



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PETRÓLEO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**APLICAÇÃO DAS FONTES RADIOATIVAS NA PERFILAGEM DE POÇOS E
ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO**

CAMILA NUNES DE CARVALHO

Orientador: Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues

Natal/RN, Junho de 2015.

CAMILA NUNES DE CARVALHO

**APLICAÇÃO DAS FONTES RADIOATIVAS NA PERFILAGEM DE POÇOS E
ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia de Petróleo da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial na obtenção do título de Engenheiro de Petróleo.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues

Natal/RN, Junho de 2015

CAMILA NUNES DE CARVALHO

**APLICAÇÃO DAS FONTES RADIOATIVAS NA PERFILAGEM DE POÇOS E
ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO**

Esta monografia foi avaliada e considerada adequada como requisito parcial na obtenção do título de Engenheiro de Petróleo pela Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Aprovado em 1 de Junho de 2015.

Banca Examinadora

ORIENTADOR:

PROF. DR. MARCOS ALLYSON FELIPE RODRIGUES
PRESIDENTE

MEMBRO:
EXAMINADOR

PROF. DR. EDNEY RAFAEL VIANA PINHEIRO GALVÃO
MEMBRO INTERNO – UFRN

MEMBRO:
EXAMINADOR

MSC. ANTHONY ANDREY RAMALHO DINIZ
MEMBRO EXTERNO

Natal/RN, Junho de 2015

AGRADECIMENTOS

Aos meus familiares, Jupira Nunes de Carvalho, Ricardo Costa de Carvalho e Caline Nunes de Carvalho, que me proporcionaram uma excelente educação e sempre me apoiaram nas atividades acadêmicas.

Aos meus colegas de curso e amigos pessoais Marcel Rocha, Emília Fernandes e Taciana Asfora, por todo o companheirismo e disposição compartilhados durante nossa formação acadêmica, fundamentais na busca e realização dos meus objetivos.

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues, a quem admiro como pessoa e profissional, que me ofereceu apoio em todo o período de formação acadêmica.

À Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN pela excelência no ensino disponibilizado, oferecendo cursos cada vez mais qualificados.

Ao corpo docente do Departamento de Engenharia do Petróleo pela dedicação e excelência nos ensinamentos técnicos.

À Empresa Schlumberger pelo estágio concedido. Em especial, ao Engenheiro Paulo Zuliani, por acreditar no meu potencial e pelo total apoio nas atividades realizadas durante o estágio.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis– ANP –, à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP – e ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação – MCTI pelo apoio financeiro fornecido por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás – PRH-ANP 43.

Ao Governo Federal pelo oferecimento do Programa Ciências sem Fronteiras, que proporcionou diversas experiências e fluência na língua inglesa.

CARVALHO, Camila Nunes – “*APLICAÇÃO DAS FONTES RADIOATIVAS NA PERFILAGEM DE POÇOS E ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO*”. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues.

RESUMO

A perfilagem de poços é uma importante etapa da perfuração e tem a função geral de determinar características da formação atravessada por um poço recém perfurado, além de avaliar a situação de poços antigos. As informações obtidas, relacionadas com a profundidade, são traduzidas em perfis elétricos, que são interpretados e possibilitam a identificação de diferentes litologias, determinação das propriedades da formação (porosidade, densidade, permeabilidade, resistividade), indicação dos tipos de fluido no reservatório e suas saturações, avaliação das condições da cimentação, entre outras indicações. Os perfis de densidade e porosidade, em especial, utilizam fontes radioativas como base para a obtenção de seus resultados. Devido ao grande risco que a radiação – em determinadas intensidades, como as utilizadas na perfilagem – fornece a saúde pessoal e ao meio ambiente, é importante que o trabalho envolvendo esse tipo de material seja mais divulgado, conhecido, e bem monitorado. Neste trabalho são apresentadas as aplicações das fontes radioativas na perfilagem, os princípios de funcionamento das ferramentas que utilizam esse tipo de material, além dos aspectos de radioproteção que devem ser seguidos a fim de garantir a qualidade e segurança das operações. O estudo apresentado é baseado na literatura utilizada em cursos fornecidos pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) – órgão que regulamenta e fiscaliza a atividade nuclear no Brasil –, dados de materiais da empresa Schlumberger, visitas a operações de campo e acompanhamento de processos de armazenamento, transporte e calibração de fontes radioativas utilizadas na perfilagem. Com o estudo, foi possível compreender o emprego das fontes na perfilagem, a forma que os resultados são obtidos, e também verificar a necessidade do cumprimento dos regulamentos de radioproteção, assim como o procedimento para serem executados.

Palavras-chave: Perfilagem de poços. Fontes radioativas. Radioproteção.

CARVALHO, Camila Nunes – “*APLICAÇÃO DAS FONTES RADIOATIVAS NA PERFILAGEM DE POÇOS E ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO*”. Trabalho de Conclusão de Curso, Departamento de Engenharia de Petróleo, Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal – RN, Brasil.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Allyson Felipe Rodrigues.

ABSTRACT

The well logging is an important drilling stage which has the general function of determining properties of the formation crossed by a new well, and evaluating the situation of old wells. Information obtained related to the depth are translated into electric logs, which are interpreted and enable the identification of different lithologies, determination of formation properties (porosity, density, permeability, resistivity), indication of fluid types in the reservoir and their saturation, evaluation of cementing conditions, among other indications. The density and porosity logs, in particular, use radioactive sources as a basis for obtaining their results. Due to the high risk that radiation – in certain amounts, such as those used in well logging operations – provides to personal and environmental health, it is important that the work involving this type of material be better divulged, known, and well monitored. This work presents applications of radioactive sources in well logging, the operation principles of the tools that use this type of material, and aspects of radioprotection that must be followed to ensure the quality and safety of operations. The present study is based on the literature used in courses provided by the National Commission of Nuclear Energy (CNEN) - the agency that regulates and supervises nuclear activities in Brazil -, data from materials of Schlumberger Company, visits to field operations and monitoring storage, transport and calibration of radioactive sources used in well logging. The study enabled learning how handle radioactive sources in well logging and how the logging results are obtained, and also verify the need for being compliant with the radioprotection regulations as well as the procedure to run this rules.

Keywords: Well logging. Radioactive sources. Radioprotection.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. ASPECTOS TEÓRICOS.....	15
2.1 Perfilagem de Poços.....	15
2.1.1 Tipos de Perfis.....	17
2.2 Princípios de Radioatividade	18
2.2.1 Estrutura da Matéria.....	18
2.2.2 Radioatividade.....	19
2.2.3 Tipos de radiação	20
2.2.4 Interação da radiação eletromagnética com a matéria	21
2.2.5 Interação de nêutrons com a matéria.....	23
2.2.6 Grandezas Radiológicas e Unidades	24
3. METODOLOGIA.....	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	32
4.1 RADIOATIVIDADE NA PERFILAGEM DE POÇOS.....	32
4.1.1 Perfil neutrônico.....	32
4.1.2 Perfil de densidade	39
4.2 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO	45
4.2.1 Etapas da Produção do Efeito Biológico.....	45
4.2.2 Mecanismos de ação.....	46
4.2.3 Natureza dos efeitos biológicos.....	46
4.2.4 Efeitos Biológico Pré-Natais e Síndrome da Irradiação Aguda.....	47
4.2.5 Fatores de Influência	48
4.3 NORMAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA: OBJETIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO.....	49
4.3.1 Norma CNEN NN-3.01: Diretrizes básicas de proteção radiológica.....	50
4.3.2 Norma CNEN NE-3.02: Serviços de radioproteção.....	51
4.3.3 Norma CNEN NE-5.01: Transporte de material radioativo.....	51

4.4 ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO NA PERFILAGEM RADIOATIVA	52
4.4.1 Fatores de Proteção Radiológica: distância, blindagem, tempo.....	52
4.4.2 Transporte de Fontes Radioativas	53
4.4.3 Procedimentos no Campo.....	55
4.4.4 Procedimentos de Emergência	55
4.4.5 Atividades do Serviço de Radioproteção	56
5. CONCLUSÕES	61
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de uma operação de perfilagem.....	16
Figura 2 - Exemplo de perfil de poço.	16
Figura 3 - Estrutura do átomo de ¹² Carbono.....	19
Figura 4 – Representação do Efeito Fotoelétrico.	21
Figura 5 – Representação do Efeito Compton.....	22
Figura 6 - Representação do efeito de Produção de Pares.....	22
Figura 7 – Ferramentas de perfilagem apoiadas em <i>racks</i> após manutenção.....	27
Figura 8 – Operação de perfilagem <i>onshore</i> . Equipamento de <i>rigup</i> montado e ferramentas dentro do poço.	28
Figura 9 – Área de calibração em ambiente isolado, indicando pontos de levantamento radiométrico para calibração de ferramenta de densidade.....	28
Figura 10 – Tipos de blindagens de fontes radioativas. À esquerda, blindagem utilizada para fonte de ¹³⁷ Cs e à direita para fonte de ²⁴¹ Am-Be.....	29
Figura 11 – Dosímetros da Sagra exigidos pela CNEN.	30
Figura 12 – Modelo de ferramenta de perfilagem neutrônica.	33
Figura 13 – Processo de produção de sinal elétrico dentro do detector de Hélio-3.	35
Figura 14 – Avaliação da porosidade em termos da relação entre a concentração de nêutrons termais e a distância dos detectores à fonte.	37
Figura 15 – Exemplo de perfil com indicação de interpretação.	38
Figura 16 – Esboço da ferramenta que gera o perfil de densidade.....	40
Figura 17 – Fonte de ¹³⁷ Cs utilizada nas ferramentas de perfilagem para perfil de densidade.	41
Figura 18 – Funcionamento dos detectores cintilômetros.	41
Figura 19 – Espectro de energia gerado com o perfil de densidade.	42
Figura 20 – Bloco de Alumínio utilizado na calibração da ferramenta de densidade. ...	44
Figura 21 – Ferramenta utilizada como chave de fonte radioativa.....	53
Figura 22 – Sinalização de transporte para movimentação de fontes radioativas.	54
Figura 23 – Quadro de dosímetros utilizado para monitoração individual.	57
Figura 24 – Vista frontal de um pit radioativo.	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Denominação dos nêutrons de acordo com sua energia.	23
Tabela 2 – Seção eficaz de espalhamento e captura de nêutrons para alguns elementos	36
Tabela 3 – Limiares de doses para reações teciduais nas gônadas, cristalino e medula óssea.	47
Tabela 4 – Risco de efeitos biológicos pré-natais à saúde humana induzido pela radiação ionizante.	48
Tabela 5 – Quadro de limites de doses anuais.	50

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis.

CNEN – Comissão Nacional de Energia Nuclear

DPHZ – Curva da porosidade a partir do perfil de densidade

DT – Perfil Sônico

GR – Perfil de Gama-Ray

HI – Índice de Hidrogênio

ILD – Perfil de Indução

IOE – Indivíduos Ocupacionalmente Expostos

IRD – Instituto de Radioproteção de Dosimetria

IT – Índice de Transporte

NMR – Nível Máximo de Radiação na superfície

NPHI – Curva de porosidade pelo perfil Neutrão

ONU – Organização da Nações Unidas

rad – *Radiation Absorbed Dose*

rem = *Roentgen Equivalent Men*

RHOB – Curva de Densidade

Rt – Resistividade da formação

Rw – Resistividade da água da formação

So – Saturação de óleo no reservatório

SP – Perfil de Potencial Espontâneo

SPR – Supervisor de Radioproteção

Sw – Saturação de água no reservatório

TNRH – Curva indicada no perfil de porosidade

α – Radiação Alfa

β – Radiação Beta

γ – Radiação Gama

ρ_a – Densidade aparente

ρ_B – Densidade de Bulk do meio

ρ_e – Densidade eletrônica do meio

Φ – Porosidade

Capítulo I

Introdução

1. INTRODUÇÃO

Fontes radioativas são materiais compostos por isótopos radioativos (radioisótopos) que possuem núcleos instáveis, muito energéticos. Para que se estabilizem, esses núcleos liberam radiação em forma de matéria (partículas α , β , nêutrons), e/ou em forma de ondas eletromagnéticas (radiação γ e raios x). As radiações são capazes de atravessar materiais ou podem ser absorvidas por eles. Esse fato torna possível a aplicação das fontes radioativas em diversas áreas de estudos. (CARDOSO, 2003^a).

