

**Felipe Luz de Oliveira**

**AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA NO USO DE  
TRAÇADORES RADIOATIVOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO.**

Trabalho de conclusão de curso apresentado para  
obtenção da certificação de Especialista pelo  
Programa de Pós-Graduação em Proteção  
Radiológica e Segurança de Fontes Radioativas do  
Instituto de Radioproteção e Dosimetria da  
Comissão Nacional de Energia Nuclear.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Cesar Augusto  
da Silva

IRD/CNEN

Co-orientador: MSc. Marcelo Ferreira Sekiguchi

TRACERCO

Rio de Janeiro – Brasil

Instituto de Radioproteção e Dosimetria – Comissão Nacional de Energia Nuclear

Coordenação de Pós-Graduação

2014

## Ficha Catalográfica

T  
621.4837 Oliveira, Felipe Luz  
O148a Avaliação da proteção radiológica no uso de traçadores radioativos na indústria de petróleo, defendida e aprovada no IRD / Felipe Luz Oliveira – Rio de Janeiro: IRD, 2014.  
X, 49 f., 29,7 cm: il., tab.

Orientador: Dr. Francisco César Augusto da Silva  
Trabalho de Conclusão de Curdo (Lato Sensu) – Instituto de Radioproteção e Dosimetria. Rio de Janeiro, 2014.  
Referências bibliográficas: f. 46-49

1. Traçador radioativo 3. Radiotraçador 4. Petróleo 5. Proteção radiológica. I.  
Título

**Felipe Luz de Oliveira**

**AVALIAÇÃO DA PROTEÇÃO RADIOLÓGICA NO USO DE  
TRAÇADORES RADIOATIVOS NA INDÚSTRIA DE PETRÓLEO.**

Rio de Janeiro, 29 de setembro de 2014.

---

*Prof. Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva – IRD/CNEN*

---

*M.Sc. Marcelo Ferreira Sekiguchi – IRD/CNEN*

---

*Dr. Manuel J M Lourenço – IRD/CNEN*

O presente trabalho foi desenvolvido no Instituto de Radioproteção e Dosimetria da Comissão Nacional de Energia Nuclear, sob orientação do Prof. Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Dr. Francisco Cesar Augusto da Silva, pela orientação, paciência, amizade, disposição e trufas de Viena.

Ao meu co-orientador MSc. Marcelo F. Sekigunchi, por todo conteúdo passado.

Ao Instituto de Radioproteção e Dosimetria/CNEN, pela oportunidade, especialmente ao Prof. Almir.

Aos meus pais, Davi e Lucimary, pelo imenso carinho, por todo amor, e por acreditarem em mim, e a minha irmã, que torna mais fácil estar morando longe de casa.

Aos meus avós, Idalina, Iracy, Lucio e Luiz, porque destes vieram às pessoas mais maravilhosas que eu conheço em especial Lívia, Laura e Manuela.

Às minhas tias, tios, primas e primos, em especial as minhas tias Rosemary e Denise.

Aos meus amigos pelos inúmeros sorrisos e lembranças, especialmente ao Lucas e Victor, por serem os únicos a se locomoverem quilômetros apenas por minha companhia.

À todos aqueles meus amigos de sala, que me auxiliaram, e conviveram com meus defeitos ao longo deste curso, especialmente a Viliene pelas massagens e seu excelente escondidinho de carne seca.

À todos os meus professores, do Ensino Fundamental aos atuais.

E acima de tudo à Deus, pois sem ele eu nada seria, e nada disso existiria.

## RESUMO

Neste trabalho são apresentadas as diversas aplicações de traçadores radioativos (ou radiotraçadores) na área de indústria e especialmente na indústria de petróleo (óleo e gás). Os traçadores radioativos são radioisótopos, tais como:  $^3\text{H}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ , etc, que podem ser usados nas formas líquida, gasosa ou sólida. A classificação e os parâmetros para a escolha de um traçador radioativo, bem como o tratamento de dados em experimentos, são também abordados neste trabalho.

Foi realizada uma avaliação da proteção radiológica no uso desses traçadores radioativos na área de petróleo, tomando como base o risco radiológico relativo as dose externa e contaminação interna e externa, os procedimentos de proteção e segurança radiológica a serem seguidos e, os requisitos e recomendações regulatórias existentes.

Como foi identificado que não existe uma norma específica de proteção radiológica para traçador radioativo, uma série de recomendações da Agência Internacional de Energia Atômica, bem como, alguns aspectos das normas dos EUA são apresentadas para contribuir na elaboração dessa norma específica.

Palavras chaves: traçador radioativo, radiotraçador, petróleo, proteção radiológica.

## ABSTRACT

This work presents some applications of radioactive tracers (or radiotracers) in the industry area and especially in the oil and gas industry. Radioactive tracers are radioisotopes, such as:  $^3\text{H}$ ,  $^{82}\text{Br}$ ,  $^{131}\text{I}$ ,  $^{85}\text{Kr}$ ,  $^{41}\text{Ar}$ , etc. that can be used in liquid, gaseous or solid physical forms. The classification and parameters for the choice of a radioactive tracer and the processing of data in experiments are also addressed in this work.

An assessment of radiation protection in the use of radioactive tracers in the oil and gas industry was also done based on the radiological risk for the external dose and internal and external contamination, radiation and safety protection procedures and regulatory requirements and recommendations.

As it was identified that there is no specific radiation protection regulation for radioactive tracer, a number of recommendations of the International Atomic Energy Agency, as well as some aspects of the United States regulation are shown to contribute for the elaboration of this specific regulation.

Keywords: radioactive tracer, radiotracer, oil and gas industry, radiation protection.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 OBJETIVO .....</b>	<b>2</b>
<b>1.2 JUSTIFICATIVA.....</b>	<b>2</b>
<b>2. TRAÇADORES.....</b>	<b>2</b>
2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS TRAÇADORES .....	3
2.2. TRAÇADORES RADIOATIVOS .....	4
2.3 ESCOLHA DO RADIOTRAÇADOR .....	4
2.4 TRATAMENTOS DE DADOS EM EXPERIMENTOS ATRAVÉS DE RADIOTRAÇADORES.....	5
2.4.1 <i>Correção do Background</i> .....	6
2.4.2 <i>Correção do decaimento radioativo</i> .....	9
2.4.3 <i>Extrapolação</i> .....	10
2.4.4 <i>Normalização</i> .....	10
<b>3. TRAÇADORES E A ÁREA PETROLÍFERA .....</b>	<b>11</b>
3.1 O PETRÓLEO .....	11
3.2 HISTÓRIA DO PETRÓLEO .....	12
3.3 A DISTRIBUIÇÃO DE PETRÓLEO NO MUNDO.....	14
3.4 RADIOTRAÇADORES NA ÁREA PETROLÍFERA.....	14
3.5 QUANTIDADE DE TRAÇADOR.....	19
3.6 UTILIZAÇÃO DE RADIOTRAÇADORES COMO FERRAMENTAS DE INVESTIGAÇÃO LOCAIS IMPACTADOS POR HIDROCARBONETOS DE PETRÓLEO .....	19
3.7 MEDIDA DE VAZÃO .....	21
3.7.1 <i>Medida de vazão por Injeção Continua</i> .....	22
3.7.2 <i>Medida de vazão por velocidade de pulso</i> .....	23
3.7.3 <i>Método de Contagem Total</i> .....	25
3.8 USO DE TRAÇADORES E O USO DO RADÔNIO COMO TRAÇADOR EM ESTUDOS DE CONTAMINAÇÃO POR NAPL's .....	27
3.9 TRAÇADORES E SEU USO NA DETERMINAÇÃO DA SATURAÇÃO RESIDUAL DE ÓLEO .....	28
3.10 DETECTORES DE NAI PARA DETECÇÃO “IN SITU” DE RAIOS GAMA EM EXPERIMENTOS COM TRAÇADORES .....	30
3.11 VELOCIDADE DE PROCESSAMENTO DE DADOS.....	31
<b>4. RISCOS RADIOLÓGICOS .....</b>	<b>32</b>
<b>5. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA .....</b>	<b>33</b>
5.1 ASPECTOS GERAIS .....	33
5.2 CLASSIFICAÇÃO DE ÁREA.....	35
5.3 INFORMAÇÕES SOBRE A EMPRESA E EMPRESAS BRASILEIRAS .....	36
5.4 PRINCÍPIOS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA.....	36
5.5 PROCEDIMENTOS DE EMERGÊNCIA A SEREM ADOTADOS NO CASO DE CONTAMINAÇÃO COM RADIOISÓTOPOS .....	38
5.6 PLANEJAMENTO E PROJETO.....	39
5.6.1 <i>Planejamento</i> .....	39
5.6.2 <i>Projeto</i> .....	39
5.7 LISTAGEM DAS FONTES E INVESTIGAÇÃO PARA O USO DE RADIOTRAÇADORES. ....	40
5.8 LIBERAÇÃO DE ÁREA CONTAMINADA E RADIOISÓTOPOS ISENTOS DE TESTES. ....	41

5.9 FUNÇÃO, QUALIFICAÇÃO DOS INDIVÍDUOS OCUPACIONALMENTE EXPOSTOS E APLICAÇÃO DOS ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO. ....	42
5.10 PROGRAMA DE MONITORAÇÃO.....	43
5.11 GERÊNCIA DE REJEITOS RADIOATIVOS .....	44
5.12 ESTIMATIVA DE TAXA DE DOSE PARA DETERMINADAS EXPOSIÇÕES DE ROTINA .....	44
5.13 PROGRAMA DE TREINAMENTO .....	45
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>45</b>
<b>7. RECOMENDAÇÃO .....</b>	<b>46</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>46</b>



## LISTA DAS FIGURAS

Figura 1	Gráfico demonstrando a correção de background.....	6
Figura 2	Correção de Background com linha de base linear .....	7
Figura 3	Rejeitos Radioativos próximos ao sistema.....	8
Figura 4	Efeito de correção do decaimento radioativo.....	9
Figura 5	Movimento de pulsação do radiotraçador entre camadas de um reservatório. .....	14
Figura 6	Equipamento para teste de rastreamento do fluxo dos radiotraçadores na água. .....	17
Figura 7	Local adequado para coleta de amostras.....	22
Figura 8	Esquema da medida de vazão por velocidade de pulso.....	24
Figura 9	Esquemática de um experimento com traçador pelo método do impulso e resposta.....	26
Figura 10	Pulso ideal de entrada de um traçador.....	27
Figura 11	Esquema em diagrama de um detector de cintilação.....	30
Figura 12	Corte lateral em uma sonda de NaI (Tl). .....	31

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Radiotraçadores líquidos mais utilizados na Indústria.....	18
Tabela 2	Limites de Dose Anuais.....	37

## 1. INTRODUÇÃO

Traçador é qualquer substância que tem serventia como marcador, seja para uma parte do sistema, quanto uma fase específica. Nos dias atuais os traçadores são importantíssimos e muito utilizados para estudos industriais, ambientais e biológicos.

Seu uso em registro foi dado pela primeira vez, nos anos 20 d.C., quando cascas moídas foram usadas para identificar fontes do Rio Jordão pelo Tetrarca Herodes (CAILLOT, 2002), hoje tal conhecimento é reconhecido devido a pesquisas laboratoriais, programas computacionais, experimentos de aplicação no meio ambiente e experimentos de aplicações em reservatórios de petróleo.

Pode-se definir traçador como “sendo qualquer substância ou partícula (química ou biológica) que pode ser usada para seguir, quer pontualmente ou de forma contínua, o comportamento ou de um determinado sistema ou de um componente, tal como um volume de água, quer em ambiente aberto ou subterrâneo.” Os traçadores não devem reagir com materiais do meio em que são aplicados, não podendo deixar resíduos, os mesmos têm de possibilitar sua detecção mesmo em pequenas quantidades. Os mais utilizados são classificados em traçadores: fluorescentes, biológicos, químicos, radioativos e os ativáveis.

Os traçadores radioativos (radiotraçadores) mostraram um potencial altíssimo em estudos das características operacionais e no diagnóstico de processos, diminuindo o tempo de paralização em questão da produção para obtenção de resultados desejados, não alterando as condições de funcionamento, com precisão no fornecimento de informações de parâmetros reais, tendo como fundamental característica o fato de que o traçador radioativo não muda de comportamento, seja por pressão, viscosidade, temperatura, entre outros fatores que tenham a possibilidade de afetar o material, ao qual está adicionado o traçador, característica essa devida a radiação emitida pelo seu radioisótopo.

O uso de traçadores radioativos (um tipo de aplicação de radioisótopos) na indústria foi iniciado em meados de 1940, na época por motivo de produção em reatores nucleares houve incentivo ao uso dos radionuclídeos, devido a sua ampla disponibilidade. A indústria petrolífera como pioneira, efetuou grandes aplicações, tendo os radiotraçadores como ferramenta em estudos de produção de petróleo. Dentre os tipos de traçadores existentes, os traçadores radioativos são os mais comuns para exploração de reservatórios de petróleo, sendo sua utilização para o fornecimento de dados para a melhor otimização de operações envolvidas.

## **1.1 Objetivo**

Este trabalho tem como objetivo, apresentar as diversas aplicações de traçadores radioativos na área de indústria e especialmente na indústria de petróleo (óleo e gás), e realizar uma avaliação radiológica no uso de radiotraçadores especificando o risco radiológico, as doses de radiação, os procedimentos de proteção radiológica e de segurança a serem seguidos, de acordo com as normas em vigor, as exposições potenciais envolvidas e os acidentes radiológicos ocorridos.

## **1.2 Justificativa**

Os traçadores radioativos têm sido largamente utilizados na indústria para otimizar processos, resolver problemas, melhorar a qualidade do produto, economizar energia e reduzir a poluição. Os benefícios técnicos, econômicos e ambientais têm sido reconhecidos pelos setores industriais e de meio ambiente. A indústria de petróleo usa fontes radioativas não seladas na forma sólida, líquida e gasosa para investigar ou rastrear o movimento de outros materiais, mesmo dentro de tubulações ou casos fechados e muitas vezes totalmente inacessíveis. Muitos desses radiotraçadores podem ser detectados e/ou medidos facilmente devido a suas emissões.

## **2. TRAÇADORES**

A técnica dos traçadores tem sido uma ferramenta de suma importância para pesquisas nas mais diversificadas áreas, desde 1923 quando a mesma foi proposta por George Hevesy. A definição geral de traçador pode ser dada como citado a seguir *“Um traçador é uma substância qualquer ou partícula (química ou biológica) que pode ser usada para seguir, seja pontualmente ou de forma contínua, o movimento de um determinado volume de água, seja em ambiente aberto (hidrologia de superfície) ou subterrâneo (ambiente porosos ou fissurados)”* (ROSSI,1994).

O método é utilizado para se obter informações de um dado sistema, ou parte deste, através da observação do comportamento de uma substância específica agregada ao processo. Em geral, o princípio básico do método dos traçadores consiste em “marcar” uma substância, objeto ou fase de um sistema e observar seu comportamento através do sistema em estudo. No estudo de processos industriais é necessário que o traçador cumpra alguns requisitos básicos:

- comportar-se similarmente ao material do sistema em estudo;
- não interferir no processo;
- ter pelo menos uma propriedade que o distinga do restante do material do sistema;
- ser facilmente detectado em baixas concentrações;
- poder ser injetado, detectado ou amostrado com mínima ou nula perturbação no sistema (SANTOS, 2005).

## **2.1 Classificação dos traçadores**

Existem diversas classificações de traçadores, dentre as quais podem ser classificados como Naturais e Artificiais.

