EDUARDO GERULIS

Controle de dose em transporte rodoviário de material radioativo

**Tese apresentada ao Instituto de
Pesquisas Energéticas e Nucleares
(Autarquia associada à Universidade
de São Paulo) para obtenção do título
de Doutor em Ciências**

**Área de Concentração: Tecnologia
Nuclear – Aplicações**

**Orientador: Prof. Dr. Gian-Maria
Agostino Ângelo Sordi**

Versão corrigida

(Versão original disponível no IPEN)

São Paulo

2013

Dedicatória

Dedico este trabalho ao IPEN-CNEN/SP e aos interessados neste assunto.

Agradecimentos

Ao meu chefe, Dr. Demerval Leonidas Rodrigues por permitir a realização deste trabalho;

Ao Dr. Gian-Maria Agostino Ângelo Sordi pela orientação, confiança e paciência;

Ao Dr. Alberto Saburo Todo pelos incentivos, ensinamentos e sugestões;

Ao M.Sc. Fábio Suzuki pelas sugestões e revisão;

À Dra. Malvina Boni Mitake pelas sugestões e participação nas Bancas;

Ao Bel. Olavo Silva pelas críticas e discussões;

Ao Bel. Feijó Vasques pela leitura e disposição em colaborar;

Às empresas transportadoras BND, HVL e REM pelo fornecimento dos dados;

Aos convidados a compor a Banca: Dr. Gian-Maria Sordi, Dra. Clarice de Freitas Acosta Perez, Dra. Teresa Cristina Nathan Outeiro Pinto, Dr. Ivan Santos, Dr. Alberto Todo, Dr. Demerval Rodrigues, Dra. Renata Correa Nieto, Dra. Carla Roberta de Barros Rodrigues Dias, Dr. José Cláudio Dellamano e Dra. Malvina Mitake pela participação;

Aos professores da pós-graduação pelos ensinamentos;

Aos colegas de trabalho do Serviço de Radioproteção, Biblioteca, Pós-graduação, Centro de Radiofarmácia do IPEN que colaboraram com imagens, serviços ou mesmo indiretamente na realização deste trabalho;

À minha família por compreender a necessidade de dedicação de horas de estudo para a realização deste trabalho;

Aos amigos pela compreensão à minha ausência, neste período;

Aos não citados neste momento, mas que também ajudaram ou torceram pelo bom resultado.

RESUMO

GERULIS, Eduardo. **Controle de dose em transporte rodoviário de material radioativo**. São Paulo, 2013. Tese (Doutorado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo.

As doses de radiação ionizante para os trabalhadores no transporte de material radioativo devem ser tão pequenas quanto razoavelmente exequível. As doses médias dos motoristas e carregadores amostrados neste trabalho devem ser diminuídas. A demonstração do controle das doses em veículo rodoviário com material radioativo, requisitada pelo regulamento brasileiro atual, norma CNEN NE 5.01, é apresentada em formulário próprio com valores de exposição obtidos em posições de ocupação regular de indivíduos do público e de trabalhadores, mesmo quando se expede veículo sem a necessidade de “uso exclusivo” ($\Sigma IT \leq 50$). Este trabalho mostra, por meio de pesquisa bibliográfica, elaboração de modelos e pesquisa de campo, que esta demonstração do controle com a obtenção dos valores de exposição nesta situação, para um método de controle melhor, deve ser realizada pela apresentação do registro do acúmulo de cargas, limitado ($\Sigma IT \leq 50$), a fim de evitar a obtenção destas medidas, para que haja padronização com regulamentos estrangeiros e para que os custos e os tempos, importantes para expedição de radiofármacos com meia-vida curta, e também as atuais doses laborais dos técnicos de radioproteção sejam todos diminuídos. Os valores de exposição dos parâmetros utilizados com esse método são menores do que seus limites regulamentares. Para contribuir com essas finalidades devem ser apresentadas pelo regulamento brasileiro atualizado as distâncias de segregação entre as cargas e as cabines dos veículos.

Palavras-chave: Proteção radiológica. Uso exclusivo. Expedição.

ABSTRACT

GERULIS, Eduardo. **Dose control in road transport of radioactive material.** São Paulo, 2013. Thesis (Doctoral) – Nuclear Energy Research Institute, University of São Paulo,

The radiation doses to workers in the transport of radioactive material should be as low as reasonably achievable. The average doses of drivers and loaders, sampled in this thesis should be decreased. The demonstration of doses control in a road vehicle with radioactive material required by the current Brazilian regulation, CNEN NE 5.01 should be written in its own printed form with exposure values obtained in normally occupied positions from workers and members of the public, even when the consignment does not need "exclusive use" ($\Sigma IT \leq 50$). Through bibliographic research, modeling and field research, this research work shows that this demonstration of the control should be done by writing the registration accumulation of load, limited ($\Sigma IT \leq 50$), also in the own printed form. It is for a better control method, in order to avoid the use of measuring equipment, to build standardization with foreign regulations, to the current occupational doses of radioprotection technicians, the costs and time, (important for consignment with radiopharmaceuticals short half-life) would be all smaller. Exposure values of the parameters used with this method are smaller than regulatory limits. The segregation distances between loads and the cabins of vehicles shall be showed by Brazilian regulation updated to contribute to these aims.

Keywords: Radiological protection. Exclusive use. Consignment.

LISTA DE SIGLAS

<i>ALARA</i>	<i>As Low As Reasonably Achievable</i>
BAE	Baixa Atividade Específica
CNEN	Comissão Nacional de Energia Nuclear
<i>D</i>	Dose
DTF	Distância entre o Trabalhador e a Fonte radioativa
DTL	Dosímetro tipo Termoluminescente
EDG	Embalagem de Gerador
<i>INIS</i>	<i>International Nuclear Information System</i>
IPEN	Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
<i>IRPA</i>	<i>International Radiation Protection Association</i>
IT	Índice de Transporte
MR	Material Radioativo
<i>NRC</i>	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
OCS	Objeto Contaminado na Superfície
OIEA	Organismo Internacional de Energia Atômica
<i>PATRAM</i>	<i>Package and Transport of Radioactive Material</i>
PPR	Programa de Proteção Radiológica
RMD	Recipiente Múltiplo de Despacho
TMR	Transporte de Material Radioativo
TPP	Transporte de Produto Perigoso
<i>WNTI</i>	<i>World Nuclear Transport Institute</i>
X	Exposição

SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 IMPORTÂNCIA DO TRANSPORTE DE MATERIAL RADIOATIVO	1
1.2 DOSES NO TMR.....	2
1.3 REALIZAÇÃO DO TMR BASEADA EM EXIGÊNCIAS	3
1.4 CONTROLE DAS DOSES	6
1.5 MOTIVAÇÃO PARA O PRESENTE TRABALHO	7
1.6 FINALIDADES	9
1.7 OBJETIVOS	10
1.8 ORIGINALIDADE	11
2 CONHECIMENTOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS BÁSICOS NECESSÁRIOS PARA UM MELHOR ENTENDIMENTO DO TRABALHO	12
2.1 ÍNDICE DE TRANSPORTE	12
2.2 RELAÇÃO DO IT COM O CONTEÚDO RADIOATIVO.....	13
2.3 “USO EXCLUSIVO” E “ARRANJO ESPECIAL”	15
2.4 LIMITES PARA AS EXPEDIÇÕES.....	16
2.4.1 Contaminação.....	16
2.4.2 Radiação	16
2.5 MONITORAÇÃO RADIOLÓGICA.....	17
2.6 EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	18
2.7 GRANDEZAS FÍSICAS USADAS EM PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	19
2.8 PRINCÍPIOS BÁSICOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	19
2.9 EFEITOS BIOLÓGICOS DAS RADIAÇÕES	19
2.10 EXPOSIÇÃO EXTERNA E INTERNA	20
2.11 ENGENHARIA DE PROTEÇÃO.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	23
3.2 DESENVOLVIMENTO DE MODELOS.....	23
3.3 PESQUISA DE CAMPO	24
3.3.1 Monitoração de área	30
3.3.2 Doses laborais.....	31
4 DESENVOLVIMENTO DE MODELOS	32
4.1 Nas superfícies dos veículos:.....	32
4.2 A 2 m das superfícies dos veículos:	32
4.3 Na cabine do veículo:.....	32
5 RESULTADOS.....	38
5.1 PESQUISA BIBLIOGRÁFICA.....	38
5.2 DESENVOLVIMENTO DE MODELOS.....	40
5.3 PESQUISA DE CAMPO	41
5.3.1 Monitoração de área	45
5.3.2 Doses laborais.....	48

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	51
6.1 DIFICULDADES ENCONTRADAS.....	54
7 CONCLUSÕES	56
8 FUTUROS TRABALHOS.....	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

1.1 Importância do transporte de material radioativo

As inúmeras aplicações da tecnologia nuclear nas áreas da medicina, indústria, agricultura e ciclo do combustível nuclear que utilizam material radioativo (MR) como fontes de energia e de radiação ionizante estão em crescimento. Para proporcionar essas aplicações os MRs são transportados comercialmente por modais de transporte eleitos pela consideração de fatores econômicos, de segurança e de prioridade de uso.

O transporte de material radioativo (TMR) anual, em escala mundial, compreende dezenas de milhões de volumes expedidos [1] a partir dos locais de produção até as instalações e locais de consumo.

A quase totalidade das expedições com volumes de MR contém quantidades pequenas e mais de 85% é expedido para aplicação na medicina e indústria [1]. Na medicina, os radionuclídeos são aplicados principalmente como radioisótopos e radiofármacos para diagnósticos e terapias, além de radioterapias.

Em 2012, foram mais de 5.000 expedições rodoviárias anuais realizadas pelo maior expedidor brasileiro: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) que expediu mais de 50.000 volumes com radiofármacos (fontes não-seladas). Destes, mais de 50% de seus volumes principais (com ^{99}Mo e ^{131}I) são expedidos, após percurso rodoviário, via aérea há mais de 10 anos [2] em razão das grandes distâncias a serem atingidas em pouco tempo, pois estes radiofármacos, principalmente os utilizados para diagnóstico, apresentam uma meia-vida curta. Segundo a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) estimam-se outras cerca de 10.000 expedições anuais no Brasil para uso industrial com fontes seladas de uso mais prolongado, porém estas fontes são expedidas repetidas vezes na mesma jornada de trabalho por trajetos rodoviários curtos totalizando aquela quantidade de expedições.

Mundialmente o TMR rodoviário, comparado ao ferroviário, aquaviário e aéreo é o mais significativo por representar a quantidade transportada maior já

que também há trajeto rodoviário agregado desde/até as estações ferroviárias, os portos e aeroportos. Também por haver indivíduos do público presentes ao redor do veículo, causando maior potencial de dose coletiva, diferentemente de veículos de outros modais de transporte, onde estes indivíduos, apesar de poderem estar expostos por mais tempo, são em menor número e permanecem no interior dos veículos. Essa peculiaridade do TMR rodoviário exige controle de dose para indivíduos do público do lado externo dos veículos.

1.2 Doses no TMR

A literatura científica atual fornece as seguintes informações relacionadas às doses no TMR:

- a) As maiores doses laborais no TMR estão relacionadas àquele efetuado por rodovia [3] para os radioisótopos usados em medicina, pesquisa e indústria;
- b) As doses laborais advindas do TMR terrestre tiveram uma redução desde as primeiras revisões das recomendações internacionais em virtude de melhorias nos procedimentos laborais [4;5];
- c) Alguns trabalhadores não seguem os procedimentos operacionais recomendados internacionalmente [6];
- d) O potencial de dose laboral é diferenciado de acordo com as atitudes individuais e das equipes [7], bem como de acordo com as categorias de trabalhadores, pois estas apresentam funções também diferenciadas no TMR.
- e) No transporte aéreo de radioisótopos para medicina, as doses laborais dos carregadores podem ultrapassar 1 mSv/ano em virtude da limitada informação assimilada sobre políticas de proteção às radiações ionizantes [8];
- f) Segundo o *World Nuclear Transport Institute (WNTI)* a monitoração individual da dose de trabalhadores envolvidos nos transportes do ciclo do combustível é desnecessária, pois suas doses não são suscetíveis de ultrapassar 1 mSv/ano. O principal problema está associado ao carregamento e descarregamento de veículos rodoviários com os outros materiais radioativos que não pertencem ao ciclo do combustível nuclear [9, p.171];
- g) Além das atividades totais transportadas para a medicina terem aumentado nas últimas décadas mundialmente, houve também um aumento de atividade

em cada volume transportado. Isto ocorreu no Brasil e também em outros países [10]. Nestes casos, deve-se otimizar o transporte com o uso de blindagens nas embalagens a fim de que as doses externas sejam mantidas de acordo com o princípio *ALARA*;

h) As maiores exposições para os indivíduos do público são decorrentes do transporte aéreo de radioisótopos para medicina [11]. No transporte rodoviário estes indivíduos apresentam doses muito menores do que os valores-limite anuais de 1 mSv [10;12].

1.3 Realização do TMR baseada em exigências

Com relação à realização do TMR, a literatura atual permite as seguintes observações:

O TMR é um serviço cuja expedição é uma tarefa especializada [13], controlada pela categoria de trabalhadores de técnicos de radioproteção e realizado com aplicações de exigências regulamentares nacionais e recomendações internacionais que propiciam seu uso comercial. O regulamento brasileiro específico de TMR [14] é de 1988 e é baseado em recomendações do Organismo Internacional de Energia Atômica, OIEA [15] e suas revisões subsequentes [16;17;18;19] para uma padronização mundial de segurança. Tanto as exigências nacionais como as recomendações do OIEA são periodicamente revisadas para contemplar novos paradigmas de segurança [20].

