traba-

lho consiste em medidas realizadas por detectores no ambiente de trabalho, que sejam capazes de detectar a radiação externa, a contaminação de superfície e a contaminação do ar, quando aplicável. Ela tem um caráter preventivo, pois a dose pode ser avaliada sem a presença do trabalhador e, portanto, podem ser tomadas medidas de proteção antes de as doses serem recebidas.

O Monitoramento Individual, por sua vez, tem o caráter confirmatório. É realizado por equipamento a ser portado pelo IOE ou por medições de materiais presentes em seu corpo, bem como a interpretação destas medições. Devem compreender a exposição externa, a contaminação de pele e roupa, e a exposição interna.

A Dosimetria Pessoal é um exemplo de Monitoramento Individual, e vale a pena ressaltar que precisará computar a dose recebida pelo IOE somente durante o desempenho de sua função; sendo assim, o equipamento deverá ser mantido no local de trabalho em área livre de radiações.

6 LIMITAÇÃO DE DOSE INDIVIDUAL

As medições realizadas pelos dois tipos de monitoramentos deverão possibilitar a medição da dose de forma a garantir o acompanhamento para que não ultrapasse os valores da Tabela 2, bem como os valores obtidos por meio do procedimento de Otimização.

Vale a pena ressaltar que os Limites de Doses Anuais deverão ser compreendidos, no nosso país, entre os meses de janeiro e dezembro de cada ano e que o valor de 20 mSv de dose efetiva de corpo inteiro e dose equivalente do cristalino são médias aritméticas de 100 mSv em cinco anos, não excedendo em nenhum dos anos o limite de 50 mSv.

Esses limites deverão ser controlados por setor próprio de radioproteção e seu cumprimento será de responsabilidade do tomador de decisão (CNEN, 2014).

7 PROBLEMAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA ATINENTES AOS SUBMARINOS

Enquanto nas instalações radiativas e nucleares, via de regra, o espaço não é problema e, portanto, pode-se facilmente separar o ambiente radiativo daquele não radiativo, definido pelo limite anual do público, e assim estabelecer rotas diferentes para o pessoal e o material radioativo, não é o caso do submarino, que é limitado pelo interior de um tubo de aço, o casco resistente.

Por questões de equilíbrio do próprio submarino dentro da água, deve-se obrigatoriamente centralizar o reator, com toda a sua blindagem possível, pelo espaço restrito de que dispõe. Portanto, alguns tripulantes deverão passar muito próximo a ele para poder percorrer as dependências que se encontram à ré do submarino. Deste modo, há locais de dose elevada, em que o tempo de permanência deve ser controlado.

Outro problema importantíssimo é o tempo de trabalho em presença de radiação: enquanto para as instalações radiativas e nucleares são consideradas 2.000 h/ano, em um submarino, para o mesmo limite anual, deve-se considerar 8.766 h/ano, o que se obriga a abaixar muito mais as doses.

Evidentemente, as menores doses encontram-se nas extremidades do casco resistente, mas deve-se lembrar que grande parte deste espaço não só pode ser ocupado pelo pessoal, mas também pelos tanques, painéis, gabinetes eletrônicos, armamentos etc.

Tabela 2: Limites de Doses Anuais (CNEN, 2014)

Limites de Doses Anuais			
Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv	1 mSv
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv	15 mSv
	Pele	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

8 CONCLUSÕES

Após uma análise breve dos conceitos, pode-se concluir que:

- A média estabelecida como limite anual de dose efetiva de corpo inteiro estabelecida pelo órgão regulador (CNEN) em IOE, em muitos casos, é bem próxima à radiação natural em determinados lugares do planeta.
- Todos os tripulantes do Submarino Nuclear Brasileiro (SN-BR) deverão ser considerados IOE.
- É necessária a capacitação prévia dos militares que formarão o Serviço de Radioproteção do SN-BR.
- O SN-BR necessitará de instalações de apoio, em área livre de radiação, com o intuito de depositar os instrumentos de dosimetria pessoal.
- Membros do setor operativo deverão acompanhar o processo de otimização da planta nuclear embarcada do SN-BR em virtude de serem a parte interessada na relação entre dose e incidência de efeitos tardios graves (estocásticos).

REFERÊNCIAS

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear. Diretrizes básicas de proteção Radiológica (CNEN NN 3.01). Rio de Janeiro, 2014. Disponível em: <<http://appasp.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm301.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2020.

ICRP – International Commission on Radiological Protection. Optimization and decision-making in radiological protection. Publication 55, New York. CIPR, 1989. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/ANIB_20_1>. Acesso em: 22 abr. 2020.

JAWOROWSKI, J. Radiation hormesis – A remedy for fear. SAGE Journals. v. 29, p. 263-270, 2010. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1177/0960327110363974>>. Acesso em: 28 mar. 2020.

JOLLY, D.; MEYER, J. A brief review of radiation hormesis. Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine. v. 32, p. 180-187, 2009. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03179237>>. Acesso em: 28 mar. 2020.

OKUNO, E. Radiação: Efeitos, riscos e benefícios. Oficina de Textos: São Paulo, 2018. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=dRFaDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PT6&dq=o+que+é+radiação+de+fundo&ots=i8r6Lok-SR&sig=BLtoi6z18cA-BK9DHvRP0c_J7so#v=onepage&q=radiação%20de%20fundo&cf=false>. Acesso em: 28 mar. 2020.

SAPRA LANDAUER. Radiação: sua descoberta, classificações e aplicações. SA. São Carlos, 2000. Disponível em: <<https://www.sapralandauer.com.br/protacao-radiologica-saiba-sobre-osprincipais-aspectos-normas-e-tecnologias-empregadas/o-que-e-radiacao-nocoes-basicas-deprotacao-radiologica>>. Acesso em: 28 mar. 2020.

TAUHATA, L.; SALATI, I.; PRINZIO, R. D.; PRINZIO, A. R. D. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos. IRD: CNEN, 2013. Disponível em: <http://www.cnen.gov.br/images/CIN/PDFs/Tahyata_Fundamentos.pdf>. Acesso em: 28 mar. 2020.

TAVARES, O. A. P. 80 anos da fissão nuclear: a mais abundante fonte de energia disponível para humanidade. Ciência e Sociedade. v. 6, p. 19-34, 2019. Disponível em: <<http://revistas.cbpf.br/index.php/CS/article/view/347/226>>. Acesso em: 5 abr. 2020.

UNEP – United Nations Environment Programme. Radiação: efeitos e fontes. UNEP, 2016. Disponível em: <<http://www.aben.com.br/Arquivos/544/544.pdf>>. Acesso em: 06 abr. 2020.

UNIPRORAD – Unificação dos Programas de Proteção Radiológica. Efeitos biológicos da radiação. São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.uniprorad.com.br/programas/etapa3.php?itm=57>>. Acesso em: 28 mar. 2020.

VASCONCELOS, D. C. Estudo da radioatividade em areias de praias do extremo sul da Bahia utilizando métodos de análises nucleares. 2010. 124 p. Tese (Doutorado em Ciências e Técnicas Nucleares) da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/MBAM-8CUPWM/1/tese_final.pdf>. Acesso em: 6 abr. 2020. proveniente de fontes naturais (OKUNO, 2018)