- a. Traçadores naturais são aqueles encontrados no próprio meio de estudo, ou seja, já estão presentes no sistema em estudo, dentre os traçadores naturais pode ser citado: flora e fauna (acompanhamento qualitativo e quantitativo de espécies vegetais e animais), isótopos ambientais, temperatura e condutância específica.
- b. Traçadores artificiais são aqueles inseridos ao meio em estudo para observação, dentre os traçadores artificiais temos os orgânicos e inorgânicos, como: pigmentos, sais e outros compostos como os fluocarbonatos, e entidades biológicas, como esporos; bactérias e vírus.

São também classificados como Internos e Externos.

- a. Traçadores internos são elementos estáveis ou não que naturalmente ocorre no sistema da qual está em estudo, sua quantificação nem sempre é simples. Não há exemplos em grande escala, contudo, em aplicabilidade destaca-se o radônio (graças a seus dois isótopos que se aplicam ao estudo de águas subterrâneas).
- b. Traçadores externos se dividem em: fluorescentes, biológicos, químicos, radioativos e ativáveis (SILVA, 2009).

Esta monografia irá abordar apenas os traçadores radioativos ou radiotraçadores.

## **2.2. Traçadores Radioativos**

Os traçadores mais comuns e utilizados em testes são os radioativos, também denominados de radiotraçadores, devido aos baixos limites de detecção. Os radiotraçadores são moléculas ou átomos marcados isotopicamente sendo eles radioativos. Tais traçadores dependem de alguns fatores, tais como: energia de radiação, tempo de meia-vida e propriedade do material. Os radiotraçadores se destacam em medidas contínuas, pois emitem ondas eletromagnéticas, ou seja, baixa interferência e grande sensibilidade, sendo estas ondas as radiações gama ou beta. Existe uma ampla flexibilidade para o uso dos radioisótopos, pois podem ser incorporados em muitos compostos sejam estes orgânicos ou inorgânicos.

Só deve ser optado pelo radiotraçador (traçador radioativo), quando nenhuns de outros métodos alternativos que possam ser aplicáveis de maneira satisfatória, como por exemplo: fluxômetros convencionais como tubos de Venturi, de palhetas ou por efeito Doppler, métodos químicos e também colorimétricos. Se a resposta destes métodos for insatisfatória pode ser indicado o uso dos traçadores radioativos (SILVA,2009).

## **2.3 Escolha do Radiotraçador**

Para o uso de radiotraçadores para medições de vazão em tubulações é de suma importância a escolha adequada do sistema de medição e do traçador com melhor perfil. Nesta escolha, assim como a dos detectores baseadas nas condições do experimento e tipo de informação esperada, devem ser levadas em conta as seguintes variáveis:

- a. Tipo da radiação que está sendo emitida, existência de carregador e elemento. A radiação gama é a melhor opção as práticas de traçadores, por ter uma boa penetrabilidade (devido a seu formato de onda eletromagnética), logicamente não basta ser radiação gama, tem de ter uma energia alta suficiente para atravessar a estrutura da tubulação e interagir com o detector.
- b. Detecção, para uma boa detecção é necessário que a sensibilidade esteja adequada, dependendo assim da interação do radiotraçador e do detector usado. Das detecções, dois tipos de medições são existentes, a amostragem e as contínuas. Na medição de tipo amostragem, a injeção do radiotraçador tende a não ser simples, porém sua detecção é de maior simplicidade, o tempo de aquisição da amostra e o intervalo de coleta das amostra são limitações deste tipo de medida, sendo assim não indicado em

eventos de curta duração. No tipo de medições contínuas são indicadas a eventos de curta duração, o sistema de medição necessário é mais complexo, porém o dispositivo de injeção é bem mais simples. Para ambos os tipos, os detectores mais acessíveis são os cintiladores, por terem menor tempo morto e uma eficiência elevada, sendo assim ampliando a gama de valores possíveis de serem escolhidos para a atividade do radioisótopo.

c. Dosimetria, outro ponto importante é qual a taxa de exposição às radiações ionizantes, que estes trabalhadores (IOE) estarão recebendo, sendo assim tendo um controle sobre este aspecto para que os trabalhadores não ultrapassem as doses estipuladas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), as quais estão baseadas nas recomendações da Agencia Internacional de Energia Atômica (IAEA), logo na escolha do traçador radioativo adequado as taxas de exposição que o trabalhador ficará exposto devem ser calculadas, de maneira a assegurar, que as mesmas estejam inferior aos valores máximos permitidos.

d. Ao ser utilizado um radiotraçador no fluido, o mesmo poderá ter de ser removido devido a contaminação radioativa que possibilita, sendo assim levando em conta o tempo gasto (desde a produção do traçador radioativo à sua utilização), deve ser feita a escolha da meia-vida do radioisótopo, de maneira que sua atividade esteja ao fim do processo baixa e em pouco tempo vá aos valores dos limites de dispersão.

Os radiotraçadores atualmente são os mais utilizados em reservatório de petróleo, o principal motivo é o de seu limite de detecção ser extremamente baixo, o que resulta num baixo volume de injeção, e por consequência gera facilidade de execução e pouca interferência no processo. Além de frequentemente cumprirem todos os requisitos que um traçador necessita ter, outra excelente vantagem é que mesmo em pequenas quantidades são facilmente detectáveis (MARTINS, 2005).

## **2.4 Tratamentos de dados em experimentos através de radiotraçadores**

Os dados experimentais não podem ser simplesmente usados, existem estágios a serem passados, sendo que o estágio fundamental a se trabalhar com traçadores é o da normalização. Neste trabalho serão mostrados alguns destes estágios.

### 2.4.1 Correção do Background

Independente da presença dos radiotraçadores existe, em qualquer ambiente, uma radiação natural, ou seja, uma radiação sem a presença do radiotraçador. Por este motivo antes de se injetar um radiotraçador, deve de ser medido este nível de radiação chamada de radiação de fundo (*background*). Esta medida deve ser feita no lugar exato onde será feito o experimento e nas mesmas condições. O nível de background encontrado tem de ser subtraído das contagens registradas durante a passagem do radiotraçador, de maneira a ser esta a primeira correção a se fazer sobre os dados brutos registrados, conforme mostrado na Figura 1.

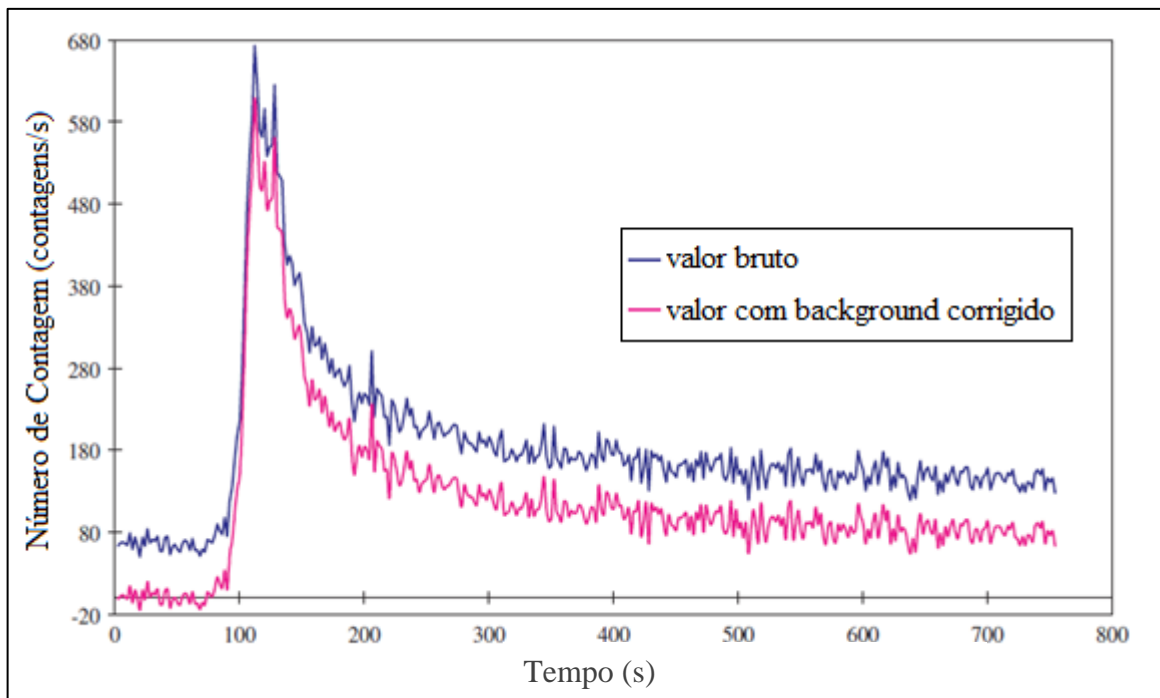


Figura 1. Gráfico demonstrando a correção de background.

(IAEA).

Porém, mesmo parecendo à primeira vista trivial, esta correção nem sempre é, pois é comum observar-se variações no background durante a condução de testes com os traçadores radioativos. Então obtemos um “sobre-background”,  $BKG_s$ , variável, de tal modo que pode ser representado na expressão matemática 1:

$$BKG_{total} = BKG_{ambiente} + BKG_s(t) \quad (1)$$



Veremos então quais são as circunstâncias que geram essas variações e as estratégias adotadas para efetuar a correção do background.

Os detectores são ligados antes da injeção, ficando registrado, e as contagens após o traçador passar são mais altas, o que pode ser facilmente entendido já que o escoamento deixa algumas partículas nas paredes internas deste sistema. Logo a presença destas é detectada devido à sensibilidade dos detectores.

É uma correção válida supor que a “contaminação” se faz de maneira gradual, de modo linear. Logo esta correção é processada com a suposição que o “sobre-background” varia segundo  $BKG_s(t) = a + b t$ , sendo os coeficientes  $a$  e  $b$  determinados obrigando a reta passar pelos pontos do registro antes e depois da passagem do traçador, como demonstra a Figura 2 (SANTOS, 2005).

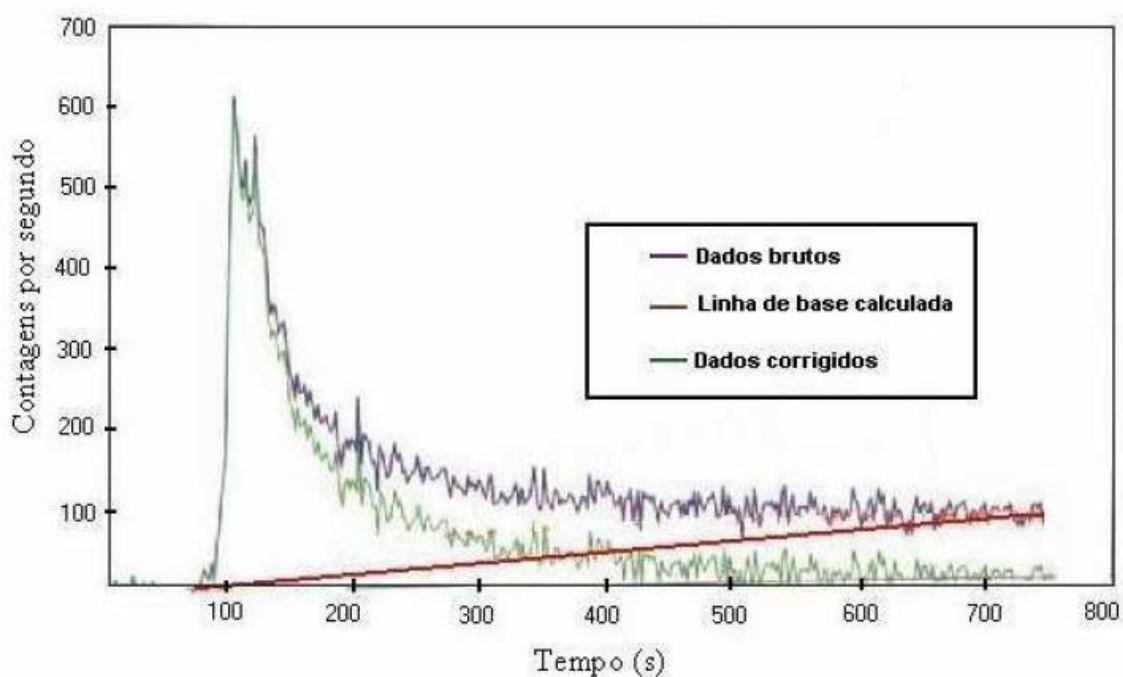


Figura 2 - Correção de Background com linha de base linear

(SANTOS, 2005)

É também possível se utilizar outras formas de correção como a linha de base quadrática ou exponencial, porém na prática a diferença é tão baixa, que não se leva muito em consideração, o importante é a definição do término da passagem do traçador.

É também possível que em dadas circunstâncias o background venha a se reduzir durante a execução de um experimento, sendo uma delas devido ao próprio traçador. O traçador depois de retirado da blindagem ou durante e após os processos de manipulação e injeção ou quando já está dentro do equipamento, mesmo quando não tendo chegado às estações de medição os detectores, já sensibilizam os detectores acusando sua presença no sistema.

Por exigências de radioproteção, muitas vezes é necessário a estocagem de efluente em um recipiente pulmão, que esteja situado nas proximidades do local do teste. Tendo então que o “sobre-background” deve assumir uma forma parecida às anteriores (linear, quadrática ou exponencial). A Figura 3 aborda tal situação.

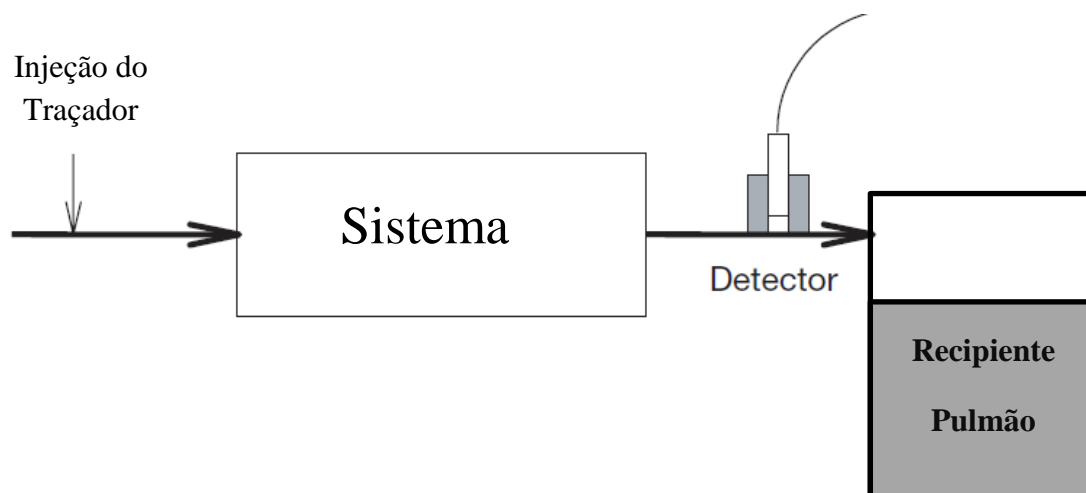


Figura 3: Rejeitos Radioativos próximos ao sistema

(IAEA, 2004)

Mesmo se as dimensões do sistema forem reduzidas os efeitos do comportamento de “sobre-background” não podem ser menosprezados por serem menores nem eliminados de maneira integral.