As fontes radioativas são amplamente aplicadas na medicina, tanto para diagnósticos como para terapias. A propriedade de destruição de células e pequenos organismos, através da absorção de radiação por eles, é utilizada para combater micro-organismos nocivos aos seres humanos. Radioisótopos são também aplicados na agricultura como uma forma de contenção de pragas, por exemplo, por meio da esterilização de organismos “machos” da espécie contaminante. Em se tratando de alimentos, as propriedades da radiação são implementadas para esterilização e também para conservação de produtos agrícolas, para que possam percorrer longas distâncias sem alterações (CARDOSO, 2003^a).

Na indústria, uma importante aplicação das fontes radioativas é a gamagrafia, ou radiografia de peças metálicas. Esse processo é bastante usado na indústria de petróleo para controle de qualidade de tubos. Inserindo-se uma determinada fonte em um tubo metálico, pode-se identificar falhas, rachaduras ou corrosão, de acordo com a quantidade de radiação que o atravessa.

Dentro da indústria de petróleo, a utilização das fontes radioativas é fundamental na perfilagem de poços, que têm a função geral de determinar características da formação atravessada por um poço recém furado, e também obtenção de dados para manutenção de poços antigos. Com as fontes radioativas obtém-se perfis que avaliam densidade e porosidade, além de identificar litologias e tipos de fluidos presentes nos poros das rochas. As fontes são colocadas no interior da ferramenta, para então descenderem com segurança no poço, de forma que o risco de perda seja reduzido ao máximo, uma vez que o material é altamente contaminante.

Trabalhos envolvendo radiação – em determinadas quantidades, como as utilizadas na perfilagem, fornecem risco à saúde pessoal, podendo provocar diversos efeitos biológicos nos seres humanos, como alterações no sistema nervoso, esterilidade,

efeitos cardiovasculares, câncer, entre outros. Portanto, é de suma importância que as atividades envolvendo esse tipo de material sejam bem conhecidas e monitoradas.

Para trabalhar com materiais radioativos, é necessário seguir uma série de regulamentos que garantem a segurança do trabalhador e do meio ambiente. No Brasil, as atividades de armazenamento, manuseio e transporte desse tipo de material, são controladas pela Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e todas as empresas do ramo devem seguir as normas regulamentadas por esse órgão.

O objetivo deste trabalho é apresentar as aplicações das fontes radioativas na perfilagem, os princípios de funcionamento das ferramentas que utilizam esse tipo de material, além dos aspectos de radioproteção que devem ser seguidos, a fim de garantir a qualidade e segurança das operações.

Nesse contexto, o Capítulo II apresenta aspectos teóricos relacionados à perfilagem de poços e princípios de radioatividade. O Capítulo III descreve a metodologia utilizada para a realização do estudo. O Capítulo IV trata das aplicações específicas das fontes radioativas nos perfis de densidade e porosidade, além dos aspectos de radioproteção utilizados para transporte e armazenamento de fontes radioativas, assim como o controle de pessoal envolvido com a atividade de perfilagem radioativa. Por fim, o Capítulo V apresenta as conclusões da pesquisa realizada.

Capítulo II

Aspectos Teóricos

2. ASPECTOS TEÓRICOS

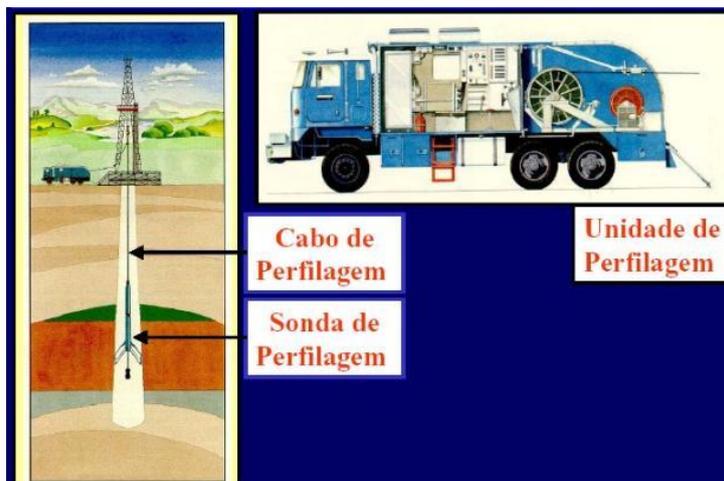
2.1 Perfilagem de Poços

Na exploração de petróleo, através do mapeamento sísmico pode-se identificar possíveis regiões com presença de hidrocarbonetos. A fim de confirmar os prognósticos dos métodos de prospecção, inicia-se a perfuração de poços, onde será estabelecido um caminho entre o reservatório e a superfície, que será utilizado posteriormente para escoamento de fluidos, quando em fase de produção.

Após cada fase da perfuração, é necessário caracterizar as rochas que estão sendo perfuradas e identificar aquelas com potencial para armazenamento de hidrocarbonetos. Essa fase de caracterização das rochas e identificação de fluidos é chamada de avaliação da formação, realizada por meio de testes de formação e perfilagem de poços. A perfilagem é a etapa do processo de avaliação que fornece propriedades das rochas e dos fluidos, litologia, e diâmetro do poço de acordo com a profundidade.

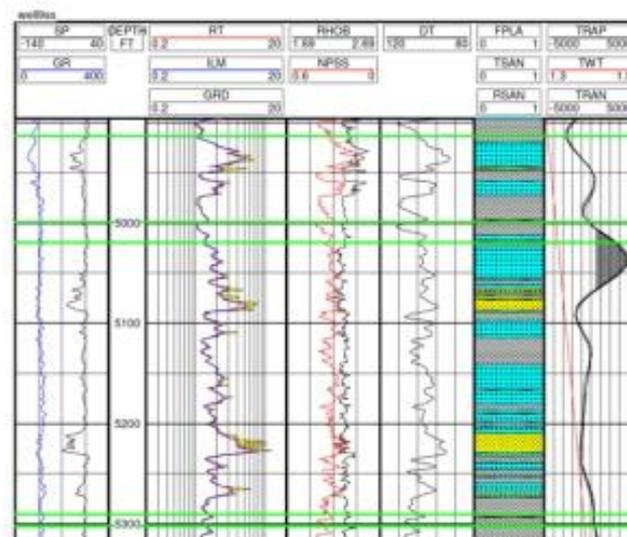
O processo para obtenção de dados ocorre a partir da descida de ferramentas no poço, seguida da transferência das informações através do cabo de perfilagem, e aquisição dos dados na unidade de superfície. A relação gráfica resultante desse processo é chamada de perfil. Os tipos de perfis que serão gerados variam de acordo com a propriedade da rocha avaliada, seja ela elétrica (resistividade elétrica, potencial eletroquímico natural), acústica (tempo de trânsito das ondas sonoras) ou radioativa (radioatividade natural e induzida). A escolha de quais perfis realizar vai depender das necessidades do cliente e do capital disponível (NERY, 1990). As Figuras 1 e 2 mostram um esquema da operação de perfilagem e um exemplo de perfil, respectivamente.

Figura 1 - Esquema de uma operação de perfilagem.



Fonte: Ebah, 2015.

Figura 2 - Exemplo de perfil de poço.



Fonte: HWS Petrophysics, 2015.

A perfilagem está dividida em *Open Hole*, quando realizada em poço aberto, e *Cased Hole*, em poço revestido, também conhecida como “perfilagem de produção”. Operações *open hole* são realizadas logo após a perfuração e fornecem as primeiras avaliações. Em geral, elas indicam dados de porosidade total, densidade e permeabilidade da rocha, resistividade da formação, da água e do filtrado, caliper, fluidos da formação, litologia, desvio das camadas, entre outras informações. Em adição, é possível coletar amostras de fluidos e efetuar pré-teste. Já trabalhos em *cased*

hole são realizados depois da descida do revestimento e, comumente, tem o objetivo de avaliar a cimentação, as condições do poço, condições de produtividade (ou injetividade) e operar canhoneios, daí o nome “perfilagem de produção”.

2.1.1 Tipos de Perfis

Os tipos de perfis variam de acordo com as propriedades das rochas, e do poço em termos geométricos. Segundos THOMAS (2004), os principais perfis são:

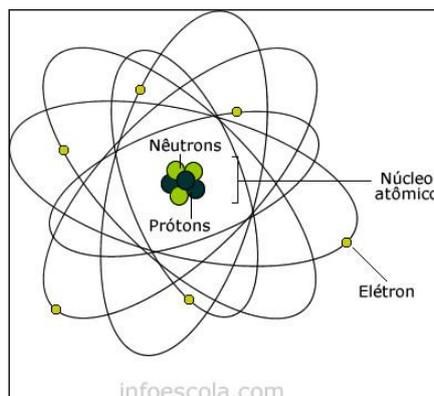
- Propriedades elétricas
 - **Indução (ILD)** – Determina a resistividade da rocha (R_t) por meio da medição de campos elétricos e magnéticos induzidos na formação.
 - **Potencial Espontâneo (SP)**: É a medida da diferença de potencial entre um eletrodo móvel descido dentro do poço e outro fixo na superfície. É utilizado para cálculo da resistividade da água (R_w), a partir dos resultados obtidos. Possibilita a identificação de camadas permoporosas, o cálculo da argilosidade das rochas, e auxilia na correlação de poços.
- Propriedade acústica
 - **Sônico (DT)** – Esse perfil mede a diferença nos tempos de trânsito de uma onda mecânica através das rochas. Dentre as aplicações estão: estimar valores de porosidade da rocha, correlacionar poços, avaliar grau de compactação das rochas, detectar fraturas e fornecer apoio à sísmica para a elaboração do sismograma sintético.
- Propriedade geométrica:
 - **Caliper** – O perfil fornece o diâmetro do poço. Com esse dado, é possível calcular o volume de tampões e/ou de cimento para o revestimento. Permite realizar controle de qualidade de perfis, indicando áreas de *washout* ou grande espessura do *mudcake*. E fornece apoio a operações de teste de formações.
- Propriedades radioativas:

- **Raios Gama (GR)** – É gerado a partir da detecção da radioatividade natural total da formação geológica. É utilizado para identificar litologia, especialmente presença de folhelhos, que geralmente apresentam maior porcentagem dos elementos radioativos K (potássio), Ur (Urânio) e Th (Tório). Permite cálculo do volume de argilas.
- **Neutrônico (NPHI)** - É um perfil gerado por meio da emissão de nêutrons da fonte radioativa (dentro da ferramenta no poço) para a formação. Os nêutrons interagem com a formação e com os fluidos presentes nela e em seguida são contados nos detectores. De acordo com essa medida, o perfil fornece estimativa da porosidade da rocha, indica zonas de hidrocarbonetos leves ou gás, e auxilia na identificação da litologia.
- **Densidade (RHOB)** – Raios gama são emitidos pela fonte radioativa localizada dentro da ferramenta no poço, e interagem com os elétrons orbitais dos componentes das rochas. De acordo com a contagem feita pelos detectores, obtém-se uma estimativa da densidade das camadas, que permite o cálculo da porosidade e a identificação das zonas de gás.

2.2 Princípios de Radioatividade

2.2.1 Estrutura da Matéria

A menor parte da matéria é o átomo. Sua estrutura é formada por um núcleo pesado de carga elétrica positiva e por elétrons de carga negativa em volta. O núcleo concentra a massa do átomo e é composto por prótons, de carga elétrica positiva, e nêutrons de massa semelhante, porém sem carga. A função do nêutron é manter os prótons juntos, sem que a força de repulsão entre eles (cargas de mesmo sinal) seja grande o suficiente para desintegrar o núcleo atômico. A Figura 3 mostra a estrutura de um átomo:

Figura 3 - Estrutura do átomo de ¹²Carbono.

Fonte: CARDOSO, 2003^b.

Os elementos químicos são definidos a partir do número de prótons que o átomo contém, ou número atômico (Z). Outra numeração relacionada ao átomo é o número de massa (A) que representa a soma do número de nêutrons com o número de prótons.

Na natureza, existem elementos com mesmo número de prótons e diferente massa atômica, ou diferente número de nêutrons. Esses elementos são chamados de isótopos. Alguns isótopos têm núcleos instáveis e são chamados de radioisótopos, pois emitem radiação para voltarem a situação de estabilidade.

2.2.2 Radioatividade

A radioatividade é o fenômeno natural ou artificial caracterizado pela emissão de radiação por substâncias ou elementos químicos radioativos. Esse fenômeno é comum em átomos muito pesados como o urânio, o tório e o rádio com 92, 90 e 88 prótons, respectivamente. A desintegração dos átomos e consequente liberação de energia (em forma de partículas ou ondas eletromagnéticas) até que atinjam a estabilidade é chamada de decaimento.