Em razão das características do material radioativo, o transporte é realizado com resguardo às pessoas, à propriedade e ao meio-ambiente, em condições de rotina, normais e de acidente. Para isso, ele é acondicionado em embalagem que assegura a sua contenção e o controle dos valores externos de radiação. Seus arranjos adequados asseguram a prevenção de reação em cadeia e de danos causados por superaquecimento.

O material radioativo embalado é denominado de volume e sua atividade determina o padrão de desempenho exigido para a embalagem. No regulamento específico de TMR há exigências para controlar o transporte nos volumes, nas operações de acondicionamento e carregamento e nos veículos.

A quantidade de volumes é limitada para este controle, bem como a dose externa de radiação ionizante.

Nos veículos, para indivíduos do público, essa quantidade de volumes limitada garante a obediência a critérios de dose apresentados nas recomendações com o propósito de cálculo de distâncias de segregação ou taxas de dose para áreas regularmente ocupadas durante o transporte e o acondicionamento em trânsito: 1 mSv ao ano para a pessoa representativa desses indivíduos. Porém para trabalhadores e para as cargas mais sensíveis à radiação ionizante (filmes não velados) são necessárias distâncias de segregação aos volumes e não basta limitar a quantidade. Os critérios de dose apresentados nas recomendações são respectivamente 5 mSv ao ano para os trabalhadores e 0,1 mSv por carga de filmes não velados, lembrando que o limite laboral de dose efetiva é de 20 mSv ao ano para trabalhadores. Também é permitido o transporte de quantidades maiores, ainda que limitadas e uma integridade menos rigorosa para materiais de baixa atividade específica, BAE, desde que os valores-limite de exposição, originados nos veículos rodoviários, sejam obedecidos. Nestas situações são requeridas, no veículo rodoviário, tomadas de valores de radiação (*monitorações de rotina*) em posições representativas de ocupação regular de trabalhadores e de indivíduos do público para comprovação das exigências regulamentares.

Nas operações de armazenamento e carregamento, a quantidade limitada em grupos de volumes e as distâncias de segregação entre os grupos de volumes garantem os valores-limite de dose regulamentar para os trabalhadores.

O regulamento brasileiro de TMR [14], apesar de estar em processo de revisão a fim de contemplar as recomendações do OIEA [21] exige:

a) para controlar a dose em relação aos trabalhadores, que sejam realizados cálculos de taxa de dose associados às distâncias de segregação, ou utilizadas distâncias de segregação adequadas, porém não apresenta os valores de taxas de dose ou das distâncias como as apresentadas nas Tabelas 1.1, 1.2 e 1.3 reproduzidas de regulamentos estrangeiros [22;23]:

Tabela 1.1 - Distâncias mínimas de segregação de volumes para o transporte por via pública, reproduzidas do *Code of Federal Regulation, USA* [22]

Índice de Transporte Total (vide definição no item 2.1)	Distância de separação mínima para o mais próximo filme não velado em vários tempos de trajeto (m)					Distância mínima para área com pessoas ou distância mínima da divisória do compartimento de carga (m)
	Até 2 horas	2 a 4 horas	4 a 8 horas	8 a 12 horas	Mais de 12 horas	
Não	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1 a 1,0	0,3	0,6	0,9	1,2	1,5	0,3
1,1 a 5,0	0,9	1,2	1,8	2,4	3,4	0,6
5,1 a 10,0	1,2	1,8	2,7	3,4	4,6	0,9
10,1 a 20,0	1,5	2,4	3,7	4,9	6,7	1,2
20,1 a 30,0	2,1	3,0	4,6	6,1	8,8	1,5
30,1 a 40,0	2,4	3,4	5,2	6,7	10,1	1,8
40,1 a 50,0	2,7	3,7	5,8	7,3	11,0	2,1

NOTA: A distância nesta tabela deve ser medida a partir do ponto mais próximo até o ponto de medida.

Tabela 1.2 - Distâncias mínimas entre volumes de categoria Amarela-II ou de categoria Amarela-III e pessoas, reproduzidas do *European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road* [23]

Soma dos Índices de Transporte não maior que	Tempo de exposição por ano (h)			
	Áreas de membros do público têm acesso regular		Áreas de trabalho regularmente ocupadas	
	50	250	50	250
	Distância de segregação sem nenhum material de blindagem intervindo (m)			
2	1	3	0,5	1
4	1,5	4	0,5	1,5
8	2,5	6	1,0	2,5
12	3	7,5	1,0	3
20	4	9,5	1,5	4
30	5	12	2	5
40	5,5	13,5	2,5	5,5
50	6,5	15,5	3	6,5

NOTA: Volumes ou grupo de volumes de categoria Amarelo-II ou Amarelo-III não devem ser carregados em compartimentos ocupados por passageiros, exceto aqueles exclusivamente reservados aos controladores especialmente autorizados a acompanhar tais volumes ou grupo de volumes. Ninguém mais do que os membros da tripulação do veículo deve ser permitido em veículos que transportam volumes, grupo de volumes ou contêineres que portem etiqueta categoria Amarelo-II ou Amarelo-III.

Tabela 1.3 - Distâncias mínimas entre volumes de categoria Amarela-II ou de categoria Amarela-III e volumes ou malotes portando a palavra "FOTO", reproduzidas do *European Agreement Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road* [23]

Número total de volumes não maior que		Soma dos Índices de Transporte não maior que	Jornada ou duração de armazenamento (h)							
Categoria			1	2	4	10	24	48	120	240
Amarela-III	Amarela-II		Distância mínima (m)							
		0,2	0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	2	3
		0,5	0,5	0,5	0,5	1	1	2	3	5
	1	1	0,5	0,5	1	1	2	3	5	7
	2	2	0,5	1	1	1,5	3	4	7	9
	4	4	1	1	1,5	3	4	6	9	13
	8	8	1	1,5	2	4	6	8	13	18
1	10	10	1	2	3	4	7	9	14	20
2	20	20	1,5	3	4	6	9	13	20	30
3	30	30	2	3	5	7	11	16	25	35
4	40	40	3	4	5	8	13	18	30	40
5	50	50	3	4	6	9	14	20	32	45

b) para controlar as doses em relação aos indivíduos do público requer que seja efetuada a *monitoração de rotina* para demonstrar o controle realizado com os valores obtidos, preenchidos em formulário próprio para o acompanhamento do veículo e da carga, mesmo para o potencial de dose causado pela carga que não requeira "uso exclusivo" ($\Sigma IT \leq 50$), diferentemente do controle realizado em países estrangeiros que requerem *monitorações* dependendo do potencial de dose da carga transportada.

1.4 Controle das doses

O controle das doses exigido pelo regulamento brasileiro apresenta alguns problemas tanto com relação aos trabalhadores como com relação aos indivíduos do público:

a) Em relação à dose dos trabalhadores: Os veículos podem ser expedidos com taxas de dose ou distâncias de segregação entre os volumes e a cabine do motorista de modo que os volumes preencham todos os espaços do

compartimento de cargas do veículo sem ser aplicada a otimização para diminuir as doses individuais, ainda que os limites de acúmulo de carga sejam obedecidos. Isto é mais evidente em veículos pequenos. Quando os volumes são entregues em vários destinos há manuseio em trânsito que também favorece essa situação apesar de sempre haver obediência aos valores-limite de exposições nos veículos e apesar dos trabalhadores sujeitos a taxas de dose maiores do que 0,02 mSv/h em suas cabines usarem dosímetros individuais. Dessa forma, os valores de taxa de dose na cabine podem ser maiores do que os ideais e ainda serem aumentados no manuseio em trânsito por reacondicionamento de volumes. Inversamente, as distâncias aos volumes podem ser menores do que as ideais e ainda serem diminuídas no manuseio em trânsito. Além disso, os trabalhadores que realizam atividades de acondicionamento, carregamento e descarregamento com exposição à radiação, além de ocuparem regularmente a cabine dos veículos, podem receber doses laborais maiores do que os 5 mSv/ano inicialmente estimados em razão do acúmulo de funções e da grande variação do tempo previsto de permanência individual em ambas as atividades.

b) Em relação à dose dos indivíduos do público: A demonstração do controle por *monitorações de rotina* independente da carga não beneficia a dose dos indivíduos do público, pois esta já está limitada com a restrição do acúmulo da carga, porém aumenta a dose laboral de trabalhadores que as realizam (técnicos de radioproteção). Além disso, requer tempo, equipamentos e trabalhadores submetidos às doses laborais, apesar destas serem pequenas por serem recebidas em pouco tempo ou em posições que representam a presença de indivíduos do público.

1.5 Motivação para o presente trabalho

As operações de transporte rodoviário envolvem basicamente quatro categorias de trabalhadores: carregadores, motoristas, técnicos de radioproteção e fiscais, como por exemplo, o policial rodoviário [24]. Estas categorias de trabalhadores possuem potencial de dose diferente entre si e devem possuir treinamento especializado para, respectivamente, manusearem, conduzirem, expedirem e conferirem o MR.

A motivação na elaboração do plano de pesquisa foi conciliar a necessidade de redução da dose de trabalhadores no TMR [3;8;12] com a observação, em mais de 20 anos de experiência e mais de 50.000 expedições, dos valores de taxa de dose no acondicionamento e carregamento de veículos, nas superfícies externas e a 2 metros dos veículos rodoviários (carregados até com carga máxima de radiofármacos, cujo $\Sigma IT \leq 50$), apresentando valores sempre menores do que os limites regulamentares. O projeto foi fortalecido pela troca de experiências profissionais e leitura de recomendações, regulamentações e trabalhos científicos publicados internacionalmente.

Para a maioria das categorias de trabalhadores (carregadores, motoristas e técnicos de radioproteção) a redução das doses pode ser atingida. Para a categoria de fiscais, cujas áreas regularmente ocupadas são as mesmas dos indivíduos do público, essa redução é desnecessária.

A meia-vida dos radiofármacos utilizados na medicina, por suas características intrínsecas, de aplicações em seres humanos, é menor do que a meia-vida dos radionuclídeos utilizados na indústria, pesquisa (instalações radiativas) e ciclo do combustível (instalações nucleares). Além disso, o número de procedimentos médicos possíveis de serem realizados por cada fonte expedida para pacientes é pequeno em relação ao número de procedimentos possíveis de serem realizados por cada fonte nas outras aplicações. Por essas razões há uma demanda notável de TMR para a medicina, com radiofármacos, em relação às outras aplicações.

A motivação da escolha de radiofármacos para representar as expedições de TMR foi em razão da proporção que estes representam no TMR mundial e brasileiro. O número de expedições realizadas para a medicina com radiofármacos pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, IPEN, é muito maior do que o número de expedições realizadas para as demais aplicações, como é na maioria dos países, apesar de o número de instalações relacionadas à indústria no Brasil ser equivalente ao número de instalações relacionadas à medicina, segundo a CNEN. O IPEN realizou em 2012 a proporção de TMR apresentada no Gráfico 1:

Gráfico 1 - Expedições do IPEN de TMR rodoviário em 2012

As expedições para as outras aplicações tiveram seus valores avaliados também e, apesar de seus conteúdos possuírem energias maiores [25], as taxas de dose nos veículos são menores em razão da menor quantidade de carga. Os veículos que transportam irradiadores de gamagrafia para uso industrial possuem uma segunda embalagem (caixa metálica) fixada ao assoalho do compartimento de cargas que limita a quantidade de fontes transportadas.

1.6 Finalidades

As ações que se esperam alcançar são:

a) Diminuir a dose laboral dos motoristas, carregadores e técnicos de radioproteção e, portanto a dose coletiva nas operações de TMR e acondicionamento em trânsito para contribuir com o princípio da otimização da proteção radiológica.

b) Saber se há algum parâmetro de controle da radiação causada pelo TMR mais restritivo entre parâmetros de controle e determiná-lo.

c) Provar que acúmulos maiores de cargas radioativas no veículo ainda permitem satisfazer os valores-limite de exposição estabelecidos para o público e mostrar que as *monitorações de rotina* são desnecessárias.

1.7 Objetivos

Após verificar se existe algum trabalho já realizado que possa ser útil para contribuir, complementar ou para comparar com este por meio de uma pesquisa bibliográfica, os objetivos são:

a) Obter valores de exposições e de doses laborais por meio de modelos, tais como previstos em programas de proteção radiológica (PPRs) [26;27;28], representativos no TMR.

b) Obter valores de exposições e de doses laborais em uma pesquisa de campo.

c) Demonstrar os valores de taxa de dose de radiação ($\dot{D}$) nas áreas regularmente ocupadas por indivíduos do público (ao redor do veículo) com a soma dos índices de transporte, IT (ver definição no item 2.1) dos volumes menor ou igual a 50.

d) Demonstrar os valores de taxa de dose de radiação ($\dot{D}$) nas áreas regularmente ocupadas por trabalhadores (cabine do motorista e área de acondicionamento de volumes).

e) Avaliar os seguintes parâmetros a serem obtidos na pesquisa de campo: soma dos índices de transporte dos volumes, exposição na cabine do veículo de transporte, exposição nas superfícies do veículo e exposição a dois metros dele. Comparar seus valores com os valores-limite regulamentares para verificar seu comportamento por meio da construção de um gráfico com linhas de tendência para avaliação desses valores.

f) Investigar se há realmente necessidade de obtenção dos valores de todos estes parâmetros citados, nas expedições de radiofármacos ou se alguns podem ser eliminados, ou seja, investigar se o acúmulo de radiação da carga, representado pela soma dos ITs dos volumes é mais restritivo do que os

valores de exposições nas superfícies externas dos veículos e a dois metros delas.

g) Avaliar se a diminuição das doses coletivas pode ser alcançada com o controle realizado pelo acúmulo da carga.