### 2.4.2 Correção do decaimento radioativo

Como é de conhecimento os radionuclídeos decaem exponencialmente com o tempo, portanto é necessário aplicar uma correção às medidas obtidas, principalmente quando o tempo de meia-vida do radiotraçador tem grande significância comparada ao tempo médio estimado para o trajeto do radiotraçador no sistema. Já no caso de meia-vidas muito elevadas, se torna de certa forma dispensável tal correção (SANTOS, 2005). Para efetuar a correção é feito um calculo das contagens que seriam registradas sem considerar o decaimento, aplicando-se então a expressão 2:

$$c(t_o) = c(t_o) e^{(t-t_o)} \quad (2)$$

Convenientemente tomando o instante da injeção como o instante  $t_o$ , como pode ser visto na Figura 4.

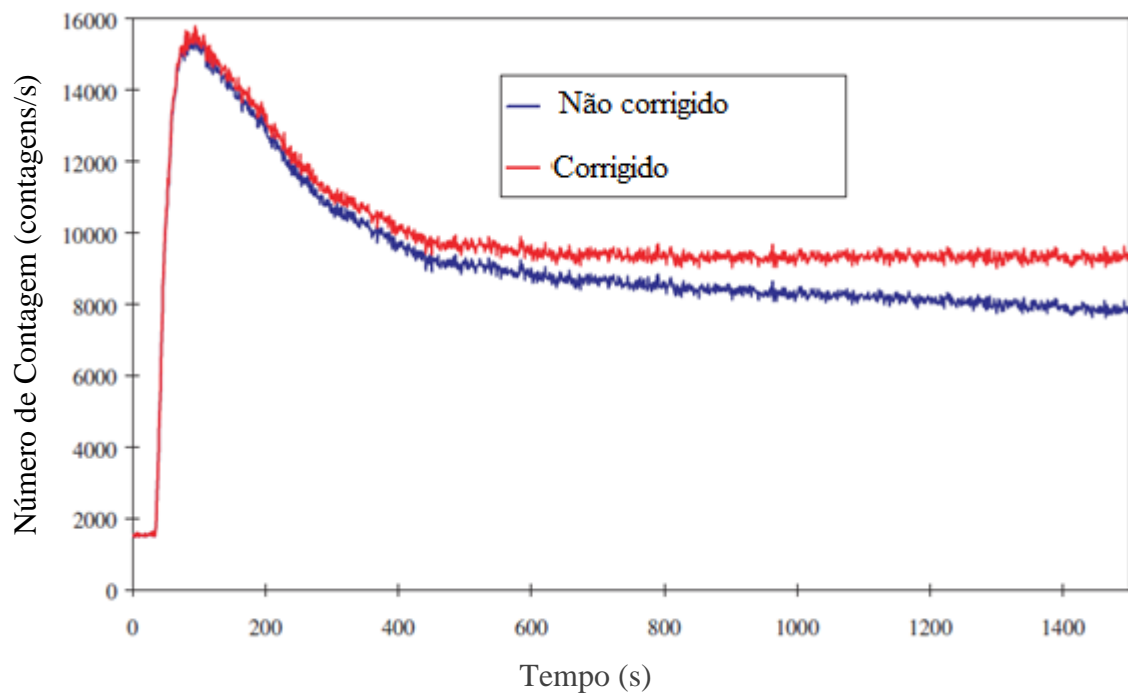


Figura 4. Efeito de correção do decaimento radioativo

(IAEA,2004)

### 2.4.3 Extrapolação

A extrapolação de dados é decidida pelo operador quando ocorrem os seguintes motivos: não consegue detectar o final da curva de resposta, seja por função de tempos de passagem muito longos; interrupções de operação; problemas de sistema; entre outros. A extrapolação dos registros de dados é realizada, obedecendo a tendência indicada, utilizando a expressão exponencial (3) para que as contagens tendem a zero.

$$\hat{c}(t) = c_f(t_f) e^{-(t-t_f)} \quad (3)$$

Sendo  $c_f(t_f)$  a última contagem registrada no tempo  $t_f$ .

É aconselhado checar se as contagens registradas efetivamente decrescem exponencialmente no período anterior ao do final. A extrapolação terá sequência até que as contagens calculadas apresentem valores satisfatoriamente pequenos. Desta maneira será ajustada uma função de decaimento exponencial a curva. A escolha do número de pontos extrapolados irá depender da precisão desejada, assim, testando diferentes números de pontos finais, é possível observar qual conjunto tem maior aproximação de uma exponencial.

### 2.4.4 Normalização

A eliminação da influência dos fatores que afetam a amplitude das curvas, mas não a sua forma, mostram a grande utilidade da normalização da área sob a curva de resposta. Tais fatores podem ser, por exemplo: espessura das paredes do sistema, a atividade injetada, a geometria nas estações de detecção, eficiência dos detectores, entre outros. A atividade injetada diferencia as respostas de experimentos, mesmo que permaneçam inalteradas as condições operacionais. Os outros fatores inserem divergências nas respostas de um mesmo experimento, devidas a condições de detecção mais ou menos propícias nas várias estações de medição (SANTOS,2005).

Para ser normalizada a resposta, se divide cada ponto pela área abaixo da curva, como representado na equação 4:

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (4)$$

Sendo  $E(t)$  a função normalizada, e  $c(t)$  a contagem real (IAEA, 2004).

É fundamental a aplicação da normalização para efetuar comparações de sistemas de diferentes dimensões. E para teste no mesmo sistema ela lhe dá a possibilidade de análise da resposta medida em diferentes posições, ou diferenças de comportamento introduzidos por variações nos parâmetros físicos, cinéticos e hidráulicos do sistema (SANTOS,2005).

### **3. TRAÇADORES E A ÁREA PETROLÍFERA**

#### **3.1 O Petróleo**

Pedra e óleo, vindo do latim *petra* e *oleum* são a conjunção da qual se deriva a palavra petróleo (SILVA,2010).

O Petróleo é uma substância inflamável, oleosa e de baixa densidade, sendo de cheiro característico e de uma variação de castanho escuro e negro como cor. Consistindo de uma mistura complexa, é formado pela combinação de átomos de carbono e hidrogênio, formando moléculas de hidrocarbonetos e outros materiais em pequena quantidade.

Já foi muito questionada sua origem, sendo alvo de grandes discussões. Na atualidade sua origem é bem definida como orgânica, estando ligada à decomposição dos seres que compõe o plâncton – organismos em suspensão nas águas salgadas tais como protozoários, celenterados e outros. Após a morte dos mesmos se depositaram no fundo de antigas baías, sendo por bactérias e oxigenação da decomposição, sendo cobertos e recobertos por outros sedimentos e, pressionados pelos movimentos da crosta terrestre, graças a ação do calor e do peso dessas camadas de cobertura sobre os depósitos de sedimentos mais fundos, é transformada essa matéria orgânica, num hidrocarboneto, o querogênio, que é o estágio inicial do petróleo, através de reações termoquímicas.

Assim que a bacia sedimentar se movia ao centro da terra, mais camadas se depositam, a temperatura e a pressão aumentam ultrapassando os 65°C, as grandes e complexas moléculas de querogênio quebram-se, fazendo daqueles depósitos de sedimentos de óleo e gás. A seguir, a temperatura permanece subindo, e quando está entre 65°C e 165°C a geração de óleo passa a ser predominante, embora ainda se forme gás, já com a temperatura elevada

ao ponto de passar os 210°C, os hidrocarbonetos vão desaparecer, restando apenas pequenos segmentos de carbono.

As mais antigas formações mundiais têm em torno de 500 milhões de anos. O petróleo, ao contrário do que se pensa, se desloca alojando-se em lugares “apropriados”; sendo assim não são encontrados nas rochas em que foram gerados. Os terrenos em que ele irá se alojar são nomeados de bacias sedimentares, e são formadas por porosas camadas de areias arenito (ou calcário). Alojado, o petróleo ocupará os poros da rocha, não subindo a superfície devido ao fato de que sobre as rochas porosas existirem rochas selantes, que trabalham no impedimento de escape do óleo, e conseqüentemente o impedindo de ser exposto a atmosfera.

O petróleo é encontrado em rochas chamadas de rochas reservatórios, onde será permitida sua produção devido a permeabilidade. Além da permeabilidade existe a porosidade, sendo então estas as características de rochas sedimentares, que formam os reservatórios de petróleo economicamente exploráveis.

Já houve casos em que o petróleo se dirigiu a superfície, porém são situações que fogem do normal, chamadas de exsudações ou vazamentos, sendo esta a razão de já haver o conhecimento e utilização de petróleo em sua forma natural por povos antigos, isso há 4000 anos antes de Cristo. Assim como o asfalto e o betume, o petróleo já era conhecido desde os primórdios da civilização, sendo usado betume como material de liga por Nabucodonosor nas construções dos Jardins Suspensos (Babilônia) e, os egípcios usaram para embalsamento dos mortos e construção de pirâmides e gregos e romanos usaram para fins bélicos (PETROBRAS, 2003).

### **3.2 História do Petróleo**

Os primeiros poços de petróleo foram escavados praticamente à mão, em torno de 1700, e não passavam dos 30 metros de profundidade (PETROBRAS, 2003).

O petróleo no início comercial, para fins medicinais, era conhecido por óleo mineral, óleo de pedra e óleo de nafta. Eram atribuídas ao petróleo as propriedades laxantes, cicatrizantes e antissépticas, além de ser considerados eficaz contra surdez, cura da tosse, bronquite, congestão pulmonar, gota, reumatismo e mau-olhado. O responsável por comercializar o mesmo nas farmácias foi o boticário Samuel Kier, que não obteve muito sucesso nas vendas até transformá-lo através de refino em querosene iluminante. Isto atraiu o

empresário George Bissel aos negócios, que contratou Edwin Laurentine Drake, que em 1859 se torna o primeiro homem a conseguir extrair petróleo do subsolo, construindo a primeira torre de perfuração, dando início assim a febre do petróleo, que iria revolucionar a indústria e dar origem a cidades em meio ao deserto dos EUA.

Fundada em 1870 a Standard Oil Company se torna ao longo dos anos a maior empresa de petróleo que já existiu, fundada por John Rockefeller, que de acordo com especialistas é o homem mais rico que já existiu, e vem a falecer em 1937, sendo fundador também da Universidade de Chicago e a Universidade de Rockefeller.

Na Rússia, os irmãos Nobel fundavam as primeiras refinarias privadas, mas o império do petróleo foi logo ameaçado por uma descoberta inesperada: a invenção da lâmpada elétrica, por um cientista conhecido até nos dias de hoje, Thomas Edison. Assim, o império do petróleo certamente teria desmoronado se não fosse por, Henry Ford, o responsável pelo crescimento da indústria automobilística, que faria com que o petróleo mudasse sua função e ganhasse ainda mais importância como combustível automobilístico. Já em território nacional, Monteiro Lobato foi um dos grandes entusiastas da época, que começou em grande escala a aparecer pelo Brasil, fazendo assim com que em 1946 a campanha “O Petróleo é Nosso” surgisse. Porém, sendo o grande marco, a criação da Petrobrás em 1953, por Getúlio Vargas. Estes eventos marcaram o país no que diz respeito ao tema.

O petróleo se torna de tamanha importância, a ponto de gerar severas crises entre países, gerando assim “guerras” e desentendimentos. O petróleo levou tanto lucro aos seus países produtores, que foi decidido, por estes países, a criação de um cartel para defender seus interesses, nomeado de OPEP.

No Brasil, o monopólio da Petrobrás é retirado, fazendo assim com que cheguem ao país as empresas estrangeiras, e surja a necessidade de criação de uma agência para a regularização do setor, intitulada de Agência Nacional do Petróleo (ANP). Atualmente os olhos do mundo do petróleo são voltados ao Brasil, devido à recente descoberta das gigantescas reservas de petróleo do Pré-Sal, que bate seu novo recorde de 470 mil barris por dia (COPPE, 2014).

### 3.3 A Distribuição de Petróleo no Mundo

Aos especialistas em ciências geológicas a distribuição do petróleo no mundo é uma situação fácil de ser compreendida, porém a quem não tem certo conhecimento já não aparenta ser tão simples. Pequena é a quantidade de países, geralmente aqueles cobertos por desertos ou selvas, e pobres em riquezas naturais presentes na superfície, são os maiores reservatórios de petróleo do planeta. Já aqueles situados em climas temperados e abundantes em riquezas naturais em sua superfície, possuem uma fração bem pequena do petróleo mundial, sendo assim são dependentes dos países hegemônicos do petróleo. A explicação para tal é que a distribuição do petróleo não é relacionada a geografia, e sim a geologia do subsolo, com bacias sedimentares formadas até centenas de milhões de anos (FREITAS, 2007).

### 3.4 Radiotraçadores na área Petrolífera

O fluxo do fluido na maioria dos reservatórios é anisotrópico. As estruturas do reservatório frequentemente são estendidas em camadas contendo heterogeneidades significantes que conduzem a variações direcionais na extensão de fluxo. Consequentemente, o movimento efetivo do fluido pode ser difícil de prever. É aqui que a tecnologia de traçadores desempenha um papel importante, onde o movimento do traçador reflete o movimento do fluido injetado. A Figura 5 apresenta o movimento de pulsação de um radiotraçador entre as camadas de um reservatório (IAEA,2004).

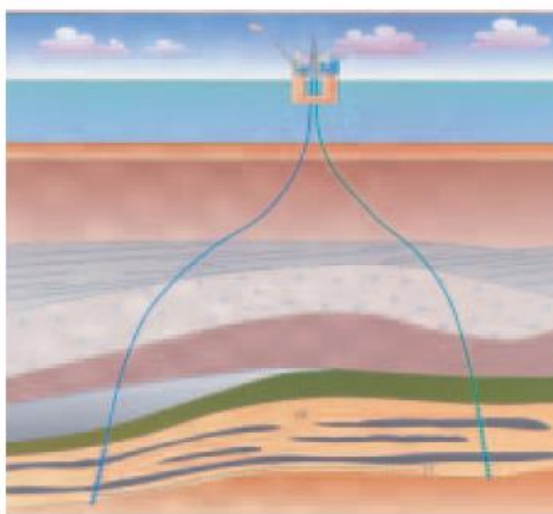


Figura 5. Movimento de pulsação do radiotraçador entre camadas de um reservatório.

(IAEA, 2004)



A utilização dos traçadores em reservatórios de petróleo parte da ideia que o escoamento deste traçador será parecido ao da água injetada, que é a responsável pela expulsão do petróleo da formação rochosa. Para que isso funcione verdadeiramente ou o mais próximo possível disto dependerá de como o traçador e a água injetada irão fluir na formação, sem atrasos significativos ou perdas do óleo (PINTO, 2012).

Em indústrias de transporte e processamento de petróleo o uso de radiotraçadores permite aferição de medidores de vazão, medida do tempo médio de residência em colunas de craqueamento, localização de pontos de obstrução e vazamentos em dutos subterrâneos e, também, de investigação de comportamento do escoamento ou de processos industriais (BASKAN, 2010).

É de extrema importância saber o que se espera de um traçador ideal, e assegurar desta forma que os traçadores cheguem o mais próximo das seguintes características:

- a) o comportamento do traçador no processo deve ser idêntico ao da água, ou seja, devem deslocar-se com a mesma velocidade;
- b) o traçador não deve experimentar reações com a água que possam interferir em sua identificação posterior;
- c) não deve reagir quimicamente com os materiais do meio;
- d) não deve ser adsorvido pelos materiais sólidos do meio;
- e) no caso de traçadores iônicos, não devem produzir fenômenos de intercâmbio no meio;
- f) a quantidade de traçador a se utilizar para uma experiência, não deve modificar, de forma significativa, a densidade, viscosidade ou temperatura da água, a fim de que não se produzam alterações no fluxo natural;
- g) se tratando de um traçador que deva ser adicionado expressamente à água, esta água não deve conter o traçador, ou somente uma concentração tão baixa que não interfira nos resultados;
- h) aproveitando-se como traçador uma substância existente na água como consequência de um processo natural ou acidental desconhecido, sua concentração não deverá modificar, durante o fenômeno em estudo, por interação com os materiais sólidos do meio;

- i) deve ser facilmente solúvel em água;
- j) deve permitir fatores de diluição muito elevados, ou seja, com uma quantidade de traçador razoavelmente pequena podem ser marcados volumes grandes de água;
- k) não deve contaminar o meio, tanto por questões de segurança ambiental ou radioproteção, quanto não interferir em outras experiências futuras;
- l) deve ser de baixo custo, fácil manipulação e inócuo para os seres vivos (FREITAS, 2007).