O tempo que cada elemento leva para alcançar sua estabilidade, ou completar o decaimento, é bastante variável. O período de tempo necessário para que metade dos isótopos de uma amostra se desintegre é chamado de meia-vida. Na perfilagem de poços, por exemplo, é importante conhecer a meia-vida do elemento presente nas fontes, pois o tempo necessário para se repetir uma calibração varia de acordo com essa

medida, onde elementos com grande meia-vida não precisam ser calibrados com tanta frequência (CARDOSO, 2003^b).

2.2.3 Tipos de radiação

A radiação é emitida por isótopos instáveis em forma de partícula e/ou de onda eletromagnética, a fim de alcançar a estabilidade, e está dividida em dois grandes grupos: ionizante e não-ionizante. As radiações não-ionizantes são aquelas de frequência relativamente baixa, que não possuem energia suficiente para ionizar átomos, como por exemplo a luz visível, calor e ondas de rádio. Já as radiações ionizantes têm altos níveis de energia e capacidade para modificar átomos através de sua ionização. Segundo Tauhata (2013), as radiações ionizantes do tipo partícula são:

- Radiação alfa (α): Possui carga positiva e é constituída de 2 prótons e 2 nêutrons, como o núcleo do gás nobre Hélio (He). Apresenta grande massa quando comparada com as outras formas de radiação e, devido a esse fator, tem baixo poder de penetração na matéria, sendo facilmente contida por uma folha de papel, por exemplo. Quando um átomo libera uma partícula alfa, ele se torna outro elemento, uma vez que o número de prótons é alterado.
- Radiação beta (β): Partículas beta são resultantes da transformação de nêutrons em prótons, quando o núcleo apresenta excesso de nêutrons. Esse tipo de radiação tem carga elétrica negativa, com massa equivalente à de um elétron. Apresenta maior velocidade e maior poder de penetração comparada à partícula α , chegando a atravessar alguns milímetros de alumínio.
- Nêutrons: São partículas que surgem por meio de colisões entre átomos na atmosfera, e após o processo de fissão nuclear, onde grandes átomos com elevado número de prótons e nêutrons são divididos em átomos menores. É uma partícula sem carga e com altíssimo poder de penetração. Necessita de elementos como concreto, chumbo e/ou água para agirem como barreira.

Tauhata (2013) menciona também as radiações ionizantes em forma de energia eletromagnética que podem ser liberadas por átomos instáveis. Elas são:

- Radiação Gama (γ): Raios gama são um tipo de radiação emitida sempre que o átomo libera alguma partícula nuclear (alfa ou beta), no intuito de estabilizar o átomo liberando a energia que ainda existe em excesso. Os raios gama são ondas

eletromagnéticas, que viajam na velocidade da luz e não possuem massa nem carga, o que lhes oferece grande capacidade de penetração.

- Raios X: São radiações eletromagnéticas de alta energia, que têm origem na eletrosfera ou no freamento de partículas carregadas no campo eletromagnético do núcleo atômico ou dos elétrons. São capazes de atravessar materiais de baixa densidade, como os músculos e são absorvidos por materiais de densidades mais altas, como os ossos.

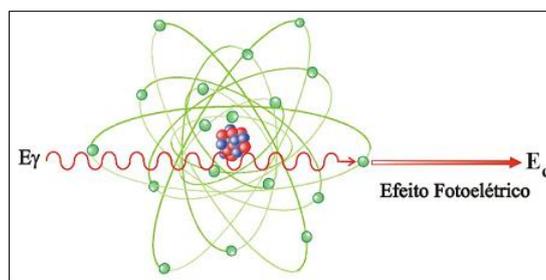
Na perfilagem de poços, as radiações emitidas pelas fontes radioativas são raios gama e nêutrons. Portanto, para fins de aplicações das fontes nessa etapa da exploração de petróleo, serão enfatizadas apenas as interações e medições relacionadas a esses dois tipos de radiação.

2.2.4 Interação da radiação eletromagnética com a matéria

No contexto de radiação, interações são os processos que causam alteração da energia e/ou da direção da radiação. Em relação à radiação gama, os principais modos de interação com a matéria são o efeito fotoelétrico, o efeito Compton e a produção de pares. A probabilidade de cada tipo de interação ocorrer varia de acordo com o valor da energia da onda eletromagnética (TAUHATA, 2013).

O efeito fotoelétrico é caracterizado pela transferência total de energia da radiação (gama ou raio x) ao elétron com que interage, que é ejetado do orbital com energia cinética definida. A Figura 4 representa essa forma de interação, que ocorre predominantemente quando a radiação é emitida com baixo teor energético, menor que 75 keV.

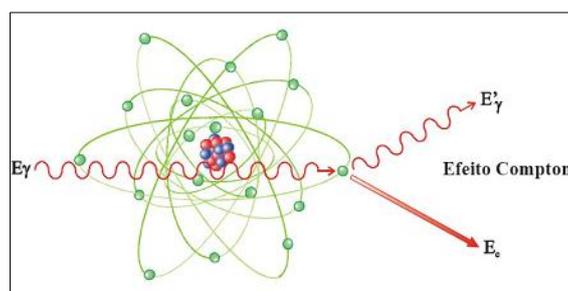
Figura 4 – Representação do Efeito Fotoelétrico.



Fonte: Tauhata, 2003.

No efeito Compton, o raio gama transfere apenas parte de sua energia para o elétron com que interage e é espalhado, mudando de direção e sofrendo uma redução em sua energia. A Figura 5 demonstra esse efeito, que normalmente ocorre quando a radiação emitida apresenta energia entre 75 keV e 10 MeV.

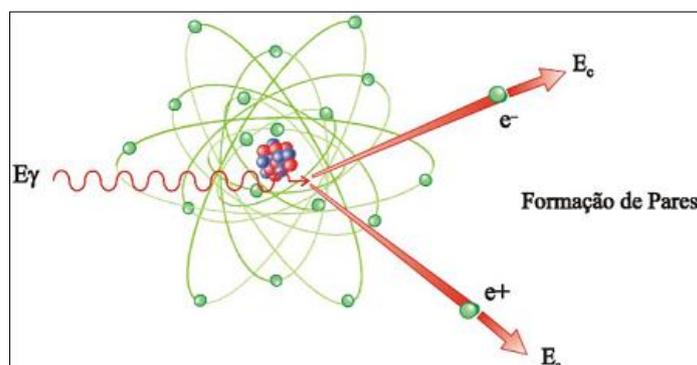
Figura 5 – Representação do Efeito Compton.



Fonte: Tauhata, 2003.

A produção de pares é caracterizada por ocorrer quando uma radiação gama de alto nível energético, acima de 1,02 MeV, passa perto de núcleos de número atômico Z elevado. Na interação, a radiação dá origem a um par de elétron-pósitron. A Figura 6 mostra um esboço desse tipo de interação.

Figura 6 - Representação do efeito de Produção de Pares.



Fonte: Tauhata, 2003.

A fonte radioativa utilizada na perfilagem para emissão de radiação gama é a fonte de Césio 137 (^{137}Cs), que emite raios gama com intensidade energética de 662 keV. Portanto, a interação que ocorre entre os raios gama emitidos e a rocha é primariamente o efeito Compton.

2.2.5 Interação de nêutrons com a matéria

A interação dos nêutrons com a matéria está interligada com o nível de energia dessas partículas. A Tabela 1 indica como eles são denominados de acordo com seu nível energético.

Tabela 1 – Denominação dos nêutrons de acordo com sua energia.

Denominação	Energia
Térmico	0,025 eV
Epitérmico	$0,025 \text{ eV} \leq E \leq 0,4 \text{ eV}$
Lento	$1 \text{ eV} \leq E \leq 10 \text{ eV}$
Lento	$300 \text{ eV} \leq E \leq 1 \text{ MeV}$
Rápido	$1 \text{ MeV} \leq E \leq 20 \text{ MeV}$

Fonte: Tauhata, 2013.

Os nêutrons interagem em geral por absorção (captura) ou espalhamento. Com relação às reações de absorção, as mais comuns são captura radiativa e a fissão. Ambos processos ocorrem com mais frequência com nêutrons térmicos ou lentos. Nessas reações, os nêutrons são absorvidos pelos núcleos dos átomos e há liberação de raios gama, às vezes prótons e partículas alfa. Por mais que qualquer elemento possa capturar nêutrons, essa não é uma interação comum, exceto para poucos elementos como o Cloro, tipicamente presente na água salgada. Portanto, é um tipo de interação que pode trazer respostas no perfil neutrônico, quando na presença desse elemento.

As interações por espalhamento podem ocorrer de forma elástica ou inelástica. No espalhamento inelástico a colisão é entre nêutrons e núcleos de massa maior, formando um núcleo composto que decai em um outro nêutron de menor energia e libera radiação gama. É o tipo de colisão que ocorre entre nêutrons e átomos de carbono e oxigênio, por exemplo. Mas, a principal maneira de frear um nêutron é através de colisões elásticas, com núcleos de hidrogênio, que apresentam massa igual à do nêutron. Ele transfere parte de sua energia para o núcleo alvo e muda de direção. É a partir desse tipo de colisão que se identifica a existência de hidrogênio nos reservatórios, seja ele relacionado à presença de água ou de hidrocarbonetos.

A fonte radioativa utilizada na perfilagem para emitir nêutrons na formação é a fonte de Amerício 241 - Berílio ($^{241}\text{Am-BE}$), onde o amerício libera partículas alfa que ativam o núcleo do berílio, provocando assim a emissão de nêutrons. A radiação é

liberada com energia de 4,5 MeV, o que classifica o nêutron como rápido, favorecendo a ocorrência de interações do tipo espalhamento.

2.2.6 Grandezas Radiológicas e Unidades

Para tratar de aplicações de fontes radioativas é importante entender o conceito de grandezas e unidades relacionadas à emissão de radiação, como a atividade de uma fonte. Já em termos de aspectos de radioproteção, a exposição à radiação e fatores de dosagem são necessários para quantificar limites aceitáveis para atividade com material radioativo. Tauhata (2013) define algumas dessas grandezas, que são explicadas nessa seção.

2.2.6.1 Atividade (A)

A atividade de uma fonte radioativa é a razão de desintegração de uma amostra de átomos por uma unidade de tempo, ou seja, é a taxa de desintegração da amostra, e é medida na unidade Bq (*Becquerel*), ou em Ci (*Curie*), onde:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ desintegração por segundo}$$

$$1 \text{ Ci} = 3 \times 10^7 \text{ Bq}$$

2.2.6.2 Exposição (X)

A exposição mede a razão entre a carga elétrica gerada pela ionização e a massa do volume no material. É uma grandeza válida apenas para fótons (raio X ou γ). Sua unidade é R (*roentgen*) e está relacionada com a unidade do SI Coulomb/kilograma (C/kg), onde:

$$1 \text{ R} = 2,58 \cdot 10^{-4} \text{ C/kg}$$

2.2.6.3 Dose absorvida (D)

Um dos efeitos da interação da radiação com a matéria é a transferência de energia. A dose absorvida é relação entre a energia absorvida e a massa do volume do material atingido, ou seja, é a energia média depositada em uma massa elementar dm. A unidade de medição no SI é J/kg que é igual à Gy (*Gray*). A unidade antiga de dose absorvida, o rad (*radiation absorbed dose*) está relacionada ao gray da seguinte forma:

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$$

2.2.6.4 Dose equivalente (H)

Dose equivalente é a grandeza mais importante quando se trata de radioproteção. Essa grandeza relacionada a um tecido ou órgão é definida como sendo a dose absorvida D média em um determinado tecido humano, ou o produto entre D e o Fator de Qualidade (Q , adimensional), que é determinado de acordo com o tipo de radiação. A unidade utilizada para representar essa grandeza é o Sv (*Sievert*). A unidade antiga denominava-se *rem* (*roentgen equivalent man*), sendo $1\text{Sv} = 100 \text{ rem}$.

2.2.6.5 Dose efetiva (E)

Dose efetiva (E) é a soma das doses equivalente ponderadas nos diversos órgãos e tecidos (T). Ou seja, é o somatório do produto $H_T \times \omega_T$, onde ω_T é o fator de ponderação de órgão e tecido. Ele é mais alto para gônadas e mais baixo para a pele. A unidade utilizada para representar essa grandeza é o Sv (*Sievert*).

Capítulo III

Metodología

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para desenvolver o estudo foi baseada em revisão bibliográfica, acompanhamento de operações de perfilagem no campo, observação de processo de calibração de ferramentas que utilizam fontes radioativas, realização de cursos online referentes a procedimentos a serem seguidos em operações com material radioativo, discussões com profissionais da área de *Wireline* (responsável por perfilagem de poços), elaboração de seminários a respeito de ferramentas de perfilagem, e acompanhamento de atividades do Engenheiro *Compliance* da locação em que foi realizado o estágio, responsável por garantir a segurança em atividades envolvendo radioativos, bem como tratar de licenças necessárias para operar esse tipo de material.