1.8 Originalidade

O acúmulo da carga, independente das distâncias de segregação da cabine do motorista para relacionar com as exposições na cabine e nas superfícies do veículo é original, pois não foram encontrados registros desses experimentos.

A comparação dos valores de radiação apresentados nos veículos em função do acúmulo de carga para demonstrar que este tipo de monitoração é desnecessário ainda não foi realizada, portanto é o primeiro e único trabalho a abordar o assunto dessa forma.

O trabalho e seu intuito são originais desde a finalidade até os seus objetivos.

2 CONHECIMENTOS TÉCNICO-CIENTÍFICOS BÁSICOS NECESSÁRIOS PARA UM MELHOR ENTENDIMENTO DO TRABALHO

2.1 Índice de transporte

O índice de transporte, IT, é o valor de taxa de dose máxima, em milisievert por hora, a uma distância de 1 m de superfícies externas, adimensional e multiplicado por 100. O IT deve ser multiplicado pelo fator apropriado apresentado na Tabela 2.1 para tanques, contêineres e volumes com materiais de baixa atividade específica (BAE) e objetos contaminados nas superfícies (OCSs) ambos definidos em regulamento [14]:

Tabela 2.1 - Fator de multiplicação para tanques, contêineres e volumes BAE-I e OCS-I

Tamanho da embalagem ^a	Fator de multiplicação
tamanho da embalagem $\leq 1 \text{ m}^2$	1
$1 \text{ m}^2 < \text{tamanho da embalagem} \leq 5 \text{ m}^2$	2
$5 \text{ m}^2 < \text{tamanho da embalagem} \leq 20 \text{ m}^2$	3
$20 \text{ m}^2 < \text{tamanho da embalagem}$	10

^a Maior área de secção transversal da embalagem medida

Para determinar o IT, o valor obtido deve ser arredondado para a primeira casa decimal, exceto se for 0,05 ou menor, neste caso pode ser considerado como zero.

Para minérios de urânio, de tório e seus concentrados, o máximo de radiação em qualquer ponto a 1 m da superfície externa da carga pode ser definido como:

- (i) 0,4 (mSv/h) para os minérios e concentrados físicos de urânio e tório;
- (ii) 0,3 (mSv/h) para os concentrados químicos de tório;
- (iii) 0,02 (mSv/h) para os concentrados químicos de urânio, à exceção do hexafluoreto de urânio.

O IT para cada grupo de volumes, contêineres ou cargas deve ser determinado ou pelo somatório dos índices de todos os volumes existentes, ou pela medição direta da intensidade da radiação deles, exceto no caso dos

grupos de volumes não fixos entre si, para os quais o IT deve ser determinado apenas pela soma dos IT, de todos os volumes.

O IT e os valores máximos de radiação externa nas superfícies externas dos volumes são utilizados para classificá-los e sinalizá-los em categorias: Branca-I, Amarela-II e Amarela-III. A Tabela 2.2 apresenta as categorias em que os volumes são classificados [20].

Tabela 2.2 - Categorias dos volumes [20]

Valor máximo de radiação na superfície externa	IT	Categoria
Não maior que 0,005 mSv/h	0 ^a	Branca-I
Maior que 0,005 mSv/h mas não maior que 0,5 mSv/h	Maior que 0 mas não maior que 1	Amarela-II
Maior que 0,5 mSv/h mas não maior que 2 mSv/h	Maior que 1 mas não maior que 10	Amarela-III
Maior que 2 mSv/h mas não maior que 10 mSv/h	Maior que 10	Amarela-III ^b

^a Se a medida do valor de radiação a 1 metro não é maior que 0,0005 mSv/h, o valor considerado pode ser 0.

^b Deve também ser transportado sob "uso exclusivo".

Apesar dessa classificação há situações em que as categorias dos volumes podem não corresponder aos valores de radiação. Esta situação ocorre quando os volumes não são classificados em nenhuma categoria (volumes exceptivos), ou em situações como expedições "sob arranjo especial" (nos quais os volumes são classificados na categoria Amarela-III mesmo que os valores de radiação sejam menores do que os valores dessa categoria).

2.2 Relação do IT com o conteúdo radioativo

O IT é utilizado para o controle das doses por apresentar uma relação proporcional quantitativa ao conteúdo radioativo (radionuclídeo) desde que seja mantida uma mesma blindagem especificada.

O IT depende da taxa de dose apresentada pelo volume que por sua vez depende da energia do radionuclídeo, da atividade, dos materiais que envolvem o volume e de suas espessuras (blindagem).

A taxa de dose para energias de fótons maiores do que cerca de 90 keV, característica dos principais radionuclídeos expedidos para a medicina, apresenta uma relação direta e proporcional à energia, como mostra o Gráfico 2.1 [29].

Gráfico 2.1 - Curvas de conversão para fluxos gama por taxa de dose [29]

Estudos realizados afirmam que não é possível encontrar uma única expressão analítica para a distribuição de taxas de dose em função da distância à fonte [30]. A função logarítmica descreve melhor os dados na região próxima à fonte (a menos de que cerca de 1 m) e a lei do inverso do quadrado da distância descreve melhor os dados com distâncias maiores [31]. Há

estudos com desenvolvimento de *software* para cálculo de valor de dose externa apresentados em curvas de isodoses [30].

2.3 “Uso exclusivo” e “arranjo especial”

“Uso exclusivo” é o uso privativo, por um único expedidor, de um meio de transporte ou de um contentor de carga geral, em relação ao qual todas as operações iniciais, intermediárias e finais de carga e descarga são realizadas de acordo com orientações específicas do expedidor ou do destinatário.

Em vista desse controle extra que é exercido sobre cargas em “uso exclusivo”, algumas das exigências que se aplicam aos transportes normais podem ser relaxadas. São disposições específicas que permitem:

- a) A utilização de uma integridade menos rigorosa para embalagem industrial com material com BAE;
- b) O embarque de volumes com valores de radiação na superfície externa maiores do que 2 mSv/h (mas não maiores do que 10 mSv/h) ou um IT maior do que 10;
- c) Aumentar em um fator de dois no número total de índices de segurança de criticidade para volumes de materiais físséis em uma série de casos.

Muitos expedidores acham que é vantajoso tomar as providências necessárias com a transportadora para realizar a expedição em “uso exclusivo” e assim utilizar uma ou mais das disposições citadas.

“Arranjo especial” é um acondicionamento em que as cargas que não satisfazem todas as exigências aplicáveis do regulamento em vigor podem ser transportadas desde que aprovadas pela autoridade competente e desde que as normas de segurança estabelecidas pelo mesmo regulamento tenham sido demonstradas por meios alternativos para as outras disposições. O valor máximo de radiação em qualquer ponto da superfície externa de volumes e de grupos de volumes neste arranjo não deve exceder 2 mSv/h.

2.4 Limites para as expedições

2.4.1 Contaminação

A contaminação não fixada nas superfícies externas de qualquer volume deve ser mantida tão pequena quanto exequível e, em condições de transporte de rotina, não deve ultrapassar os seguintes limites:

- (a) 4 Bq/cm² para os emissores beta e gama e emissores alfa de toxicidade pequena;
- (b) 0,4 Bq/cm² para todos os outros emissores alfa.

Estes limites são médios, aplicáveis para qualquer área de 300 cm² de qualquer parte da superfície externa.

2.4.2 Radiação

O carregamento de contêineres e o acúmulo de volumes e de grupo de volumes deve ser controlado da seguinte forma [20]:

- (a) o número total de volumes, grupo de volumes e contêineres a bordo de um único veículo deve ser limitado de tal maneira que a soma dos ITs transportados não exceda os valores mostrados na Tabela 2.3, salvo em caso de “uso exclusivo” e para cargas de material BAE-I.
- (b) O valor de radiação nas condições de transporte de rotina não deve exceder 2 mSv/h em qualquer ponto e 0,1 mSv/h a 2 m da superfície externa do transporte, exceto as cargas transportadas em “uso exclusivo” por rodovia ou ferrovia, para as quais os limites de radiação ao redor do veículo são os mesmos, embora sejam permitidos valores maiores para os volumes.

Tabela 2.3 - Limites de índice de transporte para contêineres e meios de transporte não sob “uso exclusivo”

Tipo de veículo ou meio de transporte	Limite da soma dos ITs num único contêiner ou num meio de transporte
Contêiner	
Pequeno	50
Grande	50
Veículo	50
Aeronave	
Passageiro	50
Carga	200
Transporte fluvial ou lacustre	50
Embarcação Marítima ^(a)	
(i) porão, compartimento ou praça definida do convés	
Volume, grupo de volumes e contêiner pequeno	50
Contêiner grande	200
(ii) embarcação no todo	
Volume, grupo de volumes e contêiner pequeno	200
Contêiner grande	ilimitado

^(a) Volume ou grupo de volumes carregados no veículo de acordo com o regulamento podem ser transportados por embarcação desde que não sejam removidos do veículo em qualquer tempo enquanto estiver a bordo da embarcação

2.5 Monitoração radiológica

A monitoração é um acompanhamento realizado por meio de observação de parâmetros gerais. Ela é uma técnica de proteção radiológica que avalia o controle das exposições às radiações ionizantes e que deve ser obtido de modo eficaz e econômico. No campo da proteção radiológica, esse termo exprime a medição de grandezas e de parâmetros para fins de controle ou de avaliação da exposição à radiação, incluindo a interpretação dos resultados [32;33]. As funções de um programa de monitoração são divididas em [34;35;36]:

a) Monitoração relacionada com a tarefa, aplicada a uma tarefa específica. Ela fornece dados para auxiliar na tomada de decisão imediata para dar prosseguimento à tarefa em execução. Portanto ela visa detectar e tomar as primeiras medidas no caso do desenvolvimento da tarefa partir para uma situação anormal, evitando-a. Como no caso do desvio de uma situação normal encontra-se presente o trabalhador, esta função é realizada por ele sob a orientação e a supervisão da proteção radiológica. Também pode auxiliar na otimização da proteção radiológica;

b) Monitoração de rotina, associada com as operações contínuas, é idealizada para demonstrar que as condições de trabalho, incluindo os valores de doses individuais, permanecem satisfatórias, e para atender às exigências regulatórias. Portanto, ela é em grande parte de natureza confirmatória, pois confirma se o programa de monitoração relacionado com o trabalho, em sua totalidade, é satisfatório. Examinada com mais detalhes ela tem, também, um caráter preventivo na monitoração do local de trabalho, pois seus valores são conhecidos antes do trabalhador receber as doses. Esta função de monitoração é realizada pelo serviço de proteção radiológica e estende a sua função para a auditoria de monitoração relacionada com a tarefa.

c) Monitoração interventora, de natureza investigatória, tipicamente envolve uma situação, no local de trabalho, onde as informações são insuficientes para demonstrar um controle adequado. É idealizada para fornecer informações detalhadas de modo que possa elucidar qualquer problema e definir procedimentos futuros. Portanto, ela pode ser realizada tanto em situações normais de trabalho como em situações anormais. Uma vez resolvidos os problemas, ela cessa de ser efetuada.

2.6 Equipamentos de proteção radiológica

Para a realização deste trabalho, deve-se ter um bom conhecimento dos equipamentos que a proteção radiológica dispõe para efetuar as monitorações. Deve saber distinguir entre equipamento fixo, móvel e portátil e em que ocasiões devem ser usados cada um deles.

Para a escolha do equipamento preferível dever-se-á ter conhecimento do intervalo de energia a ser medido, tipos de equipamentos disponíveis, intervalo de doses a serem medidas, tempo morto do equipamento etc. [37].

2.7 Grandezas físicas usadas em proteção radiológica

Como os resultados das monitorações apresentam valores expressos em unidades, é necessário ter um bom conhecimento das grandezas físicas de proteção radiológica em uso e de suas unidades. Também é necessário ter conhecimento da complexidade destas grandezas físicas, sua confiabilidade e noções dos métodos de calibração e de funcionamento correto dos equipamentos. [37;38;39;40]

2.8 Princípios básicos de proteção radiológica

É necessário conhecer em profundidade os princípios básicos de proteção radiológica, a saber: justificação, otimização ou *ALARA* e sistema de limitação de dose e a confiabilidade apresentada por eles.

2.9 Efeitos biológicos das radiações

O serviço de proteção radiológica se justifica pelos malefícios que a radiação ionizante pode provocar no ser humano. Em virtude disto, torna-se necessário conhecer os efeitos biológicos que a radiação ionizante pode provocar no ser humano e em seus descendentes, bem como o dano que pode provocar ao meio ambiente. Conhecer para quais enfermidades existem doses limiares abaixo das quais elas não se manifestam clinicamente, ainda que existam danos, e quais são eles, cuja habilidade de manifestação depende de uma probabilidade que aumenta com a dose, mas não possui limiar. Conhecer quais as enfermidades que se manifestam nos descendentes e a partir de que valores de dose aguda que mata o indivíduo irradiado. Quais são as causas da morte e os tipos de tratamento para o salvamento do irradiado [38, anexo B; 39, anexo A].

2.10 Exposição externa e interna

Deve-se conhecer os diferentes tipos de exposição às quais um indivíduo pode estar sendo submetido. Estes tipos são exposição externa, contaminação de pele e roupa e exposição interna.