Até os dias de hoje não existe um traçador na água que atenda essas exigências cem por cento, mas é certo que alguns são melhores que outros. É válido lembrar que como o número de exigências é alto fica inviável a seleção de um radiotraçador universal, pois não existe um que satisfaça todas estas exigências. De acordo com a localização da água pode-se ter duas situações: as superficiais e subterrâneas. Para as águas superficiais, as exigências não são tão complexas pelo motivo de que já estão em contato com vários meios sódios e há facilidade de coleta de amostras, levando geralmente a curta duração dos ensaios. É grande a quantidade de traçadores que dão bons resultados para situações com água superficial, sejam eles isotópicos ou não isotópicos.

Agora de maneira oposta, quando a situação é de águas subterrâneas, que circulam de meios porosos seguindo trajetórias mais complexas, as exigências para o traçador são maiores, devido aos seguintes motivos: retenção do traçador através dos materiais sólidos do meio serem de níveis muito elevados (neste caso às vezes o ocorrido é devido a fluxos lentos), variação de velocidade proveniente da água devido à desigualdade na distribuição de tamanho dos poros e de forças interiores ocasionando uma dispersão do traçador e, por fim diferenças de transporte consequências da difusão molecular e osmótica do traçador.

Sendo assim nenhum traçador é universal, portando para a escolha do mesmo deve ser investigado o processo, realizando a escolha de acordo com suas características. A figura 6 mostra um equipamento de teste para o rastreamento do fluxo de um radiotraçador na água.

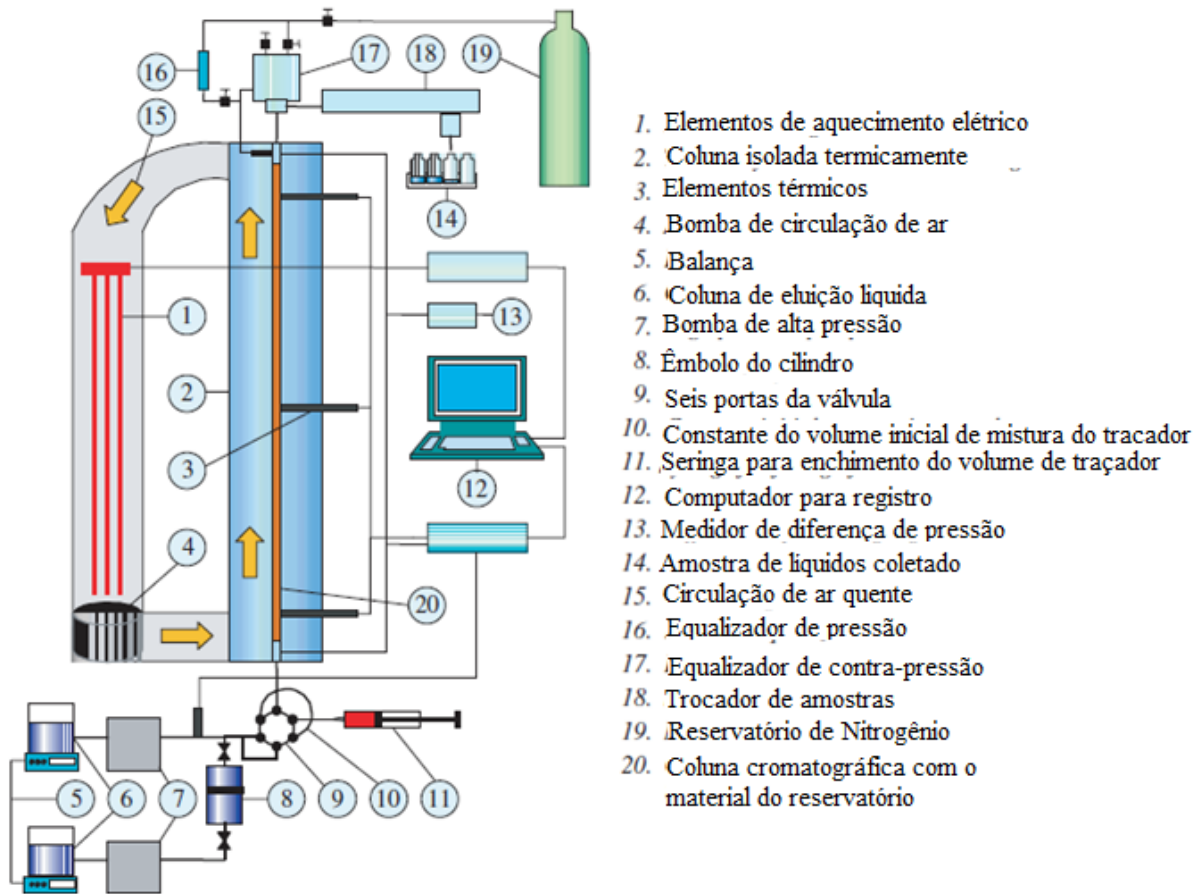


Figura 6. Equipamento para teste de rastreamento do fluxo dos radiotraçadores na água.

(IAEA, 2004)

Entre os traçadores radioativos amplamente utilizados para estudos em reservatórios de petróleo, destaca-se o trício na forma de água triciada, o qual é considerado o traçador ideal. O trício é de custo menor comparado com maioria dos radioisótopos, porém mais difícil de medir, devido sua baixa energia, necessitando, assim, de equipamentos mais sofisticados ao se tratar de sua detecção. Além do trício, são amplamente utilizados, também, os traçadores beta do  $^{14}\text{C}$  e  $^{35}\text{S}$  (SILVA, 2010).

Os radiotraçadores líquidos mais utilizados na área industrial são mostrados na Tabela 1 (IAEA, 2000).

Tabela 1. Radiotraçadores mais utilizados na Indústria (IAEA, 2000)

Radiotraçador	Meia-Vida	Emissões de Radiações característica	Fase Empregada
$^3\text{H}$	12,6 anos	$\beta$ (0,0018 MeV)	Aquosa
$^{14}\text{C}$	5730 anos	$\beta$ (0,0156 MeV)	Aquosa
$^{24}\text{Na}$	15 horas	$\gamma$ (1,37 MeV, 2,75 MeV)	Aquosa
$^{82}\text{Br}$	36 horas	$\gamma$ (0,55 MeV, 1,32 MeV)	Aquosa Orgânica Gasosa
$^{140}\text{La}$	40 horas	$\gamma$ (1,16 MeV, 0,92 MeV, 0,82 MeV)	Sólida
$^{198}\text{Au}$	2,7 dias	$\gamma$ (0,41 MeV)	Sólida
$^{197}\text{Hg}$	2,7 dias	$\gamma$ ( 0,077 MeV)	Mercúrio
$^{131}\text{I}$	8,04 dias	$\gamma$ (0,36 MeV, 0,64 MeV)	Aquosa Orgânica
$^{99}\text{Mo}$	67 horas	$\gamma$ (0,18 MeV, 0,74 MeV, 0,78 MeV)	Aquosa
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6 horas	$\gamma$ (0,14 MeV)	Aquosa
$^{46}\text{Sc}$	884 dias	$\gamma$ (0,89 MeV, 1,84 MeV)	Sólida
$^{85}\text{Kr}$	10,6 anos	$\gamma$ (0,51 MeV)	Gasosa
$^{79}\text{Kr}$	35 horas	$\gamma$ (0,51 MeV)	Gasosa
$^{41}\text{Ar}$	110 minutos	$\gamma$ (1,29 MeV)	Gasosa

### **3.5 Quantidade de traçador.**

A partir do uso de um modelo matemático simulado em computador e o comportamento padrão baseado em parâmetros do reservatório, consegue-se uma estimativa da quantidade de traçador requerida. Logo, a quantidade do radiotraçador seja sua massa ou atividade é calculada através da resposta teórica e do limite de detecção.

Como regra geral, grupos de traçadores não têm softwares adequados a estes cálculos. Por conseguinte, algumas considerações simples podem ser feitas para se ter uma ideia sobre a quantidade de traçador a ser injetado, e faltando melhores informações, pode ser assumido que a concentração de traçador é a relação entre o volume de traçador injetado no reservatório e o volume não ocupado pelo óleo dos poros interconectados envolvidos na experiência. O cálculo posterior pode ser feito através de uma aproximação radial da geometria do modelo (BJØRNSTAD, 2000).

### **3.6 Utilização de radiotraçadores como ferramentas de investigação locais impactados por hidrocarbonetos de petróleo**

O uso de traçadores para obter informações sobre o processo de produção do petróleo vem se ampliando em função dos importantes ganhos de rendimento que é possibilitado. A necessidade de saber a quantidade de óleo residual presente nos reservatórios conduziu ao desenvolvimento e à aplicação de métodos especiais com traçadores. Nesse ramo os traçadores radioativos são vantajosos, entre outras razões por possibilitar que pequenas quantidades sejam empregadas, sem perturbar as operações de rotina do campo de produção. (PEDE, 2008)

Nas rochas do reservatório já ocorre presença de radioisótopos naturais, como o  $^{222}\text{Rn}$ , sendo assim de grande vantagem a inserção do mesmo como radiotraçador. Esta possibilidade vem impulsionando várias pesquisas, trazendo uma nova alternativa de inserção do Radônio, sendo ela o uso para identificação de fase livre e residual de hidrocarbonetos, de maneira a trabalhar com esta identificação em água subterrânea, se colocando como uma ferramenta de muitíssima importância na avaliação de locais que sofreram impactos por Hidrocarbonetos de Petróleo.

O petróleo na natureza se localiza em rochas, chamadas de reservatórios e é de costume se encontrar em camadas de água, gás natural e hidrocarbonetos, estando estes a

grandes pressões. Existem duas maneiras para a recuperação, são elas: primária e secundária. A primária trabalha de maneira a gerar um caminho para que o gás, água e hidrocarbonetos sejam impulsionados naturalmente pela pressão e, quando a pressão inicial diminui durante a extração, usam-se técnicas com a recuperação secundária, onde geralmente água (ou um fluido) é injetada em um poço forçando o óleo residente a se dirigir aos poços de produção.

A importância das informações geradas pelo uso de traçadores inseridos ao fluxo de injeção é altíssima. As informações geradas são o caminho que o petróleo percorre durante a fase de extração e a denominada Saturação de Óleo Residual, que é a quantidade de óleo presente como fase imóvel em um reservatório. É válido dizer que obter tais informações se tornou de tamanha importância por isso se deu incentivo a aplicações de testes envolvendo traçadores. Os traçadores usados para este fim podem ser químicos ou radioativos, o importante é que eles têm de se distribuírem entre as fases líquida e oleosa, sendo assim chamados de traçadores de partição. A escolha por radiotraçadores se torna mais viável, pelo fato de ser necessária uma injeção de pequenas quantidades do traçador, facilitando assim operações de campo e sua detecção é feita por detectores a níveis altíssimos de sensibilidade.

O Radônio se classifica como um gás nobre quimicamente inerte que ocorre naturalmente nas rochas, o mesmo é formado pelo decaimento alfa do  $^{226}\text{Ra}$ , e após um tempo passam a ter de certa forma a mesma atividade, a qual permanece constante. O  $^{222}\text{Rn}$  produzido, geralmente não se ioniza na água, tendo assim mais mobilidade que outros elementos que decaem do  $^{238}\text{U}$ , sendo capaz de se dissolver na água, após atravessar solo e rocha.

A concentração de radônio na água pode ser diretamente influenciada. Quando se trata de um gás fica fácil notar duas variáveis físicas que fazem tal interferência, são elas pressão e temperatura. O radônio é um gás muito volátil, portando se libera facilmente quando dissolvido em água. O aumento da temperatura faz com que decresça sua solubilidade. O radônio não é polar, sendo assim tem uma alta tendência para partições entre fases líquidas e oleosas.

O coeficiente da partição linear entre tais fases é descrito através da fórmula (5):

$$Kp = \frac{CR_{n,o}}{CR_{n,a}} \quad (5)$$

Onde:

$Kp$  - é o coeficiente de partição linear

$CR_{n,o}$  - é a concentração do radônio na fase oleosa

$CR_{n,a}$  - é a concentração do radônio na fase líquida ou fase aquosa.

Partindo deste modelo matemático temos a base para o uso do  $^{222}\text{Rn}$  como traçador na estimativa de saturação de óleo residual, pois quanto mais baixo o teor de  $^{222}\text{Rn}$  na água das rochas (reservatório), mais alta é a quantidade presente de óleo.

### **3.7 Medida de vazão**

Quando se trata de vazão de líquidos ou gases em processos industriais, deve ser feito a utilização de um método que traga a avaliação de certos valores sem afetar o sistema ou ainda mesmo interromper produções ou introduzir algo aos sistemas hidráulicos. Frequentemente nestes casos o método utilizado é o radiotraçador, na qual tem como principal função industrial a medição de vazão. O principal motivo para tal escolha é a exatidão da técnica, que não depende da velocidade do fluído dentro da tubulação, e sim da eficiência de homogeneização do radioisótopo no fluído. As técnicas que fazem uso dos radiotraçadores são compostas da aplicação das funções estatísticas de distribuição de tempo de residência (RTD) em seus sistemas de análise e aquisição de dados. Tais técnicas são reconhecidas devido a sua precisão, custo e ter seu emprego regido por certificações internacionais.

Na área petrolífera as formas de medir a produção, extração, comercialização, transporte, taxa de impostos, estão vinculadas, ao conhecimento do valor da vazão, que pode ser explicada como a quantidade de produto que passa em um ponto de referência por intervalo de tempo, especificamente nesta área a vazão é dada em número de barris por dia (GONÇALVES, 2013).

Existem inúmeras técnicas de medição de vazão por meio do uso de radiotraçadores, sendo as mais conhecidas: Injeção Contínua, Velocidade de Pulso e Contagem Total. Em todos os casos o ponto para retirada de medidas deve ser distante do ponto de injeção do radiotraçador, ou seja, será feito onde o traçador esteja totalmente homogeneizado com o meio, conforme é ilustrado na figura 7.