Os conceitos relacionados à perfilagem de poços, aplicações das fontes radioativas nessa fase da perfuração, funcionamento das ferramentas de perfilagem, assim como a geração e interpretações de perfis, foram adquiridos no decorrer do estágio, por meio de observação da preparação de trabalhos de perfilagem, visitas a operações de campo, elaboração de seminário sobre ferramentas envolvendo fonte radioativa, estudo de materiais utilizados em cursos da empresa Schlumberger, além de revisão de literaturas gerais em termos de perfilagem. As Figuras 7 e 8 mostram ferramentas armazenadas em *racks* após atividade de manutenção (incluindo ferramenta que mantém fonte radioativa, quando em operações de campo) durante a preparação de trabalhos de perfilagem, e visualização do acompanhamento de uma operação de campo, respectivamente.

Figura 7 – Ferramentas de perfilagem apoiadas em *racks* após manutenção.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 8 – Operação de perfilagem *onshore*. Equipamento de *rigup* montado e ferramentas dentro do poço.



Fonte: Elaborado pela autora.

Através do acompanhamento de atividades de calibração de ferramentas com fontes radioativas foi possível aprender o procedimento físico que ocorre até que a ferramenta esteja calibrada, e o processo de segurança que deve ser seguido, a fim de atender às regulamentações exigidas pela CNEN. A Figura 9 mostra a área de calibração, em ambiente isolado.

Figura 9 – Área de calibração em ambiente isolado, indicando pontos de levantamento radiométrico para calibração de ferramenta de densidade.



Fonte: Elaborado pela autora.

Todas as instalações que realizam perfilagem radiativa de poços precisam ter um serviço de radioproteção, conforme prescrito na norma CNEN NE-3.02 (1988). Para controlar esse serviço é necessário um supervisor de radioproteção, certificado pela CNEN. Dentre suas atribuições estão o controle das fontes para as operações de perfilagem radiativa e dos rejeitos (fontes que não mais são utilizadas), indicação das áreas a serem controladas, monitoramento de documentação necessária para transporte de fontes, bem como garantia do funcionamento adequado dos equipamentos de monitoração radiológica utilizados nas operações. Eles também são responsáveis pelo treinamento dos indivíduos ocupacionalmente expostos (IOE) das instalações, pela promoção de cursos periódicos de atualização, bem como pela elaboração dos relatórios de dose dos IOE. (ARAÚJO, 2010).

O acompanhamento das atividades do Engenheiro *Compliance* possibilitou coleta de informações a respeito das funções por ele exercidas, como as citadas no parágrafo anterior. Foi possível conhecer os procedimentos para transporte e armazenamento das fontes, as blindagens utilizadas, além do controle de dosímetros dos IOE e documentação necessária para manter a empresa em conformidade com os regulamentos a respeito de radioproteção. As Figuras 10 e 11 mostram blindagens utilizadas para fontes de ^{137}Cs e $^{241}\text{Am-Be}$, e tipo de dosímetro exigido pela CNEN para controle de dosagem.

Figura 10 – Tipos de blindagens de fontes radioativas. À esquerda, blindagem utilizada para fonte de ^{137}Cs e à direita para fonte de $^{241}\text{Am-Be}$.



Fonte: Schlumberger, 2013.

Figura 11 – Dosímetros da Sapra exigidos pela CNEN.



Fonte: Sapra Landauer, 2015.

Por fim, embasamento teórico com relação à radiação e radioproteção foi em grande parte obtido de materiais fornecidos pela CNEN e pelo livro intitulado “RADIOPROTEÇÃO E DOSIMETRIA: FUNDAMENTOS”, utilizado no curso de preparação de supervisores de radioproteção oferecido por esse órgão.

Capítulo IV

Resultados e Discussões

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, são apresentadas as aplicações das fontes radioativas nos perfis de densidade e porosidade. São definidos os níveis de energia que as radiações gama e nêutron são emitidas na formação, assim como o modo de interação delas com a rocha e fluidos da formação. Os princípios de funcionamento das ferramentas que utilizam as fontes radioativas são também apresentados, além da forma de detecção da radiação, após interação com rocha e fluidos. Por fim, são definidos os efeitos biológicos que a radiação pode vir a causar nos seres humanos e os aspectos de radioproteção que devem ser seguidos afim de garantir a segurança das operações.

4.1 RADIOATIVIDADE NA PERFILAGEM DE POÇOS

Na perfilagem de poços, os princípios radioativos estão aplicados nas propriedades radioativas naturais das rochas, utilizadas em perfis de *Gama ray* natural, e na emissão de radiação por meio de fontes radioativas, empregadas em perfis de radiação induzida: densidade (gama-gama) e porosidade (nêutron). A fim de estudar a aplicação das fontes radioativas na perfilagem, serão analisados apenas os perfis de densidade e neutrônico.

4.1.1 Perfil neutrônico

O perfil neutrônico é um importante perfil realizado na maioria dos serviços de perfilagem. É utilizado para determinar a porosidade das rochas, detectar zonas de hidrocarbonetos leves (gás), além de auxiliar na identificação de litologias. Sua principal medida é a porosidade total da formação. Esse é um dado fundamental para a resolução da equação de Archie (mostrada abaixo) e, juntamente com dados de outros perfis, colabora com a determinação da saturação de água (S_w) do reservatório e consequente cálculo da saturação de óleo (S_o).

$$\frac{1}{R_t} = \frac{\Phi^m}{a} \times \frac{S_w^n}{R_w} \quad (1)$$

Onde,

R_t = Resistividade da rocha

Φ = Porosidade

m = Expoente de cimentação

a = Fator de litologia

S_w = Saturação de água da formação

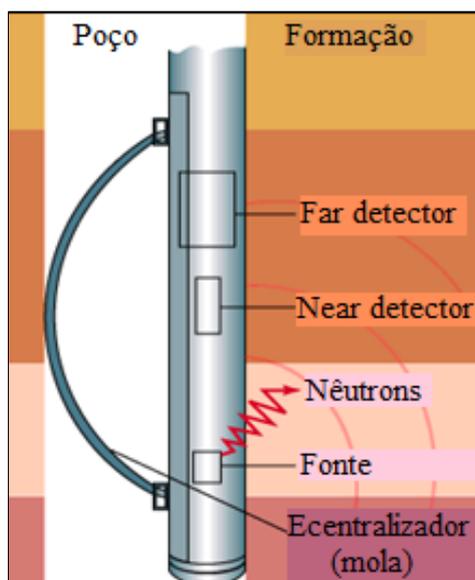
n = Expoente de saturação

R_w = Resistividade da água da formação

4.1.1.1 A Ferramenta e seus Componentes

A ferramenta de perfilagem neutrônica, ou sonda de perfilagem, é o meio mecânico que permite a movimentação da fonte e dos detectores no poço, assim como a transferência dos resultados até os equipamentos de aquisição na superfície, por meio da conexão com o dispositivo de telemetria e cabo de perfilagem. Além da fonte e dos detectores, outro elemento importante da sonda é a mola localizada na lateral da ferramenta, que permite que ela desça encostada na parede do poço, reduzindo os efeitos da lama e do reboco na resposta do perfil. A Figura 12 mostra um esquema da ferramenta utilizada para obtenção do perfil neutrônico.

Figura 12 – Modelo de ferramenta de perfilagem neutrônica.



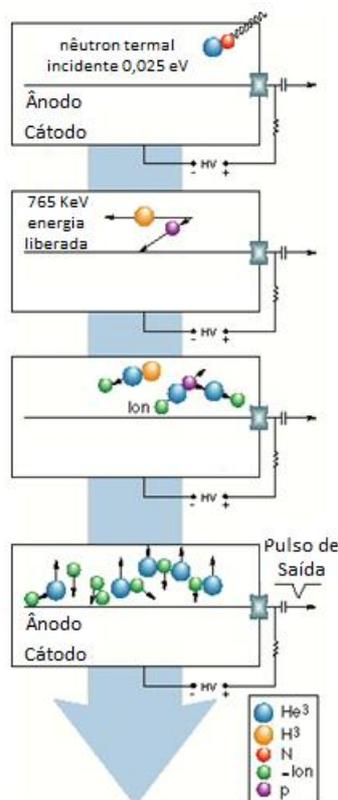
Fonte: Schlumberger, 2015^a.

A fonte radioativa mais utilizada para gerar o perfil neutrônico é a $^{241}\text{Am-Be}$ (Amerício 241 – Berílio), onde o Amerício é o elemento radioativo e o Berílio apresenta nêutrons fracamente unidos. O isótopo irá bombardear o núcleo do Berílio com partículas alfa, o que provocará a expulsão de alguns nêutrons e esses serão emitidos para a formação.

Essa fonte emite nêutrons do tipo rápido na formação, devido ao seu nível de energia, em torno de 2 MeV. Desse modo, as principais interações com a matéria serão do tipo espalhamento.

Para identificar as respostas da formação, a sonda apresenta dois detectores de Hélio-3, um mais próximo da fonte (*near detector*) e um mais afastado (*far detector*). Eles são programados para reconhecer apenas nêutrons em níveis epitermais ou termiais. A medição é feita de forma indireta, uma vez que os nêutrons não possuem carga. O elemento Hélio-3 é um excelente receptor, pois é sensível a nêutrons e age também como gás ionizante. Sua função é transformar a contagem de nêutrons epitermais ou termiais em corrente elétrica de intensidade equivalente à energia do nêutron recebido. Isso ocorre por meio da formação de próton e trítio após a colisão do nêutron com o hélio. O trítio e o próton quando reagem com o hélio geram íons positivos e elétrons livres, que são acelerados, gerando corrente elétrica. A Figura 13 indica o processo de geração de sinal elétrico dentro do detector.

Figura 13 – Processo de produção de sinal elétrico dentro do detector de Hélio-3.



Fonte: Schlumberger, 2015^a.

4.1.1.2 Princípio de Funcionamento

A determinação da porosidade da rocha é baseada no índice de hidrogênio da formação (gramas de hidrogênio por unidade de volume). Esse elemento tem núcleo de massa muito semelhante à do nêutron e necessita de apenas 18 colisões para levar o nêutron do estado energético rápido (2 MeV) para o estado térmal (0.025 MeV), interagindo de forma elástica. Quando os nêutrons atingem o nível térmal, eles ficam disponíveis para serem capturados. Essa captura é feita por qualquer elemento presente na formação, com destaque para o Cloro (bom absorvedor) e Cádmio, excelente para blindagens. A Tabela 2 mostra a seção eficaz de espalhamento e captura de nêutrons para alguns elementos, comprovando o destaque do hidrogênio para o espalhamento e do cloro para absorção de nêutrons.

Tabela 2 – Seção eficaz de espalhamento e captura de nêutrons para alguns elementos

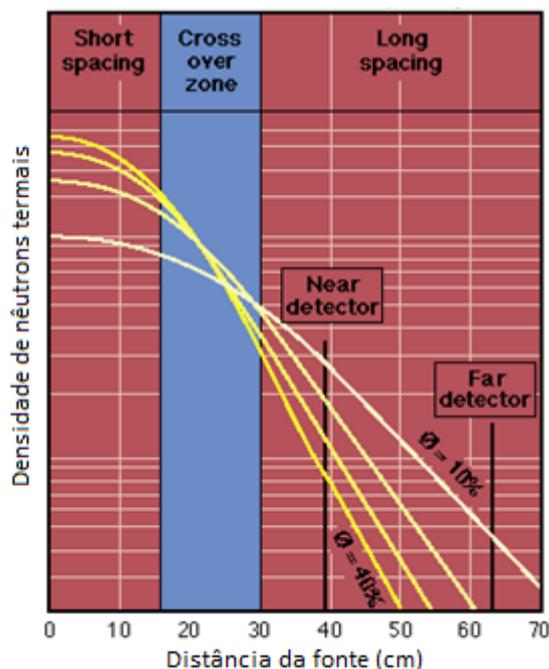
Elemento	Número Atômico (Z)	Seção eficaz de captura (Barns)	Seção eficaz de espalhamento (Barns)
H	1	0,3	20
C	6	0,0032	4,8
O	8	0,0002	4,1
Si	14	0,13	2,7
Cl	17	31,6	10
Cd	48	2500	5,3

Fonte: Schlumberger, 2015^a.