A exposição externa é aquela que o indivíduo recebe quando existe uma fonte de radiação próxima à ele. A característica deste tipo de radiação é que quando o indivíduo abandona o local a exposição cessa.

A contaminação da pele e roupa por um material radioativo provoca a exposição externa do corpo humano bem como a exposição interna, pois ela pode alcançar a corrente sanguínea e depositar-se em órgãos de captação internos ao corpo humano.

A exposição interna pode dar-se via respiratória, pelos poros ou por ingestão. A sua característica principal é que quando o indivíduo abandona o local de irradiação a exposição continua, pois o radioisótopo encontra-se *in corpore* depositado em um ou mais órgãos e tecidos do corpo humano. O indivíduo continuará sendo irradiado até se realizar o decaimento radioativo ou ser completamente eliminado pelo organismo. Desta maneira deverá ter conhecimento do metabolismo humano. Em virtude de tudo isto, dever-se-á ter conhecimento de como evitar ou diminuir as doses de poderem ser recebidas.

2.11 Engenharia de proteção

Para diminuir (ou quando possível eliminar) as doses originadas de exposição externa existem três métodos, a saber:

- 1) distância entre a fonte de irradiação e o ponto de medida da dose;
- 2) tempo de exposição do indivíduo irradiado;
- 3) interpor um anteparo absorvedor de radiação ionizante.

Quanto ao primeiro método, para o qual a dose para a radiação gama e X varia com o quadrado da distância, é muito útil até 1 m de distância, pois se passarmos de 1 cm de distância para 100 cm a dose terá diminuído de um fator 10.000. Mas se passarmos de 1 m de distância para 4 m a dose só diminuirá de um fator 16. Trabalhar a 1 m de distância da fonte de radiação é fácil, pois considera-se o braço de 70 cm de comprimento e mais uma garra ou uma

pinça de 30 cm alcança-se 1 m. Lembra-se que não se deve tocar fontes de radiação com as mãos. Trabalhar a 4 m de distância a operação torna-se mais difícil.

Quanto ao segundo método, pode-se asseverar que a dose de radiação é diretamente proporcional ao tempo de permanência do indivíduo próximo à fonte, portanto quanto menor for o tempo, menor será a dose recebida.

Quando estes dois métodos não são suficientes, deve-se partir para o terceiro método do anteparo de material e espessura conveniente para se alcançar a diminuição desejada. Também pode-se usar a combinação de dois destes três métodos ou ainda todos eles.

Para diminuir as doses originadas das exposições internas, atualmente, existem dois métodos conhecidos como bloqueadores e solventes. Como exemplo de bloqueadores podemos citar um dos mais usados, o iodeto de sódio, útil para os radioisótopos do iodo. O iodo deposita-se preferencialmente na tireoide e, portanto, se fornecermos ao indivíduo iodeto de sódio estável em um tempo hábil que alcance a tireoide antes de chegar aquele radioativo, ela se encontrará saturada e não terá sítio para o radioativo. O radioativo fluirá na corrente sanguínea e será eliminado via urina passando pelos rins. Os bloqueadores são muito eficazes quando forem tomados antes da incorporação dos isótopos radioativos. No caso do iodeto de sódio só se utiliza até, no máximo, 24 horas após a incorporação do radioativo. Ele é enviado via endovenosa.

Os solventes são utilizados para acelerar a eliminação dos radioisótopos pelo corpo humano. Um exemplo que se pode citar é o caso do acidente com césio-137 [41] em Goiânia. Como o césio é solúvel em água e o homem referência da proteção radiológica elimina $2,5 \text{ dm}^3$ de água por dia e se o indivíduo irradiado beber $2,5 \text{ dm}^3$ de água além do normal por dia diminuirá a meia-vida biológica do radioisótopo por um fator 2. Este método foi usado em Goiânia até se receber o solvente do césio mais eficaz, uma solução de cloreto de ferro com ferrocianeto de potássio conhecida como azul da Prússia.

Como pode ser notado deste pequeno resumo dos conhecimentos técnico-científicos, ainda que as medidas enumeradas neste trabalho sejam

simples, a sua interpretação de maneira confiável é complexa e envolve muito conhecimento técnico-científico de vanguarda.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para alcançar os objetivos, o trabalho buscou atingir as seguintes metas:

3.1 Pesquisa bibliográfica

Consistiu no estudo de: publicações do OIEA (recomendações, guias explicativos e cursos), regulamento nacional para TMR, regulamentos para transporte de produto perigoso (TPP), parte do acervo da biblioteca do IPEN e do *International Nuclear Information System (INIS)* anais dos simpósios internacionais *Package and Transport of Radioactive Material (PATRAM)* *papers* de conferências internacionais, relatórios técnicos do comitê de atrasos e recusas do OIEA e artigos de revistas internacionais. Oportunamente foi possível a participação em curso semanal oferecido pelo *World Nuclear Transport Institute (WNTI)* em congressos do *International Radiation Protection Association (IRPA)* e em fórum internacional de proteção radiológica, que agregaram e solidificaram conceitos e informações adquiridas nos estudos.

3.2 Desenvolvimento de modelos

A estimativa dos valores das taxas de dose em pontos estratégicos por meio de modelos [42, p.337;31] e *softwares* [30] é suficiente para garantir a eficácia dos PPR e a sua comparação com os limites regulamentares.

Neste trabalho foram desenvolvidos modelos para estimar as taxas de dose nas superfícies externas dos veículos e nas cabines dos motoristas a fim de comparar seus valores com os limites regulamentares. Os modelos utilizados aqui são internacionalmente recomendados para estimar as taxas de dose exigidas em um PPR.

Foi realizada uma pesquisa de campo para comparação com os valores obtidos dos modelos.

3.3 Pesquisa de campo

Para a obtenção de dados de monitorações de volumes e de expedições foi realizado um estudo de caso do período de 2008 a 2012 na maior expedidora brasileira de TMR rodoviário (IPEN). A fim de comparar as doses laborais com os limites regulamentares e consolidar a pesquisa bibliográfica foram utilizados dados dos dois anos mais recentes (2011 e 2012) desse período.

Diariamente foram produzidos vários conteúdos radioativos. Cada produção se repete semanalmente. Os conteúdos dos volumes produzidos e expedidos e suas principais energias com o modo de emissão ou decaimento estão apresentados na Tabela 3.1. O intervalo de energia da radiação gama foi limitado pelos radioisótopos expedidos pelo IPEN, usados na medicina brasileira como radiofármacos.

Tabela 3.1 - Principais conteúdos dos volumes expedidos e as principais energias com o modo de emissão ou decaimento

Conteúdos de Volumes Expedidos	Principal Energia de Fóton, Modo de Emissão ou Decaimento, (<i>Porcentagem</i>) (Mev)
^{99}Mo	0,740 γ (14%); 1,23 β^- (82%)
^{99m}Tc	0,141 γ (90%)
^{131}I	0,364 γ (82%); 0,61 β^- (90%)
^{67}Ga	0,093 γ (40%); 0,184 γ (24%); 0,296 γ (22%); 0,09 β^- (15%); 0,388 γ (7%)
^{18}F	0,511 γ (194%); - 0,65 β^+ (97%);
^{201}Tl	0,068 a 0,08 γ (95%)
Outros (^{32}P , ^{35}S , ^{51}Cr , ^{90}Y , ^{111}In , ^{123}I , ^{125}I , ^{153}Sm e ^{177}Lu)	Diversos

Para preparar o TMR por vias públicas foram utilizadas embalagens do tipo A para os volumes em razão dos valores das atividades contidas nas expedições deste estudo de caso. As embalagens satisfizeram dois projetos

adequados: um, denominado de embalagem de gerador (EDG), para conter o ^{99}Mo , gerador de $^{99\text{m}}\text{Tc}$, portando recipiente interno com espessura de chumbo (Pb) de 40 mm; outro, denominado de recipiente múltiplo de despacho (RMD), utilizado para os demais conteúdos, portando recipiente interno com espessura de chumbo (Pb) de 7 mm, sendo que, exclusivamente para o ^{131}I , com espessuras diferenciadas de 7, 12 e 17 mm, de acordo com os respectivos valores de atividades de 37 a 1110 MBq, de 1147 a 2923 MBq e de 2926 a 7400 MBq; e, exclusivamente para o ^{18}F , com a espessura de 30 mm. O EDG possui instalada internamente uma peça cilíndrica de chumbo (Pb) com 6 mm de espessura que circunda o recipiente interno.

As embalagens e seus recipientes internos de chumbo (Pb) estão apresentados na Figura 3.1:

Embalagem	Recipiente interno de chumbo (Pb) (mm)
<p>Projeto para Gerador (EDG)</p>	<p>40</p>
<p>Projeto para Recipiente Múltiplo de Despacho (RMD)</p>	<p>7 12 17 30</p>

Figura 3.1 - Embalagens do tipo A com destaque dos respectivos recipientes internos em corte (EDG) e destampado (RMD)

A quantidade, categoria e suas porcentagens referentes aos volumes com radiofármacos expedidos anualmente no período da pesquisa estão apresentadas na Figura 3.2:

Figura 3.2 – Gráfico da quantidade, categoria e sua porcentagem, de volumes com radiofármacos e tabela dos conteúdos expedidos ao ano pelo IPEN

Os volumes, classificados conforme a Tabela 3.1, foram sinalizados com base em registros de monitorações anteriores, previamente ao acondicionamento de seu conteúdo para evitar doses laborais desnecessárias. Em seguida, seus valores de taxa de dose foram conferidos com *monitorações*

relacionadas com a tarefa e registrados nos documentos de transporte pelos técnicos de radioproteção.

Os volumes foram dispostos para transporte pela mesma categoria de trabalhadores da instalação (doravante denominados de trabalhadores da instalação) que previamente acondicionaram os conteúdos dentro das embalagens. Os volumes foram levados pelos carregadores e/ou motoristas até o compartimento de carga dos veículos e obedeceram o limite da soma dos ITs (Tabela 2.3, $\Sigma IT \leq 50$) para não ser necessária a expedição sob “uso exclusivo”, pois a disposição da carga precisou ser modificada no trajeto em razão da entrega de parte dela durante o percurso.

Os veículos foram sinalizados pelos motoristas ou carregadores. Em seguida foram realizadas *monitorações de rotina* com detectores de radiação portáteis em suas superfícies externas e cabines pelos técnicos de radioproteção. Em razão do comportamento logarítmico e polinomial da intensidade da radiação ionizante em relação à distância, os valores a 2 metros das superfícies externas foram considerados restritivamente 10 vezes menores do que os valores nas superfícies externas. Esses dados (valores das exposições) nesses procedimentos foram utilizados para registro nos documentos das expedições de TMR rodoviário e também para avaliar as doses. Além de depender das características da radiação ionizante, os resultados das monitorações de campo em proteção radiológica dependem de fatores relacionados aos equipamentos tais como sua precisão, tempo de resposta, calibração, posição em relação à fonte entre outros. Esses fatores permitem ao trabalhador a observação de flutuações na ordem de até 50% entre os valores medidos. Dessa forma, considera-se o valor máximo e a média entre os valores medidos em campo para uma aproximação ao valor verdadeiro.

A Figura 3.3 ilustra os procedimentos.

(a) Sinalização de Volumes

(b) Acondicionamento do
Conteúdo

(c) Monitoração dos Volumes

(d) Disposição de Volumes para
Transporte

(e) Carregamento de Volumes

(f) Monitoração de Veículos

Figura 3.3 - Procedimentos para preparação de TMR

As empresas transportadoras participantes desta pesquisa, especializadas em TMR, portam divisória plumbífera nos veículos entre a cabine e o compartimento de carga.

Os trabalhadores em geral circulam pela área restrita, ilustrada na Figura 3.4, em momentos diferenciados enquanto os volumes com radiofármacos são produzidos. Inicialmente, os trabalhadores da instalação circulam nesta área para disponibilizar os volumes para carregamento. Concomitantemente, os motoristas e carregadores circulam para conferir e carregar seus volumes até os veículos. A configuração da carga nos veículos foi realizada pelos motoristas e carregadores visando a logística de entrega. Finalmente, os técnicos de radioproteção circulam nesta área para realizar a monitoração dos veículos já carregados.

A área de monitoração dos veículos, Figura 3.4, tem capacidade para vários veículos. Estes veículos, quando carregados e próximos entre si, ou aos volumes dispostos para transporte prejudicaram a obtenção individual dos valores de exposição nas cabines, superfícies externas e a 2 m delas, pois tornaram as intensidades dos valores medidos maiores do que os valores reais em virtude da influência dos demais sobre aquele que está sendo medido.

Os valores das exposições causadas pela presença dos volumes em quantidades aumentam conforme seu acúmulo, porém ocorre variação do acúmulo conforme os veículos carregados são expedidos com esses volumes.

Figura 3.4 - Vista superior da área de disposição de volumes para transporte. A, B e C representam colunas de sustentação civil – parte da instalação de expedição de radiofármacos do IPEN

3.3.1 Monitoração de área

Foram realizadas monitorações de área na Figura 3.4 para avaliar as exposições nos procedimentos atuais ilustrados nas Figura 3.3. Os pontos A, B e C da Figura 3.4 são colunas de sustentação civil onde foram instalados dosímetros tipo termoluminescentes (DTL) a partir de 5 de abril de 2010. Foram utilizados os valores obtidos, até 1º. de setembro de 2012, do Laboratório de Dosimetria Termoluminescente do IPEN. Dosímetros de controle permaneceram nesse Laboratório pelos períodos amostrados. A e B são as

colunas cujos volumes foram dispostos entre elas. C é a área de passagem do público.