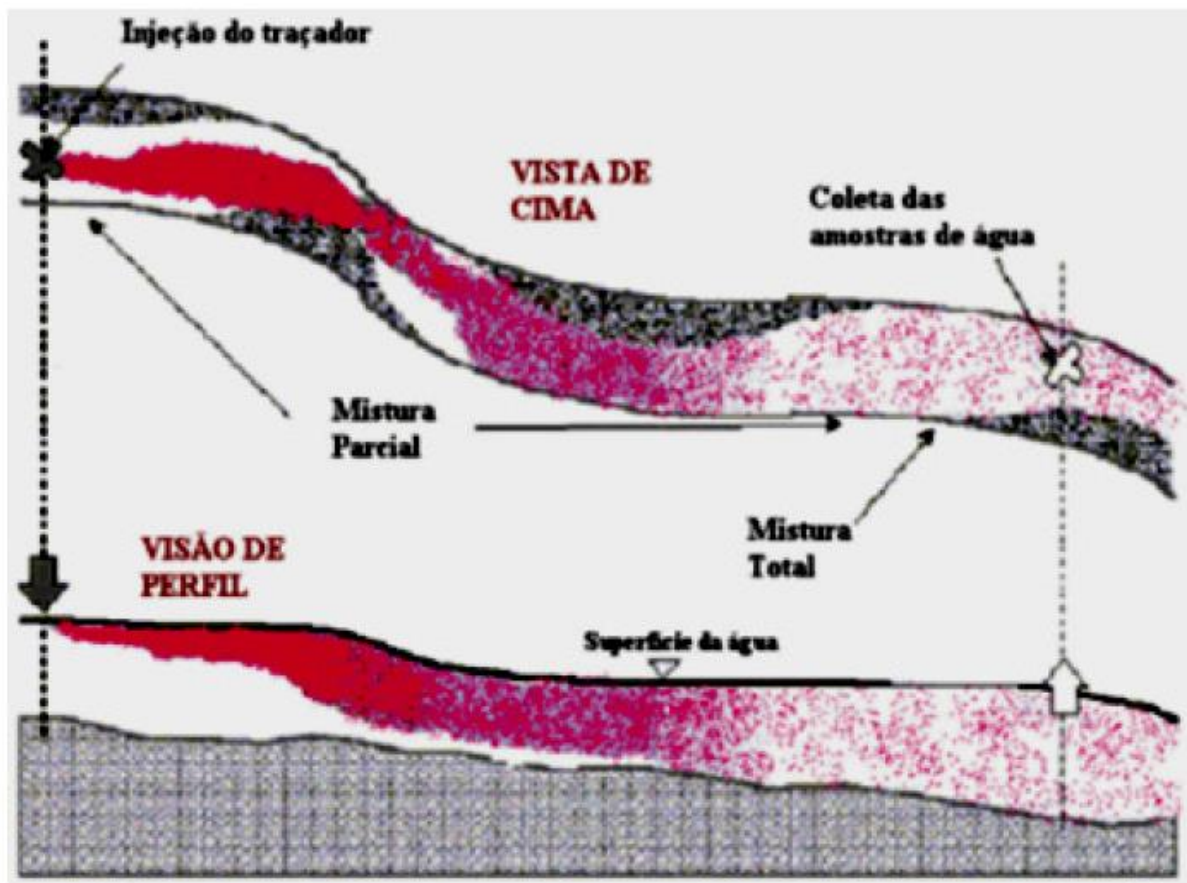


Figura 7 - Local adequado para coleta de amostras.

(GONÇALVES, 2013)

### 3.7.1 Medida de vazão por Injeção Contínua

Esta técnica consiste na injeção de um traçador no meio em estudo a uma taxa constante  $q$  com uma concentração conhecida  $C_1$  e vazão  $Q$ . A partir de um uma concentração inicial, é feita a coleta de amostras, porém após a mistura ter se deslocado para que possa haver homogeneização, a amostra então terá uma concentração,  $C_2$ . Tal comportamento é descrito pela equação 6 e observado na figura 7 (GONÇALVES, 2013).



$$Q = q \frac{(C_1 + C_2)}{(C_2 + C_0)} \quad (6)$$

### 3.7.2 Medida de vazão por velocidade de pulso

Existem diversas metodologias de traçadores existentes e entre estas a velocidade de pulso. Este método é o padrão na aferição de medidores de fluxo e apresenta imediata aplicabilidade, consistindo na instalação de dois detectores, separados a uma distância estratégica, na parte externa da tubulação transportadora do fluido, da qual a vazão é conhecida, assim o radiotraçador é injetado rapidamente no pulso, em forma de um pulso curto. Um dos detectores deve ser posto a certa distância da posição onde será injetado o radiotraçador, de maneira que neste percurso a homogeneização do radiotraçador com o fluido seja possível e assegurada. Com o radiotraçador já bem misturado ao fluido e ambos preenchendo toda a tubulação em análise será possível assegurar que sua velocidade é a mesma que a do fluido em que foi aplicado, sendo assim podendo ter a velocidade média, pré-definida.

A seguir o detector irá registrar a passagem do radiotraçador pelo primeiro ponto da tubulação em análise (com a homogeneização já obtida), já o detector de número 2 registrará a passagem do mesmo em um ponto diferente. A partir do intervalo de tempo do deslocamento do radiotraçador de um ponto a outro e as informações sobre a tubulação é possível obter o valor da vazão. Esta técnica pode ser esquematizada, como mostrado na figura 8.

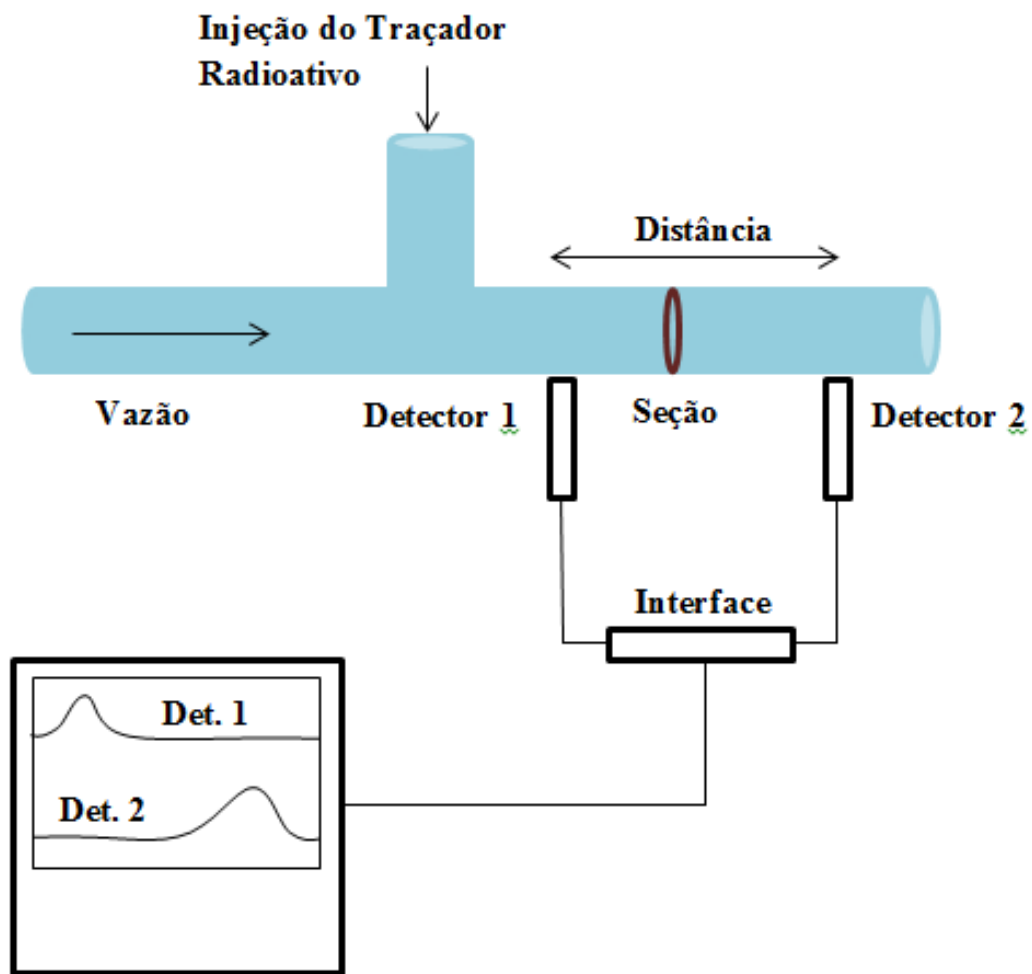


Figura 8. Esquema da medida de vazão por velocidade de pulso

Do esquema representado na figura 8, sabemos a distância entre os detectores e a área da seção da tubulação, relacionando ao tempo, temos a formulação (7):

$$vazão = \frac{distância}{tempo\ de\ transição} seção \quad (7)$$

Tal método trás algumas desvantagens:

- a) Necessidade de autorização para aquisição e manipulação de materiais radioativos;
- b) Com radioisótopos de vida curta, sua utilização tem que ser programada para serem adquiridos e transportados até o local dos ensaios em tempos que não comprometam a atividade inicial desejada;

c) Os equipamentos de medida têm um custo elevado quando comparados aos utilizados com traçadores não radioativos;

d) O preço de radiotraçador é elevado, embora em alguns casos acabem sendo menos custosos que determinados corantes ou mesmo o preço não chega a ser relevante diante as vantagens do processo;

e) O radiotraçador utilizado deve ser adequado de forma a permitir sua mistura ao meio fluído, gasoso ou líquido em que é desejado medir a vazão e;

f) O meio fluído deve preencher toda a seção da tubulação na qual estão sendo feitas as medidas de vazão.

Em contrapartida, existem suas vantagens:

a) O sistema de injeção é de certa forma simples, onde há a atividade injetada não precisa ser conhecida com precisão;

b) Apresenta resultado imediato;

c) Não é necessária a manipulação do traçador depois da injeção;

d) Os ensaios podem ser repetitivos, dando origem a uma boa estatística de medição (porém deve se levar em conta o aumento do Background);

e) Somente um ponto de acesso ao sistema é necessário;

f) Pode utilizar traçadores de vida curta o que atende os requisitos da proteção radiológica e do meio ambiente e

g) Não é necessário manipular líquidos tóxicos ou perigosos (COSTA, 2001).

### **3.7.3 Método de Contagem Total**

O método de contagem total é um procedimento de identificação dinâmico que consiste na injeção de uma pequena quantidade, bem determinada, de um traçador em um ponto  $P_1$  do sistema operando em estado constante e sua observação/detecção em outro ponto  $P_2$  do sistema, normalmente a jusante de  $P_1$  (IAEA, 2000). O resultado é uma função de transferência do processo de transporte que existe entre os pontos do sistema, o que é de

suma importância para a identificação dinâmica, modelagem e estudo de um procedimento para o controle de sistemas.

Com a utilização de uma coluna de flotação, que opere em regime permanente a distribuição dos tempos de residência (RTD) pode ser obtida experimentalmente com a introdução de um pulso e com o posterior monitoramento da resposta desse sistema (SANTOS, 2005).

Segue na Figura 9 o esquema do método.

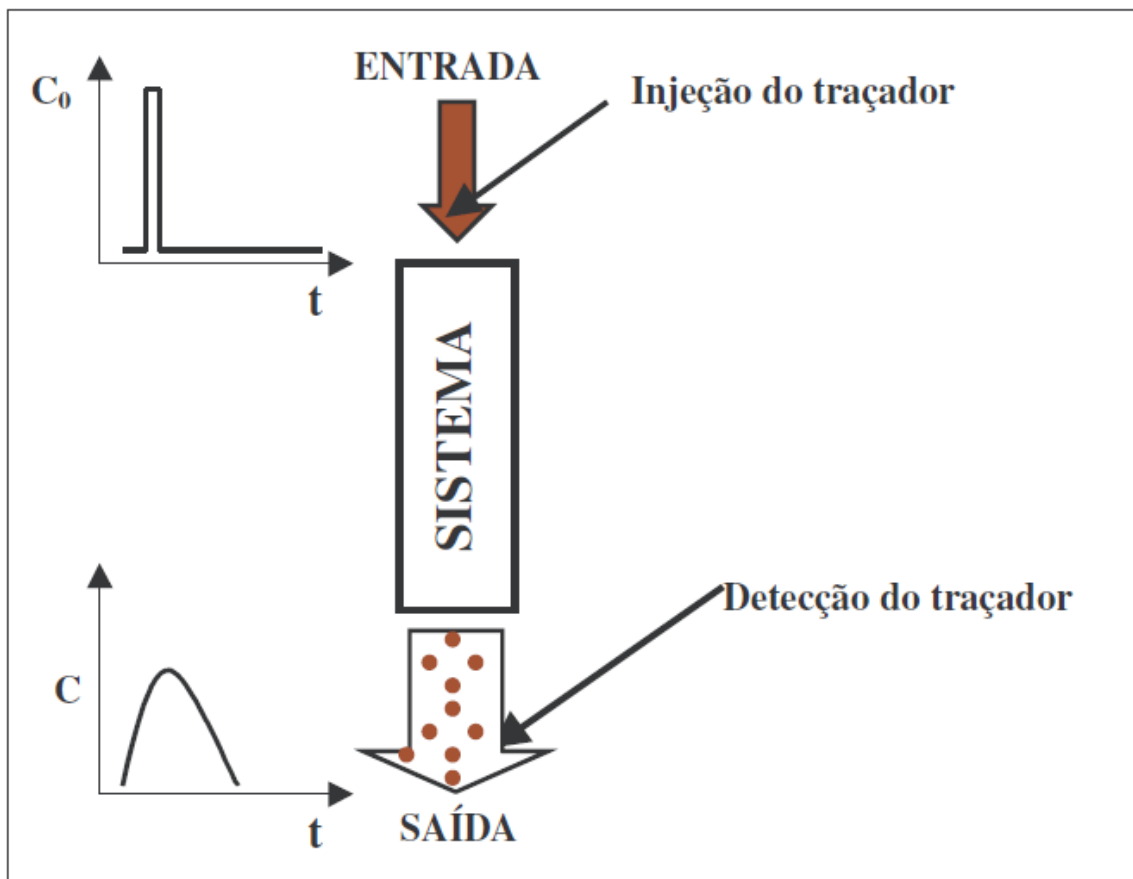


Figura 9 – Esquemática de um experimento com traçador pelo método do impulso e resposta.

(SANTOS, 2005)

A injeção tem de ser instantânea, de maneira a se obter um pulso ideal, o qual deve cumprir as condições ilustradas na figura 10.

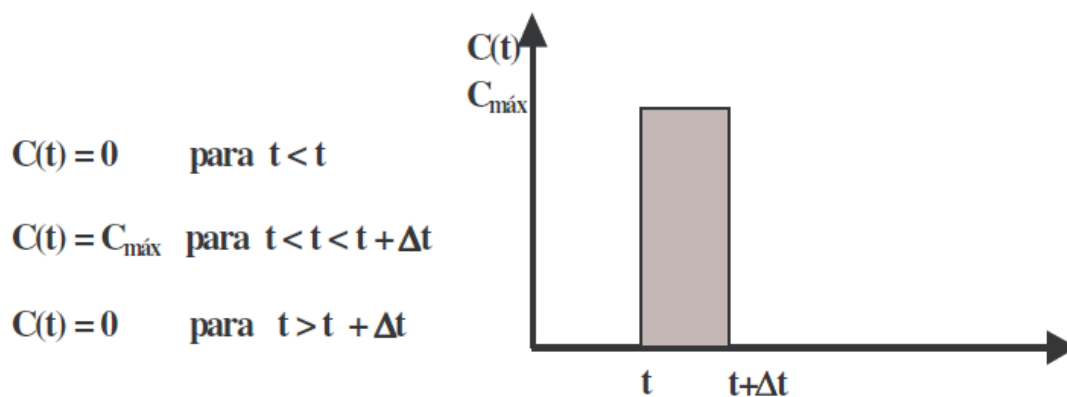


Figura 10. Pulso ideal de entrada de um traçador (SANTOS, 2005).

O pulso ideal não é algo que se consegue na prática, porém o necessário é que o tempo de injeção seja muito irrelevante comparado ao tempo de residência médio no sistema observado.

Nesta técnica uma pequena quantidade de radiotraçador de atividade conhecida,  $A$ , será detectada por um sistema de detecção, de geometria bem definida, posicionado a uma distancia suficiente para haver homogeneização, vai proporcionar uma contagem total,  $N$ . A vazão  $Q$  poderá ser calculada através da equação (8).

$$Q = \frac{A.F}{N} \quad (8)$$

Onde  $F$  é uma constante, um fator de calibração obtido em laboratório.

### 3.8 Uso de Traçadores e o uso do Radônio como Traçador em Estudos de Contaminação por NAPL's.

Entre o uso de traçadores é válido citar sua importância em estudos de contaminação por NAPL's (Nonaqueous Phase Liquids), tal contaminação traz uma grave preocupação, pois este poluente infiltrando-se fica retido por um longo período de tempo e possivelmente causaria um grande dano à qualidade das águas subterrâneas. Em 1995 é apresentado um

método desenvolvido com o objetivo de quantificar a contaminação ambiental por NAPL's, tal método foi denominado PITT (Partitioning Interwell Tracer Test).

O método PITT nada mais é do que uma adaptação dos métodos usados pelas indústrias de petróleo na determinação da SOR (Saturação Residual de Óleo). Ele pode ser usado inicialmente como uma técnica efetiva para estimar a quantidade de contaminante e, depois da remediação, como uma ferramenta para medir a sua efetividade. Em ambos os casos é necessária uma análise matemática dos resultados obtidos. A partir do seu desenvolvimento, o método PITT passou a ser o método mais avançado para caracterização de locais contaminados. A sua principal vantagem consiste no fato do volume avaliado ser muito maior, portanto mais representativo, que os demais métodos até então conhecidos como aqueles que necessitam da avaliação de testemunhos e/ou perfilagem da área.

O método foi aplicado pela primeira vez em Tucson no Arizona, por NICOLE e BRUSSEAU (1996), para fins de estudo de contaminação ambiental em escala real, foi usado SF<sub>6</sub> como traçador de partição e CaBr<sub>2</sub> (brometo de cálcio) como traçador não participante. No mesmo ano GOTTIPATI, defendeu em sua dissertação o uso de radônio como traçador para auxiliar na avaliação das técnicas usadas para remediar zonas saturadas contraminadas por NAPL's (PINTO, 2012).

### **3.9 Traçadores e seu uso na Determinação da Saturação Residual de Óleo**

O desenvolvimento de equipamentos e técnicas de medidas têm provido as petrolíferas ferramentas adicionais valiosas para determinação da SOR, sem contar a extensa variedade de isótopos radioativos. O início de testes com o uso de traçadores era feito através da aplicação simultânea de dois traçadores em poço de injeção de água, sendo o traçador distinguível pela sua solubilidade também no óleo, são coletadas amostra de água dos poços e a função resposta para o traçador é determinada. Existem exigências em relação aos traçadores relacionados a determinação da SOR:

- a. Baixo limite de detecção;
- b. Variedade de compostos com ampla faixa de solubilidade no óleo;
- c. Estabilidade radioquímica;
- d. Longo período de estabilidade química;
- e. Não ser adsorvido pela superfície da rocha ou pelas paredes em volta do poço;

- f. Não sofrer reações químicas ou troca de radioisótopos com os fluidos do reservatório;
- g. Possuir baixa toxidez;
- h. Disponibilidade.

Os radiotraçadores tem a capacidade de atender as várias destas exigências e são aplicados segundo o Método do poço único ou o Método entre poços (PINTO, 2012).

O método do poço único consiste na injeção de um traçador primário, um éster, dissolvido na água de formação e solúvel em água e óleo. E em seguida a este traçador primário é injetada água sem traçador. O poço então é fechado para permitir que uma porção do éster forme álcool (através de hidrólise), o traçado secundário, solúvel somente na fase aquosa.

TANG e HARKER (1991) descreveram o primeiro teste de campo, entre poços de petróleo (IW), que obteve sucesso ao determinar a saturação residual de óleo em um reservatório saturado com gás, no Campo Golden Spike D3 “A”, no Canadá em Alberta. A principal vantagem, segundo os autores, encontra-se no fato deste método comparar toda a curva de passagem<sup>11</sup> dos traçadores envolvidos: participantes e não participantes. TANG e HARKER obtiveram a patente deste método em 1993. Por envolver mais de um poço, este método abrange uma área maior de amostragem tornando o cálculo da SOR mais representativo para a formação estudada.

O IWTT (Interwell Tracer Test) permitiu que a metodologia de traçadores pudesse ser usada para determinar a SOR em campos carbonatados de baixa porosidade e baixa pressão (TANG, HARKER, 1991), cujas formações sofriam limitações quando na aplicação do método SWCT (Single-well Chemical Tracer). Como observado por DEANS (1970) e CARLISLIE (1986), obtinha-se balanço de material aparentemente pobre; excessiva diluição do traçador; chegada do pico antes do esperado; picos mal definidos pelos traçadores e grandes volumes de retenção causada pelo aumento das concentrações devida às extensas caudas da curva de passagem (PINTO, 2012).

### 3.10 Detectores de NaI para detecção “IN SITU” de raios gama em experimentos com traçadores

Existem inúmeras matérias que podem ser usadas para detecção de fótons. Dentro deles temos o NaI, CsI, LiI,  $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ,  $\text{BaF}_2$ , CsF, ZnS, etc. O motivo é a interação da radiação com a estrutura do cristal.

O NaI (TI) tem sido o destaque para tal detecção, sendo o uso do mesmo devido ao seu número atômico relativamente alto e sua densidade, é válido dizer também de sua excelente capacidade na produção de luz.

A cintilação é um meio de detecção de raios gama, associado à transferência de parte ou toda energia do raio incidente a um fotoelétron gerado no detector e com a posterior ampliação da corrente elétrica assim produzida até atingir um nível que possa ser medido em um circuito elétrico (SANTOS, 2009).

Desta forma, através de um refletor e tubo de luz, uma parte da radiação é transmitida para um tubo fotomultiplicador. Os fotoelétrons serão multiplicados, através de um aumento de voltagem na seção de multiplicação de elétrons, gerando como resultado um pulso de corrente que produz um sinal ao pré-amplificador que, passando por um discriminador, será detectado e contado no contador eletrônico, como mostram as Figuras 11 e 12.

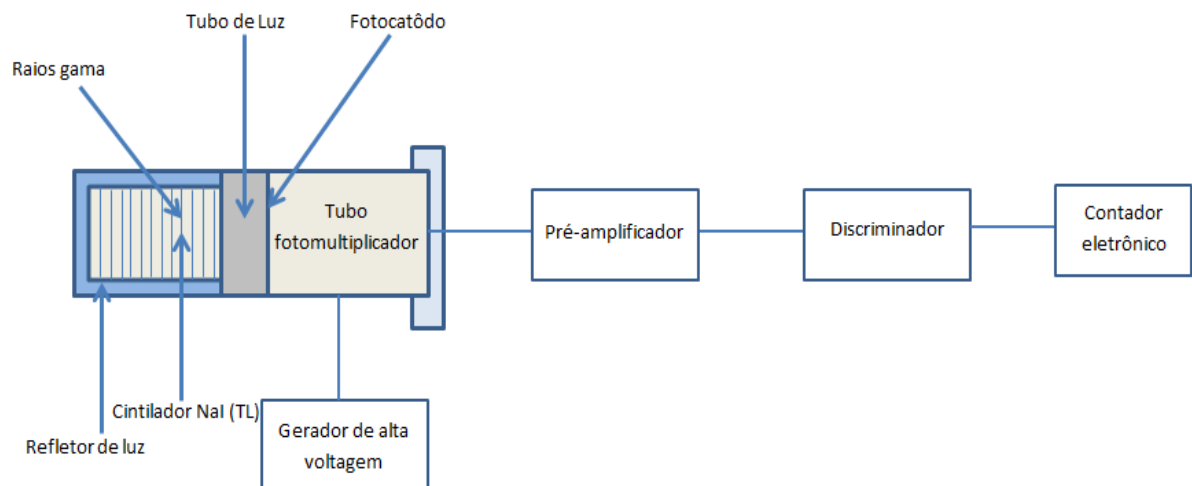


Figura 11. Esquema em diagrama de um detector de cintilação



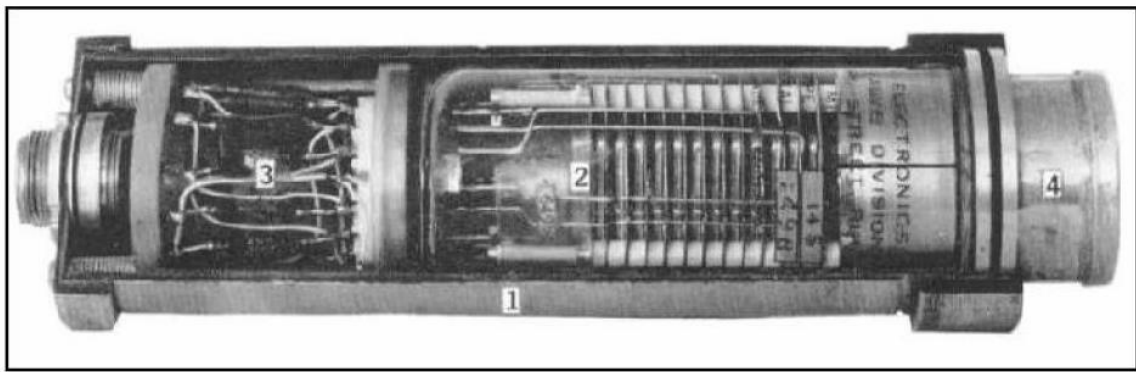


Figura 12. Corte lateral em uma sonda de NaI (TI). (1) Capa de proteção, (2) tubo fotomultiplicador, (3) circuito elétrico para multiplicação de fotoelétrons, (4) cilindro contendo o cristal de Iodeto de Sódio.

(SANTOS, 2005)

A se obter respostas on-line de traçadores radioativos que transitam pelo sistema que se quer avaliar são posicionadas na parte exterior de sistemas, sondas detectoras de NaI (TI) colimadas. É necessária a existência de uma ligação entre essas sondas e um sistema de coleta e armazenamento de dados para um tratamento de dados experimentais.

### 3.11 Velocidade de processamento de dados

São realizados rotineiramente ensaios que demandam tempos longos de trânsito. Sendo possível, nestes ensaios, ser feita manualmente a coleta de dados. Porém, medições para eventos que em intervalos de segundos ou menores, ocorrem ou variam, são limitados seja pelo processamento do equipamento ou pelo próprio operador. A superação dessa limitação pode ser feita com a aquisição simultânea de dados, de ambos os detectores de maneira automática e digital. Com os pulsos detectados sendo digitalizados e sendo enviados a um computador torna-se possível um tratamento mais tarde.

Os detectores devem fazer as contagens com a mesma referência temporal, fazendo as separadamente, tendo em mente facilitar a determinação dos centroides das formas de pulso de trânsito adquiridos, afetando o mínimo a precisão temporal de separação entre esses pulsos (COSTA, 2001).

São limitantes na taxa de aquisição de dados, as velocidades de conversão e de comunicação e a largura temporal dos pulsos detectados. O desenvolvimento de um software é fundamental para gerenciar a troca de informações bem como a automatização do sistema.

#### **4. RISCOS RADIOLÓGICOS**

As questões para segurança e manipulação de qualquer radiotraçador que envolva potenciais riscos radiológicos devem ser aprovadas pela autoridade reguladora do país, que no Brasil é a CNEN (Comissão Nacional de Energia Nuclear).

O risco radiológico de maior preocupação ao se trabalhar com radiotraçadores ocorre no local onde se é feito a injeção, pois é o momento onde a exposição externa encontra-se em seu máximo, além do risco de vazamento do mesmo durante a injeção. A situação apresentada é particularmente aguda para  $^{131}\text{I}$ odo, que emite radiação gama em níveis médios.

As exposições a esta situação é limitada por meio de técnicas de injeção de traçadores que enfatizem a manipulação de maneira rápida e de menor quantidade, evitando transferências entre recipientes, e que a realização da injeção seja feita no interior da cabeça do poço. Os traçadores como  $^{125}\text{I}$ odo e Trício não trazem problemas quanto a radiação externa, porém continuam sendo radiotraçadores e os procedimentos tem por finalidade, minimizar ao máximo a possibilidade de vazamentos. A partir do momento em que o radiotraçador tenha sido injetado, tornar-se imperativo o cuidado com a contaminação do ambiente. Isto pode ocorrer pela injeção de traçadores em saídas naturais, como por exemplo, as fontes termais, sendo assim deve-se considerar a medição dos níveis de radiação em tais situações. Além disto, podem acontecer contaminações caso águas residuais não injetadas, forem descartadas num corpo d'água, porém percebe-se que altos níveis de contaminação são improváveis mesmo nos casos extremos.

Se um recurso natural fosse afetado pelo fluxo de um radiotraçador injetado, este viria a ser conhecido a partir de outros estudos. Além disso, mesmo se tal contaminação ocorresse teria de estar em um nível muito grande para significar um risco à saúde humana (IAEA, 2004).

Os acidentes envolvendo material radioativo não selado podem resultar de inúmeras situações, por exemplo: o derramamento e lançamentos de material radioativo de sistemas pressurizados, liberações involuntárias ou não autorizadas de resíduos, situações de

emergência do local, como incêndios e explosões, catástrofes naturais, conflitos e acidentes de transporte (IAEA, 2003).

O trabalho de campo pode representar algumas dificuldades em comparação com o trabalho de laboratório. As condições meteorológicas e outros fatores físicos podem prejudicar um trabalhador da competência habitual e capacidade para realizar seu trabalho de forma limpa e segurança. Além disso, a blindagem de radioisótopos que pode ser fornecida no campo pode ser menos eficaz comparada a que pode ser fornecida em laboratório, são fatores estes que contribuem ao aumento do risco radiológico nesta área.

Os radiotraçadores como são possíveis de notar na Tabela 1, são emissores de radiações Beta e Gama. As emissões Beta trazem um baixo poder de ionização, pois geralmente suas cargas são pequenas, por exemplo, comparadas as partículas Alfa, porém as partículas betas tem um poder penetração no corpo humano considerável, penetração esta por volta de dois centímetros, o que as torna de cinquenta a cem vezes mais penetrantes que partículas Alfa. As emissões Gama são mais perigosas ao se tratar de penetração. As emissões Gama são preocupantes, pois conseguem com maior facilidade depositar dose aos órgãos internos, devido a seu alto poder de penetração.

## **5. PROTEÇÃO RADIOLÓGICA**

### **5.1 Aspectos gerais**

A CNEN não tem normas específicas para a proteção radiológica em radiotraçadores, mas os conceitos gerais aplicáveis à todas as práticas estão postulados nas diversas normas publicadas pela CNEN. Os aspectos específicos de proteção radiológica são recomendados pela AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica).

A IAEA recomenda que para o uso de tal prática deve ser estabelecido um programa de proteção radiológica, para possíveis exposições e contaminação por se tratar de fontes não seladas, otimizando assim a proteção dos trabalhadores e do público, de maneira a abranger até mesmo os funcionários terceirizados que ali prestarem algum tipo de serviço. A otimização da proteção começa na fase de concepção, por motivo de haver maior flexibilidade a mudanças, a qual se preciso deve existir até mesmo em fase operacional, tendo capacidade de responder a situações inesperadas. As classificações de área devem ser respeitadas e bem sinalizadas como dito nas Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica CNEN –NN-3.01.

O Titular deve participar do planejamento das atividades envolvendo exposições significativas, e aconselhar sob quais condições o trabalho pode ser realizado em áreas controladas. Essas condições devem especificar o tipo e natureza do equipamento de proteção que pode ser necessário e deve também garantir que haja um monitoramento de tais exposições, tanto monitoramento individual, como também de área.

A Monitoração deve ser feita por pessoal qualificado para o serviço e os IOE têm direito ao registro de dose (que recebeu em cada mês). Para tal monitoração o tipo mais usado são os monitores individuais de dose (dosímetros), porém para isso o dosímetro deve ser escolhido de acordo com vários fatores, sendo desta forma se recomenda a consulta de um especialista qualificado para auxílio na escolha do mesmo.

A Autoridade Reguladora Brasileira (CNEN) solicita o registro de dose dos IOE's da seguinte forma: "todas as doses maiores ou iguais a 0,20 mSv devem ser registradas", "o nível de investigação para monitoração individual de IOE deve ser, para dose efetiva, 6 mSv por ano ou 1 mSv em qualquer mês" (CNEN 3.01/004:2011).

"Para dose equivalente, o nível de investigação para pele, mãos e pés é de 150 mSv por ano ou 20 mSv em qualquer mês. Para o cristalino, o nível de investigação é 50 mSv por ano ou 6 mSv em qualquer mês" (CNEN 3.01/004:2011).

As áreas de atuação para as quais a CNEN certifica a qualificação de supervisores de proteção radiológica são agrupadas em classes I ou II, de acordo com o tipo de exames realizados, no caso de radiotraçadores é classificado em qualificação II logo, é obrigatório que haja na empresa a presença de um supervisor de radioproteção nesta área, como dito na Certificação da Qualificação de Supervisores de Proteção Radiológica CNEN-NN-7.01.

O Titular deve assegurar que seus funcionários recebam treinamento adequado e, entendam suas responsabilidades e funções, sabendo agir tanto em rotina, quanto em situações anormais ou de emergências, geralmente delegando tais treinamentos ao Supervisor.

Com a utilização de fontes não seladas, o lacre nas fontes, seu manuseio e armazenamento requerem uma atenção especial, sendo responsabilidade da Instalação junto a Autoridade Reguladora garantir uma forte cultura de segurança como prioridade.

## 5.2 Classificação de área

A CNEN postula que para gerenciamento de radioproteção, os titulares (ou seus respectivos representantes) devem classificar as áreas que envolvam radiações ionizantes, seja em locais de trabalho, ou que apenas contenham material radioativo, sendo a classificação feita da seguinte forma:

a) Quando for necessária a adoção de medidas específicas de proteção e segurança para garantir que as exposições ocupacionais normais estejam em conformidade com os requisitos de otimização e limitação de dose, bem como prevenir ou reduzir a magnitude das exposições potenciais. A área deve ser classificada como Área Controlada.

b) Quando embora não requeira a adoção de medidas específicas de proteção e segurança, devem ser feitas reavaliações regulares das condições de exposições ocupacionais, com o objetivo de determinar se a classificação continua adequada. A área deve ser classificada como Área Supervisionada.

c) Quando uma área não se classifica como controlada ou supervisionada, esta área pode ser classificada como Área Livre.

As áreas controladas devem estar sinalizadas com o símbolo internacional de radiação ionizante, acompanhando um texto descrevendo o tipo de material, equipamento ou uso relacionado à radiação ionizante (CNEN, 2011).

A CNEN por sua vez para melhor entendimento deste assunto publica na posição regulatória 3.01/004:2011 uma interpretação que nos permite claramente encontrar a classificação para se trabalhar com radiotraçadores, no tópico 3.3.1, referente a área controlada está escrito “controlar as exposições de rotina e evitar a disseminação da contaminação durante as condições normais de operação”, logo não nos resta dúvida quanto a classificação de área ao se trabalhar radiotraçadores, afinal praticamente todos são gasosos ou líquidos.

A NRC-39.35 postula que em caso de contaminações de superfície, a área só poderá deixar de ser uma área controlada, se a medição for igual ou menor do que 185 Bq.

### **5.3 Informações sobre a empresa e Empresas Brasileiras**

O Plano de proteção radiológica de uma empresa deve conter a identificação da instalação, de sua direção, funções da empresa, descrição das áreas da instalação, descrição da equipe, registro das fontes radioativas, e equipamentos que são utilizados no serviço de Proteção Radiológica (no caso de nosso tema, os equipamentos de proteção devem atender a proteção dos IOE's quanto a doses externas e contaminação com fontes não seladas).

De acordo com a CNEN, no Brasil existem duas empresas que são autorizadas a trabalhar com radiotraçadores, são elas: ARTEX BRASIL - SERVIÇOS E COMÉRCIO DE EQUIPAMENTOS LTDA (Mossoró – RN) e TRACERCO DO BRASIL (Rio de Janeiro – RJ).

### **5.4 Princípios de Proteção Radiológica**

A IAEA recomenda alguns princípios de proteção radiológica, alguns deles descritos a seguir.

Para que qualquer prática envolvendo radiação Ionizante seja executada deve ser previamente justificada de maneira que os benefícios sejam maiores que os riscos, logo a justificativa é um princípio fundamental em radioproteção. A empresa por melhor que estejam seus níveis sempre tem como obrigação pensar em otimizar as práticas, de maneira a sempre alcançar a menor taxa de dose possível ao cumprir tal atividade, sendo a taxa de dose o mais próximo de zero possível (princípio ALARA).

É importante ter em mente que estudos epidemiológicos e radiobiológicos em baixas doses mostraram que não existe um limiar real de dose para os efeitos estocásticos. Ou seja, qualquer exposição de um tecido envolve um risco carcinogênico, variando conforme a sensibilidade do tecido por uma dose equivalente.

Ao se tratar de proteção e detrimento da radiação, podemos considerar em termos de custo, assim temos um otimização em termos quantitativos, ou seja, pode ser baseada em uma análise custo-benefício.

Além da Justificativa e Otimização, existe um princípio importantíssimo que deve ser levado em conta, a limitação de dose. A exposição de profissionais tem de funcionar de

maneira a não ultrapassar os valores estipulados em norma, no caso do Brasil as normas são aplicadas pela CNEN e são estas:

A exposição normal dos indivíduos deve ser restringida de tal modo que nem a dose efetiva nem a dose equivalente nos órgão ou tecidos de interesse, causadas pela possível combinação de exposições originadas por práticas autorizadas, excedam o limite de dose especificado na Tabela 2, salvo em circunstâncias especiais, autorizadas pela CNEN. Esses limites não se aplicam às exposições médicas.

Tabela 2: Limites de *Dose Anuais* <sup>[a]</sup>

Grandeza	Órgão	<i>Indivíduo ocupacionalmente exposto</i>	<i>Indivíduo do público</i>
<i>Dose efetiva</i>	Corpo Inteiro	20 mSv <sup>[b]</sup>	1 mSv <sup>[c]</sup>
<i>Dose equivalente</i>	Cristalino	20 mSv <sup>[b]</sup>	15 m Sv
	Pele <sup>[d]</sup>	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	---

[a] Para fins de *controle administrativo* efetuado pela *CNEN*, o termo dose anual deve ser considerado como dose no ano calendário, isto é, no período decorrente de janeiro a dezembro de cada ano.

[b] Média aritmética em 5 anos consecutivos desde que não exceda 50 mSv em qualquer ano.

[c] Em circunstâncias especiais, a *CNEN* poderá autorizar um valor de *dose efetiva* de até 5 mSv em um ano, desde que a *dose efetiva* média m um período de 5 anos consecutivos, não excedam a 1 mSv por ano.

[d] Valor médio em 1 cm<sup>2</sup> de área, na região mais irradiada.

Os valores de dose efetiva se aplicam a soma das doses efetivas, causadas por exposições externas, com as doses efetivas comprometidas (integradas em 50 anos para

adultos e até a idade de 70 anos para crianças), causadas por incorporações ocorridas no mesmo ano (CNEN-NN-3.01:2011).

É válido que um plano de radioproteção tenha as premissas de radioproteção e a ideia de Cultura de Segurança, isto é importantíssimo para que quem tenha acesso ao plano saiba da onde vieram seus princípios, o que é e qual a função da Radioproteção e Segurança no trabalho.

### **5.5 Procedimentos de emergência a serem adotados no caso de contaminação com radioisótopos**

Existem medidas muito simples e eficientes para determinadas situações. Então é recomendado que se algum tipo de contaminação ocorra se efetue as seguintes recomendações para:

#### Contaminação Pessoal

- a. Lavar imediatamente a região contaminada com bastante água e sabão neutro. Não use substâncias abrasivas ou muito alcalinas;
- b. Caso o procedimento “a” não seja suficiente para descontaminar, esfregue a região utilizando uma escova macia e sabão, tendo o cuidado para não ferir a pele;
- c. Cuidado a efetuar este procedimento para não respingar por outras superfícies, chamar sempre o responsável pela proteção radiológica para orientação no procedimento.

#### Contaminação de Superfície

- a. Isolar e demarcar, imediatamente, a área contaminada para evitar a disseminação da contaminação;
- b. Use luvas descartáveis para realizar a descontaminação;
- c. Utilize métodos secos para absorver o contaminante;
- d. Limpe a área com sabão descontaminante, utilize a menor quantidade de água possível afim de evitar a disseminação da contaminação;
- e. Comunicar o ocorrido ao responsável pela proteção radiológica.



Contaminação de vestimenta

- a. Usar luvas descartáveis;
- b. Retirar a vestimenta contaminada e ensacar, o qual deverá ser monitorado, lacrado e identificado;
- c. Se houver condições e local, efetuar a lavagem (de preferência aguardando um tempo, para que o material decaia, pois os radionuclídeos nesta área geralmente são de baixas meias vidas), separadamente de outras vestimentas, e efetuando-se a monitoração após a mesma;
- d. Caso não haja condições para realização “c”, as vestimentas ensacadas devem ser tratadas como rejeito radioativo;
- e. Comunique ao responsável pela proteção radiológica.

## **5.6 Planejamento e Projeto**

### **5.6.1 Planejamento**

Antes de dar início a uma atividade deve se ter um planejamento, sendo necessária a escolha de uma técnica, se tal técnica for radioativa, porém, utilizar fontes seladas, o planejamento é feito de maneira simples e pode se tornar algo repetitivo.

A aplicação de radiotraçadores não é simples desta maneira, pois a partir do momento em que é definido o uso de um traçador radioativo, o planejamento tem de ser exclusivo, exige um estudo mais específico no que diz respeito a segurança, pois como já dito trata-se de fontes não seladas. O meio ambiente em poucos casos será levado em conta nos estudos, pelo motivo dos radiotraçadores terem pequenas atividades, meia-vida curta, e diluição já esperada, associada com o período de liberação limitado.

### **5.6.2 Projeto**

No projeto devem ser considerados os seguintes fatores:

- a) Definição de responsabilidades
- b) Seleção do método
- c) Segurança Radiológica

Sendo os três fatores de suma importância e relacionados, ou seja, a análise tem de ser feita em conjunto.

Por se tratar de um trabalho envolvendo radiação ionizante, é importante definir de maneira bem clara a responsabilidade de cada um, além da definição de um líder e uma pessoa responsável pela segurança radiológica.

A seguir, deve ser feita seleção de um método e o mesmo envolve a escolha da técnica e da instrumentação a serem utilizadas, sendo assim devem ser descritos os fatores que vão influenciar nestas seleções.

Em todos os projetos e em cada passo dos mesmos, devem estar presentes os aspectos de radioproteção. Para o uso e seleção do radiotraçador, serão levadas em conta várias considerações como abordado no tópico 2.3 desta monografia, as doses de radiação provenientes da operação são determinadas através do método escolhido e esta dose é determinada através de certos fatores como: atividade do radiotraçador, natureza e energia da radiação emitida e sua meia-vida.

De acordo com os princípios fundamentais de radioproteção, a atividade do traçador deve ser mantida tão baixa quanto praticável na seleção o método (princípio ALARA). A escolha do radionuclídeo para uma prática será preferencialmente o que tiver uma meia-vida condizente com a duração da prática. No projeto deve ser avaliado a meia-vida do nuclídeo, pois os de meia-vidas curtas aumentam a atividade inicial, porém o tempo de exposição aumenta ao se usar um radionuclídeo de meia-vida longa, tal escolha tem de ser feita de maneira a amenizar a dose de radiação, garantindo o alcance necessária para a investigação.

Os dispositivos de proteção são fundamentais para segurança radiológica e dependem das práticas realizadas. Um aspecto importante é determinar a restrição de área de acordo com as normas previstas pela CNEN e detectar possíveis contaminações, antes da liberação de uma área controlada, para área livre.

### **5.7 Listagem das fontes e Investigação para o uso de radiotraçadores.**

A empresa deve ter como função o comissionamento e descomissionamento de instrumentos radioativos, se não, ter uma empresa que faça o mesmo a ela, além de ter uma listagem de todas as fontes que possui e por fim um lugar de armazenamento para rejeito, geralmente se tem um temporário na própria empresa.

A empresa deve especificar todas suas aplicações que se utilizam de elementos radioativos como traçadores.

A empresa deve designar um responsável para o planejamento e aprovação de qualquer investigação com o uso de radiotraçadores, para uma análise de processo e equipamento, todas as injeções de radiotraçadores, independente de se sua forma física, serão planejadas para definição de área e que não exceda as dose previstas em normas, a sobra de material e rejeitos deve ser designado pela empresa seu armazenamento, se necessário planejando e sendo aprovado previamente pela Autoridade Reguladora caso a concentração final seja maior do que o permitido em norma. O cálculo do tempo necessário para que a empresa possa descartar o traçador é fundamental.

O Plano Específico de Radioproteção deve designar ações de segurança para cada etapa do processo principalmente para as investigações: de vazamento de gases de processo que resultam em perda de rendimento de uma planta, certificação de distribuição de fluxos, velocidade de compatibilidade das misturas de produtos, de tempo de residência, pois tais tópicos causam perdas de rendimento e com isso prejuízos.

### **5.8 Liberação de área contaminada e radioisótopos isentos de testes.**

Após o manuseio de um radiotraçador pode ser detectada uma contaminação residual, em roupa ou equipamento, deve-se então tomar as ações para descontaminação. O SPR deve medir antes de se iniciar o trabalho o “Background” do local de trabalho, para então proceder a verificação da presença ou não de uma contaminação residual (é considerado contaminação residual a presença de um taxa de radiação a um nível de  $0,9\mu\text{Sv/h}$  (acima do background)).

Em uma situação de contaminação de área a CNEN não informa os valores para liberação da área contaminada, portando o valor aqui citado é baseado na NRC. A descontaminação de uma fonte não selada deve ser realizada partindo da monitoração da superfície contaminada, tal análise deve ser capaz de detectar a presença de 185 Bq de material radioativo, se tal monitoração revelar a presença de 185 Bq ou um maior valor de material radioativo removível, deve-se efetuar o quanto antes a descontaminação do lugar. Caso não seja possível a mesma o licenciado deve ser informado e manter a área isolada até o tempo de decaimento do radioisótopo em questão. O licenciado deverá verificar o equipamento associado à fonte de vazamento de contaminação radioativa e, se contaminado, efetuar também a descontaminação do mesmo.

A NCR aborda que as seguintes fontes estão isentas de requisitos de testes de vazamento periódicos:

- a. Hidrogênio (trício) fontes;
- b. Fontes contendo material licenciado com uma meia-vida de 30 dias ou menos;
- c. Fontes seladas contendo material licenciado no estado gasoso;
- d. Fontes de beta ou gama-emissores de material radioativo com uma atividade de 3,7 MBq ou menos;

### **5.9 Função, Qualificação dos Indivíduos Ocupacionalmente Expostos e aplicação dos aspectos de Radioproteção.**

No trabalho com radiotraçadores são membros IOE's de uma equipe designada aqueles:

- a. que prepararam e distribuem o material radioativo, se o mesmo não for recebido de uma forma diretamente utilizável a partir dos fornecedores;
- b. que manipulam o radiotraçador seja no transporte, abertura, injeção e preparo do padrão tanto no campo quanto em laboratório;
- c. que coletam amostras do sistema; e
- d. profissionais responsáveis pela proteção radiológica.

Todo o trabalho de laboratório preliminar necessário para preparação do radiotraçador é considerado como idêntico ao funcionamento normal em laboratórios de radiofármacos para a qual requisitos de segurança são disponíveis na literatura (IAEA, 1990). Em algumas situações o trabalho de diluição é realizado em campo.

A empresa deve informar ou dizer em seu PPR, onde se encontra a função e qualificação de cada IOE que trabalhe para ela.

Os aspectos de radioproteção tem que se aplicar a todo indivíduo o qual esteja sobre a responsabilidade da empresa, seja este contratado, colaboradores, ou visitante, sendo também aplicado a qualquer atividade que envolva ou tenha possibilidade de envolver o uso das radiações ionizantes ou substancias radioativas, que tenha a possibilidade de provocar exposição a uma fonte ou contaminação em lugares onde a mesma preste serviços.

É importante que todas as pessoas que trabalham com fontes não seladas passem por treinamentos de proteção radiológica e este treinamento seja registrado pelo SPR, para que seja reconhecido que o IOE está capacitado para lidar com fontes radioativas não seladas. Para efetuar o manuseio de materiais radioativos não selados deve utilizar EPI adequados, fazendo uso de blindagens e seguir a risca todos os procedimentos e práticas para limitar as exposições. Caso seja necessário realizar a diluição de um radiotraçador volátil, a mesma deve ser feita quando possível em área com circulação de ar. Os IOE devem utilizar EPI apropriados, bem como estar monitorados por medidores de radiação.

Líquidos radioativos devem de preferência ser manuseados em bandejas com material de absorção suficiente para absorver, no mínimo, o dobro do volume do líquido, caso haja derramamento. Ao se tratar de transporte de líquidos, deve-se efetuar em embalagens inquebráveis, dentro de um recipiente fechado e protegido, que deve conter material absorvente suficiente, antes que seja levado para o lugar de trabalho.

### **5.10 Programa de Monitoração**

Este tópico deve conter informações relacionadas a Monitoração Individual, de Área e Meio Ambiente. Onde geralmente o supervisor de proteção radiológica é responsável por manter atualizado o histórico radiológico de todos os IOE e informar aos funcionários e a Autoridade Reguladora o valor das doses recebidas.

As Monitorações de Área e Meio Ambiente podem ser feitas por conta própria ou em parceria com outra empresa ou laboratório. Mas para a Monitoração Individual deve ser contratada uma instituição para o fornecimento do serviço de fornecimento de dosimetria, levando em conta o tipo de radiação que este IOE irá receber, além dos valores de taxas de dose.

O levantamento radiométrico deve ser feito nas áreas designadas e geralmente feitas de mês em mês nas instalações que a empresa estiver prestando serviço, sendo assim feita a monitoração de área.

Quando um IOE se der conta da perda do seu dispositivo de monitoração de individual (geralmente um dosímetro) o trabalho deverá ser encerrado até que haja a substituição do mesmo. O trabalhador deve comunicar tal caso ao supervisor de proteção radiológica (SPR) o mais cedo possível.

A seguir o SPR deve fazer uma investigação do motivo da perda, o período de monitoração perdido deve ser calculado através das atividades que ele exerceu, sendo preparado um relatório e este arquivado, sendo registrada esta dose no controle de dose acumulada do IOE.

Havendo qualquer suspeita de que um IOE tenha sido exposto acima dos limites especificados em norma, o SPR deve ser informado, o dosímetro do mesmo deverá ser mandado ao laboratório para uma leitura emergencial e os resultados devem ser encaminhados ao SPR.

A seguir o SPR tem como dever notificar a Autoridade reguladora e se necessário dar assistência médica qualificada ao IOE.

### **5.11 Gerência de Rejeitos Radioativos**

As atividades envolvendo radiotraçadores sejam eles sólidos, líquidos ou gasosos, podem gerar rejeitos radioativos. Em função de possuírem meia-vida curta em praticamente todos os casos, estes por um curto período de tempo se tornarão rejeitos com baixos níveis de radiação. Os níveis de descarte para estes rejeitos são estipulados na norma CNEN-NE06.05 (Gerência de Rejeitos Radioativos em Instalações Radioativas), de acordo com os valores limites da Tabela 6, ANEXO D, desta norma.

Em casos que as atividades dos rejeitos ou sua concentração resultem valores acima dos limites estipulados na norma em questão, cabe a empresa providenciar um lugar para que os mesmos sejam transferidos adequadamente, inventariados, identificados e armazenados conforme o item 6 e ANEXOS A, B e C da norma CNEN-NE-6.05.

Todos os materiais contaminados devem ser classificados como rejeito radioativo, como também os materiais utilizados no manuseio dos equipamentos, após segregados e armazenados em recipientes de rejeitos, para que nenhuma contaminação seja espalhada no manuseio.

### **5.12 Estimativa de Taxa de Dose para determinadas exposições de rotina**

Quando o assunto é traçadores radioativos geralmente as taxas de dose são bem inferiores aos limites estipulados em norma, porém a empresa deve designar em seu Plano

Específico de Radioproteção as estimativas destas taxas, para cada função que ela preste serviço envolvendo radiação.

As doses em qualquer que seja a função devem ser tão baixas quando o possivelmente exequíveis. Este é um dos princípios fundamentais em radioproteção (princípio ALARA), estando entre as principais recomendações da Agência.

A instalação deve ter um programa de controle médio, podendo para a realização dos exames médicos contratar uma empresa. Este programa deve conter exames desde a admissão até o desligamento dos IOE'S, seguindo todas as exigências contidas nas Normas CNEN-NE-3.01 e CNEN-NE-3.02 e NR-7 do Ministério do Trabalho. Os resultados de exames médicos devem levar em conta os resultados de monitoração individual dos IOE.

### **5.13 Programa de Treinamento**

O programa de treinamento da instalação deve ser descrito em seu PPR, abordando os procedimentos e profissionais. Tal treinamento deve de ser dado preferencialmente a todos os funcionários, os que se envolvem diretamente com radionuclídeos e aqueles que não se envolvem diretamente, pois em uma possível perda de fonte qualquer funcionário pode identificar a mesma e tomar as devidas providências. Muitas vezes este treinamento é substituído por participações em Congressos, Workshops, e Encontros de Proteção Radiológica, porém tais participações nem sempre são o suficiente para substituir o treinamento na integra.

## **6. CONCLUSÃO**

As diversas aplicações de radiotraçadores na indústria são basicamente voltadas à área do petróleo, pois os benefícios são realmente significativos no cálculo da medida de vazão, determinação da saturação residual de óleo e estudos de contaminação por NAPL's.

Os riscos radiológicos no uso de traçadores radioativos envolvem três aspectos: dose externa, contaminação externa e interna. Na maioria das vezes o risco radiológico relacionado à dose externa é muito baixo, por se tratar de fontes radioativas não seladas de baixas atividades e o tempo de exposição durante as operações ser baixo. Os riscos radiológicos relacionados as contaminações externa e interna aumentam devido ao fato de as fontes

radioativas usadas serem não seladas possibilitando um possível contato direto e até inalação e ingestão do material radioativo.

De forma a minimizar ou evitar os riscos radiológicos, relacionados a dose externa, contaminação externa e interna, é fundamental seguir os procedimentos descritos nos planos de proteção radiológica, os requisitos postulados nas normas e regulamentos e as recomendações internacionais. A observância das boas práticas de proteção radiológica certamente evitará possíveis contaminações.

Os acidentes radiológicos, apesar de serem postulados pelas instituições usuárias de traçadores radioativos, não são comuns nesta técnica, confirmando o cumprimento dos requisitos de proteção radiológica.

## **7. RECOMENDAÇÃO**

De forma a confirmar o baixo risco na técnica de traçadores radioativos recomenda-se realizar uma estimativa de dose externa e principalmente dose interna durante as operações de rotina, usando métodos físicos ou computacionais.

Recomenda-se a elaboração de regulamento técnico específico para a área de traçador radioativo tomando como referência as recomendações internacionais.

Apesar de a literatura não apresentar casos de acidente radiológico, recomenda-se uma busca mais detalhada e aprofundada para se certificar da não existência dos mesmos, contatando as autoridades reguladoras e instituições usuárias.

Como a técnica de traçador radioativo não é, ainda, muito conhecida academicamente, recomenda-se a montagem de um setup no Laboratório de Indústria do Instituto de Radioproteção e Dosimetria para aprendizado prático sobre o assunto, podendo ser usado o esquema da figura 8, na qual apresenta o uso traçador para realização de medida de vazão em tubulações.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

AOKI, Pedro Ei Ti. **METODOLOGIA DAS DETERMINAÇÕES DA VELOCIDADE, DIREÇÃO E SENTIDO DO FLUXO DA ÁGUA SUBTERRÂNEA. COM UTILIZAÇÃO DE TRAÇADORES RADIOATIVOS.** 1975. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenheiro Civil, Departamento de Escola Politécnica da USP, São Paulo, 1975.



BJØRNSTAD, T.; MAGGIO, G. E. **Radiotracer technology as applied to interwell communication in oilfields**. Vienna: IAEA, 2000; Rossi, P.; Ph. D. Thesis, University of Neuchâtel, 1994

CAILLOT, A. La radioactivité au service de l'industrie et de l'environnement. Paris: 2002. Editions Tec et Doc.

CESAREO, Roberto. **Dos raios X à bomba atômica (1895-1945): Os 50 anos que mudaram o mundo**. Brasília: Embrapa, 2010. 543 p.

CNEN. CNEN-NN-3.01:2011. **Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica**. Rio de Janeiro, RJ.

COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. CNEN-NN-7.01: RESOLUÇÃO CNEN N° 111. Rio de Janeiro: Diário Oficial da União, 2011. 6 p.

COSTA, Fábio Eduardo da. **DESENVOLVIMENTO DE CONJUNTO DETECTOR CINTILADOR COM SISTEMA DE CONTAGENS E AQUISIÇÃO DE DADOS PARA MEDIDAS DE VAZÃO UTILIZANDO TRAÇADORES RADIOATIVOS**. 2001. 114 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências na Área de Tecnologia Nuclear, Departamento de Aplicações, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, São Paulo, 2001.

COOKE JUNIOR, C. E. Method of determining residual oil saturation in reservoirs," U.S. **Patent** 3 590 923, Exxon Production Research Co. 1971

DONALDSON, E. C. **Comparison of methods for measurement of oil saturation**. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, USA, 1981. (Paper SPE 10298).

FREITAS, Cíntia Helena de. **PARTIÇÃO DE COMPLEXOS DE LANTANÍDEOS ENTRE AS FASES DE UM RESERVATÓRIO DE PETRÓLEO**. 2007. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2007. Cap. 2.

IAEA, "**Radiotracer Applications in Industry: a Guidebook**", Technical Report Series no. 423, Vienna, 2004.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Radiotracer resident time method for industrial and environmental applications distribution**. Vienna IAEA, 2008. (Training Course Series, N. 31)

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY – IAEA. **Radiotracer Generators for**

**Industrial Applications.** Vienna IAEA, 2013. (RADIATION TECHNOLOGY SERIES, N. 5)

MARTINS, Polyana Fabrícia Fernandes. **DESENVOLVIMENTO DE TRAÇADORES ATIVÁVEIS PARA APLICAÇÃO EM RECUPERAÇÃO SECUNDÁRIA DE RESERVATÓRIOS DE PETRÓLEO.** 2005. 93 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2005. Cap. 2.

MOREIRA, Rubens M.; MARTINS, Polyana F. F.; PINTO, Amenônia M. F.. **OTIMIZAÇÃO DOS VOLUMES DOS SOLVENTES NA DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE PARTIÇÃO.** In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO E GÁS, 3., 2005, Salvador. **OTIMIZAÇÃO DOS VOLUMES DOS SOLVENTES NA DETERMINAÇÃO DE COEFICIENTES DE PARTIÇÃO.** Belo Horizonte: Ibp, 2005. p. 100 - 105. Disponível em: <[http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0190\\_05.pdf](http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/3/trabalhos/IBP0190_05.pdf)>. Acesso em: 28 jun. 2014.

OLIVEIRA, Thiago César de. **Estabelecimento de Metodologia para Determinação de  $^{222}\text{Rn}$  por Espectrometria de Cintilação em Líquido para Aplicação em Estudos de Reservatórios de Petróleo.** 2008. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, Departamento de CDTN, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2008.

PAULO, J. M de. **Desenvolvimento de Metodologia Analítica do  $^{222}\text{Rn}$  como Traçador de Partição na Recuperação Secundária de Petróleo,** 2006. 102f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais). Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, 2006.

PEDE, Marco Aurélio Z.. Métodos inovadores de avaliação e gerenciamento de locais impactados por hidrocarbonetos de petróleo utilização de radônio como ferramenta de investigação. **águas Subterrâneas,** São Paulo, v. 8, n. 2, p.26-28, nov. 2008.

PETROBRÁS, **O petróleo e a Petrobrás,** Disponível em: <<http://www.petrobrás.com.br>>. Acesso em: 26 de maio de 2014

PINTO, Amenônia Maria Ferreira. **DETERMINAÇÃO DA SATURAÇÃO RESIDUAL DE ÓLEO ATRAVÉS DA MEDIDA DA VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE RADÔNIO NA ÁGUA DE PRODUÇÃO.** 2012. 199 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Química, Unicamp, Campinas, 2012.

RIO DE JANEIRO. CNEN. **Procedimentos de emergência:** Procedimentos a serem adotados pelos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) no caso de contaminação com

radiosótopos. Disponível em: <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/lfc/acr-mn-emerg.asp>>. Acesso em: 01 set. 2014.

SANTOS, Adriano Ribeiro. **ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DE COLUNAS DE FLOTAÇÃO UTILIZANDO TÉCNICAS NUCLEARES**. 2005. 153 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia das Radiações, Minerais e Materiais, Departamento de Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, CNEN, Belo Horizonte, 2005.

SENNA, José Julio. O petróleo no Brasil. **R.A.P.: evolução histórica e perspectivas**, Rio de Janeiro, p.75-96, dez. 1978. Trimestral.

SILVA, Láuris Lucia da et al. **TRAÇADORES: O USO DE AGENTES QUÍMICOS PARA ESTUDOS HIDROLÓGICOS, AMBIENTAIS, PETROQUÍMICOS E BIOLÓGICOS**. *Química Nova*, Belo Horizonte, v. 36, n. 06, p.1576-1585, 03 jul. 2009.

SILVA, Láuris Lucia da. **SÍNTESE, CARACTERIZAÇÃO E ESTUDO DA APLICABILIDADE DOS COMPLEXOS ENTRE LIGANTES CARBOXÍLICOS E LANTANÍDEOS (La, Eu, Tb e Dy) COMO TRAÇADORES**. 2010. 158 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, UFMG, Belo Horizonte, 2010.

TAUHATA, Luiz; SALATI, Ivan; PRINZIO, Renato di. **Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos**. 9. ed. Rio de Janeiro: Cnen, 2013. 344 p.

UFRJ, Mbp Coppe /. **A História do Petróleo**. 2014. Disponível em: <<http://www.petroleo.coppe.ufrj.br/historia-do-petroleo/>>. Acesso em: 27 maio 2014.