Desse modo, uma formação eficaz no amortecimento de nêutrons indica um alto índice de hidrogênio (HI), e é certamente uma formação porosa, uma vez que esse elemento é característico da água e dos hidrocarbonetos, fluidos que preenchem os poros das rochas. Assim, quanto maior o HI, mais nêutrons são espalhados e em seguida capturados, resultando em uma menor contagem nos detectores.

A Figura 14 mostra como a porosidade é avaliada a partir da relação entre a concentração de nêutrons termiais e a distância dos detectores à fonte. A zona *short spacing*, localizada bem próxima a fonte, sofre bastante efeito do poço, sendo a porosidade diretamente proporcional à densidade de nêutrons termiais. Essa zona tende a uma região de incerteza (*cross over zone*), que não tem aplicação para o cálculo da porosidade, uma vez que não há modificação dessa propriedade com relação à densidade de nêutrons termiais. A melhor localização para os detectores, portanto, é na região *long spacing* que oferece maior sensibilidade à medição de porosidade. Eles são dispostos a 38 e 63,5 centímetros da fonte, onde a porosidade é inversamente proporcional à concentração de nêutrons termiais. (NERY, 1990). A Figura 14 apresenta as curvas de porosidade nas zonas *short*, *cross over* e *long spacing*.

Figura 14 – Avaliação da porosidade em termos da relação entre a concentração de nêutrons termiais e a distância dos detectores à fonte.



Fonte: Schlumberger, 2015^a.

A principal medida da ferramenta é a razão da contagem do detector mais próximo pela do mais distante (N/F). A porosidade é diretamente proporcional à divisão da contagem, onde a inclinação da curva na Figura 14 determina o valor final. Quanto maior a inclinação, maior a porosidade. Desse modo, em formações mais porosas, mesmo que menos nêutrons sejam contabilizados nos detectores individualmente – devido ao maior amortecimento e captura –, a divisão entre as contagens dos detectores é um valor maior do que para uma formação de menor porosidade. O uso da razão N/F em vez da contagem individual de cada detector contribui para a redução dos efeitos do poço.

4.1.1.3 Interpretação do Perfil

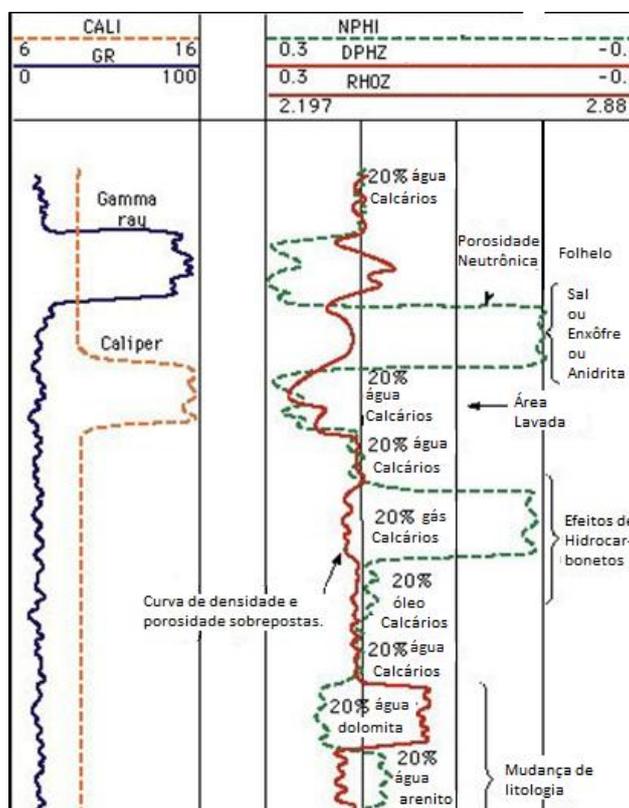
A interpretação do perfil neutrônico, assim como a dos demais, é feita em conjunto com a observação do comportamento de curvas de outros tipos de perfis. A elaboração do perfil neutrônico é feita de acordo com o índice de hidrogênio da formação. A partir das curvas obtidas, é possível identificar zonas de gás, pois hidrocarbonetos leves apresentam um baixo HI, e conseqüentemente um valor baixo de

porosidade no perfil, uma vez que as moléculas gasosas são mais separadas, resultando em uma menor massa de hidrogênio por unidade de volume. Assim, uma queda na curva de porosidade (NPHI), ou um grande espaçamento entre essa curva e a da porosidade determinada pelo perfil de densidade (DPHZ), podem ser um indicativo da presença de gás.

Quanto à identificação de argilas, constituintes dos folhelhos, o perfil de porosidade indica erroneamente uma alta porosidade nessa área. Isso se dá devido à grande quantidade de água rodeada aos poros, *bound water*, o que induz um alto índice de hidrogênio. Porém, comparando com outros perfis, como o de gama-ray, pode-se apontar que é uma região de folhelhos, em virtude do alto valor de GR.

Já zonas de óleo e de água apresentam valores semelhantes de porosidade, devido a um índice de hidrogênio parecido, sendo a porosidade na presença de óleo um pouco menor. Sabe-se também que a identificação do tipo de fluido é feita mediante observação do espaçamento entre as curvas NPHI e RHOZ. Tendo como exemplo a porosidade em calcário (*limestone*), essas duas curvas ficam sobrepostas quando há água, e apresentam um pequeno espaçamento quando o fluido que preenche os poros é o óleo. A Figura 15 mostra os efeitos citados acima em um perfil.

Figura 15 – Exemplo de perfil com indicação de interpretação.



FONTE: Schlumberger, 2015^a.

4.1.1.4 Calibração

À medida que o tempo passa, as fontes radioativas se desintegram de acordo com suas meias-vidas (conceito abordado no tópico 2.2.2), o que acarreta diferenciação nos resultados obtidos. Para garantir que a ferramenta continue fornecendo resultados precisos, ela deve ser calibrada regularmente. No caso da ferramenta que gera o perfil de porosidade, a calibração *master* é feita trimestralmente. O processo é realizado na área de calibração (região isolada), que contém um tanque de água elevado 1 metro do chão. O procedimento é iniciado com a medição da temperatura da água no tanque e do diâmetro do *housing* da ferramenta – tubo metálico que envolve a parte eletrônica da ferramenta a fim de evitar danos mecânicos durante a descida e/ou subida no poço. Essas medições são feitas para que os efeitos desses parâmetros possam ser corrigidos quando inseridos no software que calcula o resultado da porosidade.

O segundo passo é a medição da porosidade com a ferramenta fora do tanque e sem a fonte dentro. Em seguida coloca-se a ferramenta dentro do tanque, agora com a fonte, e faz-se outra medição. Essa medição é corrigida para os parâmetros medidos inicialmente (temperatura da água e diâmetro do *housing*), e são computados os ganhos e *offsets*. Em seguida, o valor que deve ser mostrado pela curva TNRH do perfil deve ser de 2,159, que é o equivalente a 18% de porosidade em arenito a 75 °F. Para finalizar, a ferramenta é testada e o processo é finalizado.

4.1.2 Perfil de densidade

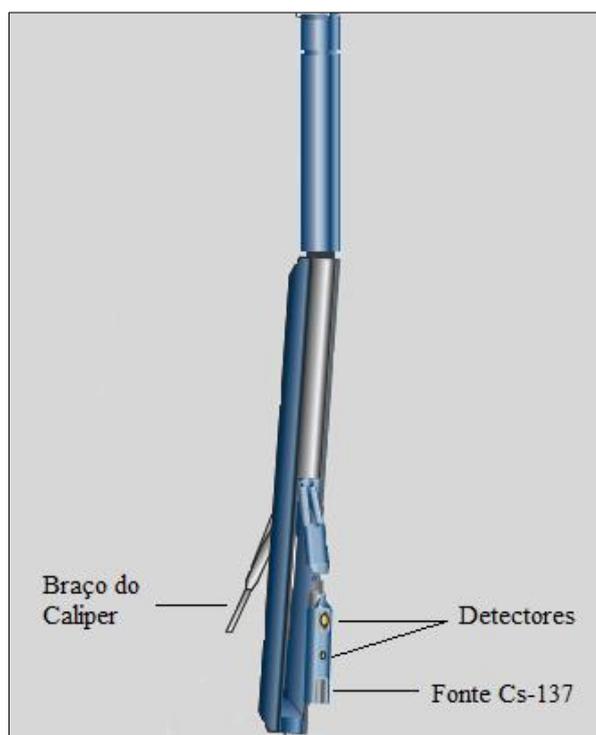
O perfil de densidade, assim como o neutrônico, é também realizado na maioria dos serviços de perfilagem. O perfil realiza, na verdade, a medição da massa específica total da formação, porém, é convencionalmente chamado de perfil de densidade. É utilizado para determinar a densidade de *Bulk* (densidade da matriz somada à do fluido), identificar litologias, além de fornecer dados de porosidade por meio do princípio de que a densidade é inversamente proporcional à porosidade.

4.1.2.1 A Ferramenta e seus Componentes

A ferramenta que faz a medição da densidade contém a fonte radioativa de ^{137}Cs e três detectores do tipo cintiladores, que são blindados da radiação proveniente da fonte

com chumbo ou tungstênio. Além desses componentes, apresenta “braços” que possibilitam que a caixa da fonte possa ficar encostada na parede do poço, reduzindo os efeitos de fluido de perfuração e reboco. A “pata” que faz a medição do perfil caliper também é localizada nessa ferramenta. A Figura 16 demonstra essa ferramenta.

Figura 16 – Esboço da ferramenta que gera o perfil de densidade.



Fonte: Schlumberger, 2001.

A fonte radioativa de ^{137}Cs emite raios gama na formação com nível de energia de 662 MeV, tem atividade de 1.7 Ci e meia-vida de 30,2 anos (SCHLUMBERGER, 2015^b). A Figura 17 apresenta um tipo de porta fonte utilizado nas ferramentas de perfilagem de densidade. Nele, internamente está colocada uma fonte de ^{137}Cs . Esse equipamento possui uma rosca para fixá-lo nas blindagens de transporte e no interior das ferramentas.

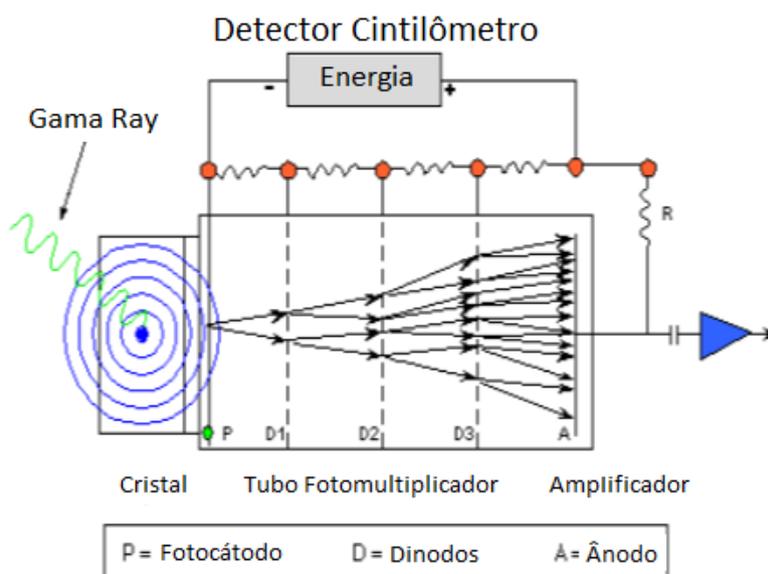
Figura 17 – Fonte de ^{137}Cs utilizada nas ferramentas de perfilagem para perfil de densidade.



Fonte: Araújo, 2010.

Os detectores são de Iodeto de Sódio (NaI) e do tipo cintilômetro. Quando os raios gama atingem o cristal do detector, eles são convertidos em um feixe de luz, que atinge o fotocátodo (ponto P na Figura 18). O fotocátodo é sensível à luz e emite elétrons para o fotomultiplicador. Lá os elétrons são multiplicados para que possam gerar sinal elétrico. O sinal fornecido ao final do processo é proporcional à energia dos raios gama recebidos na entrada (OLIVEIRA, 2005). A Figura 18 mostra o procedimento que ocorre nos detectores até a saída do pulso elétrico.

Figura 18 – Funcionamento dos detectores cintilômetros.



Fonte: Schlumberger, 2015^b.