3.3.2 Doses laborais

As doses laborais foram obtidas por categorias de trabalhadores com base em estimativas e em resultados de monitorações. A categoria de trabalhadores dos fiscais (como o policial rodoviário) raramente atua no TMR e, portanto não foi avaliada.

4 DESENVOLVIMENTO DE MODELOS

Foi realizada a estimativa dos valores de taxa de dose efetiva nos veículos carregados com volumes cujo $\Sigma IT = 50$.

4.1 Nas superfícies dos veículos:

Os veículos que transportam volumes, não sob “uso exclusivo”, cujo $\Sigma IT = 50$ apresentam $\dot{D} \leq 2$ mSv/h em suas superfícies externas, pois os volumes transportados apresentam também $\dot{D} \leq 2$ mSv/h em suas superfícies externas e $IT \leq 10$. Nas superfícies externas dos veículos, a soma das taxas de dose de outros eventuais volumes apresentam valores que se encontram dentro da variação de leitura de um volume em virtude que o seu acúmulo fornece uma blindagem entre si e em virtude das distâncias aos volumes. Além disso, quando localizado o maior valor de taxa de dose nas superfícies externas dos veículos, a variação da intensidade nestas proximidades é muito maior do que a variação de intensidade causada por taxas de dose de volumes distantes em razão do comportamento do campo de radiação.

Este valor de 2 mSv/h foi utilizado como limite nas superfícies externas dos veículos rodoviários portadores de material radioativo também sob “uso exclusivo”. [20]

4.2 A 2 m das superfícies dos veículos:

O OIEA afirma que a taxa de dose máxima teórica a 2 m da superfície externa de um veículo cujo $\Sigma IT = 50$, equivale a 0,1 mSv/h [42, p.103].

4.3 Na cabine do veículo:

A Exposição (X) medida no ar, se relaciona com a Dose (D) absorvida no ar, sob condições de equilíbrio eletrônico, pela expressão: [43]

$$D_{ar} = X_{ar} \times (w/e)_{ar} = 0,876 \times X_{ar} \quad \dots\dots(1)$$

onde $(w/e)_{ar}$ é a energia média para formação de um par de íons no ar / carga do elétron = 0,876

A relação entre os valores da dose absorvida no material, D_m e no ar, D_{ar} , pode ser expressa por:

$$f = \frac{D_m}{D_{ar}} = \frac{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_m}{\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{ar}},$$

onde $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_m$ é o coeficiente de absorção de energia em massa do material, m , e $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{ar}$ é o coeficiente de absorção de energia em massa do ar.

Portanto,

$$D_m = D_{ar} \times \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_m / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{ar} = 0,876 \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_m / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{ar} \times X_{ar} = 0,876 \times f \times$$

$$X_{ar} = f_m \times X_{ar},$$

onde $f_m = 0,876 \times \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_m / \left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)_{ar}$ = fator de conversão de exposição no ar em dose absorvida no meio m .

O fator f_m , que converte exposição no ar em dose absorvida no meio, depende da energia do fóton e, por isso, na maioria dos casos, utiliza valores médios dos coeficientes de absorção de energia em massa $\left(\frac{\mu_{en}}{\rho}\right)$. Esses valores são tabelados para alguns materiais, sendo que para a água eles variam de $0,881 \text{ rad.R}^{-1}$ a $0,964 \text{ rad.R}^{-1}$, na faixa de energia de 20 keV a 150 keV, respectivamente, conforme o Gráfico 4.1.

Gráfico 4.1 - Valores do fator de conversão de dose no ar para dose na água (tecido humano) em função da energia do fóton [43]

Para efeito de radioproteção, onde se utiliza um procedimento conservativo, este fator pode ser arredondado para um.

As distâncias, em um veículo rodoviário que porta volume(s) podem ser representadas pela Figura 4.1 a seguir:

Figura 4.1 - Distâncias em um veículo rodoviário com volume

Onde:

d = distância entre o trabalhador e a divisória da cabine (m);

e = espessura da divisória da cabine (m);

S = distância entre a superfície do volume ou grupo de volumes e a cabine (m);

r = distância entre o centro geométrico do volume ou grupo de volumes e a superfície do volume ou grupo de volumes (m).

A distância entre o trabalhador e a fonte radioativa (DTF) será de:

$$\text{DTF (m)} = d + e + S + r \quad \text{.....(2)}$$

Ainda na Figura 4.1, se considerarmos o ponto (A) representando a posição a 1 m do volume ou grupo de volumes (cujo valor de radiação coincide com o IT) e o ponto (B) representando a posição ocupada pelo motorista, fazendo coincidir esses pontos, podemos dizer que as taxas de exposição neste caso são dadas respectivamente por:

$$\dot{X}_{(A)} = \Gamma A / (1 + r)^2 \text{ e } \dot{X}_{(B)} = \Gamma A / (\text{DTF})^2$$

Como ΓA é constante, podemos afirmar:

$$\dot{X}_{(A)} \times (1 + r)^2 = \dot{X}_{(B)} \times (\text{DTF})^2 \quad \text{.....(3)}$$

Substituindo a equação (2) em (3) e considerando $\dot{X}_{(A)} = \Sigma I T$, podemos dizer que:

$$\dot{X}_{(B)} = [\Sigma I T \times (1 + r)^2] / (d + e + S + r)^2 \quad \text{.....(4)}$$

Para considerar a diminuição da intensidade da exposição em razão da presença de materiais (divisória da cabine) entre o trabalhador e a fonte radioativa, a taxa de exposição em (B), $\dot{X}_{(B)}$, deve ainda ser multiplicada por um fator de transmissão, FT, tal que essa taxa, corrigida, seja:

$$\dot{X}_{(B, \text{ corrigida})} = \dot{X}_{(B)} \times \text{FT} \quad \text{.....(5)}$$

FT depende:

- da composição do material da divisória de separação entre a posição do motorista e o compartimento de carga;
- da composição do material do encosto do assento do banco do motorista e
- da energia da radiação emitida pelo radionuclídeo.

O fator de transmissão para $\Sigma I T = 50$ foi utilizado da tabela [42, p.341] com fatores típicos no transporte aéreo, reproduzida como Tabela 4.1, apesar dos materiais dos veículos aéreos serem menos densos do que os materiais

dos veículos rodoviários (estes ainda algumas vezes possuem divisória plumbífera entre o compartimento de carga e a cabine do motorista).

Tabela 4.1 - Fatores de transmissão

Somatório do Índice de Transporte (ΣIT)	Fator de Transmissão (FT)
0 a 1,0	1,0
1,1 a 2,0	0,8
2,1 a 50	0,7

FONTE: OIEA [42, p.341].

Para estimar a taxa de dose na posição do motorista, vamos considerar a princípio:

- a distância de segregação entre a posição do motorista e a superfície da carga é 1 metro ($d + e + S = 1$);
- o $\Sigma IT = IT$ medido;
- a inexistência de divisória entre o compartimento de carga e a cabine do motorista.

Observação: a 1 m da superfície da carga, o motorista estaria exposto a 0,5 mSv/h se o IT medido fosse 50 e se não houvesse a divisória entre o compartimento de carga e sua cabine. Porém o valor da medida do IT da carga é menor do que o valor da soma dos ITs dos volumes individuais e existe uma divisória entre o compartimento de carga e a cabine do motorista. Dessa forma essas considerações ($\Sigma IT = IT$ medido e a inexistência de divisória) devem compensar a consideração de o motorista permanecer a 1 m da superfície da carga.

Para estimar a taxa de dose efetiva ($\dot{D}_e$), já considerando $f_m = 1$, teremos de (1) e (5):

$$\dot{D}_e = 0,876 \times \dot{X}_{(B, \text{ corrigida})} \dots\dots(6)$$

Substituindo (4) em (5) e considerando agora a existência de divisória entre o compartimento de carga e a cabine do motorista ($FT = 0,7$), da relação (6) vem:

$$\dot{D}_e = 0,876 \times [\Sigma I T \times (1 + r)^2] / [(d + e + S + r)^2] \times FT$$

$$\dot{D}_e = 0,876 \times [50 \times (1 + r)^2] / [(1 + r)^2] \times 0,7$$

$\dot{D}_e = 30,66$, já que $\Sigma I T = 50$ equivale a $0,5 \text{ mSv/h}$, ou ainda:

$$\dot{D}_e = 0,31 \text{ (mSv/h)} \quad \text{.....(7)}$$

5 RESULTADOS

5.1 Pesquisa bibliográfica

Das referências encontradas pode-se verificar o que segue:

O regulamento brasileiro [14] apresenta os valores-limite de radiação para as expedições de veículos rodoviários e distância mínima de segregação entre cargas radioativas (6 metros), mas não apresenta valores de taxa de dose ou de distâncias de segregação entre volumes e cargas sensíveis ou entre volumes e trabalhadores. Apesar disso, requer para essas expedições o resultado da *monitoração de rotina* efetuada na carga e no veículo para ser registrado em uma ficha.

As recomendações do OIEA também apresentam os valores-limite de radiação para as expedições de veículos rodoviários [20], porém não requer para essas expedições o resultado da *monitoração de rotina* efetuada na carga e no veículo para ser registrado em uma ficha.

O guia explicativo do OIEA apresenta a taxa de dose máxima teórica a 2 m da superfície externa de um veículo rodoviário cuja soma dos ITs de seus volumes é 50: 0,1 mSv/h e afirma que a experiência confirma a aceitação desses valores [42], mas também não requer para esses veículos o resultado da *monitoração de rotina* efetuada na carga e no veículo para ser registrado em uma ficha.

A *Western Governor's Association, WGA*, (organização não reguladora que serve a 19 Estados-membro estadunidenses) utiliza distâncias de separação da carga apresentadas no regulamento dos Estados Unidos [22] e já mostradas na Tabela 1.1. Além disso, não aplica o *monitoramento de rotina* para o controle e comparação com valores limites de radiação nos veículos não expedidos sob “uso exclusivo”, conforme Tabela 5.1 [44].

O *Nuclear Regulatory Commission, NRC*, (organismo independente do governo dos Estados Unidos) apresenta uma ilustração [45], reproduzida na Figura 5.1, com os limites e as posições para o controle dos valores de

radiação no transporte rodoviário e também aplica mesmo procedimento da WGA.

Tabela 5.1 - Limites de níveis de radiação apresentados em forma de tabela pelo *Western Governor's Association* [44]

Limites de Níveis de Radiação para Volumes e Veículos (49 CFR 173.441) ¹				
Esta tabela não deve ser usada como substituta dos regulamentos em transporte de material radioativo DOT e NRC				
Uso de Veículo de Transporte	Não-Exclusivo	Exclusivo		
Tipo de Veículo de Transporte	Aberto ou Fechado	Aberto (tipo mesa plana)	Aberto/Cercado ²	Fechado
Limites para volume (ou contentor de carga):				
Superfície Externa	2 mSv/h (200 mrem/h)	2 mSv/h (200 mrem/h)	10 mSv/hr (1000 mrem/hr)	10 mSv/hr (1000 mrem/hr)
Índice de Transporte (IT) ³	10	Sem limite		
Índice de Segurança de Criticalidade (ISC) ⁶	50	Sem limite		
Limites para veículo rodoviário ou ferroviário (ou contentor de carga):				
Qualquer ponto da superfície exterior	Não se Aplica	Não se Aplica	Não se Aplica	2 mSv/h (200 mrem/h)
Planos verticais projetados das bordas externas		2 mSv/h (200 mrem/h)	2 mSv/h (200 mrem/h)	Não se Aplica
Superfície superior		carga: 2 mSv/h (200 mrem/h)	cercado: 2 mSv/h (200 mrem/h)	veículo: 2 mSv/h (200 mrem/h)
a 2 metros		planos verticais 0,1 mSv/h (10 mrem/h)	planos verticais 0,1 mSv/h (10 mrem/h)	superfícies laterais externas: 0,1 mSv/h (10 mrem/h)
Superfície inferior	Não se Aplica ⁴	2 mSv/h (200 mrem/h)		
Posição ocupada		0,02 mSv/h (2 mrem/h) ⁵		
Soma dos IT's dos Volumes		Sem limite		
Soma dos ISC's dos Volumes ^{6,7}	50	100		

1 Os limites não se aplicam aos volumes exceptivos nesta tabela (§§173.421, 173.424, 173.426, 173.428).

2. Fixados firmemente (para veículos), limita o acesso cercado; volumes com barreiras individuais são considerados como cercados.

3. O número adimensional equivalente ao nível máximo de radiação a 1 m (3,3 pés) da superfície exterior do volume, em mrem/h arredondado para o décimo seguinte (§§173.403).

4. Não há limite de dose especificado, mas aplica-se distâncias de separação a Radioativo Amarelo-II, Radioativo Amarelo-III ou volumes rotulados ISC (§§177.842).

5. Não se aplica aos carregadores se estiverem operando sob um programa de radioproteção regulamentado e se usa dispositivo de dosimetria individual (§§173.441 (b)(4)).

6. Estas disposições não se aplicam ao transporte por navio - veja §§176.700-720 requisitos para embarcação.

7. O número de volumes contendo material fissil armazenados em trânsito deve ser limitado de forma que a soma total dos ISC é 50 e esses grupos de volumes devem estar distanciados no mínimo de 6 m (20 pés) de outros grupos análogos (§§173.457 e 173.459).

Revisão 1, 1 de outubro de 2004.