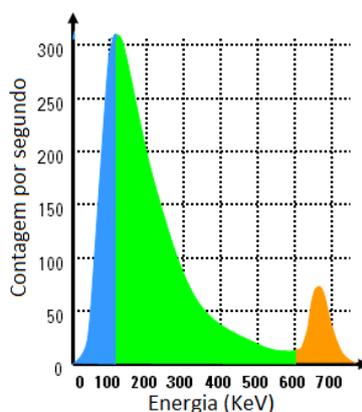
4.1.2.2 Princípio de Funcionamento

O perfil de densidade é corrido apenas na subida das ferramentas. Isso se dá pelo fato desse equipamento ter um braço que faz a medição do caliper e esse braço só é aberto (pressionando a caixa da fonte radioativa na parede) no momento da subida, pois haveria muito desgaste e possibilidade de quebra se estivesse aberto durante a descida.

Quando a ferramenta começa a subir, ela é ligada e a fonte de ^{137}Cs inicia a emissão de raios gama na formação a um nível de energia de 662 MeV, o que preestabelece o tipo de colisão com o meio, que será pelo Efeito Compton. Os raios gama, então, colidem com os elétrons da formação, e perdem parte de sua energia. Alguns atingem níveis muito baixos de energia ($< 75 \text{ KeV}$) (SCHLUMBERGER, 2015^b), e sofrem absorção fotoelétrica.

Os detectores medem o quanto o raio gama reduziu sua intensidade de energia com as interações e os resultados geram um espectro, onde a região de baixa energia (cor azul, Figura 19) é caracterizada pelo efeito fotoelétrico e é utilizada para avaliação da litologia, e a região de energia média (cor verde, Figura 19) é utilizada para determinação da densidade. O eixo vertical do gráfico indica a contagem por segundo feita nos detectores. Uma menor contagem de raios gama na região de baixa energia indica a ocorrência de mais absorção fotoelétrica, portanto maior é o Z da formação. E quanto menor a contagem na região de nível médio de energia, maior é a densidade do meio, uma vez que isso implica maior intensidade de espalhamento Compton. A Figura 19 a seguir ilustra um exemplo de espectro de energia obtido com a ferramenta de densidade.

Figura 19 – Espectro de energia gerado com o perfil de densidade.



Fonte: Schlumberger, 2015^b.

A queda no nível energético do feixe de raios gama está diretamente relacionada com a densidade eletrônica do meio pela seguinte equação:

$$I = I_0 \times e^{-\mu x \rho_e} \quad (2)$$

Onde,

I = Intensidade do feixe radioativo no detector;

I_0 = Intensidade do feixe radioativo na fonte;

μ = coeficiente de absorção de massa;

x = distância entre a fonte e o detector;

ρ_e = densidade eletrônica do meio (número de elétrons por volume);

O princípio de funcionamento da ferramenta é, portanto, baseado na determinação da densidade eletrônica da formação. Essa densidade é diretamente proporcional à densidade de *bulk*, como indicado na equação abaixo:

$$\rho_e = 2 \left(\frac{Z}{A} \right) \rho_B \quad (3)$$

Onde,

Z = Soma dos números atômicos dos elementos constituintes da rocha;

A = Soma dos pesos atômicos dos elementos constituintes da rocha;

ρ_B = Densidade de Bulk;

4.1.2.3 Interpretação do perfil

Valores de ρ_e , ρ_B , $2 Z/A$ e ρ_a (densidade obtida pela ferramenta) são pré-tabelados, de acordo com experimentos feitos em laboratório, e são relacionados ao tipo de componente da rocha em análise. Dessa forma, com o valor obtido pela ferramenta, obtém-se a densidade de bulk e conseqüentemente o tipo de componente na formação.

A determinação da porosidade através dos dados de densidade obtidos é feita partindo-se do princípio apresentado na equação abaixo, em que pode-se observar que quanto maior a densidade medida, menor será a porosidade da referida formação.

$$\Phi = \frac{\rho_m - \rho_B}{\rho_m - \rho_f} \quad (4)$$

Onde,

Φ = Porosidade

ρ_m = Densidade da matriz

ρ_f = Densidade do fluido

Fazendo uma avaliação gráfica do perfil, com base no perfil da Figura 15, pode-se inferir também que, estando as curvas de porosidade (NPHI) e densidade (DPHZ) sobrepostas, sabe-se que a estimativa do tipo de formação e fluido está correta, ou seja, é calcário (*limestone*) e água (*water*), pois a calibração da ferramenta neutrônica é feita baseada nessas especificações. Presença de gás e óleo são avaliadas de acordo com o espaçamento entre essas duas curvas, como explicado no tópico 4.1.1.3.

4.1.2.4 Calibração

A calibração master dessa ferramenta é feita mensalmente, em período menor que a de porosidade, devido à fonte de ^{137}Cs ter meia-vida bem menor que a de $^{241}\text{Am-Be}$. Logo, seu decaimento é mais rápido, o que requer uma calibração mais frequente para manter os resultados precisos.

O processo é realizado na área de calibração, que contém blocos de alumínio e magnésio, como indicado na Figura 20.

Figura 20 – Bloco de Alumínio utilizado na calibração da ferramenta de densidade.



Fonte: Oliveira, 2005.

A calibração constitui-se em fazer a medição das contagens dos detectores quando a ferramenta é inserida nos blocos de alumínio e magnésio. Primeiramente, faz-se a medição com a ferramenta no bloco de alumínio, em seguida coloca-se uma placa de aço inoxidável no bloco e mede-se novamente. Retira-se a ferramenta do bloco de alumínio e repete o mesmo processo, agora com o bloco de magnésio. Ao final desse procedimento, os ganhos e *offsets* são computados e a ferramenta é testada.

4.2 EFEITOS BIOLÓGICOS DA RADIAÇÃO

Os átomos do nosso corpo estão unidos por forças elétricas, formando moléculas muito pequenas como a molécula da água, e outras muito grandes como a molécula de DNA. A desestabilização dessas moléculas pode ocorrer quando um de seus átomos perde um elétron para uma partícula ionizante, o que resulta na quebra da molécula. (OKUNO, 2013). Radiações utilizadas na perfilagem, como os raios γ e nêutrons, são bastante penetrantes e podem causar sérios efeitos biológicos se expostas aos seres humanos sem a devida proteção radiológica. As características da forma de atuação da radiação no corpo humano são descritas a seguir.

4.2.1 Etapas da Produção do Efeito Biológico

Segundo Tauhata (2013), a sequência dos efeitos é a seguinte:

- Efeitos físicos: caracterizados pela ocorrência da ionização de um átomo, absorção de energia, excitação de átomos e moléculas e quebra de ligações químicas em cerca de 10^{-13} s;
- Efeitos químicos: São definidos como a restauração do equilíbrio químico e ligação de fragmentos das moléculas às outras moléculas, com duração na ordem de 10^{-10} s;
- Efeitos biológicos: Ocorrem em um tempo que varia de dezenas de minutos até dezenas de anos. Nesse período, alterações químicas podem afetar as células de várias maneiras: morte prematura, impedimento ou retardo da divisão celular ou modificação permanente que é passada para células de gerações posteriores. A reação do indivíduo vai depender de fatores como: quantidade total de radiação recebida, dano físico recebido simultaneamente com a dose de radiação

(queimadura, por exemplo), intervalo de tempo durante o qual a quantidade total de radiação foi recebida, entre outros.

- Efeitos orgânicos: Esses efeitos surgem quando a quantidade ou a frequência de efeitos biológicos produzidos pela radiação começam a desequilibrar o organismo humano, com o aparecimento de sintomas e doenças (câncer, catarata).

4.2.2 Mecanismos de ação

Okuno (2013) explica que os mecanismos de ação podem ser de dois tipos:

- Mecanismo direto, quando a radiação atinge diretamente o DNA, modificando-o, podendo causar desde mutação genética até morte celular.
- Mecanismo indireto, quando a radiação quebra a molécula da água, formando assim radicais livres que podem atacar outras moléculas importantes. Esse mecanismo é importante, uma vez que nosso corpo é composto por mais de 70% de água.

4.2.3 Natureza dos efeitos biológicos

Quanto à natureza, Okuno (2013) classifica os efeitos em reações teciduais e efeitos estocásticos:

- Reações teciduais: resultam de dose alta e somente surgem acima de certa dose, chamada dose limiar, cujo valor depende do tipo de radiação e do tecido irradiado. A dose limiar é definida como sendo a dose estimada que causa incidência de reações teciduais em 1% dos tecidos irradiados. Tauhata (2013) mostra uma tabela com limiares das doses para alguns efeitos do tipo reações teciduais. Um dos principais efeitos é a morte celular. Nessas reações, quanto maior a dose, mais grave é o efeito. Um exemplo é a queimadura que pode ser desde um leve avermelhamento até a formação de bolhas enormes. Os efeitos podem surgir com pouco tempo após a exposição ou podem ser tardios, resultando em doenças vasculares cardíacas e cerebrais além da opacificação do cristalino, a catarata. A Tabela 3 apresenta esses dados:

Tabela 3 – Limiares de doses para reações teciduais nas gônadas, cristalino e medula óssea.

TECIDO E EFEITO	LIMIAR DE DOSE		
	Dose Equivalente Total recebida em uma única exposição (Sv)	Dose Equivalente Total recebida numa exposição fracionada ou prolongada (Sv)	Taxa de Dose Anual recebidas em exposições fracionadas ou prolongadas por muitos anos (Sv)
Gônadas			
- esterilidade temporária	0,15	ND	0,40
- esterilidade	3,5 – 6,0	ND	2,00
Ovários			
- esterilidade	2,5 – 6,0	6	> 0,2
Cristalino			
- opacidade detectável	0,5 – 2,0	5	> 0,1
- catarata	5,0	> 8	> 0,15
Medula óssea			
- depressão de hematopoese	0,5	ND	> 0,4

Fonte: Tauhata, 2013.

- Efeitos estocásticos: são alterações que surgem em células normais, sendo as principais o câncer e o efeito hereditário. As recomendações de proteção radiológica consideram que esse tipo de efeito pode ser induzido por qualquer dose, inclusive dose devido à radiação natural. Eles são sempre tardios e a gravidade do efeito não depende da dose, mas a probabilidade de sua ocorrência aumenta com a dose. Os efeitos hereditários ocorrem nas células sexuais e podem ser repassadas aos descendentes.

4.2.4 Efeitos Biológico Pré-Natais e Síndrome da Irradiação Aguda

Os efeitos biológicos pré-natais compreendem os efeitos biológicos produzidos pelas radiações ionizantes durante a evolução de um feto. Esses efeitos podem surgir quando ocorre ingestão ou inalação de radionuclídeos pela mãe, ou por radiação externa

durante o período de gravidez. As doses absorvidas durante a gravidez podem causar retardo mental da criança, indução de leucemia, más-formações e até efeitos letais. A Tabela 4 mostra os riscos de efeitos (TAUHATA, 2013).

Tabela 4 – Risco de efeitos biológicos pré-natais à saúde humana induzido pela radiação ionizante.

Exposição Pré-natal (semanas)	Risco de efeito
Até 3	Não resulta em efeitos estocásticos ou deletérios após o nascimento
4-14	Má-formação e reações teciduais (0,1 a 0,5 Gy)
8 a 25	Sistema nervoso central muito sensível à radiação $D > 100$ mGy, inicia o decréscimo do QI
8 a 15	Alta probabilidade de retardo mental severo
16 a 25	Menor sensibilidade do sistema nervoso central

Fonte: Tauhata, 2013.

A síndrome da irradiação aguda é caracterizada pela exposição de uma pessoa à radiação num intervalo de tempo pequeno de até alguns dias. Essa síndrome pode variar com a dose. Se a dose absorvida no corpo todo for de 0,25 a 1 Gy, algumas pessoas podem ter náusea, diarreia e depressão no sistema sanguíneo; se for entre 1 e 3 Gy, além de sintomas anteriores, pode ter forte infecção causada por agentes oportunistas; entre 3 e 5 Gy pode ocorrer hemorragia, perda de pelos e esterilidade temporária ou permanente; ao redor de 10 Gy ocorre a inflamação dos pulmões, e para doses maiores os efeitos incluem danos no sistema nervoso e cardiovascular levando o indivíduo à morte em poucos dias (OKUNO, 2013).

4.2.5 Fatores de Influência

Segundo Tauhata (2013), nem sempre os mesmos danos ocorrem em pessoas que recebem a mesma dose de radiação, e os danos nem sempre respondem em tempos semelhantes. Nesse contexto, alguns fatores que influenciam os efeitos biológicos da radiação são a idade, o sexo e o estado físico.