Figura 5.1 - Limites de radiação: parte do anexo A, *information notice* No. 80-32, *Nuclear Regulatory Commission* [45]

A natureza e a frequência da *monitoração de rotina* nos veículos devem ser detalhadas de acordo com o âmbito do PPR, segundo o guia de programa de proteção radiológica para o transporte do Reino Unido [28].

Alguns artigos relacionam o Σ IT transportado com as doses efetivas [5;8] ou com as taxas de dose [4].

5.2 Desenvolvimento de modelos

Além da divisória da cabine, existente entre a posição do motorista e o compartimento de cargas nos veículos rodoviários, as empresas transportadoras participantes desta pesquisa adicionaram a ela uma camada plumbífera de 2 mm espessura. Nesses casos, há uma redução do valor da dose por unidade de comprimento da blindagem (dD/dl), proporcional à dose, tal que:

$$\frac{dD}{dl} = -\eta \cdot D$$

A solução desta equação diferencial é:

$$D = D_0 \cdot e^{-\eta l}, \quad \text{tal que } \eta \text{ é o coeficiente de atenuação e}$$

l é a espessura da blindagem ($l = 2 \text{ mm}$),

Ou

$$D = D_0 \cdot 2^{-\frac{l}{\lambda}} \quad \text{tal que } \lambda \text{ é a espessura da camada semi-redutora, pois}$$

$$\lambda = \ln 2 \cdot \eta^{-1}$$

$$e^{-\eta l} = (e^{\eta \lambda})^{-\frac{l}{\lambda}}$$

ou

Sabendo-se que:

λ de chumbo (Pb) para $^{99}\text{Mo} + ^{99\text{m}}\text{Tc} = 4,9$ mm e que

λ de chumbo (Pb) para $^{131}\text{I} = 2,5$ mm (usa-se o maior dos 2) [46]:

$$D = D_o \cdot 2^{-\frac{l}{4,9}} \Rightarrow D = D_o \cdot 0,75 \quad \dots\dots\dots(8)$$

Para o cálculo da taxa de dose na cabine dos veículos podemos considerar $\dot{D}_o = \dot{D}_e$ e substituindo (7) do item 4.3 em (8), podemos afirmar que:

$$\dot{D} = \dot{D}_o \times 0,75$$

$$\dot{D} = 0,31 \times 0,75 = 0,23 \text{ mSv/h,}$$

Desse modo,

$$\dot{D} \leq 0,23 \text{ mSv/h para } \Sigma I T \leq 50.$$

5.3 Pesquisa de campo

A quantidade anual de veículos rodoviários expedidos pelo IPEN com radiofármacos para a medicina em função dos ΣIT s das cargas está apresentada na Figura 5.2:

	2008	2009	2010	2011	2012
Total	5019	5191	5533	5414	5446
$0 < \Sigma IT \leq 0,5$	2151	2299	2385	2500	2566
$0,5 < \Sigma IT \leq 5$	1500	1703	1687	1222	1215
$5 < \Sigma IT \leq 50$	1368	1189	1461	1692	1665
$\Sigma IT = 50$	5	6	4	9	18

Figura 5.2 – Gráfico e tabela da quantidade de veículos rodoviários expedidos pelo IPEN com radiofármacos em função dos Σ ITs das cargas

Essa quantidade com suas porcentagens e as taxas de dose médias e máximas em função das posições monitoradas referentes ao veículo (cabine e superfícies do compartimento de carga), que são parâmetros de controle nas expedições, estão apresentadas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Quantidade anual de veículos rodoviários expedidos pelo IPEN com radiofármacos (e suas porcentagens em função dos intervalos dos ΣIT s das cargas) e taxas de dose em função das posições monitoradas (cabine e superfícies)

		2008			2009			2010			2011			2012		
		$0 < \Sigma IT \leq 0,5$	$0,5 < \Sigma IT \leq 5$	$5 < \Sigma IT \leq 50$	$0 < \Sigma IT \leq 0,5$	$0,5 < \Sigma IT \leq 5$	$5 < \Sigma IT \leq 50$	$0 < \Sigma IT \leq 0,5$	$0,5 < \Sigma IT \leq 5$	$5 < \Sigma IT \leq 50$	$0 < \Sigma IT \leq 0,5$	$0,5 < \Sigma IT \leq 5$	$5 < \Sigma IT \leq 50$	$0 < \Sigma IT \leq 0,5$	$0,5 < \Sigma IT \leq 5$	$5 < \Sigma IT \leq 50$
Número de Expedições		2151 (43%)	1500 (30%)	1368 (27%)	2299 (44%)	1703 (33%)	1189 (23%)	2385 (43%)	1687 (30%)	1461 (27%)	2500 (46%)	1222 (23%)	1692 (31%)	2566 (47%)	1215 (22%)	1665 (31%)
		5019 (100%)			5191 (100%)			5533 (100%)			5414 (100%)			5446 (100%)		
$\bar{X}$ cabine	$\bar{X}$	1	3,73	29,15	1	4,39	31,92	1	4,70	25,97	3	4,01	24,27	1,00	3,86	25,02
($\mu Sv/h$)	$X_{máx}$	10	25	87	17	56	200	51	56	110	10	36	107	75	69	250
$\bar{X}$ esquerda	$\bar{X}$	5,00	4,81	76,64	6	4,26	49,92	20	5,69	41,55	10	9,13	57,30	10,00	10,76	75,09
($\mu Sv/h$)	$X_{máx}$	50	100	500	50	100	600	80	100	400	40	100	600	50	100	1000
$\bar{X}$ traseira	$\bar{X}$	40,00	27,85	296,09	4	26,12	207,19	6	31,81	152,22	60	40,24	209,86	7,00	41,29	229,72
($\mu Sv/h$)	$X_{máx}$	100	100	800	100	200	900	100	180	850	100	100	1000	100	200	1000
$\bar{X}$ direita	$\bar{X}$	6,11	35,71	325,77	6,05	38,17	242,07	5,92	40,76	188,62	5,52	47,43	246,12	5,45	51,96	176,38
($\mu Sv/h$)	$X_{máx}$	100	100	1000	100	100	1000	80	120	1000	90	200	1000	100	200	1000

Conforme apresentado no item 3.3, as medidas obtidas foram registradas com valores potencialmente maiores do que o real já que algumas vezes a proximidade com o compartimento de cargas de outros veículos com ΣIT s com valores maiores influenciou o resultado dessas medidas obtidas.

Os valores médios e máximos das taxas de dose em função dos parâmetros de controle nas expedições do período da pesquisa estão apresentados em função dos ΣIT s das cargas no Gráfico 5.1.

Gráfico 5.1 - Valores médios e máximos das taxas de dose dos veículos em função dos parâmetros de controle, no período da pesquisa em função dos Σ ITs

Para análise de comportamento, o Gráfico 5.2 apresenta os valores absolutos das taxas de dose dos parâmetros de controle em 240 expedições contínuas realizadas nas três primeiras semanas de janeiro de 2009, para análise parcial da grande quantidade de dados, em função do Σ IT das cargas (este representa o acúmulo de radiação de volumes com radiofármacos dentro de veículos rodoviários). Esses valores foram inseridos no *software Microsoft Office Excel 2007* que proporcionou ajustes lineares para favorecer a análise de comportamento da tendência dos dados.

Conforme explicado no item 3.3, os valores a 2 metros das superfícies foram considerados com intensidade 10 vezes menor do que os valores nas superfícies e não foram registrados neste gráfico.

Taxa de Dose ($\mu\text{Sv/h}$)

Gráfico 5.2 - Valores absolutos das taxas de dose na cabine e nas superfícies externas dos veículos em função do Σ ITs em 240 expedições realizadas nas três primeiras semanas do mês de janeiro de 2009

5.3.1 Monitoração de área

Os valores das taxas de dose nos pontos de monitoração da Figura 3.4 já com os valores dos dosímetros de controle descontados, por períodos, estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valores das taxas de dose nos pontos da Figura 3.4 e no dosímetro de controle por períodos

	A Área com volumes armazenados ($\mu\text{Sv/semana}$)	B Área com volumes armazenados ($\mu\text{Sv/semana}$)	C Área pública ($\mu\text{Sv/semana}$)	Dosímetros de controle ($\mu\text{Sv/semana}$)
05/abr/2010 a 21/set/2010	876,38	2261,25	38,60	125,26
22/set/2010 a 03/dez/2010	2234,12	3280,87	153,17	36,04
04/dez/2010 a 04/mar/2011	1981,24	3312,12	27,18	47,07
05/mar/2011 a 06/jun/2011	1435,63	1581,48	78,23	48,06
07/jun/2011 a 08/set/2011	1324,46	1961,30	86,18	42,78
09/set/2011 a 09/dez/2011	1573,19	2436,02	83,53	44,75
10/dez/2011 a 03/mar/2012	1535,87	2361,44	21,90	73,62
04/mar/2012 a 02/jun/2012	1400,16	1985,88	96,46	38,78
03/jun/2012 a 01/set/2012	1182,05	1940,46	93,81	23,87
Média				
Aritmética	1504,79 $\pm$ 404,95	2346,76 $\pm$ 596,82	75,45 $\pm$ 41,17	53,36 $\pm$ 30,03
($\mu\text{Sv/semana}$)				

NOTA: - Os pontos A,B e C estão apresentados na Figura 3.4
 - A tolerância máxima admitida por semana é 400 μSv para trabalhadores com radiação e 20 μSv para indivíduos do público [36]

Na Figura 3.4, a disposição dos volumes armazenados em acúmulo permaneceu cerca de 6 horas por semana. A dose semanal foi considerada restritivamente exclusiva dessas horas. Os valores das médias aritméticas das taxas de dose com os volumes nessa disposição estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Valores das médias aritméticas das taxas de dose nos pontos da Figura 3.4 na presença dos volumes armazenados

	A	B	C
	Área com volumes armazenados	Área com volumes armazenados	Área pública
Média Aritmética			
($\bar{x}$)			
nas 6h semanais	251 ± 67	391 ± 99	12 ± 7
($\mu\text{Sv/h}$)			

NOTA: - Os pontos A,B e C estão apresentados na Figura 3.4

A maior evidência de fonte de radiação na área, ilustrada na Figura 3.4, é o acúmulo de volumes, porém, dependendo da proximidade exigida pela atividade realizada, volumes individuais e veículos carregados com esses volumes também são fontes de radiação evidentes. A taxa de dose na posição encostada às colunas de sustentação civil foi estimada utilizando o valor da média aritmética nos pontos A e B ($320,96 \pm 83,48 \mu\text{Sv/h}$), como critério, pois os trabalhadores da instalação estão sujeitos no máximo a esse valor enquanto manuseiam os volumes individuais produzidos para agrupá-los e identificá-los por nome de empresa transportadora (cenário cujos volumes passaram a ser acumulados). Depois disso, os motoristas e carregadores manuseiam os volumes individuais a partir desses grupos para conferi-los e acondicioná-los nos veículos. A estimativa da taxa de dose real média deve considerar a proximidade necessária dos trabalhadores aos volumes individuais durante esse manuseio, mas também deve considerar a proximidade aos volumes acumulados, pois os trabalhadores permanecem entre manuseios na espera de novos volumes produzidos. A distância estimada dos trabalhadores aos volumes acumulados durante o trabalho foi maior do que 2 metros e menor de que 2 metros aos volumes individuais para manuseá-los. As fontes de radiação foram consideradas puntiformes para os cálculos das taxas de dose nas posições em que cada categoria de trabalhadores normalmente ocupa e, portanto, utilizada a lei do inverso do quadrado da distância a partir do valor da média aritmética.

5.3.2 Doses laborais

5.3.2.1 Obtidas com base em estimativas

Para avaliar as doses laborais na área ilustrada na Figura 3.4 por categorias de trabalhadores, suas distâncias às fontes, as taxas de dose e seus tempos de permanência foram determinados e apresentados na Tabela 5.5.

A taxa de dose na posição de trabalho dos motoristas, carregadores e trabalhadores da instalação foi avaliada conforme aproximação da lei do inverso do quadrado da distância em relação ao local de acúmulo de volumes. Foi considerada a média aritmética dos valores em A e B. Dessa forma, para distâncias menores do que 2 metros, o valor avaliado foi de $(200 \pm 50) \mu\text{Sv/h}$ e para distâncias maiores foi de $(60 \pm 15) \mu\text{Sv/h}$.

A taxa de dose na posição de trabalho dos técnicos de radioproteção foi estimada conforme aproximação da lei do inverso do quadrado da distância em relação ao local dos veículos carregados. Foi considerada a média anual das taxas de doses médias nas superfícies externas dos veículos, ponderadas por intervalo de ΣIT , obtidas com os auxílios do *software Microsoft Office Excel 2007* e dos dados da Tabela 5.2. Dessa forma, para distâncias menores do que 2 metros, o valor estimado foi de $20 \mu\text{Sv/h}$.

Tabela 5.5 - Dose laboral estimada (por atividade) na área ilustrada na Figura 3.4 por categoria de trabalhadores

	Distância à fonte (m)	Taxa de Dose ($\mu\text{Sv/h}$)	Tempo de trabalho com as fontes na área da Figura 3.4 (h/semana)	Dose laboral semanal ou anual ^(1;2) (mSv)
Trabalhadores da instalação, motoristas e carregadores	< 2	200	3	De 0,18 a 0,6 (semanal)
	> 2	60		ou De 9 a 30 (anual)
Técnicos de radioproteção	< 2	20	1	0,02 (semanal) ou 1 (anual)

⁽¹⁾ Para melhorar a precisão, as doses laborais estimadas por atividade realizada devem ser divididas pelo número de trabalhadores que a realiza em cada categoria, porém adicionadas às doses de outras eventuais atividades não consideradas neste modelo.

⁽²⁾ A dose anual é sujeita a erro sistemático, pois é estimada a partir da dose semanal multiplicado por 50 (semanas).

A taxa de dose na posição de espera dos trabalhadores e o tempo de espera não foram considerados nessa estimativa por serem muito variáveis.

5.3.2.2 Obtidas com base em resultado de monitorações

a) Técnicos de radioproteção e trabalhadores da instalação

Os valores das doses foram fornecidos pelo Laboratório de Dosimetria Termoluminescente do IPEN. Esses valores e a quantidade de trabalhadores estão apresentados por categorias na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Quantidade e doses efetivas dos trabalhadores em 2011 e 2012

	Categoria de Trabalhadores			
	Técnicos de Radioproteção		Trabalhadores da instalação	
	2011	2012	2011	2012
Quantidade de trabalhadores	6	6	5	5
Dose efetiva individual média (mSv)	2,9 $\pm$ 1,2	1,9 $\pm$ 1,4	9,6 $\pm$ 5,4	6,2 $\pm$ 3,2
Dose efetiva individual máxima (mSv)	5,31	4,58	15,02	10,80
Dose efetiva individual mínima (mSv)	2,24	0,80	0,80	2,25
Dose efetiva coletiva (mSv pessoa)	17,36	11,65	48,27	30,86

b) Motoristas e carregadores

Os valores das doses foram fornecidos por três empresas que transportaram mais de 90 % do total dos volumes. Esses valores, a quantidade de trabalhadores (motoristas e carregadores) bem como o Σ ITs transportado com suas porcentagens do total, as relações entre o Σ ITs transportado pelas doses coletivas e individuais médias, respectivamente as melhores relações em 2012 e as piores em 2011, estão apresentados por empresa na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Quantidade e doses efetivas dos trabalhadores das empresas que transportaram mais de 90 % do total dos volumes, somas dos ITs transportadas e relações com suas doses em 2011 e 2012

	Empresas					
	Transportadora 1		Transportadora 2		Transportadora 3	
	2011	2012	2011	2012	2011	2012
Quantidade de trabalhadores	15	16	3	3	4	7
Dose efetiva individual média (mSv)	14,6 $\pm$ 8,6	10,9 $\pm$ 7,9	25,3 $\pm$ 2,0	20,3 $\pm$ 1,6	9,9 $\pm$ 2,7	10,5 $\pm$ 4,9
Dose efetiva individual máxima (mSv)	27,96	24,89	27,56	22,1	13,5	15,5
Dose efetiva individual mínima (mSv)	1,71	0,31	23,86	19,01	7,5	2,2
Dose efetiva coletiva (mSv pessoa)	219,2	175,11	75,88	61,05	39,7	73,5
Σ IT transportada (porcentagem do total)	15805,22 (46,48 %)	16100,73 (43,60 %)	9124,94 (26,83 %)	11276,37 (30,54 %)	6611,42 (19,44 %)	6817,49 (18,46 %)
Σ IT/ Dose efetiva coletiva	72 ⁽¹⁾	92	120	185 ⁽²⁾	166	93
Σ IT/ Dose efetiva média	1082	1472 ⁽²⁾	361 ⁽¹⁾	554	666	649

Nota: (1) Pior relação
(2) Melhor relação

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os objetivos e as finalidades foram atingidos de acordo com os seguintes entendimentos:

a) Apesar da regulamentação brasileira não apresentar os valores das distâncias de segregação e requerer *monitorações de rotina* para os veículos rodoviários, o mesmo procedimento não é requerido por regulamentos de países estrangeiros.

Os procedimentos adotados por países estrangeiros utilizam distâncias de segregação da carga, mas não aplicam o *monitoramento de rotina* para o controle e comparação com valores-limite de radiação nos veículos não expedidos sob “uso exclusivo”, pois esses valores já são obedecidos com o controle do acúmulo.

O estudo dos valores relacionados ao TMR rodoviário (quantidades, Σ IT e doses), apresentados por países estrangeiros [4;5;8], e a comparação das relações entre o Σ IT transportado e as doses efetivas apresentadas por este trabalho na Tabela 5.7 permitem observar variações que dependem intensamente dos PPRs individuais das expedições e armazenamento em trânsito, pois estes PPRs diferem entre si sobre distâncias de segregação da carga, tempo de trajeto do transporte, uso de blindagens nas cabines e outros procedimentos para avaliar as doses.

b) Os valores das taxas de dose médias na cabine dos veículos obtida na pesquisa de campo, Tabela 5.2, são menores do que o valor da taxa de dose na cabine dos veículos obtida pelo modelo, (0,23 mSv/h), item 5.2.

Os *valores de exposições* obtidos na pesquisa de campo, apresentados na Tabela 5.2, mostraram que os trabalhadores devem ser individualmente dosimetrados para Σ IT > 5, pois os valores médios na cabine para eles são maiores do que 20 μ Sv/h.

Os *valores de exposições* obtidos na pesquisa de campo, apresentados no Gráfico 5.1, mostram que não foram alcançados os limites regulamentares nas superfícies externas nas 26.603 expedições efetuadas.

Os *valores de doses* laborais para a maioria das categorias de trabalhadores e obtidos por modelos, Tabela 5.5, são estimados estar acima de 6 mSv, ou seja, 3/10 do limite anual de 20 mSv (nível de investigação), portanto os procedimentos de trabalho deverão ser modificados para possibilitarem que os valores estimados sejam diminuídos. Para a categoria de técnicos de radioproteção, os valores deverão estar abaixo do nível de registro e, portanto os procedimentos de trabalho não precisariam ser modificados e os seus valores devem ser desprezados ou registrados como zero.

Os *valores de doses* laborais obtidos na pesquisa de campo, Tabelas 5.6 e 5.7, são compatíveis com os valores estimados, obtidos através dos modelos, Tabela 5.5. As variações destes valores ocorrem em razão de atitudes pessoais em procedimentos de trabalho e de tempo de exposição à radiação em outras atividades, mesmo as atividades relacionadas ao preparo das expedições, não contempladas no modelo, vide observação na Tabela 5.5, cujos valores foram obtidos dos resultados dos dosímetros. Embora existam atividades nas quais os trabalhadores realizam procedimentos iguais, alguns trabalhadores não estão conscientizados suficientemente para manter as doses tão pequenas quanto razoavelmente exequíveis tanto quanto outros. Essa situação foi notada ao observar trabalhadores desnecessariamente próximos às fontes. As doses individuais mostram que essa conscientização deve ser melhorada para possibilitar expedições com acúmulos maiores de volumes.

Observa-se também na Tabela 5.7 que as doses efetivas individuais médias em duas das três transportadoras têm porcentagens menores do que 100 % dos limites regulamentares. Nesses casos, o Σ IT transportado, poderia ter sido proporcionalmente maior sem que as doses tivessem atingido seus limites regulamentares de 20 mSv/ano. Um raciocínio análogo pode ser utilizado ao observar o Gráfico 5.2, no qual o Σ IT transportado poderia ter sido cerca de 100 para as exposições nas superfícies dos veículos e a dois metros

deles atingirem seus valores-limite regulamentares, desde que fosse melhorada a blindagem na cabine.

Observou-se a necessidade de realocação da sala dos motoristas e carregadores da posição atual, vide Figura 3.4, para as proximidades da entrada/saída da instalação, distante dos volumes acondicionados, (dispostos para carregamento) e próxima ao veículo estacionado, na sequência: *sala – veículo - volumes acondicionados* e não *veículo – volumes acondicionados - sala* como está atualmente. Isto se faz necessário para possibilitar que os motoristas e carregadores possam circular entre a sala e o veículo descarregado para preparar seu transporte sem estarem sujeitos à exposição desses volumes acondicionados. Com essa medida as doses laborais serão diminuídas.

c) O Gráfico 5.2 relaciona os valores das taxas de dose obtidos na superfície externa dos veículos e na cabine dos motoristas com os valores dos Σ ITs dos volumes individuais (acúmulo de carga). Os valores das taxas de dose a 2 m do veículo podem ser deduzidos a partir dos valores nas superfícies externas, apesar de não registrados no gráfico (foram considerados 10 vezes menores do que estes). Através das linhas de tendência dos valores colocados no gráfico, observa-se que há uma relação direta e proporcional com o acúmulo da carga. Observa-se também que os valores nas superfícies externas e a 2 m delas não alcançam os valores-limite regulamentares. Diferentemente os valores nas cabines e os acúmulos das cargas, para não sob “uso exclusivo”, alcançam esses limites.

d) A análise do Gráfico 5.2 e o conhecimento dos valores-limite permitem observar que com o acúmulo máximo de radiação, sem a necessidade de “uso exclusivo” (Σ IT=50), os valores de taxa de dose nas superfícies externas dos veículos são pouco mais da metade dos valores de seus limites regulamentares para as expedições realizadas naquele período. Essa proporção e as linhas de tendência (lineares) projetam os valores limites-regulamentares das taxas de dose nas superfícies externas a valores maiores

do acúmulo máximo de radiação da carga permitido não sob “uso exclusivo”, o mesmo acontecendo para as taxas de dose deduzidas a 2 metros das superfícies externas desses veículos. Dessa forma, pode-se garantir que nas expedições de radiofármacos não sob “uso exclusivo” os valores de taxa de dose nas superfícies externas e a 2 metros delas serão menores do que seus valores-limite regulamentares e é desnecessária a obtenção de novas medidas. O Σ IT transportado poderia ter sido proporcionalmente maior, caso não houvesse limitação regulamentar, que as exposições não teriam atingido seus limites regulamentares. Nesse caso, o Σ IT transportado dependeria intensamente dos procedimentos laborais e do PPR.

As taxas de dose na cabine podem ser obtidas para elaboração de novo programa de proteção radiológica específico. As linhas de tendência do Gráfico 5.2 permitem observar que os volumes com maiores valores de IT são acondicionados na parte traseira dos veículos e que a linha de tendência do acúmulo maior na superfície externa direita em relação à esquerda para as menores quantidades de carga é em razão do acondicionamento dessas cargas próximo à porta de mesmo lado em razão da facilidade de manuseio. Essas linhas se invertem para as maiores quantidades de carga em razão da utilização de maior espaço do veículo para a carga com os maiores valores de IT no lado oposto à porta lateral e traseira do veículo.

Embora individualmente os trabalhadores com conscientização e que recebem valores de radiação menores do que os limites em suas outras atividades pudessem transportar maiores acúmulos, nesta pesquisa o trabalho com maiores acúmulos deverá ser possível apenas para a categoria de técnicos de radioproteção, pois ao se adotar as modificações no regulamento brasileiro, a dose efetiva individual média dessa categoria, na prática deverá ser ≤ 1 mSv/ano.

6.1 Dificuldades encontradas

Após os veículos estarem prontos para serem monitorados, os motoristas, carregadores e responsáveis pelas produções de radiofármacos

aguardam com impaciência a saída dos veículos em razão da pressa em se finalizar as entregas em seus destinos.

Configurações novas de carga arranjadas por valores de ITs ou por conteúdos radioativos, para diminuir as doses nos pontos de medida regulamentares, não foram elaboradas para evitar atrasos nas entregas dos radiofármacos.

7 CONCLUSÕES

O parâmetro de controle mais restritivo para os indivíduos do público é o acúmulo da carga representado pela soma dos ITs individuais dos volumes enquanto que para os trabalhadores é o valor da taxa de dose na cabine ou da distância de segregação da carga à cabine.

Os valores de taxa de dose na superfície externa dos veículos rodoviários que transportam radiofármacos e a 2 metros deles são menores do que os valores-limite regulamentares admitidos nestas posições para o acúmulo dos volumes limitado pela soma de seus ITs individuais ($\Sigma IT = 50$). A análise da projeção da continuidade dos valores medidos até seus valores-limite, com as linhas de tendência apresentadas em um gráfico, mostrou que os valores-limite regulamentares das posições citadas são alcançados quando a soma dos ITs individuais for maior do que 50. Esse comportamento permite afirmar que na prática os valores das taxas de dose nessas posições (áreas regularmente ocupadas por indivíduos do público) são menores do que seu limite nas situações normais e de rotina. A demonstração do controle das doses dos indivíduos do público é tecnicamente suficiente de ser realizada pela demonstração do parâmetro: acúmulo dos volumes, quando limitado pela soma de seus ITs individuais ($\Sigma IT = 50$). A monitoração regulamentar exigida pela norma CNEN NE 5.01 para acúmulos até o limite ($\Sigma IT = 50$) sempre fornecerá valores das taxas de dose em áreas regularmente ocupadas por indivíduos do público menores que seu limite para estas situações. Desse modo, a não ser para cumprir a requisição do regulamento brasileiro, tal monitoração é desnecessária.

Para diminuir as doses coletivas, como sugestão, o regulamento brasileiro atualizado deve deixar de requerer a demonstração do controle das doses por monitorações realizadas para expedições sem a necessidade de “uso exclusivo”. Dessa forma, os técnicos de radioproteção que realizam essas monitorações evitarão trabalho e doses laborais, economizarão custos,

equipamentos e tornarão mais rápidas as expedições de transporte, fator importante para radiofármacos de meia-vida curta.

O regulamento brasileiro atualizado deve também apresentar os valores requeridos das distâncias mínimas de segregação entre as cargas e as cabines dos veículos rodoviários para diminuir as doses dos motoristas, seus ajudantes e carregadores, pois alguns destes trabalhadores recebem valores acima do critério de dose de 5 mSv ao ano e até acima do limite laboral de dose efetiva de 20 mSv ao ano. Requerer estas distâncias em preferência à taxa de dose máxima na cabine evita a necessidade de *monitorações de rotina* nas cabines e também padroniza o regulamento brasileiro com os regulamentos estrangeiros. Estas duas opções diminuem a dose média dos motoristas e ajudantes.

Para que a dose dos carregadores diminua, além da diminuição das taxas de dose nas cabines para os carregadores que ocupam regularmente esses locais junto com os motoristas, são necessárias medidas de conscientização para que não permaneçam desnecessariamente próximos às fontes. Essas modificações no regulamento brasileiro diminuirão doses laborais dos técnicos de radioproteção por deixar de requerer as *monitorações de rotina* para quantidades de carga sem a necessidade de “uso exclusivo” e também diminuirão as doses laborais dos trabalhadores que ocupam regularmente as cabines, pois as taxas de dose serão menores do que as atuais em razão do cumprimento de distâncias de segregação regulamentadas, associadas ou não à espessuras de blindagem em suas divisórias.

8 FUTUROS TRABALHOS

Efetuar estudos:

- a) da dose acumulada na cabine do veículo em função da distância percorrida pelo veículo, ou melhor, do tempo gasto durante o trajeto;
- b) para o arranjo ideal para a entrega a cada usuário;
- c) de trabalhos análogos com outras empresas distribuidoras de radiofármacos de diferentes países para verificar se obtém resultados análogos aos nossos, pois as porcentagens de cada radiofármaco pode ser diferente bem como as características dos veículos e suas vias de percurso;
- d) dos valores dos parâmetros para $\Sigma IT = 50$ com radionuclídeos de energias maiores a fim de corroborar ou não com esta tese;
- e) de otimização relacionados às ΣIT expedidas (quantidades transportadas).

REFERÊNCIAS

- [1] **Revista del CSN / Año IX / Número 34 I Trimestre 2005, La señalización en el transporte de material radiactivo, p.24. ARTÍCULOS DIVULGATIVOS, Seguridad Nuclear .** Disponível em: http://www.csn.es/images/stories/publicaciones/periodicas/revista_seguridad_nuclear/rev_34.pdf Acesso em: 22/jul/2013
- [2] GERULIS, E.; ALMEIDA, E.A.; SANCHES, M.P. Transportation of radiopharmaceuticals produced in the "Instituto de Pesquisas Energeticas e Nucleares - IPEN". In: International Congress of the International Radiation Protection Association, 11th, 23-28 May, 2004, Madrid, Spain. Disponível em: <http://www.ipen.br/biblioteca/2004/IRPA/10803.pdf> Acesso em: 22/jul/2013
- [3] Occupational and public exposures arising from the normal transport of radioactive material: Experience in Germany *G. Schwarz, H.-J. Fett, F. Lange* (IAEA-CN-101/22). **International Conference on the Safety of Transport of Radioactive Material Vienna, Austria 7 - 11 July 2003** Disponível em: <http://www-ns.iaea.org/downloads/rw/radiation-safety/512seitenText.pdf> Acesso em: 22/jul/2013
- [4] WATSON, S.J., OATWAY, W.B., JONES, A.L., HUGHES, J.S. **Survey into the Radiological Impact of the Normal Transport of Radioactive Material in the UK by Road and Rail.** Rep. NRPB-W66., National Radiological Protection Board, Chilton, UK, 2005. Disponível em: http://www.hpa.org.uk/webc/HPAwebFile/HPAweb_C/1194947392224 Acesso em: 22/jul/2013
- [5] ZAMORA, F.; ACEÑA, V.; RUBIO, E.; **Análisis de las Dosis en el Transporte de Radiofármacos, II Congreso Conjunto SEFM-SEPR, May, 2011, Madrid, ES.** Disponível em: http://www.csn.es/images/stories/publicaciones/otras_publicaciones/folletos_divulgativos/dosis_2011sevilla.pdf Acesso em: 22/jul/2013
- [6] BEMELMANS, D.; NEVES, M.C.B.; NOGUEIRA, H.; **Case Study: Occupational Exposures in the Transport of Radioactive Material** – REM Indústria e Comércio LTDA. Brazil, PATRAM 2007, Miami, Fl, USA. Disponível em: <http://www.ipen.br/biblioteca/2007/inac/11930.pdf> Acesso em: 22/jul/2013
- [7] GERULIS, E.; SORDI, G.A.A.; SILVA, O.P. Aplicação de modelos para demonstrar o controle de doses na expedição de transporte de materiais radioativo. In: Simposio Internacional sobre Proteccion Radiologica, 2-4 de abril, 2012, Cuzco, Peru. *Proceedings..* Disponível em: <http://www.ipen.br/biblioteca/2012/eventos/17886> Acesso em: 22/jul/2013

[8] Dose of ionizing radiation received by transport workers - A study conducted in Canada in 2002 *S. Faille* (IAEA-CN-101/19). **International Conference on the Safety of Transport of Radioactive Material. Vienna, Austria 7 - 11 July 2003**

Disponível em: <http://www-ns.iaea.org/downloads/rw/radiation-safety/512seitenText.pdf>

Acesso em: 22/jul/2013

[9] Safety of Transport of Radioactive Material. Proceedings of an international conference Vienna, 7–11 July 2003.

Disponível em: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1200_web.pdf

Acesso em: 22/jul/2013

[10] Statistics on the road transport of radioactive materials in Italy *S. Trivelloni, L. Matteocci, G. Palmieri, P. Caporali* (IAEA-CN-101/24, p. 106). **International Conference on the Safety of Transport of Radioactive Material Vienna, Austria 7 - 11 July 2003**

Disponível em: <http://www-ns.iaea.org/downloads/rw/radiation-safety/512seitenText.pdf>

Acesso em: 22/jul/2013

[11] Doses assessment and shielding optimization for the transport of radiopharmaceuticals produced by the isotope centre in Cuba *S. Perez Pijuan, S. Ayra Pardo* (IAEA-CN-101/18). **International Conference on the Safety of Transport of Radioactive Material Vienna, Austria 7 - 11 July 2003**

Disponível em: <http://www-ns.iaea.org/downloads/rw/radiation-safety/512seitenText.pdf>

Acesso em: 22/jul/2013

[12] RODRIGUES, Demerval Leônidas. ***Impacto radiológico devido ao transporte de radiofármacos do IPEN-CNEN/SP***. 2009. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em:

<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-25082009-131536/pt-br.php>

Acesso em: 22/jul/2013

[13] Radioactive Material Shipping for Academic and Medical Facilities. Vernig, Peter G.; Tipping, Tracy N.; Herrold, Jim; Ward, Paul, Health Physics. 101(5):S154-S159, November 2011. Abstract disponível em:

http://journals.lww.com/health-physics/Abstract/2011/11001/Radioactive_Material_Shipping_for_Academic_and.5.aspx

Acesso em: 22/jul/2013

[14] COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. **Transporte de material radioativo – CNEN-NN-5.01**. Rio de Janeiro: 1988. Disponível em

<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/pdf/Nrm501.pdf> Acesso em: 22/jul/2013

[15] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material***. IAEA, Vienna, 1961 Edition, (Safety Series No. 6).

[16] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material***. IAEA, Vienna, 1964 Edition, (Safety Series No. 6).

[17] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material***. IAEA, Vienna, 1967 Edition, (Safety Series No. 6).

[18] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material***. IAEA, Vienna, 1973 Edition, (Safety Series No. 6).

[19] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material, Edition Revised (As Amended)***. IAEA, Vienna, 1985 Edition, (Safety Series No. 6).

[20] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material***. IAEA, Vienna, 2012 Edition, Specific Safety Requirements, No. SSR-6. Disponível em:
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1570_web.pdf Acesso em: 22/jul/2013

[21] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material***. IAEA, Vienna, 2009 Edition, Specific Safety Requirements, No. TS-R-1. Disponível em:
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1384_web.pdf Acesso em: 22/jul/2013

[22] UNITED STATES DEPARTMENT OF TRANSPORT. ***Title 49 of the Code of Federal Regulations***. Transportation - Chapter I, Part 177 - Carriage by public highway, § 177.842 - Class 7 (radioactive) materials. - Revised Jan 26, 2004. Disponível em
http://edocket.access.gpo.gov/cfr_2006/octqtr/pdf/49cfr177.842.pdf Acesso em: 22/jul/2013

[23] European Agreement. Concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Road. Part 7. United Nations, New York and Geneva, 2010. Disponível em:
<http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/danger/publi/adr/adr2011/English/Part7.pdf> Acesso em: 22/jul/2013

[24] SHAW, KEN. B. **Worker exposures: How much in the UK?** IAEA Bulletin, Spring, 1985. Disponível em:
<http://www.iaea.org/Publications/Magazines/Bulletin/Bull271/27104592527.pdf> Acesso em: 22/jul/2013

[25] SUÁREZ, RODOLFO CRUZ (especialista em proteção radiológica do OIEA), **1º. Fórum Internacional de Proteção Radiológica**, 22 a 23 de outubro de 2012 – IPEN, São Paulo, SP.

[26] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. ***Radiation Protection Programmes for the Transport of Radioactive Material***. IAEA, Vienna, 2007, Edition No. TS-G-1.3, Disponível em:
http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/pub1269_web.pdf Acesso em: 22/jul/2013

[27] LÓPEZ VIETRI, J.R.; CAPADONA, N. M.; *Establecimiento y utilización de Programas de protección radiológica para el transporte de material radiactivo*. Primer Congreso Americano del IRPA (International Radiation Protection Association) Sep 4-8, 2006 Acapulco, México.

[28] UK Guidance on Radiation Protection Programmes for the Transport of Radioactive Material. National Radiological Protection Board, Chilton, UK, Jun 2002. Disponível em:
<http://www.hse.gov.uk/nuclear/transport/ukguidanceonradiationprotec1.pdf> Acesso em: 22/jul/2013

[29] ROCKWELL, T. **Reactor shielding design manual**, D. Van Nostrand, Princeton, N.J., 1956, p.13.

[30] [Revista Brasileira de Ensino de Física](#) Print version ISSN 1806-1117 Rev. Bras. Ensino Fís. vol.33 no.1 São Paulo Jan./Mar. 2011 <http://dx.doi.org/10.1590/S1806-11172011000100019> DESENVOLVIMENTO EM ENSINO DE FÍSICA Desenvolvimento de *software* de análise gráfica para planos de radioproteção; Ronaldo Celso Viscovini^{I,1}; Nilson Benedito Lopes^{II}; Daniel Pereira^{III} Disponível em:
http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1806-11172011000100019&script=sci_arttext Acesso em: 22/jul/2013

[31] Dose Rate Distribution from a Standard Waste Drum Arrangement Zoeger, N.; Brandl, A., Health Physics: November 2011 - Volume 101 - Issue 5 - pp S142-S147.

[32] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic requirements for personnel monitoring**. IAEA, Vienna, 1980 (Safety Series No.14).

[33] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **Basic Principles for occupational radiation monitoring**. IAEA, Vienna, 1987 (Safety Series No.84).

[34] GERULIS, Eduardo. **Controle da dose de radiação ionizante para trabalhadores em uma instalação radiativa com fontes não-seladas**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo. Disponível em:
<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85131/tde-08062007-143503/pt-br.php> Acesso em: 22/jul/2013

[35] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **General principles of monitoring for radiation protection of workers**. ICRP, Vienna, 1982 (ICRP Publication 35).

[36] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. **Principles for the radiation protection on of workers**. ICRP, Vienna, 1997 (ICRP Publication 75).

[37] ICRU International Commission on Radiation Units and Measurements, **Fundamental quantities and units for ionizing radiation**. Bethesda,MD: ICRU, 1998.(ICRU-60).

[38] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *Recommendations of the international commission on radiological protection*. ICRP, Vienna, 1991 (ICRP Publication 60).

[39] INTERNATIONAL COMMISSION ON RADIOLOGICAL PROTECTION. *The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP, 2007 (ICRP Publication 103).

[40] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **International basic safety standards for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources**. IAEA, Vienna, 1996 (Safety Series No. 115).

[41] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. **The radiological accident in Goiania** IAEA, Vienna, 1988.

Disponível em: http://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/pub815_web.pdf Acesso em: 22/jul/2013

[42] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Advisory Material for the IAEA Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material*. IAEA, Vienna, 2008 Edition No. TS-G-1.1 (Rev.1). Disponível em:

http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1325_web.pdf Acesso em: 22/jul/2013

[43] Tauhata, L., Salati, I.P.A., Prinzio, R.Di., Prinzio, M.A.R.R.Di. Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – 5º revisão agosto/2003 – Rio de Janeiro – IRD/CNEN.

[44] WESTERN GOVERNOR'S ASSOCIATION. Briefing material, workshop Meeting of the Western Interstate Energy Board High-Level Radioactive Waste Committee. May 3-4, 2005 Salt Lake City, Utah. Disponível em:

http://www.westgov.org/wieb/meetings/hlwsprg2005/present/6_sheets-Hlw.pdf

[45] Information Notice N0. 80-32: Clarification of Certain Requirements for Exclusive-use Shipments of Radioactive Materials. Nuclear Regulatory Commission. August 29, 1980, SSINS: 6870. Disponível em:

<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1034/ML103420457.pdf> Acesso em: 22/jul/2013

[46] GENERIC PROCEDURES FOR ASSESSMENT AND RESPONSE. DURING A RADIOLOGICAL EMERGENCY. IAEA, VIENNA, 2000. **IAEA-TECDOC-1162**.

Disponível em: www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1162_prn.pdf Acesso em: 22/jul/2013