Tauhata (2013) explica que, com relação à idade, os efeitos à radiação são mais acentuados quando o indivíduo é uma criança ou um idoso. Na infância, devido aos órgãos, os metabolismos e as proporções não terem se estabelecido definitivamente, alguns efeitos biológicos podem ter reposta com intensidade ou tempo diferentes. Em crianças, o processo de multiplicação celular é muito significativo, as células são mais sensíveis a radiação, morrendo em maior quantidade, mesmo que a reposição seja maior. Já em idosos, o processo de reposição ou reparo tem pouca eficiência e a resistência imunológica é menor que a de um adulto normal.

Outro fator de influência é o sexo, no qual mulheres são mais sensíveis à radiação e devem ser mais protegidas nesse aspecto. Isso se dá pelo fato delas possuírem órgãos reprodutores internos e os seios serem constituídos de tecido muito sensível à radiação. Além disso, existe o período de gestação, onde o feto apresenta a fase mais vulnerável à radiação (3 primeiros meses) e a mãe tem seu organismo bastante modificado em forma, composição hormonal e química. Outro agravante são as concentrações dos elementos químicos, que são menores em mulheres, normalmente.

Quanto ao estado físico, Tauhata (2013) diz que esse fator influencia bastante na resposta do indivíduo à radiação. Para pessoas fortes, resistentes, bem alimentadas, a resposta aos possíveis danos será atenuada quando comparada a uma pessoa fraca, subalimentada e com deficiência imunológica. Assim, a avaliação do estado físico é importante no momento da tomada de decisão quanto ao tipo de tratamento de uma pessoa com câncer, pois em alguns casos o tratamento por radioterapia pode resultar em agravamento do quadro clínico.

4.3 NORMAS DE PROTEÇÃO RADIOLÓGICA: OBJETIVO E CAMPO DE APLICAÇÃO

A atividade de perfilagem envolve riscos em todo o processo contendo fontes radioativas: armazenamento, transporte, calibração e realização do trabalho. Portanto, cada uma dessas etapas deve ser realizada com base no cumprimento das normas estabelecidas pela CNEN.

4.3.1 Norma CNEN NN-3.01: Diretrizes básicas de proteção radiológica

O objetivo desta Norma é estabelecer os requisitos básicos de proteção radiológica das pessoas em relação à exposição à radiação ionizante. Esta Norma é aplicada em todo o envolvimento de fontes radioativas nas práticas de manuseio, produção, posse e a utilização de fontes, bem como o transporte, o armazenamento e a deposição de materiais radioativos, abrangendo todas as atividades relacionadas que possam envolver exposição à radiação (CNEN, 2014).

A norma se aplica não só às práticas como também às ações de intervenção, como aquelas decorrentes de situações de emergência, que requeiram uma ação protetora para reduzir ou evitar as exposições à radiação.

Dentre o conteúdo da norma, são apresentados todos os conceitos descritos no item 2.2.6, e também é mostrado um importante quadro de limitação de dose individual. A Tabela 5 reproduz os dados desse quadro.

Tabela 5 – Quadro de limites de doses anuais.

Limites de Dose Anuais ^[a]			
Grandeza	Órgão	Indivíduo ocupacionalmente exposto	Indivíduo do público
Dose efetiva	Corpo inteiro	20 mSv ^[b]	1 mSv ^[c]
Dose equivalente	Cristalino	20 mSv ^[b]	15 mSv
	Pele ^[d]	500 mSv	50 mSv
	Mãos e pés	500 mSv	-

Fonte: CNEN, 2014.

^[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 em um período de 5 anos consecutivos não exceda 1 mSv por ano.

^[d] Valor médio em 1 cm² de área, na região mais irradiada.

4.3.2 Norma CNEN NE-3.02: Serviços de radioproteção

O objetivo desta Norma é estabelecer os requisitos relativos à implantação e ao funcionamento de Serviços de Radioproteção. Ela é aplicada às Instalações Nucleares e às Instalações Radiativas. Abrange as estruturas do serviço de proteção: pessoal, instalações e equipamentos. Além disso, trata das qualificações dos técnicos, sejam de nível superior, médio ou auxiliares, e descreve as atividades do serviço de radioproteção, como o controle de área, de trabalhadores, de meio ambiente e de fontes de radiação e rejeitos (CNEN, 1988^a).

4.3.3 Norma CNEN NE-5.01: Transporte de material radioativo

O objetivo desta Norma é estabelecer requisitos de radioproteção e segurança, com relação ao transporte de materiais radioativos, a fim de garantir um nível adequado de controle da eventual exposição de pessoas, bens e meio ambiente à radiação ionizante. A norma trata das especificações sobre materiais radioativos para transporte, da seleção do tipo de embalado, das especificações dos requisitos de projeto e de ensaios de aceitação de embalados, das disposições pertinentes ao transporte propriamente dito e das responsabilidades e requisitos administrativos (CNEN, 1988^b).

Com relação ao campo de aplicação, no contexto do transporte de materiais radioativos, esta norma aplica-se ao transporte por terra, água ou ar, também ao projeto, fabricação, ensaios e manutenção de embalagens, à preparação, expedição, manuseio, carregamento, armazenagem em trânsito e recebimento no destino final de embalados e ao transporte de embalagens vazias, que tenham encerrado material radioativo.

Esta Norma não se aplica ao transporte de material radioativo que se realize no interior de instalações nucleares ou radiativas, ou sendo o material radioativo parte integrante do meio de transporte.

Outras normas aplicáveis à atividade de perfilagem são as normas NN-6.02, referente ao Licenciamento de Instalações Radiativas e a NN-7.01 de Certificação da Qualificação de Supervisores de Proteção Radiológica.

4.4 ASPECTOS DE RADIOPROTEÇÃO NA PERFILAGEM RADIOATIVA

Diante dos efeitos biológicos que podem existir quando do uso incorreto e falta de cuidados relacionados a fontes radioativas, verifica-se a necessidade de tratar dos aspectos de radioproteção relacionados à atividade de perfilagem radiativa. Segundo Okuno (2013), a proteção radiológica se baseia em três princípios:

- Da justificativa – qualquer exposição à radiação deve ser justificada de modo que o benefício supere qualquer malefício à saúde;
- Da otimização da proteção – a proteção radiológica deve ser otimizada de forma que o número de pessoas expostas e a probabilidade de exposições que resultem em doses mantenham-se tão baixos quanto possa ser razoavelmente exequível, considerando os fatores econômicos e sociais;
- Da limitação de dose – as doses individuais devem obedecer aos limites estabelecidos em recomendações nacionais que se baseiam em normas internacionais.

4.4.1 Fatores de Proteção Radiológica: distância, blindagem, tempo

Os fatores de proteção são utilizados a fim de otimizar a proteção, e reduzir a exposição à radiação. O fator “tempo” é aplicado de modo que deve-se reduzir ao máximo o tempo na proximidade de fontes radioativas, pois quanto menor o tempo à exposição, menor é a dose absorvida e, conseqüentemente, menores são os riscos da ocorrência de problemas de saúde. Com relação à distância, a dose absorvida é relacionada ao inverso do quadrado desse fator. Deve-se sempre manter distância das blindagens. (SANCHES, 2001). Apenas a quantidade necessária de pessoas deve se aproximar. Para utilizar esse fator da melhor forma, as chaves utilizadas para retirar as fontes da blindagem e colocá-las na ferramenta têm um braço de aproximadamente 1,5 metros, de modo que o engenheiro consegue manter essa distância da fonte nesse momento da operação. A Figura 21 mostra um tipo de ferramenta utilizada como chave para rosquear as fontes da blindagem e transferí-las para a ferramenta.

Figura 21 – Ferramenta utilizada como chave de fonte radioativa.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação ao selamento da fonte para armazenamento e transporte, é utilizada uma blindagem, feita de material que tenha característica de bom absorvedor do tipo de radiação que é blindada. No caso da radiação de nêutrons, as blindagens são feitas de chumbo e polietileno, material que apresenta bastante hidrogênio para amortecer e absorver os nêutrons. E a fonte de radiação gama é blindada com chumbo.

4.4.2 Transporte de Fontes Radioativas

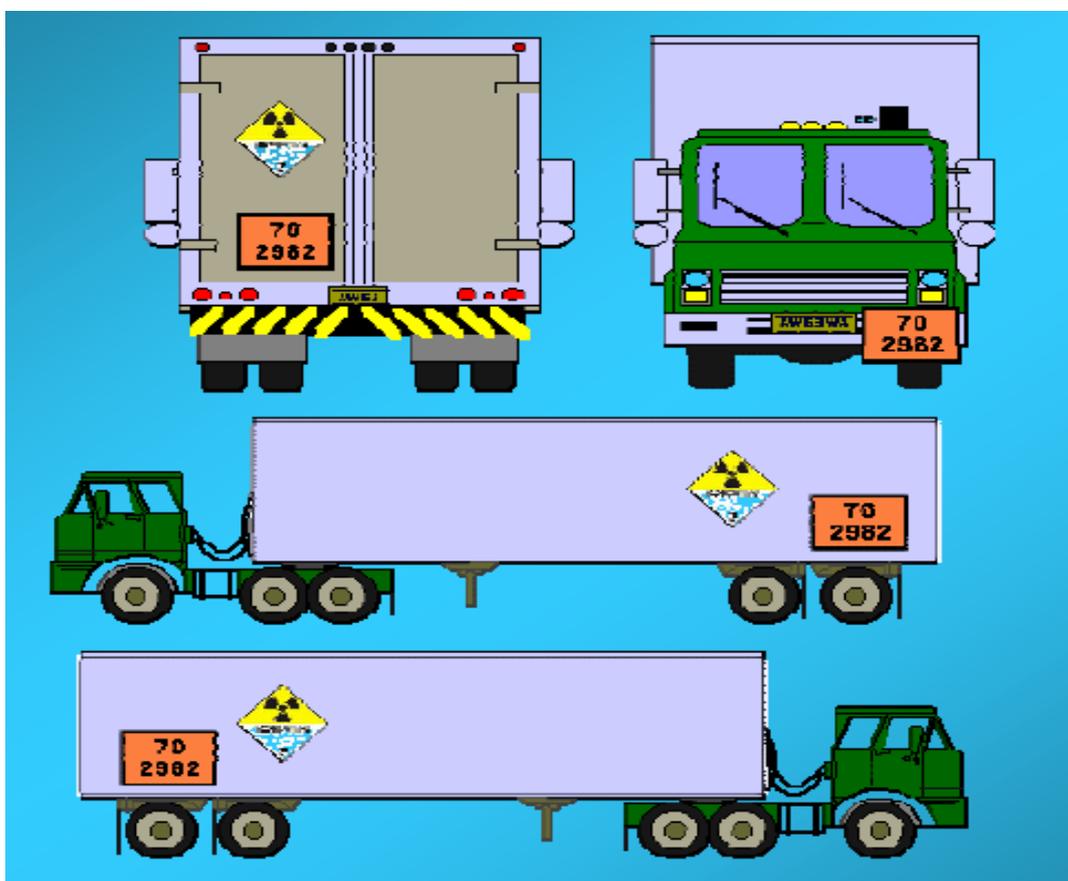
Seguindo a norma NE-5.01 da CNEN e aspectos de proteção informados pela Schlumberger (2013), o procedimento para transporte de fontes radioativas utilizadas na perfilagem é o seguinte:

- Certificar-se que todos os envolvidos estejam portando dosímetros.
- Verificar bateria e validade de calibração dos medidores.
- Realizar e registrar a aferição da blindagem.
- Colocar as blindagens na caixa de transporte e fazer levantamento radiométrico, definindo o Índice de Transporte (IT), medido em mRem/h. O levantamento radiométrico nada mais é que a realização de medições da radiação em pontos determinados, seja da ferramenta, da blindagem ou da área de operação.
- Sinalizar o embalado (blindagem + fonte) com no mínimo duas etiquetas em lados opostos.
- Fixar o embalado no veículo.
- Monitorar o veículo em termos de taxa de dose.

- Sinalizar o veículo com número da ONU e placas com criptograma de material radioativo e classe.
- Preencher a documentação de transporte, que inclui envelope de emergência, ficha de emergência, declaração do expedidor e ficha de monitoração de carga e veículo.
- Por fim, instruir o motorista quanto aos procedimentos básicos na ocorrência de uma situação de emergência.

A Figura 22 indica como o meio de transporte deve ser sinalizado quando transportando fontes radioativas.

Figura 22 – Sinalização de transporte para movimentação de fontes radioativas.



Fonte: Schlumberger, 2013.

Observa-se na Figura 22 que a sinalização é feita em todas as principais áreas do transporte: frontal, traseira e lateral. Desse modo, a presença de material radioativo pode ser reconhecida a partir da visão dos principais ângulos do meio de transporte.

4.4.3 Procedimentos no Campo

Nas operações de campo, deve-se garantir que os envolvidos estejam portando dosímetros, a fim de controlar a dose que está sendo absorvida, e deve haver definição do local para armazenar provisoriamente a caixa de transporte contendo as fontes. Após essa decisão, deve-se isolar a área e realizar reunião de segurança com toda a equipe da sonda, não só o pessoal envolvido na operação de perfilagem, informando os cuidados com trabalhos com radiação, ressaltando a importância do respeito ao isolamento da área.

Faz-se o levantamento radiométrico da ferramenta de perfilagem, para certificar-se de que não há fonte de radiação dentro. Em seguida, o engenheiro realiza a transferência da fonte da blindagem para a ferramenta, por meio da chave de segurança mostrada na Figura 21. Após esse passo, é realizada a monitoração da área. A perfilagem é realizada. Quando finalizada, o engenheiro realiza a retirada da fonte da ferramenta para a blindagem e feito um novo levantamento radiométrico na ferramenta para garantir que a fonte não ficou presa. É realizada, por fim, uma monitoração da área para poder ser liberada para outras operações. Ao final, faz-se também monitoração do caminhão de transporte e da carga.

4.4.4 Procedimentos de Emergência

Procedimentos de emergência devem ser seguidos para os casos de incêndio ou explosão, acidente de transporte, perda ou roubo da fonte, ferramenta presa no poço, fonte presa na ferramenta e fonte esquecida na ferramenta. Neste tópico serão especificados os procedimentos para ferramenta presa no poço, fonte presa à ferramenta e fonte esquecida na ferramenta.

4.4.4.1 Ferramenta presa ao poço

Quando detectado que a ferramenta está presa no poço, deve-se proceder com tentativas para desprendê-la (*D-Jar*, modificações do fluido, entre outros), que caberá ao cliente decidir. Antes de finalizar a pescaria, deve-se conduzir reunião de segurança e garantir que apenas IOEs portando dosímetro permaneçam na área. Finalizada a pescaria da ferramenta, deve-se transferir a fonte para a blindagem e realizar levantamento radiométrico.

Cabe ao cliente a decisão de abandono, caso a ferramenta não consiga ser recuperada. Nesse caso, a CNEN deve ser informada pelo SPR. Acima das fontes deve ser colocado tampão de cimento, e um mecanismo de deflexão acima do tampão. Após essa fase, tem de ser colocada também uma placa de abandono na cabeça do poço e deve ser elaborado relatório de abandono a ser enviado para a CNEN.

4.4.4.2 Fonte presa à ferramenta

Assim como nos outros procedimentos, é preciso garantir que todos os envolvidos estejam portando dosímetro. Em geral, deve-se inserir uma blindagem especial ao redor da ferramenta (segurança no transporte) e fazer a transferência dela para a base, onde o problema terá melhores condições de ser solucionado. O transporte deve ser acompanhado por um técnico de radioproteção e as causas do incidente devem ser relatadas em relatório a ser enviado para a CNEN.

4.4.4.3 Fonte esquecida na ferramenta

Após certificação do uso de dosímetros pela equipe, deve-se isolar a área onde encontra-se a ferramenta com a fonte que foi esquecida. Em seguida, coloca-se a fonte na blindagem, e realiza-se levantamento radiométrico da ferramenta. Após esses passos, os IPs e IOEs expostos devem ser identificados para ser realizada estimativa de doses recebidas e posterior envio dos dosímetros para leitura imediata. As causas do acidente devem ser relatadas em relatório a ser enviado para a CNEN.

4.4.5 Atividades do Serviço de Radioproteção

4.4.5.1 Controle de IOE

O controle de IOEs é feito por meio da monitoração individual, avaliação de doses, por meio de relatórios dos laboratórios, e supervisão médica periódica. A monitoração individual é realizada por meio do controle do uso de dosímetros. Esse objeto é um medidor de doses e é específico para cada tipo de radiação. Para a atividade de perfilagem radiativa, a CNEN requer que todos os IOEs utilizem dosímetros da SAPRA (laboratório de medição nacional credenciado), que medem apenas radiação

gama. A Schlumberger exige o uso de dosímetro da Landauer, além do dosímetro da Sagra, pois o da Landauer faz medição tanto de radiação gama, como de radiação de nêutrons. A troca e envio dos dosímetros da Sagra para medições em laboratório é realizada mensalmente. Como forma de monitorar os dosímetros da base, e se de fato os funcionários estão levando, quando em operação, as empresas fazem uso de quadros de dosímetros. A Figura 23 exemplifica esse tipo de quadro.

Figura 23 – Quadro de dosímetros utilizado para monitoração individual.



Fonte: Elaborado pela autora.

Os relatórios de dose mostram que a dose mensal recebida pelos IOEs é, em média, 0,1 mSv. O valor é tão pequeno que não atinge o mínimo que pode ser medido pelos dosímetros da Sagra. Esse valor é mostrado pelos resultados das medições em dosímetros da Landauer. É importante lembrar que, segundo a NN-3.01 da CNEN, os IOEs podem receber dose efetiva de até 20 mSv por ano. Considerando a média mensal de 0,1 mSv, durante um ano a dose total seria de 1,2 mSv, bem abaixo do limite permitido.

4.4.5.2 Controle de Área

Para o controle de área, é feita inicialmente a sua classificação. A avaliação é realizada levando em conta a segurança requerida e as taxas de dose. As áreas são classificadas em (SCHLUMBERGER, 2013):

- Controlada – $H \geq 6$ mSv/ano
- Supervisionada – $1 < H < 6$ mSv/ano
- Livre – $H \leq 1$ mSv/ano

O acesso às áreas supervisionadas e controladas é permitido apenas para pessoas autorizadas. A sinalização devida deve ser implantada, além da monitoração que deve ser feita por meio de dosímetros de área e por meio de medições em ponto pré-determinados.

4.4.5.3 Controle de fontes radioativas

As fontes têm de ser devidamente identificadas e sinalizadas nas blindagens, através de identificações do tipo de radioisótopo, número de série e atividade. Elas devem conter também o símbolo internacional da radiação. O armazenamento deve ser realizado em áreas seguras, isoladas, trancadas, blindadas e sinalizadas. A Figura 24 mostra um exemplo de Pit radioativo (instalação que armazena fontes radioativas).

Figura 34 – Vista frontal de um pit radioativo.



Fonte: Elaborado pela autora.

Com relação ao manuseio, esse só pode ser realizado por pessoas treinadas, portando dosímetros e seguindo os procedimentos definidos pelo SPR. O transporte deve seguir rigorosamente a norma NE-5.01 e deve ser autorizado pelo SPR.

Capítulo V

Conclusões

5. CONCLUSÕES

Finalizado o estudo, foi possível concluir que:

- A perfilagem de poços é uma etapa fundamental para a determinação de importantes propriedades das rochas, e para identificação de fluidos e litologias. Com a geração dos perfis, obtém-se os dados relacionados à profundidade, o que permite determinação de intervalos de produção.
- A energia com a qual a radiação é emitida na formação é determinante para definir o tipo de interação da radiação com o meio.
- Para o perfil de densidade, a resposta principal é a densidade de bulk, obtida por uma relação com a densidade elétrica da formação. Quanto menor a contagem de raios gama nos detectores, maior é a densidade de bulk da formação. Com o perfil de densidade obtém-se também a porosidade.
- No perfil neutrônico, a principal resposta é a porosidade total da formação. Esse dado é obtido com base no índice de hidrogênio da formação. Quanto maior o HI, maior é a porosidade (entende-se que maior é a quantidade de fluidos). Com esse perfil pode-se determinar também zonas de gás.
- Entre os tipos de perfis, os de densidade e porosidade apresentam um maior fator de risco devido ao uso de fontes radioativas como base para adquirir suas respostas finais.
- O órgão nacional controlador da atividade nuclear é a CNEN, que regulamenta atividades com emissão de radiação, por meio de normas regulamentadoras.
- Roubo, perda, esquecimento e manuseio errado de fontes radioativas são ações que podem causar acidentes que, dependendo do nível de dose absorvida e de outros fatores como tempo de exposição, chegam a causar efeitos biológicos nos seres humanos, que podem ser de fracos a letais.
- Para evitar tais consequências, o armazenamento, transporte, calibração e manuseio devem seguir rigorosamente os procedimentos indicados nas normas implementadas pela CNEN, e devem ser monitorados pelos Supervisores de Rioproteção.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, I. S. (2010). *Avaliação da proteção radiológica nas empresas prestadoras de serviços de perfilagem de poços no município de Macaé*. Dissertação de Mestrado. Instituto Militar de Engenharia – Rio de Janeiro.

CARDOSO, E. M. (2003^a). *Apostila educativa: Aplicações da Energia Nuclear*. Disponível em <<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>>. Acesso em 15 de fevereiro de 2015.

CARDOSO, E. M. (2003^b). *Apostila educativa: Radioatividade*. Disponível em <<http://www.cnen.gov.br/ensino/apostilas.asp>>. Acesso em 16 de fevereiro de 2015.

CNEN, (1988^a). *Norma NE 3.02 – Serviços de Radioproteção*. Resolução 10/88, agosto/1988. Disponível em <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=3>>. Acesso em 16 de maio de 2015.

CNEN, (1988^b). *Norma NE 5.01 – Transporte de material radioativo*. Resolução 013/88, agosto/1988. Disponível em <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=5>>. Acesso em 16 de maio de 2015.

CNEN, (2014). *Norma NN 3.01 – Diretrizes Básicas de Proteção Radiológica*. Resolução 164/14, março/2014. Disponível em <<http://www.cnen.gov.br/seguranca/normas/normas.asp?grupo=3>>. Acesso em 16 de maio de 2015.

EBAH, (2015). *Perfilagem*. Disponível em <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABbDsAH/perfilagem>>. Acesso em 12 de maio de 2015.

HWS PETROPHYSICS, (2015). *Well Log Evaluation*. Disponível em: <<http://hwspetrophysics.com/our-services/well-log-evaluation/>>. Acesso 10 de maio de 2015.

NERY, G. G. (1990). *Perfilagem Geofísica em Poços Abertos*.

OKUNO, E. (2013). *Efeitos biológicos das radiações ionizantes. Acidente radiológico de Goiânia*. Instituto de Estudos Avançados da Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/53961/57904>>. Acesso em: 16 de maio de 2015.

OLIVEIRA, L. J. (2005). *Avaliação do uso da perfilagem geofísica para obtenção de informações secundárias para utilização em co-estimativas de variáveis geológico-mineiras*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre.

SANCHES, M. P. (2001). *Fundamentos de Radioproteção – Conceitos Básicos*. Disponível em <<http://www.direxlim.fm.usp.br>>. Acesso em 5 de março de 2015.

SAPRA LANDAUER, (2015). Disponível em <http://www.sapralandauer.com.br/mensagem/pub/mensagem.php?tipo=0&id_mensagem=custom_orcamento&lid=85&pid=0>. Acesso em 6 de maio de 2015.

SCHLUMBERGER, (2001). *Platform Express*. Disponível em: <http://www.slb.com/~media/Files/evaluation/brochures/wireline_open_hole/petrophysics/platform/platform_express_br.pdf>. Acesso em 2 de maio de 2015.

SCHLUMBERGER, (2013). *Normas para Supervisores de Radioproteção*. Apresentação oferecida para supervisores da Schlumberger em curso de reciclagem anual. Arquivo não disponível. Acesso em 4 de março de 2015.

SCHLUMBERGER, (2015^a). *Highly Integrated Gama Ray Neutron Sonde (HGNS)*. Apresentação oferecida no curso de Engenheiro Junior da Schlumberger. Arquivo não disponível. Acesso em: 13 de maio de 2015.

SCHLUMBERGER, (2015^b). *Three-detector Lithology Density Tool (TLD)*. Apresentação oferecida no curso de Engenheiro Junior da Schlumberger. Arquivo não disponível. Acesso em: 15 de maio de 2015.

TAUHATA, L. SALATI, I. P. A., PRINZIO, R. Di, PRINZIO, M. A. R. R..Di. (2003) *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – 5 Revisão agosto/2003*. Rio de Janeiro – IRD/CNEN.

TAUHATA, L. SALATI, I. P. A., PRINZIO, R. Di, PRINZIO, M. A. R. R..Di. (2013) *Radioproteção e Dosimetria: Fundamentos – 9 Revisão novembro/2013*. Rio de Janeiro – IRD/CNEN.

THOMAS, J. E. (2004). *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. – 2. ed. – Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRÁS.