

PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática

PETRÓLEO E A FÍSICA:
uma visão contextualizada para o Ensino Médio.

Ricardo Uzêda Pache de Paiva

Adriana Gomes Dickman

Belo Horizonte

2012

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	5
CADERNO DE FÍSICA DO PETRÓLEO.....	11
1 Definição	11
2 Origem e formação	11
3 Propriedades físicas	16
3.1 Peso específico ou densidade.....	16
3.2 Viscosidade.....	17
3.5 Tensão superficial.....	20
3.6 Capilaridade.....	21
3.7 Compressibilidade.....	22
3.8 Condutividade térmica.....	23
4 Descobrindo Petróleo	26
4.1 Métodos de Descoberta: Gravímetro.....	27
4.1.1 Gravímetro do tipo pêndulo de mola.....	29
4.1.2 Gravímetro pendular	31
4.2 Métodos de Descoberta: Magnetometria	32
4.3 Métodos de Descoberta Através da Sísmica.....	35
4.3.1 Propagação das ondas elásticas em função da porosidade da rocha.....	36
4.3.2 Propagação das ondas elásticas em função da distância.....	37
4.3.3 Propagação das ondas elásticas em função da temperatura.....	38
4.3.4 Propagação das ondas elásticas em função da saturação dos poros das rochas ..	38
4.3.5 Variação da frequência das ondas elásticas	40
4.4 Prospecções Sísmicas - Sísmica de Poço	40
4.5 Prospecção Sísmica - Sísmica de Reflexão de Alta Resolução.....	42
4.6 Registro das ondas sonoras pelos receptores	45
4.7 Processamento de dados sísmicos	47
5 Descobrindo Petróleo (<i>Up Stream</i>) – Perfuração e Produção	50
5.1 Bombeio Mecânico com Haste.....	55
6 Constituição e Subprodutos do Petróleo (<i>Down Stream</i>) – Refino	58
6.1 Constituição do Petróleo	58
6.2 Processamento Primário de Fluidos	61
6.3 Refino	64
OFICINA DE QUÍMICA	66
7 Petróleo – O maior vetor energético do mundo.....	66
7.1 Energia.....	66
7.2 Motores de Combustão – Ciclos de Funcionamento.....	67
7.3 Energia Útil.....	70
8 Balanço Energético.....	72
9 Impactos Ambientais	76
9.1 Impactos causados pela geração de energia em Termoelétricas	78
9.2 Impactos causados pelos motores de combustão.....	79

9.3 Chuva ácida.....	81
9.4 Grandes impactos.....	82
9.4.1 Efeito estufa	82
9.4.2 Acidentes petrolíferos	84
10 Leitura Suplementar - Breve História do Petróleo.....	85
10.1 I Guerra mundial e o petróleo	89
10.2 Desenvolvimento da Geofísica.....	91
10.3 II Guerra Mundial e o Petróleo.....	93
10.4 Mudança do Centro da Produção Petrolífera.....	94
10.5 Pós-guerra e o Petróleo.....	95
10.6 Preços do Petróleo.....	97
10.8 Pré-Sal.....	100
10.9 Considerações.....	100
REFERÊNCIAS.....	41

APRESENTAÇÃO

A base unitária do Ensino médio é de permitir aos estudantes estabelecer reais conexões entre a ciência que se aprende e a realidade que vivem, e para isso a Física não pode ser uma mera desconhecida, isolada no espaço da sala de aula, sem estabelecer diálogo com os diferentes contextos. A elaboração do Caderno de Física do Petróleo foi construída sob um olhar prospectivo para o ensino de Física, com a perspectiva de contribuir para que o jovem aprendiz se sinta competente para compreender suas relações com o mundo tecnológico e competitivo.

Os tópicos abordados na dissertação perpassam pela origem (formação); características físicas; exploração; sistemas petrolíferos; exploração; refino; importância energética do petróleo; matriz energética; impactos ambientais e como suplemento um pouco da história política, econômica e estratégica do petróleo. Importante colocarmos que a criação do Caderno de Física do Petróleo alterna em profundidade com relação aos conhecimentos físicos: alguns fogem do público alvo, pois requerem uma Física mais apurada e outros conhecimentos, que não se baseiam em conceitos físicos, recaem na interdisciplinaridade e contextualidade.

Tendo em vista essa diversidade, optou-se em fazer um texto com todo o assunto disponibilizado no questionário da pesquisa de campo e pela constatação de falta de apoio nos materiais didáticos, conforme elucidado na pesquisa bibliográfica. A intenção é criar uma fonte de consulta para estudos diversos em relação à interdisciplinaridade e amplitude de conhecimento da Física relacionada ao petróleo.

O texto que o professorado vai utilizar como referencial teórico da Física do Petróleo segue uma sequência de encadeamento que visa uma melhor compreensão sobre o assunto, pois pela teoria ausubeliana, a aprendizagem compreende aspectos lógicos como coerência na estrutura do conteúdo, sequência lógica nos processos de ensino e conseqüentemente nas relações entre os componentes ensinados. Ausubel, Novak e Hanesian (1980) sugerem que o professor, ao planejar sua disciplina, considere duas categorias reitoras:

- a) a organização substantiva, ou seja, a identificação dos conceitos organizadores básicos de uma dada disciplina, a qual consiste na seleção de ideias básicas, na coordenação e na integração do assunto em diferentes níveis;
- b) a organização programática, isto é, a ordenação e a sequência do assunto considerando sua organização e lógica interna.

No Caderno de Física do Petróleo, primeiramente define-se, estabelece-se a origem (formação) e descrevem-se as propriedades físicas do “ouro negro”, nesta parte do produto a Física se torna muito presente. Levantar os conceitos físicos relacionados ao petróleo é primordial para fincar o destaque do ensino de Física sobre o tema.

O processo de formação do petróleo envolve mais algumas propriedades físicas pertinentes ao tópico e alguns aspectos da Física que interferem, por exemplo, na evolução e migração do petróleo. Destaca-se a inserção de figuras bem didáticas ao contexto para um processo de assimilação mais lúdica. A Física mais uma vez aparece de forma representativa.

Na sequência do Caderno de Física do Petróleo abordam-se os métodos de descoberta e exploração, que advém de uma engenharia sofisticada, e são indicadas situações mais simples que envolvam os assuntos no intuito de evidenciar a Física. Aparelhos usados para a descoberta do petróleo, como o gravímetro e o magnetômetro, usam princípios físicos simples elucidados no Ensino médio.

A sísmica tem um destaque no processo de descoberta do petróleo, mesmo com uma engenharia requintada por trás, a intenção é, através do produto, colocar em evidência os princípios físicos presentes no Ensino médio que servirão de raiz para estudos posteriores. A Física está contextualizada nas grandes descobertas de jazidas e também aparece sob o caráter interdisciplinar em:

- a) Geografia: na localização das reservas de petróleo (trabalhando com mapas e escalas); os maiores países produtores; a política de preços da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), uma entidade que reúne a maioria dos países do Oriente Médio, além de países produtores da África e Venezuela; e a importância de reservas estratégicas para os países.
- b) Geologia: bacias feitas de rochas sedimentares derivadas de restos de animais, plantas e detritos de outras rochas pré-existentes; armadilhas do petróleo (trapas), estruturas geológicas que permitem a acumulação de óleo e gás; e a migração que é o caminho que o petróleo faz de onde foi gerado até onde será acumulado.
- c) Geofísica: estudo da Terra usando medidas físicas tomadas na superfície terrestre ou marítima. Nem sempre é fácil estabelecer uma fronteira entre Geologia e Geofísica. A diferença fica, primariamente, no tipo de dados com os quais se manipula. De uma maneira geral, a Geofísica fornece as ferramentas para o estudo da estrutura e composição do interior da Terra; os processos de perfuração e produção de petróleo; como os enormes navios petroleiros, as grandes plataformas

submarinas e os cavalos mecânicos tipo martelo (bombeamento mecânico) que conseguem, respectivamente, retirar o petróleo do mar e do solo.

Um capítulo muito importante, o qual reporta a vários conceitos físicos, é o Petróleo como vetor energético. O assunto energia sempre é muito discutido, sendo uma das ideias centrais dos currículos de ciências, como descrito no CBC, e tema sempre recorrente do Exame Nacional do Ensino Médio (ENEM).

O tópico energia, considerado como um dos mais difíceis de ser ensinado, permeia diferentes disciplinas escolares, mas quase nunca se vê uma interligação multidisciplinar. Segundo o CBC (2007), o tema energia permite uma maior integração entre as disciplinas Química, Biologia e Física, e entre as diversas áreas da própria Física. O conceito de energia é um conceito integrador importante nos campos das ciências naturais permitindo aos alunos o entendimento de uma ampla gama de fenômenos. Segundo Solbes e Tarín (1998), o tema energia é uma parte muito importante de um curso de Física, uma vez que fornece uma ligação clara entre as diferentes seções da Física. Solbes e Tarín (2004) atestam ainda que a importância de ensinar o conceito de energia reside na reflexão do seu significado social, porque muitos postos de trabalho perpassam em lidar com os conceitos de trabalho, energia e calor.

A ideia convergente entre Solbes e Tarín (1998) e o CBC, é que se torna evidente e necessário introduzir este conceito desde os primeiros anos da educação secundária obrigatória, reafirmando a utilização do caderno no terceiro ano do Ensino médio, pois em concordância com Ausubel, os conhecimentos prévios necessários já estariam introduzidos, facilitando o aprendizado deste enfoque.

Na pesquisa de Solbes e Tarín (1998; 2004) são destacadas algumas dificuldades dos estudantes em identificar trabalho e energia, atribuir caráter material a energia e calor, ignorar a variação de energia interna, não utilizar a interpretação do conceito de energia nos fenômenos cotidianos, ignorar as fontes energéticas, não associar a energia do movimento com a do combustível, e principalmente não compreender os aspectos de processamento, armazenamento, transferência e degradação de energia, o que interfere no entendimento da conservação de energia.

Em relação ao tema ora discutido, na verdade o estudante tem dificuldade de associar uma quantidade determinada de energia advinda do petróleo, carvão mineral, lenha, etc., no sentido de desencadear alguma outra energia associada ou um fenômeno que se possa observar. No caso de um item específico do produto que é o combustível, a ideia entre os

estudantes é que quase sempre prevalece a noção de que combustível é energia, muito mais do que a ideia de que combustível represente uma fonte de energia.

Solbes e Tarín (2004) destacam ainda a importância de aplicar os conceitos relacionados à energia e sua conservação, seja na Mecânica, na Termodinâmica, na Física Moderna e no Eletromagnetismo na compreensão de problemas de relevância tecnológica, ambiental e social.

Em conformidade com o exposto, propõe-se no trabalho desenvolvido que a energia seja percebida como um processamento de atividades, transferência de energia, cadeias de processo, trabalho e mecanismos de transferência de calor, o que dá margem também para o professor trabalhar conservação e degradação de energia. Em consonância com o estudo de Solbes e Tarín (2004) e com o referencial Ausubel, a proposta de trabalho prioriza uma aprendizagem significativa de energia, ensinando a nível secundário, a partir de ideias alternativas dos alunos sobre a energia advinda do petróleo, para de início com a energia do combustível, desenvolver a compreensão do processamento, transferência e degradação, mostrando o status de princípio ou teorema à respeito da conservação de energia, identificando restrições à conservação surgidas na Mecânica e Termodinâmica.

Para a finalização do capítulo reporta-se ao Balanço Energético do País no intuito de situar o aluno quanto à produção e consumo energético do Brasil. A importância do tema recai na aproximação do aluno a uma visão de energia num contexto macro e na oportunidade do professor tratar temas como:

- a) fontes energéticas: recursos e tecnologias de oferta de energia primária;
- b) energias renováveis: tecnologias e perspectivas brasileiras;
- c) tecnologias do setor elétrico e perdas energéticas;
- d) eficiência energética nas residências e iluminação pública;
- e) eficiência energética no transporte;
- f) eficiência energética na indústria, comércio e agricultura;
- g) planejamento energético;
- h) instituições, programas e órgãos encarregados da gestão da energia no Brasil;
- i) energia, eficiência energética e qualidade de vida;
- j) meio ambiente e sustentabilidade.

O penúltimo assunto abordado no caderno tem um foco na Química, pois se trata da composição e refino do petróleo, mas pretende-se dar um caráter interdisciplinar ao texto,

fornecendo ao professor a opção de inserir o tema de maneira leve e lúdica com pinceladas na Física.

O último capítulo sobre impactos ambientais recai na competência solicitada pelo ENEM, e descrita anteriormente, de associar intervenções que resultam em degradação ou conservação ambiental a processos produtivos e sociais. O objetivo é permitir que o alunado entenda questões fundamentais como a disponibilidade de recursos naturais e os riscos de se utilizar uma determinada tecnologia que possa ser nociva a algum ecossistema. Logicamente que o assunto vem se tornando mais temático em virtude dos grandes acidentes envolvendo o petróleo.

Como leitura suplementar (aprofundando conhecimentos), descrevem-se os processos históricos envolvidos na descoberta e na evolução política/econômica em torno da fonte energética. A intenção é que o professor possa trabalhar neste tópico um contexto multidisciplinar aguçando a história e a geografia política/econômica relacionada ao petróleo, indo assim, ao encontro das novas tendências que apontam para a remoção de fronteiras entre áreas diversas de pesquisas.

Além dos textos informativos, o Caderno também traz sugestões de oficinas após a discussão dos tópicos, com projetos ou atividades experimentais para aprofundamento nos temas vistos.

Neste momento vale ressaltar que no trabalho subte-se uma proposta curricular baseada não somente nos PCN como dito na introdução, mas também no CBC (Conteúdo Básico Comum – MG), no intuito de se completar o tradicional estudo de energia da academia, e a necessidade de favorecer as reinterpretações das visões do mundo geradas pelos meios nos quais os alunos estão inseridos.

Então, no Caderno de Física do Petróleo o professorado irá navegar pelo conteúdo de Física do primeiro ao terceiro anos do Ensino médio, fazendo uma referência à proposta do Conteúdo Básico Comum (CBC) – MG, em tornar a Física mais integrada ao longo dos anos do Ensino médio. Dentro ainda do CBC destacam-se algumas habilidades a serem conseguidas com o foco do projeto:

- a) reconhecer a energia como algo indispensável ao funcionamento da vida social e que essa dependência vem crescendo progressivamente ao longo da história humana;
- b) compreender a energia como algo que se conserva, que pode ser armazenado em sistemas, que pode ser transferido de um corpo a outro e transformado de uma forma para outra;

- c) compreender situações envolvendo aquecimento de um corpo por meio de trabalho, situações envolvendo máquinas térmicas, saber distinguir situações sem que haja transferência de energia pela realização de trabalho e/ou por troca de calor;
- d) compreender as causas da intensificação do efeito estufa e compreender o seu significado em termos ambientais;
- e) Identificar as principais mudanças que vêm ocorrendo na matriz energética brasileira;
- f) distinguir fontes renováveis e não renováveis de energia;
- g) saber explicar como as forças de atrito e a resistência afetam o movimento;
- h) saber enunciar as Leis de Newton;
- i) compreender o conceito de pressão, suas unidades de medida e suas aplicações em situações do cotidiano;
- j) compreender o conceito de densidade e suas unidades de medida;
- k) compreender o comportamento das ondas, propriedades e efeitos das ondas sonoras.
- l) compreender o magnetismo da Terra.

Acredita-se que os textos desenvolvidos irão produzir bons resultados na perspectiva de motivar os estudantes do Ensino médio para o estudo de Física e atualizar o programa de Física na escola sem significar necessariamente um aumento na extensão do currículo.

CADERNO DE FÍSICA DO PETRÓLEO

1 Definição

O petróleo, do latim *petra* (pedra) e *oleum* (óleo), no estado líquido é uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e de cores variadas. O petróleo consiste de uma série de hidrocarbonetos, compostos de hidrogênio e carbono, que vão desde um gás leve como o metano (CH₄) até sólidos pesados. As várias misturas que podem compor o óleo cru ou petróleo líquido são separadas por destilações usando temperaturas crescentes (refino). (ROSA, 1998). As componentes da mistura classificadas na ordem de leves para pesados, maior peso molecular, são: gases, gasolina, querosene, óleo diesel, óleo lubrificante, óleo combustível residual, asfalto e parafina.

O óleo cru pode ter uma composição química muito variada, por isso suas propriedades como cor, peso específico e viscosidade variam muito, indo desde a viscosidade de um óleo fino como a gasolina até o de um denso e viscoso asfalto. Sua cor varia do amarelo ao negro, passando pelo verde. É imiscível com a água e mais leve que ela, flutuando em suspensão aquosa. (ROSA, 1998).

2 Origem e formação

Uma teoria sobre a origem do petróleo estipula que durante milhões de anos, os rios fluindo para o mar carregaram grande volume de lama e areia que foi espalhado pelas correntes e pelas marés sobre o fundo do mar. Novos depósitos foram sucessivamente formados, superpondo-se diversas camadas de areia e de lama justapostas. Altas pressões e outros processos, atuando durante o tempo geológico, transformaram essas camadas em rochas sedimentares¹, do tipo que pode conter petróleo. (ROSA, 1998). Segundo a teoria orgânica da origem do petróleo, variados organismos marinhos foram sepultados com essas camadas de lama e areia. Em um ambiente protegido contra a oxidação, sob altas pressões e temperaturas elevadas, o oxigênio, nitrogênio e outros elementos são eliminados, e os átomos de carbono e hidrogênio da matéria orgânica dos seres marinhos sepultados são convertidos em hidrocarbonetos.

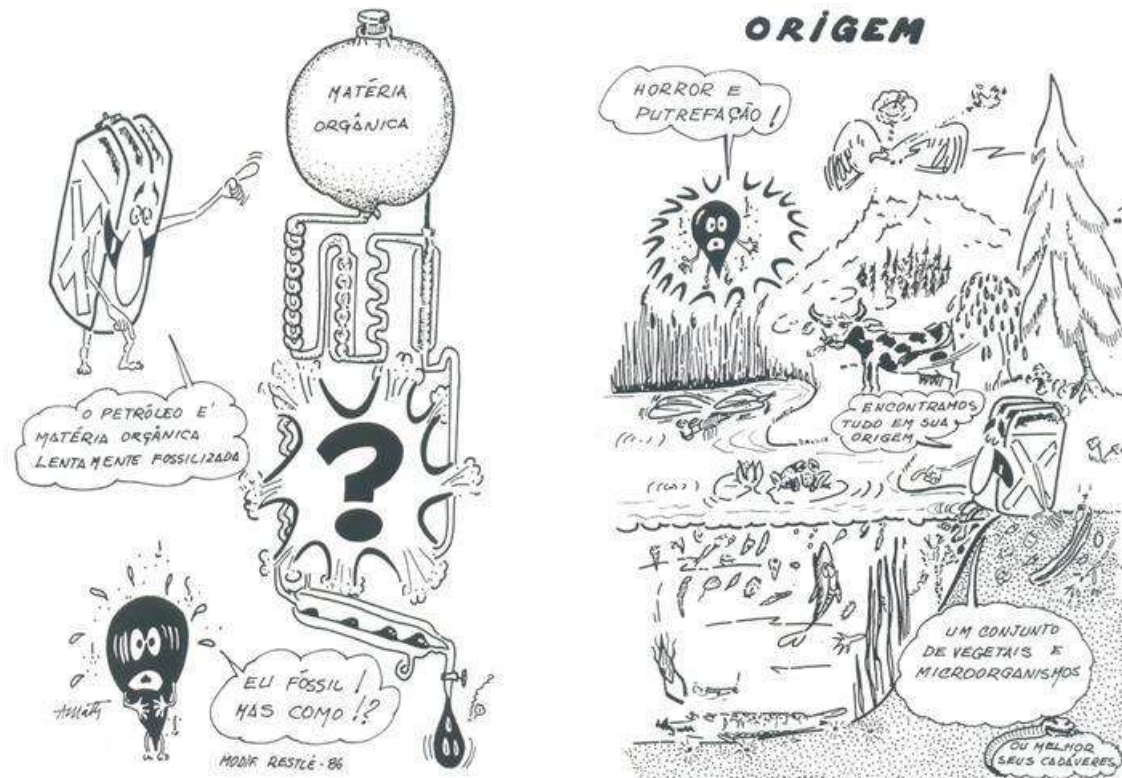
Devido ao fato de o óleo ser formado essencialmente de material marinho, os depósitos estão distribuídos, em sua maioria, em regiões litorâneas. Entretanto, pode-se

¹As rochas sedimentares são encontradas nas Bacias Sedimentares que são depressões da crosta terrestre onde se acumulam essas rochas que podem ser portadoras de petróleo ou gás, associados ou não. (BRASIL, 1997).

encontrar óleo no interior dos continentes, que em algum período da sua existência poderia ter estado submerso. (OKUNO; CALDAS; CHOW, 1982). Assim, essa teoria admite que houve radicais mudanças das margens do mar, pois muitos depósitos foram encontrados muito longe do mar. (ROSA, 1998).

Na figura 1 é mostrada uma representação simplificada da origem da formação do petróleo e na figura 2 são mostradas as condições necessárias para a sua formação.

Figura 1 - Origem do petróleo.



Fonte: Mello; Hessel; Soldan, 1998.

O petróleo é a prova de que existe um sistema petrolífero. Este sistema representa formações geológicas com grande probabilidade de se encontrar petróleo. Segundo Mello (1998), para haver esses sistemas são necessários elementos essenciais para a sua formação, ou um campo de petróleo que consiste na: rocha geradora, rocha reservatório e rocha capeadora ou a rocha selante, representadas na figura 15.

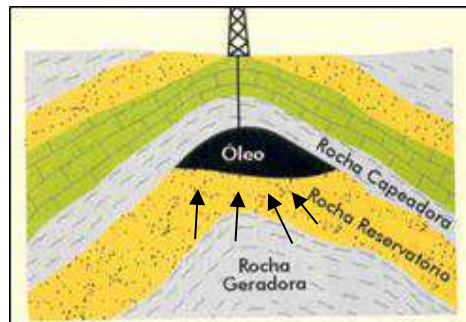
As rochas geradoras ou matrizes são as rochas com elevado teor de matéria orgânica, substância oleosa precursora de sedimentos marinhos, ricos em plâncton, sedimentos continentais, restos de vegetais, etc. (LUCCHESI, 1998). A substância oleosa precursora do petróleo surge misturada com a água do mar acumulada nesses sedimentos, mas separa-se por ser menos densa, fluando sobre a água. (ROSA, 1998).

Figura 2 - Condições de formação do petróleo.



Fonte: Mello; Hessel; Soldan, 1998.

Figura 3 - Exemplos de “Trapas”. As setas indicam a migração do petróleo.



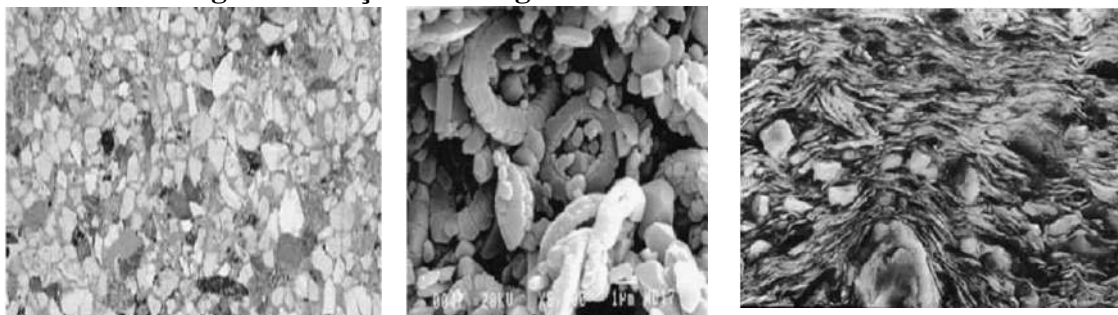
Fonte: Modificado da National Geologic. Acesso em: 04 mai. 2011.

O óleo não permanece nas rochas em que é gerado – rochas matrizes ou geradoras – mas separa-se sob a ação da pressão, fluindo através de rochas porosas até encontrar uma camada impermeável de rochas argilosas que o bloqueie, formando a “trapa”. (OKUNO; CALDAS; CHOW, 1982). A trapa ou armadilha é a porção de um reservatório natural, na qual uma acumulação de petróleo pode ser formada e retida, ilustrada na figura 3. É necessário que haja uma associação adequada, ao longo do tempo, da rocha geradora, da migração do óleo e da “trapa” que a rocha reservatório faz com a rocha selante ou capeadora. É importante observar que os reservatórios de petróleo não são lagos subterrâneos. (LUCCHESI, 1998).

A migração, indicada pelas setas da figura 3, é o processo de movimentação dos hidrocarbonetos, gerados pela transformação da matéria orgânica original da rocha geradora em direção às rochas reservatório, principalmente por um diferencial de pressão causado pelo peso dos sedimentos, expansão térmica e/ou geração dos hidrocarbonetos. Os hidrocarbonetos se movem através de juntas e fissuras, na direção de menor pressão, podendo ocorrer em todas as direções. (FJAER *et al.*, 2008).

Assim que o petróleo nasce já começam os problemas, pois a rocha geradora torna-se quase impermeável e seus poros ficam saturados de água. (MELLO; HESSEL; SOLDAN, 1998). Há uma coesão nesse sistema grãos (rocha)-água-ar que define um formato finito para a rocha. Quando acontece a migração, a rocha pode ser remodelada quanto ao seu formato. (FJAER *et al.*, 2008). Dessa maneira são formadas as jazidas, contendo gás em cima, óleo no meio e água em baixo, armazenados em pequenos espaços vazios nas rochas reservatórios. (ROSA, 1998). Exemplos dessas rochas são mostrados na figura 4. Esta distribuição se dá em função da densidade da água do mar, que é maior que a do óleo, que por sua vez é maior que a do gás. Os espaços são da ordem de μm (micro metro).

Figura 4 - Seções de imagens de rochas reservatório.



Fonte: Fjaer *et al.*, 2008.

Na figura 5 é mostrada uma representação lúdica de um sistema petrolífero, e na figura 6 tem-se o sistema petrolífero na sua totalidade.

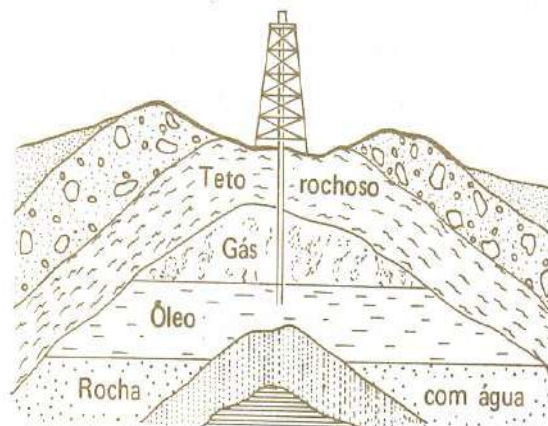
A síntese do petróleo se dá através da transformação da matéria orgânica classificada em classes como proteínas (aminoácidos), carboidratos (açúcar e/ou celulose), lipídios (gorduras), etc., durante um enorme período de tempo (escala geológica), seria o que os especialistas chamam de “diagênese” que consiste de uma série de mudanças físicas e químicas sofridas pela matéria orgânica após sua deposição, obtida apenas se houver a presença de bactérias anaeróbicas, que ajudam a criar um ambiente livre do oxigênio que protege o petróleo. Após o processo citado vem o período de maturação do petróleo que segundo Mello; Hessel; Soldan, (1998), tem que ser feito numa temperatura morna, idealmente entre 60° e 120°C, por isso, muita profundidade (centenas ou milhares de quilômetros) não garante um bom petróleo, pois a temperatura da crosta terrestre sobe 1°C a cada 40 m de profundidade em média.

Figura 5 - Representação lúdica de um sistema petrolífero.



Fonte Mello; Hessel; Soldan, 1998.

Figura 6 - Sistema Petrolífero.



Fonte: Okuno; Caldas; Chow, 1982.

Segundo Fjaer *et al.* (2008), eventos como a variação do nível do mar, depósito de sedimentos e atividades geológicas (movimentos tectônicos, erosão, etc.) irão afetar não somente as propriedades físicas das rochas, mas também as condições limites em termos de fissuras da rocha e pressão nos poros.

A formação da trapa ocorre logo depois dos processos de criação, migração e maturação do petróleo, formando então o Sistema Petrolífero, que é um sistema que oferece

uma provável condição de se retirar petróleo, pois neste universo também se trabalha muito com possibilidades.

3 Propriedades físicas

3.1 Peso específico ou densidade

O peso específico do petróleo é inferior ao da água, que por convenção é igual à unidade. Para classificá-lo usa-se a escala do *American Petroleum Institute*, que atribui 10° API ao peso específico da água igual a 1 kg/dm³, aumentando o número de graus API à medida que a densidade do óleo diminui à temperatura de 60°F e a uma atmosfera de pressão (1atm). No quadro 1 são mostrados os graus API em função do peso específico. A classificação de óleo leve a óleo extrapesado é feita de acordo com o número de graus API, como mostra o quadro 2.

Quadro 1 - Grau API em função do peso específico.

API	Peso específico (kg/dm ³) - 60°F e 1atm
10°	1 (H ₂ O)
20°	0,93
30°	0,87
40°	0,82

Fonte: Rosa, 1998.

Quadro 2 - Classificação dos óleos de acordo com o grau API.

Tipo de óleo	API
Leve	API > 31°
Médio	22° < API < 31°
Pesado	10° < API < 22°
Extrapesado	API < 10°

Fonte: Lucchesi, 1998.

O preço do óleo cru é ordinariamente baseado no seu peso específico. Os óleos mais leves obtêm mais alto preço porque contém maior quantidade de hidrocarbonetos leves (cadeia menos complexa), permitindo mais facilmente a produção de gasolina. Os óleos mais leves têm cor amarela, os intermediários têm cor verde e os pesados têm cor negra. Alguns dos componentes do petróleo possuem temperatura de ebulição muito baixa, como o metano (-161,6°C), sendo voláteis à temperatura ambiente, escapando da atmosfera. Outros

componentes têm temperatura de ebulição muito alta, sendo impossível se atribuir uma temperatura de ebulição para as misturas.

OFICINA DE FÍSICA

Nesta discussão o professor poderá explorar: o conceito de densidade ou peso específico, unidades de medida, conversão entre kg/m^3 , kg/dm^3 , g/ml , g/cm^3 ; unidades de temperatura, conversão entre Celsius e Fahrenheit; temperatura de ebulição em função da pressão.

Atividade experimental: Medir a densidade de vários líquidos.

3.2 Viscosidade

A viscosidade é medida pela resistência para certa quantidade de óleo fluir através de uma abertura fixa, a uma dada condição de temperatura e pressão. Quanto maior a viscosidade, maior o tempo necessário para o óleo fluir. No sistema internacional a viscosidade é medida em N.s/m^2 , o poise é a unidade de medida no sistema cgs e equivale a $0,1 \text{ N.s/m}^2$.

A viscosidade é função decrescente da proporção de hidrocarbonetos leves no óleo cru e da temperatura no subsolo que aumenta à medida que a profundidade aumenta; logo a profundidades maiores o óleo é menos viscoso que na superfície. Encontramos melhor qualidade do óleo em águas profundas e o Brasil é líder mundial na extração do mesmo.

OFICINA DE FÍSICA

O professor poderá aproveitar este momento para discutir: o conceito de viscosidade; sua dependência com a temperatura e pressão local; unidades de medida; a força de atrito viscoso. Atividade experimental: Medir a viscosidade de um óleo ou demonstrar a diferença na velocidade de uma esfera movendo-se através de fluidos com viscosidades diferentes.

3.3 Pressão

A pressão atmosférica é a pressão exercida pelo peso da atmosfera em um determinado ponto. Como as plataformas de petróleo ficam na superfície, onde a pressão é a atmosférica (p_{atm}), pode-se deduzir que a pressão do fluido a uma profundidade h será:

$$p = p_{\text{atm}} + \rho gh \quad (1)$$

em que ρ é a densidade do fluido e g é a aceleração da gravidade. Quanto maior a profundidade maior a pressão.

Importante ressaltar que o aumento de pressão de acordo com a profundidade nos reservatórios faz com que a quantidade de componentes gasosos que podem ser dissolvidos no óleo aumente até que atinja o ponto de saturação, quando a quantidade máxima de soluto for dissolvida em uma mesma quantidade de solvente. A quantidade de soluto dissolvida aumenta com o aumento da pressão. A temperatura também interfere fortemente no ponto de saturação. Para os solutos sólidos, geralmente, quanto maior a temperatura, maior o coeficiente de solubilidade. Isso porque a alta temperatura quebra as ligações intermoleculares entre as moléculas do solvente e fazem com que elas interajam mais facilmente com as moléculas ou íons do soluto. Já para os gases, o aumento da temperatura diminui o coeficiente de solubilidade, em geral.

Segundo Rosa (1998), em reservatórios profundos e sob alta pressão, chega-se a ter 150 vezes mais gás em volume do que a quantidade de óleo, trazida à superfície. Ao atingir a superfície, sob a pressão atmosférica, o gás se desprende do óleo, tornando-se mais viscoso, mais denso e mais escuro.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir: os estados da matéria, sua relação com a densidade; conceito de pressão, pressão atmosférica e pressão dentro de um líquido; Lei de Stevin; unidades de medida utilizadas para pressão, a conversão entre elas. Atividade experimental: demonstrar a existência da pressão atmosférica.

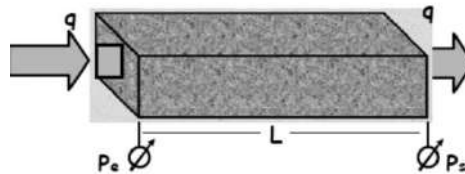
3.4 Vazão e permeabilidade

As rochas componentes dos sistemas petrolíferos possuem uma propriedade física que se chama permeabilidade do fluxo de fluidos, que permite passagem de fluidos sem dano à sua estrutura. (LUCCHESI, 1998). A permeabilidade não depende apenas do fluido, e sim da interação dinâmica entre fluido e poros, configurando transformações de energia no sistema.

A permeabilidade pode ser expressa pela velocidade de fluxo ou vazão, que passa por uma amostra da rocha de seção transversal A (cm^2) e comprimento L (cm), como mostrado na figura 7. A vazão, definida como o volume de fluido que atravessa a seção transversal da rocha por unidade de tempo, é representada pelo produto da área transversal

pela velocidade do fluido. Para um fluido incompressível, para que a vazão permaneça a mesma nas regiões onde o tubo sofre um estrangulamento, o fluido escoar mais rapidamente. (LUCCHESI, 1998).

Figura 7 - Vazão do fluido por uma amostra de rocha de seção transversal constante.



Fonte: Lucchesi (1998).

A vazão de fluido por uma rocha é proporcional à seção transversal e à diferença de pressão (Δp), e inversamente proporcional à viscosidade e ao comprimento da rocha. A constante de proporcionalidade é a permeabilidade absoluta (k) índice empregado para estabelecer parâmetros de permeabilidade dos solos, medida em miliDarcy (mD).

$$Q = \frac{kA \Delta P}{\eta L} \quad (2)$$

A diferença de pressão corresponde a uma “perda de carga” à medida que o fluido escoar. Temos uma equação constitutiva fenomenológica derivada que descreve o fluxo de um fluido através de um meio poroso.

Em uma rocha com permeabilidade de 1 Darcy passa 1 cm^3 de fluido, com viscosidade de 1 centipoise, por segundo, através de uma seção de 1 cm^2 de área e comprimento de 1 cm, submetida a uma diferença de pressão de 1 atmosfera entre os extremos da amostra. (LUCCHESI, 1998).

As permeabilidades das rochas podem variar muito de acordo com sua formação, no quadro 3 é mostrado o tipo de permeabilidade em função da constante de permeabilidade absoluta.

Quadro 3 - Tipo de permeabilidade das rochas geradoras.

Tipo de Permeabilidade	Valor de k (permeabilidade)
Baixa	1 a 15 mD
Moderada	15 a 50 mD
Boa	50 a 250 mD
Muito boa	250 a 1000 mD
Excelente	> 1000 mD

Fonte: Lucchesi, 1998.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir conceitos básicos de hidrodinâmica: vazão, conservação de massa, lei de Poiseuille, tipos de escoamento. Atividade experimental: demonstrar o aumento da velocidade com a diminuição da área transversal de escoamento.

3.5 Tensão superficial

Uma boa redução da tensão superficial melhora bastante o deslocamento do fluido no meio poroso. A tensão superficial na interface entre um par de fluidos tem a finalidade também de ser um método auxiliar para obter as devidas condições de homogeneidade entre os mesmos.

As propriedades de superfície aparecem sempre que houver duas substâncias em contato. Essas substâncias podem ser: líquido com líquido, líquido com sólido ou sólido com gás. Essas propriedades se devem à assimetria das forças entre as moléculas dos dois meios na superfície. (NUSSENZVEIG, 2002).

Atualmente, os centros de pesquisa têm como um de seus principais objetivos o desenvolvimento e aplicação de técnicas capazes de aumentar a economicidade de um campo de petróleo, seja pela antecipação de produção, seja pelo aumento do fator de recuperação do campo. Dentre estas técnicas, destaca-se a estimulação de formações, que consiste em qualquer operação ou intervenção realizada em uma jazida portadora de hidrocarboneto, de forma a aumentar sua permeabilidade, facilitando o escoamento de fluido da rocha para o poço.

A acidificação da rocha geradora é uma técnica de estimulação na qual se injeta uma solução ácida na formação, a fim de dissolver parte dos minerais presentes na sua composição mineralógica ou o dano presente, aumentando ou recuperando a permeabilidade da formação ao redor do poço (THOMAS *et al.*, 2004). Esta acidificação é feita atualmente com a inserção de polímeros hidrossolúveis. Estes polímeros são macromoléculas que apresentam um

comportamento ímpar, com estabilidade à hidrólise, viscosidade elevada sob condições severas (alta temperatura e concentração de sais), capacidade de reduzir a tensão superficial, se comportando como um tensoativo, além de apresentarem estabilidade em meio ácido, para que possam ser utilizados no tratamento de formações carbonatas.

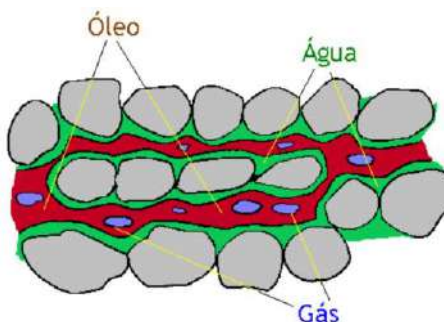
OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir tensão superficial, como é calculada, sua medição, dependência com a temperatura e natureza das substâncias. Atividade experimental: demonstrar a redução da tensão superficial da água ao adicionar detergente à mesma quando uma agulha estiver boiando em sua superfície.

3.6 Capilaridade

O fenômeno da capilaridade ocorre no interior dos meios porosos que constituem os reservatórios de petróleo, os quais, em geral, contêm dois ou mais fluidos imiscíveis. Normalmente um fluido fica em contato com o material sólido (grãos da rocha) e o outro fica em contato com o material líquido. (FJAER et. al., 2008). Os efeitos parciais da saturação do sistema grãos-água-ar ocorrem nos poros da rocha, quando da ocorrência de dois fluidos imiscíveis como óleo e a água. Na figura 8 são representadas as interações citadas e a coesão óleo e água.

Figura 8 - Coesão óleo água.



Fonte: Fjaer et al., 2008.

O efeito da capilaridade é o de produzir uma diferença de pressão entre o óleo (fluido não molhado) e a água (fluido molhado). A magnitude da pressão capilar depende do tipo de fluidos, condições das rochas (parte sólida) e o tamanho do poro onde os fluidos estão submersos. Como os fluidos envolvidos têm diferentes densidades, estes apresentam

diferentes gradientes de pressão. Deve-se levar em consideração também a tensão ou força superficial entre o óleo e a água. (LUCCHESI, 1998).

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir a ação capilar e sua dependência com a natureza do líquido e do tubo, e o raio do tubo, além da sua relação com a tensão superficial. Atividade experimental: Observar a curvatura de líquidos diferentes em tubos capilares.

3.7 Compressibilidade

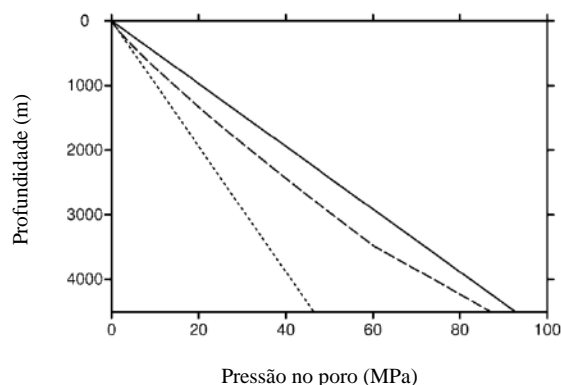
Compressibilidade é a medida da deformação quando ocorre variação da pressão à qual o corpo está submetido. Os gases têm maior compressibilidade do que líquidos, e estes têm maior compressibilidade do que os sólidos.

O reservatório é um sistema de rocha e fluidos, no qual cada componente apresenta uma compressibilidade. Para a rocha reservatório pode-se pensar em compressibilidade sob três aspectos: sobre a rocha matriz (sólido), sobre a rocha e os poros como um todo (sólido e fluido), e sobre o ar nos poros. Nestes sistemas ocorrem variações de pressões que acarretam em variações de volume, calculando-se, portanto, a compressibilidade efetiva da formação do reservatório.

A análise da compressibilidade nas rochas normalmente é feita com análises laboratoriais. Uma característica das rochas ligada à compressibilidade é a porosidade da mesma. Ocorre uma variação direta da compressibilidade em relação à porosidade, ou seja, quanto mais compressível for o sistema, maiores vazões e recuperações do petróleo podem ser esperadas. (LUCCHESI, 1998).

A pressão nos poros das rochas geradoras varia conforme mostra o gráfico 1, para a relação profundidade (m) x pressão nos poros (MPa), no qual a linha pontilhada representa um óleo de densidade $1,05 \text{ g/cm}^3$, a linha tracejada um fluido de densidade $1,75 \text{ g/cm}^3$ e a linha cheia representa um fluido de densidade $2,1 \text{ g/cm}^3$. Assim, observa-se que a pressão nos poros (parâmetro de formação - todas aquelas que são impostas às formações) depende da profundidade das rochas, da densidade dos fluidos e conseqüentemente da compressibilidade.

Gráfico 1 - Profundidade da rocha geradora x Pressão no poro.



Fonte: Fjaer et. al., 2008.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá definir compressibilidade, discutir sua dependência com pressão, volume específico e temperatura. Atividade: Comparar os valores tabelados para a compressibilidade de várias substâncias.

3.8 Condutividade térmica

A condutividade térmica das rochas, que quantifica a habilidade das mesmas de conduzir calor, é um tema relativamente complexo, pois depende de vários fatores, dentre eles se destacam a composição química, porosidade, tipo de fluido no espaço poroso, densidade, pressão, temperatura, textura, estrutura, grau de consolidação, grau de alteração, etc.

Uma rocha é constituída por um agregado de minerais, cada um com valores ou intervalos característicos de condutividade térmica, portanto é de se esperar que, ao se variar as proporções entre os minerais, a condutividade também apresente modificações, mostrando uma complexa interação de variáveis. (FIGUEIREDO, 2006).

No que diz respeito à avaliação da condutividade térmica nas rochas de onde se extraem o petróleo, Clauser & Huenges (1995) citado por Figueiredo (2006), descreveram o comportamento dos quatro grupos de rochas: sedimentares, vulcânicas, plutônicas² e

² As rochas plutônicas, ou intrusivas, são formadas devido à lenta cristalização de um magma em profundidade. (FIGUEIREDO, 2006).

metamórficas³, investigando a variação da condutividade térmica e os principais fatores que a influenciavam por meio de uma análise estatística.

No caso específico de rochas sedimentares, os fatores determinantes seriam a porosidade e origem da partícula sedimentar, já em rochas vulcânicas o fator determinante seria a porosidade, em rochas plutônicas o ponto principal seria a fase mineral dominante e por fim, as rochas metamórficas seriam influenciadas pela anisotropia e pela fase mineral predominante.

Os autores tratam ainda da influência da temperatura e pressão sobre a condutividade térmica para vários tipos de rochas. Para a variável temperatura, notou-se uma queda da condutividade térmica com o incremento de temperatura (0 a 1000° C), entretanto, as variações são muito pequenas no intervalo de 0 a 100° C, mostrando que neste intervalo a condutividade térmica é praticamente a mesma. Já o efeito da pressão é muito menos evidente, mas no geral mostra um discreto aumento de condutividade térmica com o aumento da pressão, no intervalo de 0 a 500 MPa.

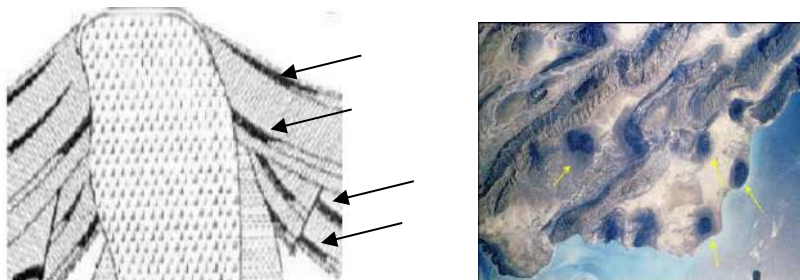
A porosidade mostrou excelente correlação com a condutividade térmica, em que baixos valores de porosidade (poros vazios) estavam sempre associados a altos valores de condutividade térmica e vice-versa. A relação com a porosidade foi analisada ainda com o preenchimento dos poros por fluidos (água e óleo) e em todos os casos foram constatados um aumento na condutividade térmica, em especial para os líquidos mais densos.

Deve-se destacar no sistema petrolífero quando a rocha selante é o sal. O sal possui porosidade e permeabilidade nulas, o que o torna o selo ideal para rochas reservatório como mostrado na figura 9. (VAZ, 1987, apud BENGALY; LANDAU; BEDREGAL, 2003).

O sal possui alto valor de condutividade térmica, que provoca mudanças sobre o gradiente térmico. Considerando-se estruturas mais complexas, como um domo (anticlinal) de sal, ocorre o “Efeito Chaminé”, isto é, há o aquecimento da região próximo ao seu topo e o resfriamento da região próxima à sua base, formando-se um dipolo térmico.

³ Rochas metamórficas são aquelas que são formadas por transformações físicas e/ou químicas sofridas por outras rochas, quando submetidas ao calor e à pressão do interior da Terra, num processo denominado metamorfismo. (FIGUEIREDO, 2006).

Figura 9 - (Esquerda) Domo de sal servindo de trapa. Setas indicam petróleo. (Direita) Afloramentos salinos (setas amarelas) do Golfo Pérsico. Visão aérea do satélite.



Fonte: Bengaly; Landau; Bedregal, 2003.

Este fenômeno ocorre devido à combinação entre o contraste de condutividades entre o sal e material que o envolve e a geometria assumida, gerando assim um caminho de menor resistência ao fluxo térmico da região. Isto modifica a história de maturação da matéria orgânica, pois a cada 10° C dobra-se o nível de atividade cinética de uma região. (MELLO, 1994; apud BENGALY; LANDAU; BEDREGAL, 1995).

As bacias sedimentares contendo essas estruturas sempre tiveram destaque na indústria do petróleo, por conterem importante parcela das reservas mundiais de hidrocarbonetos. Aproximadamente 60% de todo o petróleo produzido está trapeado por estas estruturas, e as principais províncias petrolíferas do mundo (Oriente Médio, Golfo do México, etc.) estão marcadas pela sua presença. Estas estruturas são importantes para a indústria do petróleo devido ao fato de constituírem excelentes trapas para o confinamento deste em reservatórios e, em decorrência das diferentes geometrias assumidas e do seu alto valor de condutividade térmica, provocam profundas alterações no gradiente térmico de uma bacia sedimentar, o que traz significativas mudanças no nível de maturação de matéria orgânica em potenciais geradoras localizadas próximas a estas. (BENGALY; LANDAU; BEDREGAL, 2003).

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir os processos de transmissão de calor, condução, convecção e radiação. Relacionar materiais que são bons condutores térmicos e bons isolantes. Atividade experimental: Mostrar a transmissão de calor por condução aquecendo uma extremidade de um material condutor.

4 Descobrindo Petróleo

Encontrar a nobre esponja de petróleo não é simples, e embora não possa ser uma questão de sorte ou azar, a verdade é que não se pode prever onde existe petróleo, e sim os locais mais favoráveis para sua ocorrência. (THOMAS et al., 2004).

Todos os reservatórios aflorantes já são conhecidos. Entre os métodos superficiais, a identificação de afloramentos de petróleo na superfície é o mais óbvio. Algumas vezes é o gás natural que aflora à superfície, sendo invisível, mas possível de ser detectado por instrumentos em concentração tão pequena quanto 1/100.000. (ROSA, 1998). Amostras de ar na área explorada são analisadas, obtendo-se mapeamentos dos pontos com a concentração de gás encontrado. Análise semelhante pode ser feita de gases dissolvidos na água. Esses métodos geoquímicos, entretanto, não são capazes de detectar ocorrências que não afloram à superfície.

Até a uma década atrás, a exploração do petróleo envolveu a procura em áreas sedimentares nos continentes. Agora tem sido dada grande importância à busca do petróleo na plataforma continental sob o mar, ao longo das costas, implicando em um custo muito maior. (ROSA, 1998).

A pesquisa do petróleo pode ser dividida em duas fases: Inicialmente, devem-se localizar as estruturas que tenham condições de armazenar petróleo na área de uma bacia sedimentar. Essa fase envolve o estudo do relevo e das amostras de superfície para desenhar um Mapa Geológico, que dá uma ideia de como é o subsolo na região. (MELLO; HESSEL; SOLDAN; 1998). Em seguida devem-se verificar quais dessas estruturas contém o petróleo. Segundo Motta (1998), a probabilidade de haver óleo em determinado local pode ser descrita como o produto das probabilidades de cada um dos eventos estruturadores para se originarem petróleo ocorrerem individualmente. Assim, a probabilidade de sucesso é igual ao produto da probabilidade de ocorrência de: Rocha Geradora; Trapa; Reservatório; Rocha Selante; Migração e Tempo maturação do petróleo.

Como pode-se observar é um risco encontrar petróleo, e quando este é encontrado, há o risco quanto ao volume do óleo encontrado em função do capital investido. Segundo Motta (1998), estabelece-se a partir da análise dos parâmetros que determinam a distribuição de tamanho (área e volume) das possíveis acumulações (área da estrutura, espessura, porosidade, saturação do óleo), redistribuindo os índices de sucesso em probabilidades de descobertas de vários tamanhos de campos de petróleo. Faz-se uma conta com a melhor estimativa possível

para os componentes da fórmula. Nada garante que o número calculado vá se verificar, pois há uma grande imprecisão ou variabilidade nos parâmetros estimados. (MOTTA, 1998).

Segundo Gibson e Millegan (1998), citado por Braga e Dias (2000), os métodos potenciais foram os primeiros a serem utilizados como ferramenta nos estudos pioneiros de Geologia e Geofísica, na década de 1920, para exploração de recursos minerais. Desde então, a praticidade e o baixo custo dos equipamentos (gravímetros e magnetômetros) permitiu sua ampla utilização para obter anomalias gravimétricas e magnéticas. Braga e Dias (2000) cita ainda Nettleton (1976), em que o mesmo escreve que na década de 1970, após ampla utilização com fins científicos, os métodos potenciais foram os precursores nas pesquisas e exploração de recursos minerais marinhos, principalmente os hidrocarbonetos (petróleo e gás) nas margens continentais. Foram amplamente utilizados para o mapeamento dos limites das bacias sedimentares e de diversos alvos importantes para a indústria do petróleo. A seguir são discutidos vários métodos de descoberta de petróleo e os princípios físicos relacionados.

4.1 Métodos de Descoberta: Gravímetro

A gravimetria⁴ permite detectar a localização de materiais de diferentes densidades a diferentes profundidades. A gravimetria consiste de um conjunto de técnicas e operações que têm por finalidade a medida da intensidade da aceleração da gravidade em qualquer local que esteja sob a influência do campo gravitacional terrestre. (FAGGION, 2011).

A gravidade terrestre, ou força da gravidade num ponto da superfície terrestre, é a resultante entre a força de atração gravitacional aparente exercida pelas massas terrestres e a força centrífuga, causada pelo movimento de rotação terrestre, que atuam sobre uma unidade de massa situada neste ponto. O vetor resultante dessas forças é dirigido para o interior da Terra, definindo a direção da vertical naquele ponto, como mostrado na figura 10.

Segundo Faggion (2011), a importância da determinação da gravidade pode ser evidenciada em vários aspectos como:

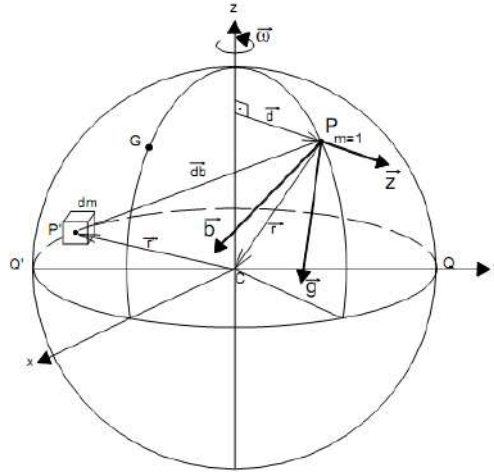
- a) cálculo das anomalias da gravidade, com as quais é possível calcular as componentes principais do desvio da vertical e da ondulação geoidal⁵;
- b) o módulo da gravidade é de fundamental importância na determinação da altitude ortométrica⁶, da latitude juntamente com o nivelamento geométrico;

⁴ Do latim “gravis”, peso, e do grego “metron”, medida. (FAGGION, 2011).

⁵ Geóide - superfície equipotencial do campo da gravidade. (FAGGION, 2011).

⁶ Altitude ortométrica - é a distância vertical de um ponto, situado sobre a superfície terrestre, em relação a um geoide de referência. (FAGGION, 2011).

Figura 10 - Composição vetorial do campo gravitacional para um determinado corpo em um ponto P qualquer. \vec{z} representa a força centrífuga, \vec{b} a força gravitacional terrestre e $\vec{g} = \vec{b} + \vec{z}$ é a força gravitacional em um dado ponto.



Fonte: Faggion, 2011.

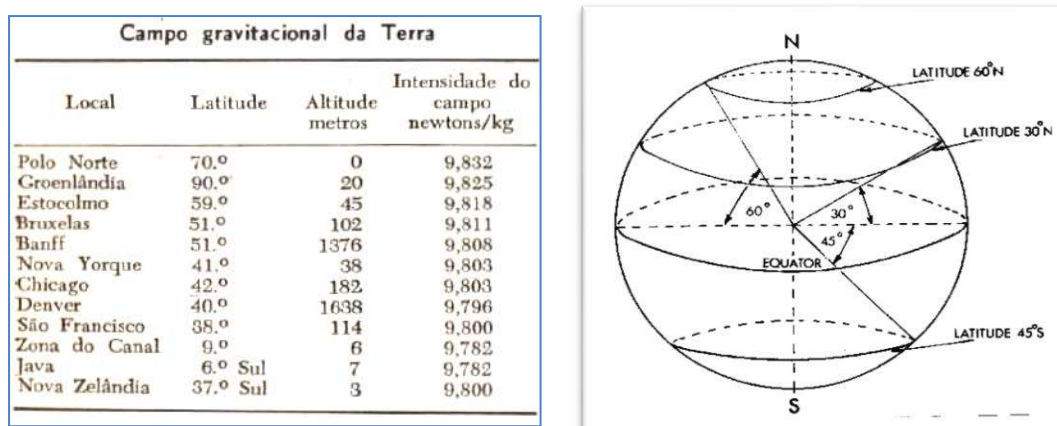
- c) auxílio na prospecção (Geologia);
- d) modelagem Geofísica e estrutura da Terra.

A determinação do módulo do vetor da gravidade g se baseia na observação dos efeitos físicos que este provoca. Portanto, a determinação de sua grandeza é realizada por medida indireta, relacionada a outras grandezas, as quais são objetos de mensurações diretas, por exemplo, o deslocamento de uma massa presa por uma mola e submetida à ação do campo gravitacional.

Pela Lei da Gravitação de Newton, a força gravitacional vai diminuindo de intensidade à medida que se afasta da Terra. Além disso, existem inúmeros fatores que influenciam o valor do campo gravitacional, tais como o movimento de rotação da Terra, a não homogeneidade da distribuição de massa e a posição de outros planetas. Na figura 11 são apresentadas medidas do campo gravitacional da Terra em vários locais.

Assim, a “maçã” de Newton não cai da mesma maneira em diferentes subsolos, pois a gravidade varia com a densidade das rochas. As anomalias gravíticas e a atração gravítica são diferentes em todas as zonas do planeta. A média da densidade dos sedimentos depositados numa bacia sedimentar está entre 1,8 a 2,2 g/cm³. (FJAER *et al.*, 2008).

Figura 11 - Variação do campo gravitacional da Terra em função da altitude e da latitude.



Fonte: Physical Science Study Committee, 1963.

A gravimetria para a descoberta de petróleo é feita através de um sensoriamento remoto, não sendo necessária a perfuração; pode ser aplicada usando um avião para sobrevoar a região que se quer explorar. O gravímetro é mantido nivelado por meio de plataforma estabilizadora, mas as acelerações verticais da aeronave não permitem que o sistema esteja constantemente em equilíbrio. Ainda assim, as características do sistema (amortecimento e sensibilidade) permitem que as leituras sejam realizadas mesmo sob estas condições.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir a lei da gravitação universal, rever os conceitos de massa, peso e densidade. Discutir a variação do campo gravitacional da Terra e os efeitos da aceleração sobre a medida de g . Atividade: Discussão da experiência de Cavendish.

4.1.1 Gravímetro do tipo pêndulo de mola

O gravímetro tipo pêndulo de mola é baseado num sistema físico simples, em que o peso de um corpo é equilibrado por uma força elástica. A variação da posição de equilíbrio do sistema em função da variação da gravidade permite a avaliação da mesma. Dentro do intervalo elástico da mola, a sua deformação e, portanto, sua força elástica varia de acordo com o peso colocado no extremo da mola. A força gravitacional provoca distensão na mola e, na situação de equilíbrio, esta força tem mesmo módulo e sentido oposto ao da força elástica.

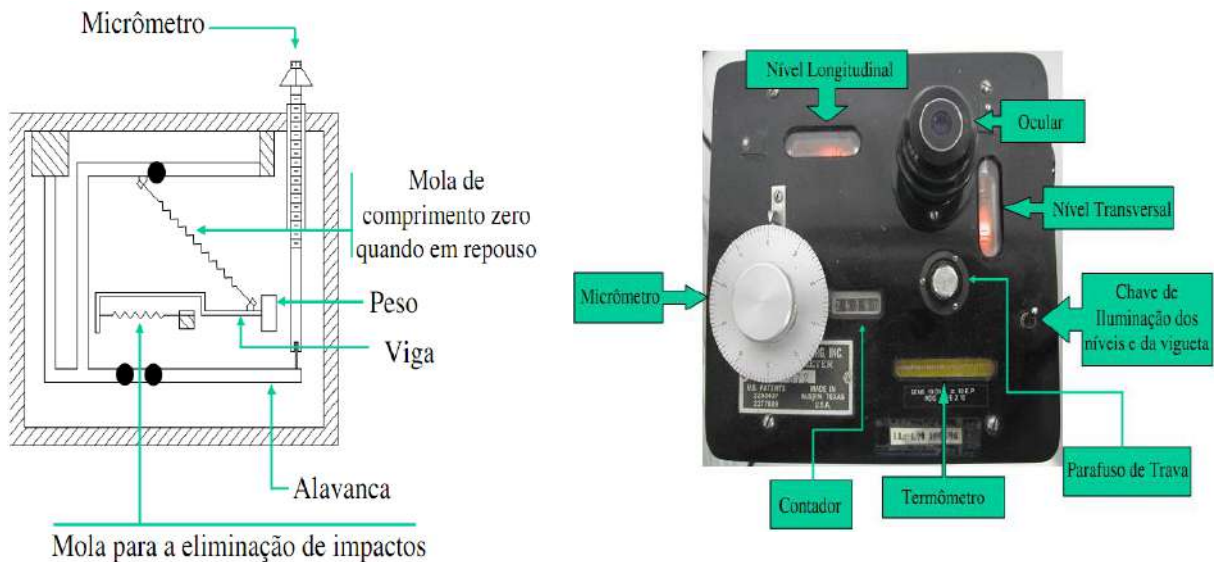
Ao passar de uma estação, como é chamado um ponto fixo na superfície terrestre, até outra estação observa-se uma alteração da gravidade de $(g + \Delta g)$ e, a deformação Δx pode ser

medida pela diferença das leituras efetuadas na elongação da mola na escala E_A e E_B nas duas estações. A partir da variação da deformação pode-se remontar à variação da gravidade:

$$\Delta g = C\Delta x = C(E_B - E_A) \quad (3)$$

sendo: C = fator de calibração do equipamento e E_A e E_B = leituras das escalas nas estações A e B. Na figura 12 é mostrado o esquema e o painel frontal de um gravímetro de mola de LaCoste & Romberg de 1988.

**Figura 12 - Esquema de construção do gravímetro LaCoste & Romberg (esquerda).
Visão superior do gravímetro LaCoste & Romberg (direita).**



Fonte: Faggion, 2011.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir a lei de Hooke, força elástica, energia potencial elástica e as características de um sistema massa-mola. Atividade experimental: Medir a constante elástica de uma mola ou gominha e determinar a validade da lei de Hooke.

4.1.2 Gravímetro pendular

O método consiste em se medir o período de um pêndulo de comprimento invariável em duas estações, uma com gravidade conhecida e outra com gravidade desconhecida. Então na primeira estação tem-se o período:

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g_1}} \quad (3)$$

e analogamente, para a segunda estação tem-se o período:

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g_2}} \quad (4)$$

Por comparação, conclui-se que:

$$g_2 = g_1 \frac{T_1^2}{T_2^2}. \quad (5)$$

A unidade da gravidade no SI é o m/s^2 , mas no caso da gravimetria, é aceito de forma generalizada o Gal e os seus submúltiplos. O quadro 4 mostra a equivalência entre unidades.

Quadro 3 - Equivalência entre as unidades utilizadas pelo gravímetro e o sistema internacional para o campo gravitacional.

Nome	Símbolo	Equivalência
Gal	Gal	$10^{-2} \times m.s^{-2}$ ou $cm.s^{-2}$
Miligal	mGal	$10^{-5} \times m.s^{-2}$
Microgal	μ Gal	$10^{-8} \times m.s^{-2}$
Nanogal	nGal	$10^{-11} \times m.s^{-2}$

Fonte: Faggion, 2011.

A atração gravitacional aumenta nos topos das anticlinais. Quando ocorre essa anomalia, dita pesada sugere-se a formação de trapas. Já a atração gravitacional diminui sobre os domos de sal, pois este é menos denso do que as demais rochas, tratando-se então, neste caso, de uma anomalia leve. (MELLO; HESSEL; SOLDAN, 1998).

Dessa maneira, conclui-se que zonas com materiais mais densos que o meio envolvente são afetadas por maior atração para o centro da Terra e são acompanhadas por

anomalias positivas; zonas com materiais menos densos são afetadas por menor atração para o centro da Terra e são acompanhadas por anomalias negativas.

Importante frisar que o pêndulo de mola tem precisão maior do que o pêndulo simples, daí ser mais utilizado.

Segundo Thomas *et al.* (2004), a utilização individual do método gravimétrico não consegue diagnosticar com confiabilidade a real estrutura do interior da Terra, muito embora possa mostrar a existência de algum tipo de anomalia. Contudo, quando utilizado conjuntamente com outros métodos geofísicos e com o conhecimento geológico prévio da área, permite um avanço significativo no entendimento da distribuição espacial das rochas submersas.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir o pêndulo de Foucault, o simples e a dependência de seu período de oscilação com o comprimento do pêndulo e *g*. Atividade experimental: Determinar a aceleração da gravidade local por meio da medição do período de um pêndulo simples

4.2 Métodos de Descoberta: Magnetometria

Magnetometria é a área da Geofísica que utiliza as medições do campo magnético na Terra e tenta, a partir delas, inferir a distribuição em profundidades de minerais com propriedades magnéticas distintas. Ou seja, os magnetômetros são equipamentos muito sensíveis que medem na superfície o magnetismo gerado no interior da Terra, fornecendo informações sobre as estruturas rochosas presentes em subsuperfícies que possuem propriedades magnéticas. O campo magnético terrestre é perturbado pela natureza das rochas do subsolo, assim, medindo suas variações deduz-se a forma da bacia. (MELLO; HOSSEL; SOLDAN, 1998).

As anomalias do campo magnético da Terra podem ser em função da latitude e altitude, da variação magnética diurna, das tempestades magnéticas e da susceptibilidade magnética das rochas. Este último elemento permite que seja inferido de forma indireta o tipo de rocha que se encontra no interior da Terra.

A variação magnética diurna origina-se a partir da interação entre a ionosfera⁷ e os ventos solares. Esses ventos são emitidos pelo Sol e consistem em um fluxo de partículas carregadas. A fonte destas partículas é a coroa solar (parte mais externa do Sol), onde as altas temperaturas geram uma pressão térmica maior do que a pressão gravitacional. Neste caso, a gravidade solar não é mais capaz de “segurar” as partículas do plasma coronal que escapam para o meio interplanetário na forma de um “vento”. O vento solar tem uma densidade média de 10^7 partículas por metro cúbico, temperaturas da ordem de 10^5 K, e atinge uma velocidade de 450 km/s, próximo à órbita da Terra. (SILVA, 2006). Como a variação magnética diurna é previsível, esta pode ser retirada dos dados a partir de levantamentos estatísticos em consonância com o levantamento efetuado na área pretendida.

A tempestade magnética ou geomagnética é um fenômeno durante o qual o campo magnético terrestre apresenta variações rápidas em escalas globais. O termo foi elaborado por Alexandre Von Humbolt no século XVIII, que foi o primeiro a construir uma rede de monitoramento do campo magnético terrestre. O campo magnético terrestre, que é da ordem de 30.000 a 60.000 nT, sofre variações de 50 a mais de 500nT durante as tempestades. (SILVA, 2006). Acredita-se que as tempestades magnéticas mais intensas são criadas por ejeções de massa coronal⁸ rápidas que produzem distúrbios no vento solar ao menos no período de maior atividade. Assim, durante essas tempestades não é recomendável realizar o levantamento pela magnetometria.

Segundo Thomas *et al.* (2004), as anomalias produzidas por rochas de diferentes susceptibilidades magnéticas podem ser comparadas, por analogia, com a quantidade de magnetita disseminada nas rochas. Existem logicamente outros minerais, mas nenhum em quantidades significativas quanto a magnetita. Consequentemente, rochas básicas (baixo teor de sílica) apresentam valores altos de susceptibilidade magnética e rochas ácidas (alto teor de sílica) apresentam valores baixos.

As rochas sedimentares apresentam, em geral, valores de susceptibilidade magnética muito baixos, razão pela qual as medidas magnéticas são relacionadas diretamente com as características do embasamento. Segundo Mello; Hossel; Soldan (1998), o embasamento possui uma grande susceptibilidade magnética, então se o magnetismo é forte nos magnetômetros o embasamento não está longe. Então este método assinala os casos

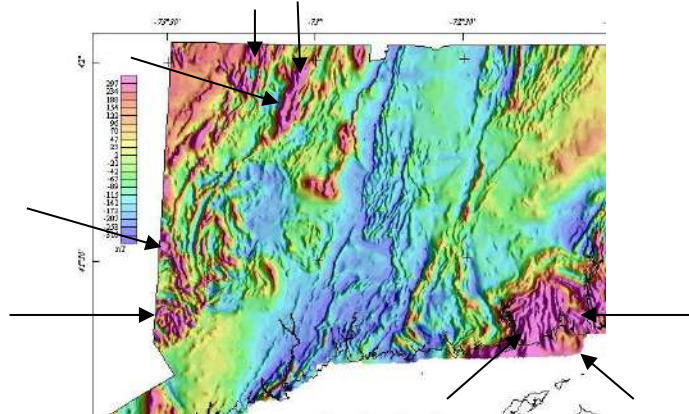
⁷ A ionosfera se localiza a cerca de sessenta mil quilômetros de altitude, é composta de íons, plasma ionosférico, e, devido à sua composição, reflete ondas de rádio até aproximadamente 30 MHz. (IONOSFERA, 2011).

⁸ Massa coronal é ejeção de material da coroa solar. O material ejetado é plasma, primariamente constituído de elétrons e prótons, com pequenas quantidades de materiais mais pesados tais como hélio, oxigênio e ferro. (SILVA, 2006).

desfavoráveis à formação do petróleo, pois as bacias sedimentares são desprovidas de magnetismo. Quando da alternância intensa dos mesmos, então a situação é favorável à formação de trapas estruturais que reservam o petróleo. Os magnetômetros podem ser acoplados a qualquer tipo de veículo aéreo, para que sejam feitos diversos tipos de levantamentos magnéticos.

Segundo Braga e Dias (2005), a magnetometria é utilizada para uma série de objetivos de prospecção, como por exemplo: (i) para a definição do "potencial e riscos de exploração" de bacias e sub-bacias sedimentares, (ii) para definição dos limites entre crosta oceânica e crosta continental e (iii) para o mapeamento de novas fronteiras exploratórias. Através da modelagem dessas anomalias pode-se ainda investigar a idade térmica da crosta oceânica e seus processos magmáticos, a espessura dos sedimentos, a morfologia do embasamento, a espessura da crosta e o fluxo de calor superficial. Deve-se destacar que todos estes parâmetros são fundamentais para a definição dos ambientes tectono magmáticos e sedimentares com potencial para exploração de recursos minerais marinhos. Exemplo desse ambiente é refletido no mapa 1 que descreve o mapa magnético de Connecticut nos Estados Unidos da América. As regiões em roxo (setas) são as mais prováveis de se encontrar um sistema que se aproxime de um terreno sedimentar.

Mapa 1 - Padrões geológicos que gera o mapa magnético.



Fonte: Science for a Changing World, 2011.

Existem vários tipos de magnetômetros como o *Flux Gate*, de bombeamento ótico ou Célula de Absorção, e o de *Nuclear Magnetic Resonance* (NMR), este último, refere-se ao princípio físico responsável pelo campo magnético nuclear. Os núcleos comportam-se como barras magnéticas. Esses *spins* magnéticos podem interagir com campos magnéticos produzidos externamente produzindo sinais mensuráveis.

A NMR utiliza o hidrogênio, pois o mesmo tem um momento magnético relativamente grande e é abundante na água do mar e nos hidrocarbonetos que estão dentro do espaço das rochas sedimentares.

Pela calibração do NMR tem-se a frequência de ressonância magnética do hidrogênio, que é a frequência com que o próton gira em torno do eixo magnético, que foi definida matematicamente pelo físico britânico Joseph Larmor⁹ como sendo proporcional ao campo aplicado e a cada núcleo usado. No NMR também mede-se a amplitude de sinal, proporcional ao número de núcleos de hidrogênio presentes, calibrada para transmitir a porosidade proveniente das rochas. Outra calibragem importante é o tempo de relaxamento, que constitui o ciclo de medição feito pelo magnetômetro; a distribuição do tempo de relaxamento é a medida de distribuição dos tamanhos dos poros.

Sobre os métodos potenciais analisados Reford e Lafehr (1980), citados por Braga e Dias (2000), afirmam que estes podem fornecer informações fundamentais para a exploração e produção de hidrocarbonetos, mas devem ser integrados a outros métodos geofísicos para sua melhor confiabilidade.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir o campo magnético terrestre, magnetismo atômico e nuclear. Materias magnéticos. Aurora boreal. Atividade experimental: Construir uma bússola simples e analisar a direção do campo magnético da Terra.

4.3 Métodos de Descoberta Através da Sísmica

O método sismográfico utiliza a transmissão do som ou ultrassom dependendo do processo de sísmica com a produção de eco nas rochas. Segundo Mello, Hessel e Soldan (1998), a sísmica absorve 95% do orçamento de pesquisa na fase de encontrar o “ouro negro”.

Ondas elásticas são perturbações mecânicas que se propagam através de um material. Tais ondas são capazes de viajar longas distâncias através da Terra, e assim trazer informações sobre as deformações rochosas que são inacessíveis. Nas prospecções sísmicas, as ondas elásticas são geradas na superfície e os ecos de várias camadas nas formações

⁹ Joseph Larmor foi um físico e matemático irlandês, professor do Trinity College da Universidade de Cambridge de 1903 a 1932. Larmor foi o primeiro a publicar a transformação de Lorentz, em 1897, dois anos antes de Hendrik Antoon Lorentz e oito anos antes de Albert Einstein. (LARMOR, 2011).

rochosas são usados para mapear a estrutura do subsolo. Ondas elásticas se propagando no ar, na água e nas rochas são normalmente chamadas de ondas acústicas ou ondas sonoras. As ondas elásticas podem ser longitudinais ou de compressão (ondas P) e transversais ou de cisalhamento (ondas S).

A velocidade de propagação das ondas elásticas depende da rigidez e densidade do meio. Assim, as ondas sonoras se propagam com diferentes velocidades dependendo do tipo de rocha que atravessam e quando incidem numa interface, como uma fronteira entre duas formações rochosas ou uma fissura na rocha, parte da energia da onda é transmitida e parte é refletida. Estes parâmetros por sua vez dependem de outros fatores, tais como a porosidade da rocha. Assim, as ondas elásticas fornecem um método de parâmetros de formação específica, que pode ser estimado pelos profissionais atuantes na área da Geofísica, Geologia, Engenharia de Petróleo, etc.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir ondas mecânicas, suas características, tipos de ondas mecânicas, grandezas que a caracterizam: amplitude, frequência, período, velocidade. Propriedades das ondas: reflexão e refração. Atividade experimental: Determinar a velocidade de propagação de uma onda transversal e longitudinal em uma corda.

4.3.1 Propagação das ondas elásticas em função da porosidade da rocha

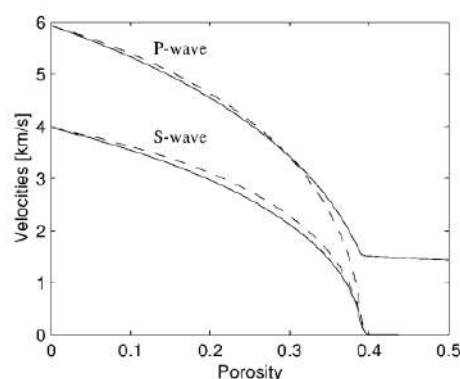
Normalmente as rochas sedimentares são consideradas materiais homogêneos, no entanto, elas são constituídas de pequenas partículas amplamente heterogêneas, então é intuitivamente claro que as propriedades das rochas dependam também da natureza microscópica da mesma. Para este estudo mais detalhado usa-se a “teoria do poro elasticidades” que é baseada na suposição de que a rocha é composta de uma parte sólida e uma parte de líquidos, que são separadas numa escala microscópica, mas que coexistem numa escala macroscópica.

A resposta às propagações elásticas nas rochas depende da parte não sólida dos materiais. A resposta elástica de um material poroso pode ser significativamente afetada pela presença de fluido nos poros. Em sedimentos mal consolidados, com água saturada (líquido/vapor), a velocidade da onda de compressão (v_p) pode ser várias vezes maior do que quando o material estiver seco. Qualitativamente, pode-se explicar isso como uma consequência da maior resistência contra a velocidade de compressão fornecida pelo fluido

dos poros. Para materiais mais compactos, ou materiais confinados sob alta pressão, a contribuição do fluido dos poros é relativamente menor, daí o efeito de saturação ser muito menor. Como saturação implica também num aumento na densidade, pode-se esperar uma redução da velocidade da onda de compressão para uma rocha dura (menos porosa). O efeito de saturação depende da relação entre a rigidez da rocha e um aumento na v_p ; podendo, assim, ser visto também em rochas de baixa porosidade se a rigidez do quadro é suficientemente baixa.

Claramente, o impacto do fluido dos poros sobre as velocidades está fortemente relacionado com a porosidade da rocha. Assim, é possível estimar a porosidade de uma rocha uma vez que a velocidade de propagação de uma onda de compressão for conhecida. O gráfico 2 ilustra como a saturação do fluido afeta as velocidades elásticas para arenitos com porosidades diversas, baseado no limite de porosidade 0,39 estabelecido pela American Society for Testing and Materials – ASTM para quantificar a porosidade de uma rocha. As linhas tracejadas representam as rochas secas, e as linhas sólidas representam as rochas saturadas. Pode-se observar pelo gráfico que a saturação levará a um aumento da v_p para rochas com alta porosidade (moles), enquanto pode levar a uma ligeira diminuição $1/v_p$ para rochas duras. Observa-se também que a saturação sempre leva a uma redução na velocidade da onda de cisalhamento (v_s).

Gráfico 2 - Velocidades das ondas de compressão (P-wave) e de cisalhamento (S-wave) em função da porosidade.



Fonte: Brier, 2011.

4.3.2 Propagação das ondas elásticas em função da distância

Quando a onda elástica se propaga num meio, no caso através de uma rocha, a amplitude será reduzida conforme ela se propaga, ou seja, ela vai ser atenuada. Isso ocorre em parte devido à dispersão da energia das ondas em outras direções e em parte devido à

transformação da energia das ondas em outras formas de energia (absorção). Na absorção, a energia é convertida em calor. A amplitude cai exponencialmente com a distância percorrida pela onda numa direção positiva x :

$$l = l_0 e^{-\alpha x} \quad (6)$$

em que l é a amplitude da onda (m); l_0 é a amplitude inicial da onda (m); e α é o coeficiente de atenuação do tipo de rocha, em m^{-1} ou dB/m. (FJAER *et al.* 2008).

4.3.3 Propagação das ondas elásticas em função da temperatura

Normalmente, há uma ligeira redução na velocidade de uma onda elástica com o aumento da temperatura. Este efeito é geralmente inferior a 5% para um aumento de 100°C na temperatura. (BOURBIE *et al.*, 1987; CHRISTENSEN, 1982 apud FJAER, *et al.*, 2008). O efeito pode ser significativamente maior se um ou mais tipos de rochas coexistirem. A atenuação da amplitude de ondas elásticas também é mais acentuada devido ao aumento de temperatura. (JONES e NUR, 1983 apud FJAER *et al.*, 2008).

4.3.4 Propagação das ondas elásticas em função da saturação dos poros das rochas

A saturação parcial da relação água e gás pode ter um efeito significativo nas velocidades e atenuação de propagação das ondas elásticas. Considerando rochas saturadas com água e sal, o fluido dos poros pode ser tratado como uma suspensão de bolhas de gás em um líquido; pode-se supor então que a pressão do gás segue a da água a qualquer momento.

O efeito líquido é que faz com que a velocidade da onda de compressão caia drasticamente em relação à onda de cisalhamento, que depende basicamente da densidade, daí a sua dependência apenas com a saturação. Uma saturação muito baixa faz a velocidade de cisalhamento aumentar.

Em altas proporções, a distribuição de água e de gás no espaço dos poros faz as velocidades aumentarem, por exemplo, a água presa em fendas finas pode responder de maneira eficaz à compressão e as velocidades (P e S) que serão proporcionalmente mais altas. Ressalta-se que a distribuição de água e gás é o resultado das propriedades de umidificação da rocha e a forma como a saturação real foi alcançada. Consequentemente, não há uma relação direta entre a velocidade da onda de compressão e saturação de água. (ENDRES e KNIGHT,

1989 apud FJAER *et al.*, 2008), mas sim uma gama de possíveis valores para a velocidade em cada nível de saturação.

Comportamento semelhante pode ser visto por rochas parcialmente saturadas com óleo. O óleo pode conter quantidades significativas de gás dissolvido que reduzem a densidade e conseqüentemente reduz o contraste entre o petróleo e o gás. Nota-se que a densidade aumenta significativamente com o aumento da pressão, portanto o efeito da saturação diminui com o aumento da pressão do fluido.

As considerações citadas acima também podem ser usadas para estimar o comportamento da rocha saturada com água e óleo. Os efeitos da saturação são significativamente menores neste caso, pois, as diferenças de volume e densidade são muito menores para a água e óleo do que para a água e gás.

O quadro 3 mostra alguns valores típicos de propriedades do fluido dos poros, para um par de combinações de pressão e temperatura, correspondendo aproximadamente a cerca de 1500 m e 3000 m de profundidade, respectivamente. Nota-se que existem variações significativas nas propriedades do petróleo e gás dependendo de sua composição química, assim como variações de pressão e condições de temperatura numa dada profundidade. Também as propriedades de salmoura variam um pouco com a salinidade e a quantidade de gás dissolvido. As propriedades da salmoura são típicas de água do mar.

Quadro 3 - Alguns exemplos de propriedades dos fluidos nos poros.

Fluido	Condições	Densidade (g/cm³)
Salmoura	50° - 15 MPa	1,02
Salmoura	100° - 100 Mpa	1,00
Óleo pesado	50° - 15 MPa	0,70-0,80
Óleo pesado	100° - 100 Mpa	0,65-0,75
Óleo leve	50° - 15 MPa	0,60-0,70
Óleo leve	100° - 100 Mpa	0,60-0,70
Gás	50° - 15 MPa	0,20-0,40
Gás	100° - 100 Mpa	0,25-0,40

Fonte: Modificado de Fjaer *et al.* 2008.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá mostrar diagrama de fase de várias substâncias, discutir a mudança de fase líquido/vapor, dependência com pressão e temperatura, variação da densidade. Atividade experimental: Determinar a temperatura de ebulição para várias misturas: água e sal; água e álcool, etc.

4.3.5 Variação da frequência das ondas elásticas

Ondas são mecanismos de vibração que transmitem mais energia em frequências próximas de sua frequência de ressonância. As velocidades das ondas de compressão e cisalhamento têm sua energia máxima em torno de 10 kHz. A frequência de pico é mais baixa em formações macias e poros grandes, e é mais elevada nas formações duras e de poros pequenos. Em uma formação homogênea, as ondas de compressão e de cisalhamento não são dispersivas e suas frequências variam entre 6 e 13 kHz.

As velocidades das ondas de compressão e cisalhamento apresentam algumas variações em formações porosas. Materiais não porosos e rochas secas são um meio não dispersivo. A dispersão de frequência é causada pela interação entre o fluido dos poros e a estrutura da rocha; sendo que pequenas fissuras e a formação dos grãos das rochas também provocam atenuação. Quando o comprimento de onda da onda é maior do que a espessura da camada de formação da rocha, também há atenuação. A variação ocorre em torno de 1 kHz.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir ressonância, frequência de ressonância, meios dispersivos e não dispersivos. Atividade experimental: Demonstrar a ressonância do som produzido por um diapasão em um tubo de ar.

4.4 Prospecções Sísmicas - Sísmica de Poço

O poço de petróleo é uma amostra pontual das características da subsuperfície na área de pesquisas. Na sísmica de poço evidencia-se a Tomografia Sísmica ou sísmica poço a poço, é uma maneira direta de obter-se o campo de velocidade das ondas de compressão e cisalhamento, utilizando o tempo de propagação destas entre fontes e receptores localizados em poços adjacentes ou na superfície.

Nos instrumentos acústicos de profundidade, o som se propaga a partir do transmissor, passando por meio da lama e formação rochosa, até chegar aos receptores, no qual é detectado como um pulso de pressão. A diferença entre o tempo de chegada de dois receptores, dividida pela distância que separa esses receptores, fornece uma medida do tempo de trânsito de intervalo Δt , expresso normalmente em ms/m ou ms/km. Segundo Brier (2011), o registro sonoro é uma gravação do tempo de trânsito de intervalo Δt ou lentidão versus

profundidade. Essa lentidão revelará a formação das rochas sedimentares, a porosidade e o fluido nos poros.

Os transmissores e receptores são feitos de material piezelétrico. Ao se colocar um material piezelétrico num campo elétrico, as cargas elétricas da rede cristalina interagem com o mesmo e produzem tensões mecânicas, vibrações que geram som. Por outro lado, pressões acústicas, que causam variações nas dimensões de materiais piezelétricos, provocam o aparecimento de campos elétricos neles. Exemplos destes materiais são o quartzo e a turmalina.

O sinal captado pelos receptores, normalmente entre 10 kHz e 20 kHz, pode ser amplificado e mostrado em um osciloscópio ou registrador.

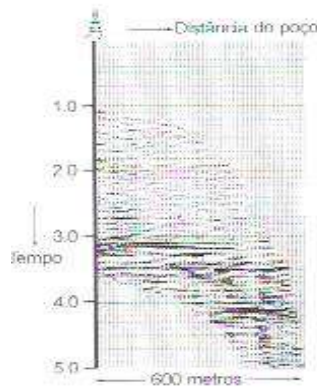
O transmissor pode ser feito também de material magnetostritivo, no qual são produzidos vibrações e calor intenso por meio da passagem de eletricidade sobre metais especiais.

Os limites ou interfaces entre diferentes partes de um meio são importantes para a maioria dos aspectos de acústica na rocha. Em particular as interfaces são as bases da sísmica e as ferramentas usadas para produção de ondas sonoras focarão as refrações para obtenção de um caminho de onda através da rocha.

Os registros fornecem o campo de ondas ascendentes (ondas que se propagam de baixo para cima, como as reflexões, por exemplo) e o campo de ondas descendentes, os quais representam a resposta sísmica das rochas nas vizinhanças do poço, e podem ser comparados diretamente com a seção sísmica correspondente. A figura 13 mostra um exemplo de sísmica de poço com afastamento lateral. Ela nos mostra o levantamento que é feito na vertical, o resultado analisado pelos geólogos, é a resposta sísmica dos tipos de rochas atravessadas pelo poço. É possível fazer estimativas dos parâmetros das rochas a partir do conhecimento da velocidade, e pelo tipo do sistema rochoso encontrado, identificar se há possibilidade de haver um sistema petrolífero.

A área entre os poços é dividida em células regulares com velocidade constante e o caminho percorrido pela onda sísmica para cada par fonte/receptor é discriminado em função do número de células. O tempo de chegada da onda no receptor será a soma dos tempos fracionários em cada célula. Utilizando vários receptores em um poço e diferentes posições da fonte no outro poço (inclusive na superfície se for o caso), é possível recobrir cada célula com um número significativo de raios e, após sofisticado tratamento computacional, obter o campo de velocidade entre os poços.

Figura 13 - Exemplo de levantamento sísmico com afastamento lateral.



Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir ondas sonoras, ultrassom, dependência da velocidade de propagação com o meio, material piezelétrico, material magnetostritivo. Atividade: Calcular o tempo de propagação de um pulso sonoro no ar para várias distâncias. Estes tempos são perceptíveis pelo ouvido humano?

4.5 Prospecção Sísmica - Sísmica de Reflexão de Alta Resolução

Na prospecção sísmica de reflexão, o som é produzido por uma pequena explosão em um buraco feito para esse fim e é captado em microfones (geofones ou hidrofones) espalhados pelo terreno (mar) a distâncias pré-fixadas. As fontes de energia sísmica mais utilizadas são a dinamite e o vibrador em terra, e canhões de ar comprimido em levantamentos marítimos. Cada uma das fontes emite um pulso característico (uma assinatura) que se propaga em todas as direções. Estes pulsos elásticos (λ muito pequeno) duram na ordem de 200 milissegundos, e se refletem e refratam em cada uma das camadas geológicas em profundidade, retornando à superfície com informações valiosas para a pesquisa do petróleo.

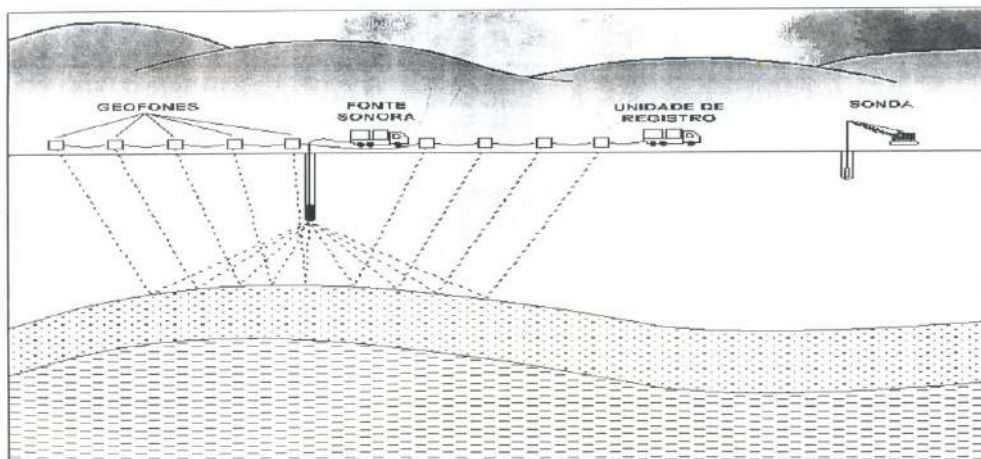
Os receptores utilizados para registrar as reflexões destes pulsos são os geofones, que são compostos por uma bobina suspensa dentro de um campo magnético gerado por um potente ímã acondicionado em um invólucro impermeável. Quando uma onda sísmica atinge o geofone, o movimento relativo entre a bobina e o ímã gera uma corrente elétrica induzida que é proporcional a vários fatores, dentre eles a amplitude da onda incidente. Outro receptor é o hidrofone que utiliza cristais piezelétricos, que geram uma corrente elétrica proporcional à

variação de pressão produzida pelas ondas acústicas na água. Estes devem reproduzir as vibrações mecânicas na forma de oscilações elétricas, que são transmitidas até o sismógrafo, onde são digitalizadas, multiplexadas e registradas.

Registrando o tempo de chegada da onda sonora a cada microfone, calcula-se a sua velocidade e daí procura-se descobrir o tipo de rocha que ela atravessou através da análise dos dados por geofísicos e geólogos, dentre outros profissionais, com *softwares* sofisticados. Na figura 14, é ilustrado o processo como um todo numa sísmica terrestre e nas figuras 15 e 16 a sísmica marítima.

Um levantamento sísmico é a única ferramenta disponível para o mapeamento e caracterização de estruturas de superfície de grande porte. Os levantamentos sísmicos de superfície poderão servir de base para aplicações em larga escala de acordo com os dados sísmicos registrados.

Figura 1 - Propagação e reflexão do pulso ultrassônico na terra.



Fonte: Lucchesi, 1998.

Figura 15 - Propagação e reflexão do pulso ultrassônico no mar.



Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

Figura 16 - Vista área de uma sísmica marítima.



Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

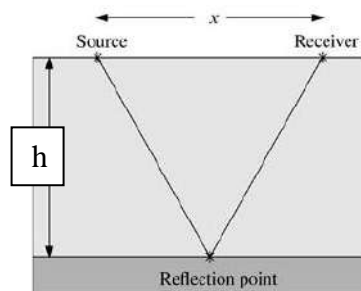
O elemento básico em um levantamento sísmico é um tiro sísmico. A distância (x) entre a fonte e o receptor é chamada de *offset*. Quando um tiro é disparado por uma fonte, uma onda sonora semiesférica se propaga através dos maciços rochosos. Em cada interface entre as diversas camadas da formação, uma parte da onda é refletida e propaga em direção à superfície e, eventualmente é detectada no receptor. O tempo decorrido a partir do tiro disparado até a reflexão detectada no receptor é chamado de *Two-Way Traveltime* (TWT).

Consideremos a situação mostrada na figura 17, na qual a onda se propaga com velocidade v através de uma formação uniforme até que é refletida para um avião, numa interface horizontal de profundidade h .

Através de uma análise geométrica simples, pode-se mostrar que o TWT para um determinado deslocamento pode ser expresso pela equação hiperbólica:

$$t_T^2(x) = \left(\frac{2h}{v}\right)^2 + \frac{x^2}{v^2} \quad (7)$$

Figura 17 - Onda se propaga numa formação uniforme e é refletida numa profundidade h .



Fonte: Modificado de Fjaer *et al.*, 2008.

À medida que a distância x entre fonte e receptor aumenta o tempo varia conforme uma função hiperbólica da profundidade e velocidade, onde considerando um único geofone temos uma linha reta, supondo múltiplos geofones (aumento de x) as reflexões não são planas, são hipérbolas.

Se um conjunto de fotografias forem registradas por um avião, com *offsets* diferentes ao redor do mesmo ponto de reflexão, correspondentes valores de TWT em relação ao deslocamento deve, então, cair em uma linha reta num gráfico $t_T^2(x) \times x^2$. Assim é possível identificar as variáveis h e v a partir dos dados sísmicos.

Se a formação consiste em várias camadas, a onda é refletida em cada interface real, e o TWT é detectado diferentemente em função do seu caminho de volta para a superfície. A amplitude de uma reflexão sísmica também traz informações sobre a rocha no sentido de fornecer dados sobre sua densidade.

Para todos os fins práticos, quando uma frente de onda incide sobre uma interface separando duas rochas com velocidades e densidades diferentes, parte da energia incidente é refratada para o meio inferior e parte da energia se reflete e retorna à superfície. A quantidade de energia que retorna para a superfície depende do contraste de impedâncias acústicas dos dois meios e do ângulo de incidência. Conseqüentemente, através de processamento criterioso do registro das energias das reflexões captadas na superfície e com o conhecimento da distribuição de velocidades, é possível fazer estimativas dos parâmetros das rochas, das impedâncias acústicas e parâmetros de calibração, e também fazer estimativas da porosidade ao longo dos reservatórios.

OFICINA DE FÍSICA

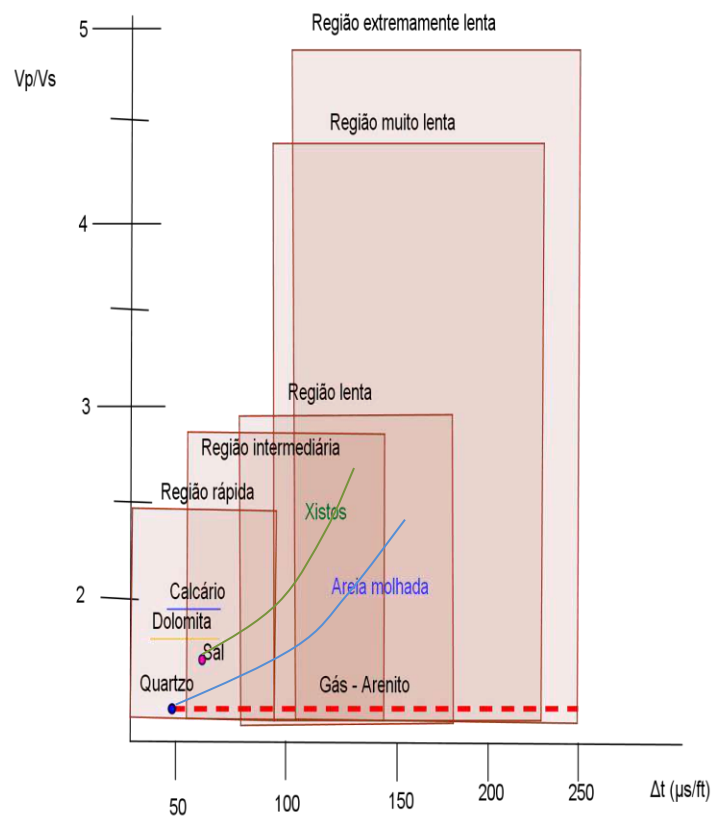
Neste ponto o professor poderá discutir a indução eletromagnética de Faraday, o funcionamento de uma bobina, sua relação com o alto-falante e o microfone. Em relação às ondas sonoras: Coeficiente de transmissão e reflexão, impedância acústica. Atividade: Calcular os coeficientes de transmissão e reflexão da onda sonora para vários pares de meios. Comparar os resultados. Deduzir a equação (7) junto com os alunos.

4.6 Registro das ondas sonoras pelos receptores

O objetivo do registro das ondas sonoras é medir a sua velocidade de propagação nas formações rochosas. Segundo Brier (2001), os parâmetros de processamento podem ser

determinados a partir de informações bem básicas, sem a necessidade de intervenção do usuário especialista. Para identificação dos sinais sonoros e interpretação dos dados, cinco tipos diferentes de formação de ondas foram definidos para cobrir toda a gama de formações geológicas. Eles são definidos como rápido, intermediário, lento, muito lento e extremamente lento. Cada tipo é definido pelo mínimo e máximo valor para a lentidão da velocidade de compressão e pela relação entre a velocidade de compressão e de cisalhamento. Então, com esses dados, as velocidades de compressão e de cisalhamento são determinantes para análise das formações rochosas. As categorias das formações são melhores verificadas numa relação (v_p/v_s) com a variação do tempo que as ondas atravessam a região examinada. No gráfico 3 é mostrado como as formações são interpretadas em função das velocidades das ondas sonoras.

Gráfico 3 - Formações geológicas interpretadas a partir das velocidades da onda sonora.



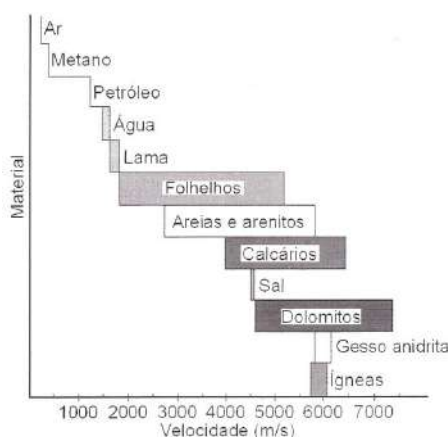
Fonte: Modificado de Brie, 2011.

Por exemplo, para uma relação $v_p/v_s=2$ em um intervalo de tempo de $100\mu s/ft$, referimos a uma região de formação intermediária com possibilidade do tipo xisto. Existem gráficos mais detalhados (mesmo princípio) para uma análise mais criteriosa, mas o escolhido

nos mostra uma visão mais ampla e ilustrativa. A escolha dos parâmetros para a inserção nos métodos computacionais torna-se única para um dado intervalo e os mesmos dados processados com o presente método por diferentes usuários em locais diferentes produz as mesmas respostas finais. Este modo de funcionamento é chamado o modo padrão.

Como o método sísmico de reflexão permite o cálculo das velocidades citadas, é possível fazer estimativas dos parâmetros das rochas a partir do conhecimento das velocidades. No gráfico 8 tem-se uma relação entre materiais típicos da litologia do petróleo com a velocidade de compressão, ou seja, para cada velocidade temos uma forte probabilidade de relacionar a tipos de materiais que compõem a rocha e fazer uma previsão (geólogos e geofísicos) da formação de um sistema petrolífero.

Gráfico 4 - Distribuição de velocidades comumente encontradas na prospecção de petróleo.



Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

4.7 Processamento de dados sísmicos

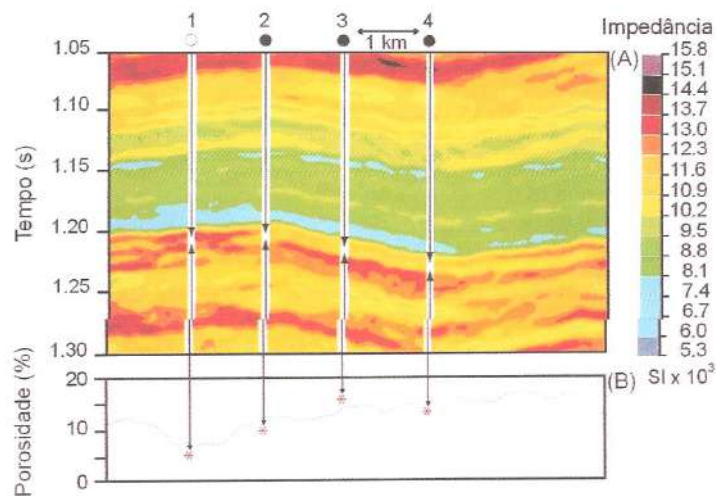
No caso da sísmica para o petróleo, o processamento de dados tem como objetivo produzir imagens da subsuperfície com a máxima fidelidade possível, atenuando as várias distorções “ópticas” presentes no método. Geólogos e geofísicos interpretam estas imagens na busca de situações mais favoráveis à acumulação de hidrocarbonetos, ou para caracterizar reservatórios produtores, melhorando o gerenciamento da produção. (THOMAS *et al.*, 2004).

Na prática, o processamento de dados sísmicos é complicado por vários fatores, tais como variações de velocidades nas camadas rochosas, reflexões espúrias provenientes de ondas refletidas, reflexões múltiplas, etc.

A resolução dos dados sísmicos, ou seja, o tamanho típico dos menores objetos que podem ser vistos com as reflexões é geralmente assumido como sendo de um quarto do comprimento de onda ($\lambda/4$). Como a onda sísmica contém uma faixa de frequência (1-10kHz), grande amplitude e longa duração, o limite de resolução é normalmente definido como o comprimento de onda da componente que tem a maior frequência.

A interpretação das feições geológicas presentes nas seções sísmicas pode indicar situações favoráveis à acumulação de hidrocarbonetos. Estas situações são analisadas em detalhe para eventual perfuração de um poço pioneiro. A figura 18 é uma imagem que reúne essas análises cuja escala vertical é o tempo de ida e volta de reflexão e a escala horizontal é a distância em metros ou quilômetros. Para a conversão da escala vertical de tempo para metros, é fundamental o conhecimento da distribuição de velocidades de propagação nas rochas.

Figura 18 - (A) Exemplo de seção de impedância acústica obtida pelo processamento de dados sísmicos. (B) Estimativas de porosidade ao longo da seção e comparação com as porosidades medidas nos poços, marcados pelos asteriscos vermelhos.



Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

Os registros de campo, com os relatórios da fase de aquisição e os dados de topografia ou navegação, são submetidos a um pré-processamento inicial com correções que atenuam as distorções causadas pelos receptores e pelo equipamento de gravação. As correções consideram as variações topográficas e anomalias superficiais em relação a uma superfície de referência (nível do mar) nos levantamentos terrestres. Nos marítimos as correções adicionam frações de tempo nos registros sísmicos, simulando o posicionamento dos canhões (detonadores) e dos receptores na superfície do mar. Após as correções estáticas,

tudo se passa como se tiros e receptores estivessem em uma mesma superfície plana horizontal, que vai corresponder ao tempo zero nas imagens sísmicas.

Existe uma operação de filtragem matemática, devido ao fenômeno da reverberação (reflexão múltipla de uma frequência) presente no método sísmico. Algoritmos especialmente construídos para este fim analisam as propriedades estatísticas dos traços sísmicos e constroem operadores matemáticos que realizam a função de filtragem citada, logicamente obedecendo a parâmetros definidos pelos geofísicos.

Este trabalho tem que se basear na recuperação da energia da onda sonora perdida pela fonte durante a propagação nos meios. Esta perda se dá em função do espalhamento esférico progressivo da energia e da absorção. As reflexões por sua vez devolvem parte da energia para a superfície, impedindo que energias maiores incidam nos refletores mais profundos. Estes fatores provocam um decréscimo exponencial na amplitude do registro sísmico em função da profundidade ou tempo de propagação.

Executam-se as análises de velocidade, subtraindo-se os excessos de tempo no registro de uma reflexão em função das disposições geométricas de tiros e receptores, e os traços geológicos de uma mesma família são somados para formar um único traço representando a geologia daquela posição. O resultado final corresponde a uma seção composta por traços sísmicos colocados lado a lado.

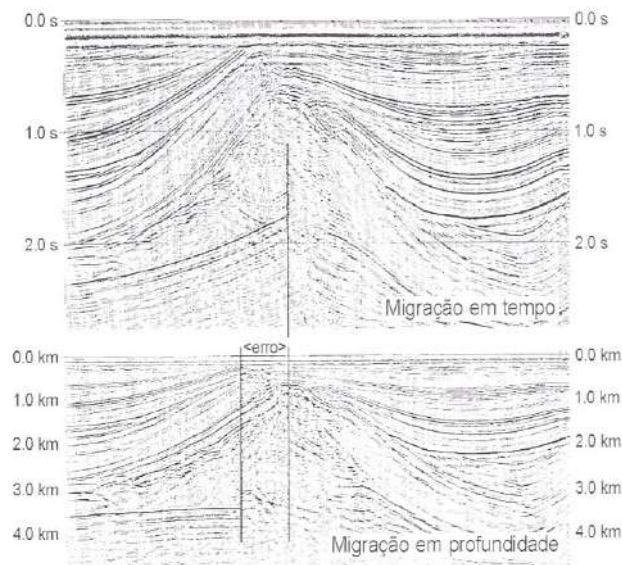
As seções sísmicas finais, geralmente migradas na escala de tempo, são interpretadas para gerar os mapas estruturais. Além da interpretação estrutural, uma série de outras feições geológicas é reconhecida através de padrões típicos relacionados com o histórico de deposição sedimentar, variação lateral de qualquer conjunto de rochas com determinadas características distintivas, presença de camadas e domos de sal, evolução estratigráfica, até a detecção de hidrocarbonetos através da análise de anomalia de amplitude.

Na figura 19 podem-se observar as escalas verticais e as distorções presentes na seção sísmica migrada do tempo. A seção final migrada em profundidade representa a imagem real da subsuperfície verticalmente abaixo do local onde foi executado o levantamento sísmico (2-D). No caso da sísmica 3-D, o algoritmo de migração possui flexibilidade de migrar eventos para a terceira dimensão, permitindo que eventos laterais presentes nas seções 2-D sejam migrados para as suas respectivas posições verdadeiras em 3-D.

Embora os avanços tecnológicos dos métodos geofísicos e geológicos estejam surgindo cada vez mais de forma promissora, somente a perfuração de um poço é que revelará se os prognósticos serão ou não confirmados. Segundo Thomas *et al.* (2004), muitas vezes,

durante a própria perfuração do poço se torna difícil a constatação da presença de hidrocarbonetos nas camadas geológicas atravessadas. Torna-se necessário identificar os vários tipos de rochas perfuradas, localizar aquelas que possam conter hidrocarbonetos e avaliar o significado comercial da ocorrência.

Figura 19 - Exemplo de sísmica 2-D de migração de profundidade.



Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

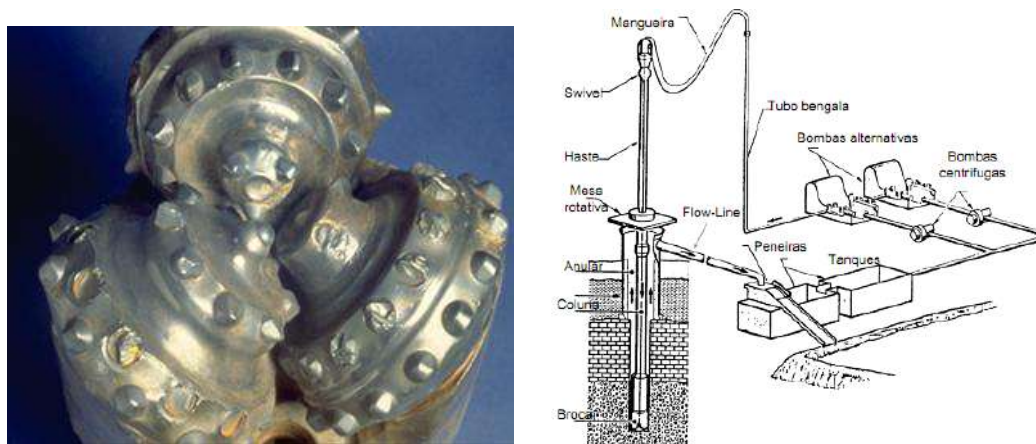
5 Descobrimo Petróleo (*Up Stream*) – Perfuração e Produção

Os primeiros poços de petróleo eram abertos por um processo que usava o impacto da ferramenta no solo, como o de uma picareta, que era presa a um cabo suspenso até a superfície, transmitindo-se um movimento de vai e vem, para cima e para baixo, através de um mecanismo na boca do poço. A operação tinha de ser interrompida periodicamente para remover a terra e os fragmentos de rocha acumulados no buraco e para drenar eventuais infiltrações de água. Quando se atingia um depósito de petróleo, este fluía à superfície devido à pressão interna ser maior que a atmosférica. Esta imagem de fazer jorrar o petróleo ainda é guardada como símbolo de êxito na exploração de petróleo. (ROSA, 1998).

Nas últimas décadas, o método usado para abertura de poços de petróleo é bem diferente, devido à perfuração giratória. Nesse processo, uma broca (figura 20) penetra no solo, ao mesmo tempo em que são removidas para cima as lascas da rocha perfurada. Essa ferramenta é ligada à superfície por um tubo oco que transmite o movimento giratório, produzido por um motor na superfície, à broca no fundo do poço. O diâmetro do poço é maior do que o desse tubo. Segundo Rosa (1998), enquanto a ferramenta trabalha acionada pelo

motor, uma lama especial é injetada pelo tubo, pela ação de bombas existentes na superfície, atingindo o fundo do poço. Sob ação da pressão produzida pelo bombeamento, a lama é obrigada a subir de volta por fora do tubo, trazendo com ela os escolhos de perfuração. O esquema da figura 20 ilustra o funcionamento da perfuração.

Figura 20 - Exemplo de broca de perfuração (esquerda) e esquema simplificado de um poço de perfuração (direita).



Fonte: Schumblager, 2011 e Mansano, 2004.

Essa lama cumpre a dupla finalidade de evitar que qualquer líquido inunde o poço e de carrear para a superfície os escolhos produzidos na perfuração. Sobre a boca do poço é montada uma torre que permite o engate de sucessivas partes seccionadas do tubo à medida que a broca penetra no solo (figura 20). Frequentemente a broca se quebra necessitando-se retirar todo o conjunto para substituí-la.

Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço e uma coluna de revestimento de aço, de diâmetro inferior ao da broca, é descida no poço. O anular entre os tubos de revestimento e as paredes do poço é cimentado com a finalidade de isolar as rochas atravessadas, permitindo então o avanço da perfuração com segurança. Após a operação de cimentação, a coluna de perfuração é novamente descida no poço, tendo na sua extremidade uma nova broca de diâmetro menor do que a do revestimento, para o prosseguimento da perfuração. Assim, percebe-se que um poço é perfurado em diversas fases caracterizadas pelos diferentes diâmetros das brocas. (THOMAS *et al.*, 2004)

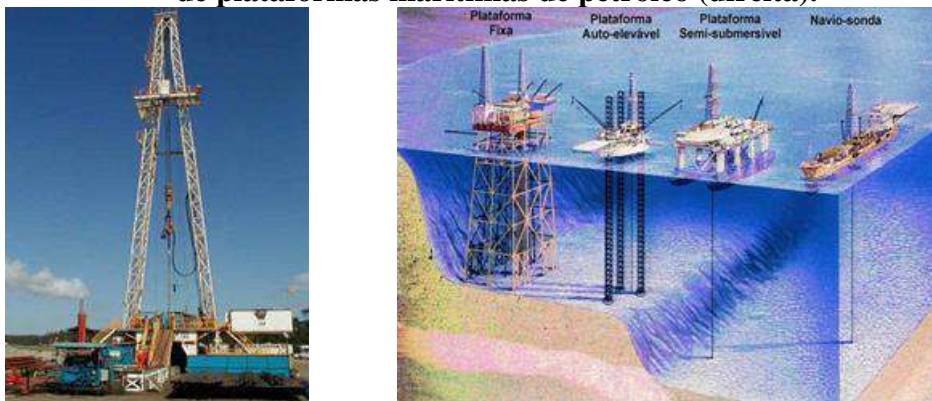
Durante a perfuração é necessária a concentração de grande quantidade de energia na broca para cortar as diversas formações rochosas. Esta energia, em forma de rotação e peso aplicados sobre a broca, é transferida às rochas para promover sua ruptura e desagregação em forma de pequenas lascas, ou cascalhos, que são removidos do fundo do poço e carregados até

à superfície pelo fluxo do fluido de perfuração. Para dimensionar uma coluna de perfuração, devem ser conhecidas algumas grandezas físicas como o peso da lama, a profundidade total prevista para a coluna, a tração de ruptura, pressão interna e o peso máximo previsto sobre a broca.

O fluido de perfuração é composto de misturas complexas de sólidos, líquidos, produtos químicos e, por vezes, até gases. Estes devem ser especificados de forma a garantir uma perfuração rápida e segura, grandezas como a densidade, viscosidade e teor de sólidos, são as que mais influenciam na taxa de penetração – outras, porém, afetam menos como alcalinidade, salinidade, etc.

Há diversos tipos de estruturas (plataformas) a operar na indústria marítima de petróleo. Cada qual tem sua utilidade e abrangência de acordo com a profundidade dos poços e as variáveis do processo que são: tipo do petróleo; localização do campo; perspectiva de produção; e disponibilidade técnica-econômica. Na figura 21 são exemplificados os tipos de plataformas de perfuração e exploração utilizadas em terra, em águas profundas e ultras profundas.

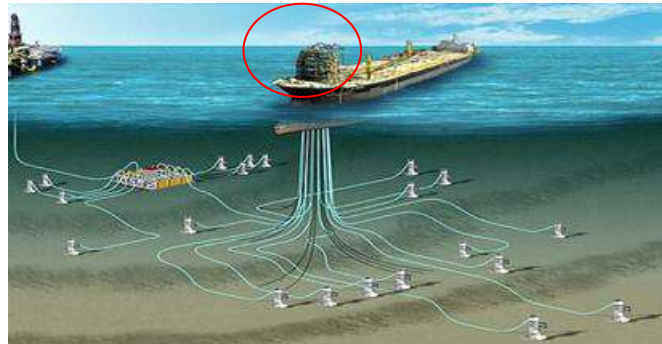
Figura 21 - Esquema simplificado de um poço de perfuração em terra (esquerda). Tipos de plataformas marítimas de petróleo (direita).



Fonte: Thomas *et al.*, 2004 e Mansano, 2004.

Em águas relativamente rasas, até 300 metros de lâmina d'água, os poços são perfurados de plataformas fixas, construídas com uma altura superior à altura da maior onda possível na região. Em águas mais profundas (entre 1000 m e 2000 m) usam-se plataformas semissubmersíveis e em águas ultraprofundas (> 2000 m), são utilizados navios chamados FPSO (*Floating Production Storage*). Os FPSO são navios de posicionamento dinâmico, mantidos em posição por âncoras, motores e um sistema chamado de “*turret*” (figura 22) por onde o navio circunda. O FPSO produz e estoca petróleo até um navio aliviador ou navio tanque (*Shuttle*). (ROSA, 1998).

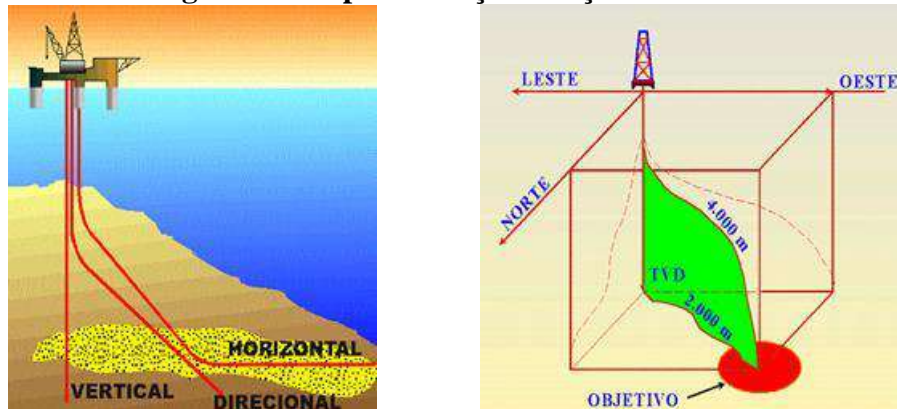
Figura 22 - FPSO com Turrent (assinalado em vermelho) com a exploração de múltiplos poços.



Fonte: Modificado de Mansano, 2004.

Quando se usa o tipo de plataforma em que muitos poços são perfurados, normalmente são feitas perfurações de vários tipos, conhecidas como horizontal, vertical e direcional, usando-se dispositivos apropriados para perfurar em ângulo. Na figura 23 são mostrados os tipos de poços e o poço direcional.

Figura 23 - Tipos de Poços e Poço direcional.



Fonte: Mansano, 2004

Após o buraco perfurado atingir a formação produtiva de petróleo, esta é testada. Os primeiros testes são feitos por instrumentação introduzida no poço que emite sinais à superfície, cuja leitura dá a informação desejada sobre a natureza da formação. Um desses processos usa a diferença de condutividade elétrica da rocha, do petróleo e da água para detectar anomalias. Os sensores detectam, por exemplo, a resistividade das rochas, e a identificação é feita através de comparações com banco de dados. (ROSA, 1998).

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir vetores, suas coordenadas 2-D e 3-D, bem como o funcionamento do GPS. Tópicos de eletricidade como resistência elétrica, condutividade elétrica e condutância poderão ser trabalhados. Atividade: Pesquisar sobre a importância do GPS para o posicionamento dinâmico de navios, condutividade elétrica das rochas, do petróleo e da água do mar.

Outro processo utiliza as diferentes absorções de partículas nucleares por esses materiais. Com os sensores nucleares, detecta-se a intensidade de radioatividade das rochas e dos fluidos em seus poros, podendo-se inferir a composição mineralógica das mesmas. Mas somente com o teste de produção – em que é retirado petróleo do poço – se pode estabelecer a produtividade de um poço. (ROSA, 1998).

Confirmada a produtividade tem-se a ocorrência da completação do poço, que segundo Mansano (2004), seria o conjunto de serviços efetuados no poço desde o momento no qual a broca atinge a base da zona produtora até a cimentação do revestimento de produção, que constitui uma das parcelas mais expressivas do custo da perfuração de um poço de petróleo (15% a 20% no mar, podendo chegar a 50% na terra). A completação consiste em transformar o poço perfurado em uma unidade produtiva, na qual o poço passa a produzir óleo/gás, gerando receitas.

Importante salientar que algumas vezes a pressão do reservatório é suficiente para empurrar o petróleo até a superfície, caso contrário é necessário bombeá-lo ou injetar um fluido para dar pressão. Em geral, isso se torna necessário à medida que se retira o petróleo, perdendo-se a pressão natural. O equipamento que regula esse processo é chamado de “árvore de natal” (figura 24).

Quando o poço é colocado em produção, o equilíbrio das pressões é quebrado: a pressão é menor no poço e vai crescendo à medida que se afasta dele em direção aos limites do reservatório. Quando o volume de fluido produzido é pequeno, em comparação ao tamanho do reservatório, observam-se quedas de pressão (em relação à pressão original) apenas em uma região próxima ao poço. Neste caso, as pressões nas porções do reservatório mais afastadas do poço permanecem iguais à pressão original. Com o avanço da produção, a região afetada (onde se observam quedas de pressão) vai aumentando e, eventualmente, se propaga para todo o reservatório. Quanto mais fluido é retirado, maiores são as quedas de

pressão observadas. O período de tempo em que o poço está produzindo é chamado de período de fluxo (THOMAS *et al.*, 2004).

Figura 24 - À esquerda é mostrada uma Árvore de Natal convencional – seca (superfície terrestre) e à direita uma Árvore de Natal molhada (fundo do mar).



Fonte: Mansano, 2004 e Tn Petróleo, 2004.

Quando um poço é fechado, embora a vazão de produção seja nula, continuará ocorrendo movimento de fluidos no reservatório até que não haja diferença de pressão no seu interior. Assim, a pressão medida no poço crescerá com o passar do tempo e, após um longo período, eventualmente se estabilizará.

A produtividade do poço também se caracteriza pela sua capacidade de fluxo, determinada pelo índice de produtividade (IP), definido por:

$$IP = \frac{q}{P_e - P_w} \quad (8)$$

em que q é a vazão, P_e a pressão estática (ou média) do reservatório e P_w é a pressão de fluxo no fundo do poço. Este índice pode ser utilizado para estimar a vazão do poço e a regulação de fluxo nas “árvores de natal”.

5.1 Bombeio Mecânico com Haste

O movimento de um motor elétrico ou à combustão interna é transformado em movimento de bombeamento através de uma coluna de hastes que transmite o movimento tipo

alternativo (periódico) para o fundo do poço, acionando uma bomba que eleva os fluidos produzidos pelo reservatório para a superfície conforme o esquema da figura 25. Este método é o mais utilizado no mundo, sendo mais recomendado para elevar vazões médias de poços rasos. Para grandes profundidades, só consegue elevar baixas vazões. Os principais componentes do bombeio mecânico com haste são: bomba de subsuperfície, coluna de hastes, unidade de bombeio e motor, conforme esquematizado na figura 25.

A bomba de subsuperfície tem a função de fornecer energia ao fluido vindo da formação, elevando-se para a superfície. A transmissão de energia ao fluido ocorre sob a forma de aumento de pressão através do ciclo de bombeio (figura 25) dividido em curso ascendente (*upstroke*) e curso descendente (*downstroke*). Para uma mesma vazão, maiores diâmetros de pistão implicam em maiores cargas de fluido nas hastes, enquanto menores diâmetros implicam velocidades maiores, com maiores cargas dinâmicas (atrito e aceleração).

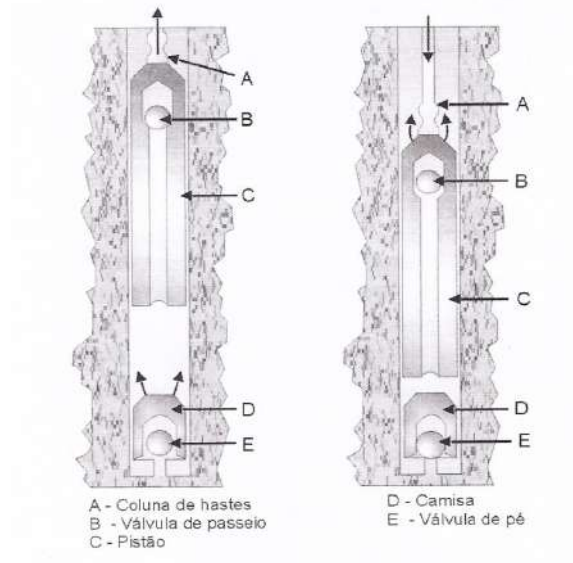
Figura 2 - Sistema de bombeio mecânico (esquerda) e unidade de bombeio (direita).



Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

Considerando que a eficácia volumétrica de uma bomba é sempre inferior a 1 (100%), a vazão de líquido a ser obtida na superfície será menor do que o deslocamento volumétrico. Os fatores que influenciam a eficácia volumétrica de uma bomba são o vazamento de líquido em volta do pistão no curso ascendente, a compressibilidade do fluido e o incompleto enchimento da camisa (figura 26) com o líquido vindo. Segundo Thomas *et al.*, (2004), valores normais de eficiência volumétrica situam-se entre 0,7 e 0,8, porém são influenciados pela razão gás-líquido da formação, viscosidade do fluido, profundidade da bomba, etc.

Figura 26 - Partes da bomba e ciclo de bombeio.



Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

As hastes operam em ambientes que podem ser abrasivos, corrosivos, ou ambos. Estão sujeitas a cargas cíclicas, uma vez que o peso do fluido que está acima da bomba é sustentado pela coluna de hastes no curso ascendente e pela coluna de produção no curso descendente. Devido a esta alternância de esforços a coluna de haste se torna o ponto crítico do sistema.

A haste polida (figura 26) tem o objetivo de proporcionar uma melhor vedação na cabeça do poço. Devido ao movimento alternado da coluna de hastes, a haste polida está continuamente entrando e saindo do poço. A vedação na cabeça do poço é feita através de um equipamento chamado de *stuffing box*.

A haste polida é a que está sujeita à maior força de tração, pois sustenta as seguintes cargas:

- a) P_h : peso da coluna de hastes medido do ar. Valor constante positivo atuando de cima para baixo;
- b) F_e : força de empuxo que é igual ao peso do fluido deslocado pela coluna de hastes. O seu valor é constante e negativo, atuando sempre de baixo para cima;
- c) F_{ac} : força responsável pela variação de velocidade das hastes. A velocidade é nula quando atingem o ponto mais alto e o ponto mais baixo do ciclo, conseqüentemente a energia cinética é nula.
- d) F_f : força de fricção que atua no sentido oposto ao do movimento e é devida ao atrito das hastes com o fluido e com a coluna de produção. O seu valor é variável e diretamente proporcional à velocidade das hastes.

- e) P_f : peso do fluido que é o peso da coluna de fluido que está acima do pistão. Atua somente no curso ascendente, quando todo o fluido que está na coluna de produção é sustentado pela válvula de passeio (figura 26).

A carga (F) medida por um dinamômetro na haste polida é a soma algébrica de todas as cargas anteriormente citadas, ou seja:

$$F = P_h + F_e + F_{ac} + F_f + P_f \quad (8)$$

Esta carga varia continuamente durante um ciclo de bombeamento, porém é sempre positivo ou nulo. Com isso utiliza-se a carta dinamométrica, principal ferramenta disponível para avaliação das condições em que está ocorrendo o bombeio. A carta é obtida instalando-se um dinamômetro para registrar as cargas na haste polida e com isso controlar o bombeio.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir força de atrito, tipos de atrito, peso, empuxo, princípio de Arquimedes. Em termos do tema energia, poderia discutir a energia mecânica e sua conservação. Atividade experimental: Determinar a densidade de um líquido utilizando o princípio de Arquimedes. Verificar o princípio da conservação de energia num pêndulo de mola de movimento vertical.

6 Constituição e Subprodutos do Petróleo (*Down Stream*) – Refino

6.1 Constituição do Petróleo

O petróleo é constituído, basicamente, por uma mistura de compostos químicos orgânicos ou hidrocarbonetos, classificados como:

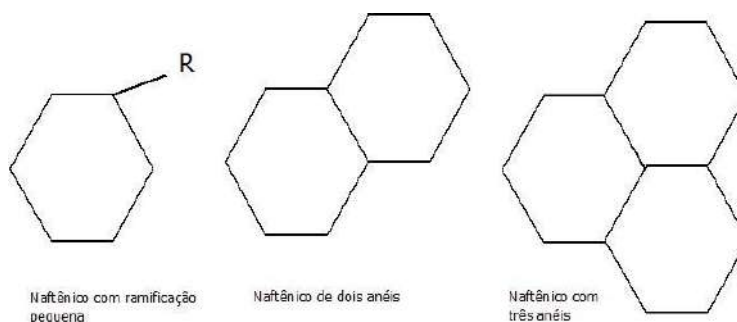
- a) alcanos: Fórmula geral C_nH_{2n+2} .

São conhecidos como hidrocarbonetos parafínicos normais, indo de C_1 a C_{42} . Hidrocarbonetos parafínicos ramificados (isoparafinas ou isoalcanos), que apresentam ramificações em um ou mais átomos de carbono, são constituintes importantes da gasolina.

b) ciclanos: Fórmula geral C_nH_{2n} .

São conhecidos como naftênicos ou hidrocarbonetos parafínicos cíclicos, pois se concentram na fração nafta. Naftênicos com ramificações pequenas são os principais constituintes de frações leves, tipo gasolina de alta octanagem. Naftênicos de dois anéis são constituintes importantes do querosene. Naftênicos com três, quatro ou cinco anéis conjugados ou condensados constituem os óleos lubrificantes. Na figura 27 é mostrado um exemplo de um composto naftênico, no qual as ramificações são os radicais associados e os anéis correspondem ao ciclo total de interligação do hidrocarboneto.

Figura 3 - Exemplos de cadeias de naftênicos.



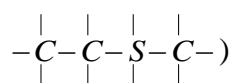
Fonte: Elaborado pelo autor, 2011.

c) aromáticos:

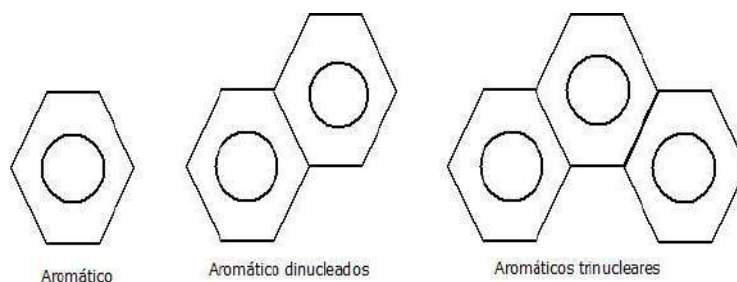
Apresentam anel benzênico como mostrado na figura 28. O Benzeno, Tolueno e Xilenos, de baixo peso molecular, estão presentes em pequenas proporções na nafta. Aromáticos com maior peso molecular ocorrem do querosene ao gásóleo, bem como compostos dinucleados. Compostos tri e tetranucleares se concentram em frações mais pesadas do petróleo, tipo asfalto, etc.

d) não hidrocarbonetos:

São denominados hidrocarbonetos insaturados; neles ocorrem apreciáveis quantidades de constituintes que possuem S, N, O e metais. Esses elementos podem ocorrer como compostos orgânicos contendo heteroátomos (exemplo:



ou ainda compostos inorgânicos. Estes tipos de hidrocarbonetos constituem um grupo extremamente reativo. Embora sejam biologicamente metabolizados em grande quantidade, dificilmente são preservados na natureza.

Figura 28 - Exemplos de cadeias de aromáticos.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2011.

Segundo Thomas *et al.* (2004), os hidrocarbonetos saturados constituem o maior grupo, formado por alcanos normais (n-parafinas), isoalcanos (isoparafinas) e cicloalcanos (naftenos). No petróleo são encontradas parafinas normais e ramificadas, que vão do metano até 45 átomos de carbono. As parafinas normais usualmente representam de 15 a 20% do petróleo, variando, no entanto, entre limites bastante amplos (3 a 35%). Os hidrocarbonetos aromáticos compreendem aos aromáticos propriamente ditos, os naftenoaromáticos e os benzotiofenos e seus derivados (que contêm heterociclos com enxofre).

O quadro 5 mostra a composição química de um petróleo típico.

Os óleos obtidos de diferentes reservatórios de petróleo possuem características diferentes, entretanto, todos eles produzem análises elementares semelhantes às dadas no quadro 6.

Quadro 5 - Composição química do petróleo.

Componentes	Porcentagem
Parafinas normais	14%
Parafinas ramificadas	16%
Parafinas cíclicas (naftênicas)	30%
Aromáticos	30%
Resinas e asfaltenos	10%

Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

Quadro 6 - Análise elementar do óleo cru típico (% em peso).

Elementos	Porcentagem
Hidrogênio	11-14%
Carbono	83-87%
Enxofre	0,06-8%
Nitrogênio	0,11-1,7%
Oxigênio	0,1-2%
Metais	Até 0,3%

Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

A *American Petroleum Institute* (API) realizou análises em vários petróleos de diferentes origens, chegando às seguintes conclusões:

- a) todos os petróleos contêm substancialmente os mesmos hidrocarbonetos, em diferentes quantidades;
- b) a quantidade relativa de cada grupo de hidrocarbonetos presente varia muito de petróleo para petróleo, caracterizando os tipos de petróleo;
- c) a quantidade relativa dos compostos individuais, dentro de cada grupo de hidrocarbonetos, no entanto, é aproximadamente da mesma ordem de grandeza para diferentes petróleos.

Quando a mistura de hidrocarbonetos contém uma maior porcentagem de moléculas pequenas seu estado físico é gasoso, e quando a mistura contém moléculas maiores seu estado físico é líquido, nas condições normais de temperatura e pressão.

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos cuja composição abrange do metano (CH_4) ao hexano (C_6H_{14}), sendo o metano o principal componente. Apresenta, também, pequenas quantidades de componentes diluentes, como o nitrogênio e o vapor d'água, e contaminantes como o gás sulfídrico e dióxido de carbono. O gás natural é mais leve do que o ar, não tem cheiro e a sua combustão fornece de 8.000 a 10.000 kcal/m³, ocorrendo na natureza em solução no óleo ou no estado livre.

OFICINA DE QUÍMICA

Neste ponto o professor poderá discutir a nomenclatura básica de química orgânica, queima ou combustão a reação química pela qual os constituintes do combustível se combinam com o oxigênio do ar, temperatura de ignição, poder calorífico de um combustível, número de octanagem do combustível, estado físico dos combustíveis. Atividade experimental: Elaborar um teste (materiais simples) da qualidade da gasolina num posto perto de casa.

6.2 Processamento Primário de Fluidos

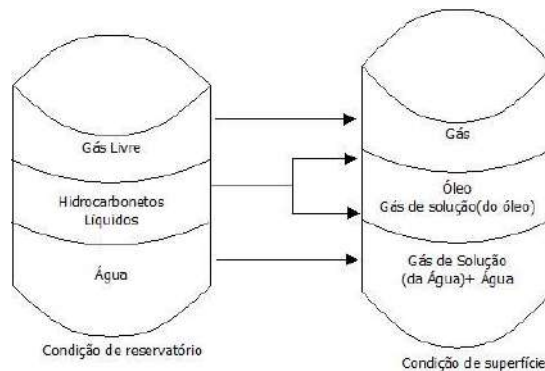
Nos sistemas de produção primária (cabeça do poço) todo o óleo produzido chega com pelo menos dois outros produtos: água e gás combustível. A maior parte dos esforços nas unidades de produção tem por objetivo separar os três componentes básicos do fluido produzido. A água produzida é poluidora, rica em sais e óleo e deve ser tratada antes de ser descartada no mar. O gás produzido deve estar isento de umidade e outros contaminantes

como CO₂. O óleo produzido deve conter um máximo de 1% de água em sua composição para que a refinaria possa trabalhar.

Um campo de petróleo geralmente produz simultaneamente gás, óleo e água, juntamente com impurezas. Como o interesse econômico é somente na produção de óleo e gás, é necessário dotar os campos de um processamento primário dos fluidos para: a separação do óleo, do gás e da água com as impurezas de suspensão; o tratamento ou condicionamento do petróleo para que possa ser transferido para as refinarias, onde é efetuado o processamento propriamente dito; e o tratamento da água para reinjeção ou descarte.

Importante colocar que o fluido no reservatório é diferente quando se encontra na superfície, pois são condições diferentes de temperatura e pressão. Na figura 29 exemplifica-se a diferença do que é encontrado no reservatório e o que se consegue com o bombeamento para a superfície.

Figura 29- Fluidos nos reservatórios e na superfície.



Fonte: Modificado de Thomas *et al.*, 2004.

O sistema de produção no campo de petróleo começa na cabeça do poço, que é equipado com uma válvula para controle de vazão de acordo com as recomendações da engenharia de reservatórios. As vazões são sempre expressas nas condições de superfície (m³std/dia ou barril *standard* por dia, std/dia). As condições padrões da superfície correspondem a pressão de 1 atm e temperatura de 20°C que é também chamada de condição *standard*.

O efeito da gravidade é um agente responsável pela melhoria do desempenho dos mecanismos de produção. A gravidade faz com que ocorra a segregação de fluidos, isto é, os fluidos tendem a se arranjar dentro do reservatório de acordo com suas densidades. Um exemplo, encontrado em alguns reservatórios, é que a diferença de densidade entre o óleo e a água faz com que essa última, apesar de estar se deslocando de baixo para cima, de uma

maneira geral, permaneça sempre atrás do óleo, sem ultrapassá-lo no seu deslocamento em direção aos poços produtores. Então, para esse efeito ocorrer é necessária a regulação da vazão dos poços produtores, com as mesmas favorecendo a essa manifestação, caso contrário, se as vazões forem muito elevadas o gás não será segregado, sendo produzido junto com o óleo (THOMAS *et al.*, 2004).

Os fluidos produzidos passam, inicialmente, por separadores que podem ser bifásicos ou trifásicos, atuando em série ou paralelo. No separador bifásico ocorre a separação gás / líquido, enquanto no separador trifásico ocorre, também, a separação água / óleo. Os separadores baseiam-se nos seguintes mecanismos físicos para separar líquido do gás:

- a) ação da gravidade e diferença de densidades – responsável pela decantação do fluido mais pesado;
- b) separação inercial – mudanças bruscas de velocidade e de direção de fluxo permitindo ao gás desprender-se da fase líquida devido à inércia que esta possui;
- c) aglutinação das partículas – contato das gotículas de óleo dispersas sobre uma superfície, o que facilita sua aglutinação e consequente decantação;
- d) força centrífuga – que aproveita as diferenças de densidade do líquido e do gás.

O condicionamento, ou tratamento do gás natural, é o conjunto de processos físicos e ou químicos ao qual o gás deve ser submetido, de modo a remover ou reduzir os teores de contaminantes para atender as especificações: teores máximos de compostos de enxofre, de dióxido de carbono e de água, ponto de orvalho e poder calorífico. O ponto de orvalho é a temperatura na qual o vapor de água presente passa ao estado líquido na forma de pequenas gotas (condensação); já o poder calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa (ou de volume no caso dos gases) liberada na oxidação de um determinado combustível.

Livre da fase líquida, o gás natural é enviado a uma Unidade de Processamento de Gás Natural (UPGN), onde é promovida a separação das frações leves (metano e etano – gás residual) das pesadas, que apresentam um maior valor comercial. O gás natural, antes de ser processado, é denominado de “gás úmido”, por conter Líquido de Gás Natural (LGN), enquanto o gás residual é o “gás seco”, pois não possui hidrocarbonetos condensáveis. Parte do gás residual é consumida internamente nas próprias áreas produtoras, já o LGN é adicionado ao óleo para transferência.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir a primeira lei de Newton, referenciais com força centrípeta e centrífuga, os processos de decantação e condensação. Atividade: Pesquisar como estes processos contribuem para separar líquidos de gás.

6.3 Refino

O petróleo contém centenas de compostos químicos, e separá-los em componentes puros ou misturas de composição conhecida é praticamente impossível. Antes de o petróleo ser enviado à seção de fracionamento – que consiste na quebra da cadeia de hidrocarbonetos – deverá passar pela dessalinização para remoção de sais, água, e suspensões de partículas sólidas, permitindo uma maior flexibilidade operacional em relação aos tipos de petróleo processados.

Esse processo, conhecido como eletrólise, consiste basicamente em colocar a mistura de petróleo, aquecido entre 60°C e 170°C para reduzir a viscosidade e a tensão superficial; água (entre 3% e 10%); sais e impurezas, num vaso de dessalgação, passando através de um campo elétrico de alta voltagem (15.000 a 50.000V), mantido entre pares de eletrodos metálicos. A força elétrica que atua sobre as gotículas de água dispersas no óleo (meio de baixa constante dielétrica), faz com que estas adquiram uma forma elíptica, alinhadas na direção do campo, com polos induzidos de sinais contrários, que criam uma força de atração provocando a sua aglutinação, ou seja, se unem formando-se muitas gotas grandes, que por terem maior densidade (sedimentação gravitacional), caem para o fundo da dessalgadora, carregando com elas os sais e sedimentos.

Tratadores eletrostáticos são frequentemente encontrados também em sistemas marítimos de produção. Independente do tipo de tratamento utilizado, uma moderada agitação e o uso de desemulsificantes (inibem a emulsão¹⁰) são imprescindíveis para que a separação gravitacional das fases óleo / água seja feita dentro do menor tempo e com a maior eficiência possível. Nem sempre é possível separar totalmente a água emulsionada. Assim, o petróleo é enviado às refinarias, através de oleodutos ou navios, ainda contendo água e sais.

Após a dessalinização, o petróleo passa por uma segunda bateria de pré-aquecimento, na qual a sua temperatura é elevada ao máximo valor possível. Quanto mais alta for a

¹⁰ Emulsão é a mistura entre dois líquidos imiscíveis em que um deles (a fase dispersa) encontra-se na forma de finos glóbulos no seio do outro líquido (a fase contínua), formando uma mistura estável. Exemplos de emulsões incluem manteiga e margarina, maionese, café expresso e alguns cosméticos. As emulsões mais conhecidas consistem de água e óleo. (EMULSÃO, 2011).

temperatura atingida no pré-aquecimento, menor será a quantidade de combustível gasta nos fornos da refinaria para o aquecimento final do óleo. A máxima temperatura que se pode aquecer o petróleo, sem que haja perigo de decomposição térmica, é 700°F (371°C).

O processo de destilação consiste no fracionamento do petróleo em torres de destilação, que possuem no seu interior bandejas que permitem a separação do petróleo cru em cortes pelos seus pontos de ebulição (quadro 7), porque à medida que as bandejas estão mais próximas ao topo, suas temperaturas vão decrescendo.

Quadro 7 - Frações típicas do petróleo e suas características.

Fração	Temperatura de ebulição (°C)	Composição aproximada	Usos
Gás residual	-	C ₁ – C ₂	Gás combustível
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	Até 40	C ₃ – C ₄	Gás combustível engarrafado, uso doméstico e industrial.
Gasolina	40 - 175	C ₅ – C ₁₀	Combustível de automóveis, solvente.
Querosene	175 - 235	C ₁₁ – C ₁₂	Iluminação, combustível de aviões jato.
Gásóleo leve	235 - 305	C ₁₃ – C ₁₇	Diesel, fornos.
Gásóleo pesado	305 - 400	C ₁₈ – C ₂₅	Combustível, matéria-prima para lubrificantes.
Lubrificantes	400-510	C ₂₆ -C ₃₈	Óleos lubrificantes.
Resíduo	Acima de 510	C ₃₈₊	Asfalto, piche, impermeabilizantes.

Fonte: Thomas *et al.*, 2004.

Segundo Rosa (1998), à medida que o vapor se encaminha em direção ao topo, troca calor e massa com o petróleo líquido existente em cada bandeja, cujos pontos de ebulição são maiores ou iguais a temperatura de uma determinada bandeja, aí ficam retidos, enquanto a parte restante do vapor prossegue em direção ao topo até encontrar outra bandeja mais fria e repetir o processo. O petróleo em cada bandeja possui o seu ponto de ebulição, desta maneira a composição do petróleo varia entre bandejas. No quadro 7 são mostradas as frações típicas que são obtidas do petróleo.

Assim, do petróleo se derivam produtos energéticos: gás combustível, gás liquefeito, gasolina, querosene, óleo diesel e combustível, etc.; e produtos não energéticos: solventes, naftas, óleos isolantes e lubrificantes, graxas, parafinas, asfalto, etc. Para ser mais exato, do gásóleo leve derivam o diesel e os combustíveis para fornos industriais, do gásóleo pesado deriva-se matéria-prima para lubrificantes, e dos resíduos são derivados o asfalto, piche e impermeabilizantes. (FALABELLA, 1998).

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir campo elétrico, força elétrica, dipolo elétrico, materiais isolantes e condutores. Atividade experimental: Atritar uma régua de plástico contra um pedaço de lã e usá-la para atrair um filete de água. Explicar o fenômeno.

OFICINA DE QUÍMICA

O professor poderá trabalhar: destilação, a eletrólise e tipos de pilhas eletrolíticas além de debater sobre as pilhas e baterias existentes no mercado. Atividade experimental: Construir uma pilha eletrolítica com materiais simples.

7 Petróleo – O maior vetor energético do mundo

Todas as espécies de combustíveis utilizadas nos motores de combustão resultam da ação da energia solar, condição necessária para a existência da vida. Os combustíveis podem ser vegetais ou fósseis.

O petróleo é o resultado da fermentação bacteriana de matérias orgânicas (biomassa) sob condições especiais, que fazem os hidratos de carbono transformarem-se em hidrocarbonetos depositados em rochas sedimentares porosas. A energia armazenada nos combustíveis está sob a forma de energia química, isto é, energia de coesão dos átomos nas moléculas do material combustível. Esses materiais contêm considerável proporção de carbono, além de hidrogênio.

A combustão é a reação em que átomos de um material se combinam quimicamente com átomos de oxigênio do ar, ou seja, é a queima do material. Nessa reação há liberação de energia, principalmente na forma de luz e calor. Essa energia pode ser aproveitada para aquecimento, cozimento, produção de energia elétrica, movimentação de meios de locomoção, funcionamento de máquinas etc.

7.1 Energia

A primeira coisa, e a mais trivial que pode ser dita a respeito de energia é que se trata de um conceito que apresenta múltiplos aspectos. De acordo com Feynman, não importa como se define e sim como se mede a energia. Embora se saiba que a energia é conservada, a

energia disponível para utilização humana não é conservada tão facilmente (FEYNMAN; LEIGHTON; SANDS, 2008), pois, o que ocorre é sua transformação em outros tipos de energia como sonora, térmica, etc., que em alguns casos não são reaproveitadas para gerar trabalho útil.

A palavra energia deriva do grego e significa trabalho, e é este o conceito formal ensinado no ensino médio, ou seja, “a capacidade de produzir trabalho”. Diz-se que possui energia um corpo que se move (energia cinética), um corpo em repouso sob a atração gravitacional (energia potencial gravitacional), cargas elétricas sob a atração ou repulsão do campo elétrico (energia potencial elétrica), uma mola comprimida (energia potencial elástica), entre outras, como a luz se propagando no espaço, um isótopo nuclear físsil, uma massa de um combustível ou de um explosivo químico.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir o conceito de energia, tipos de energia, unidades, conservação de energia. Atividade: Relacionar a contabilização de energia em toneladas equivalentes de petróleo (TEP) com o quilowatt-hora utilizado para medir energia elétrica consumida. Fazer um comparativo no Balanço Energético Nacional (BEN) do consumo de petróleo e energia elétrica nos setores da economia do país. Fazer um estudo do consumo do petróleo em relação a outras fontes energéticas (BEN).

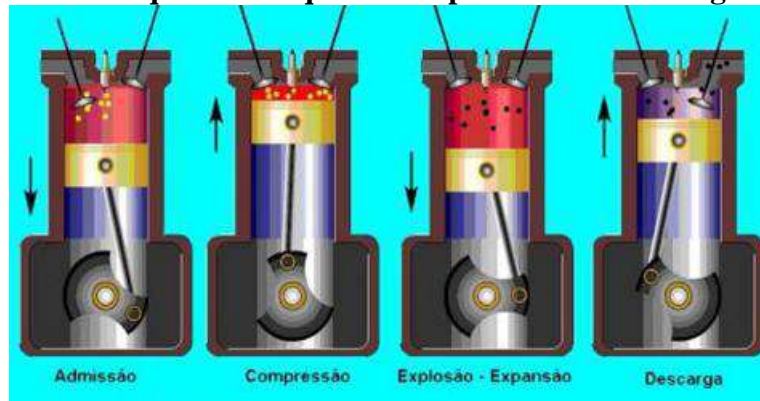
7.2 Motores de Combustão – Ciclos de Funcionamento

No caso de geração de força motriz, o exemplo mais antigo de uma máquina térmica¹¹ é a locomotiva a vapor (um dos marcos da Revolução Industrial). A expansão do vapor produzido pela caldeira (alimentado por carvão mineral/óleo diesel) faz movimentar as rodas.

Nos motores de combustão interna, a queima do combustível é feita no interior do motor. Nos motores a álcool ou gasolina, a produção de movimento começa pela queima de combustível nas câmaras de combustão. Essas câmaras contêm um cilindro, duas válvulas (uma de admissão e outra de escape) e uma vela de designação. O pistão que se move no interior do cilindro é acoplado à biela que se articula com o virabrequim como mostrado na figura 42.

¹¹A máquina térmica é um dispositivo que funciona num processo cíclico que converte calor em trabalho útil, que pode utilizar o petróleo como combustível. (GREF, 2002).

Figura 30 - Esquema dos quatro tempos de um motor à gasolina.



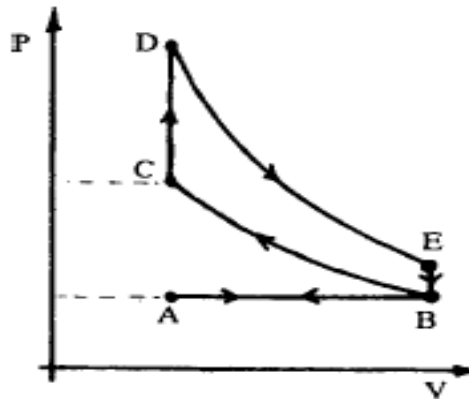
Fonte: Silveira, 2012.

Para entender o ciclo de funcionamento de um motor a explosão, discute-se as etapas deste ciclo para um motor à gasolina, que obedece ao Ciclo de Otto:

- a) admissão da mistura: 1º tempo. Abertura da válvula de admissão: enquanto o volume do gás aumenta, a pressão fica praticamente constante - transformação isobárica (pressão constante). (A-B).
- b) compressão da mistura: 2º tempo. Enquanto o volume diminui, a pressão e a temperatura aumentam. Como o processo é muito rápido, não há trocas de calor com o ambiente - transformação adiabática (B-C).
- c) explosão da mistura: 3º tempo. O volume do gás fica praticamente constante, e ocorre um grande aumento da temperatura e da pressão - transformação isométrica (C-D); enquanto o volume aumenta, a pressão e a temperatura diminuem - transformação adiabática (D-E).
- d) escape dos gases: 4º tempo. Abertura da válvula de escape: o volume permanece o mesmo e a pressão diminui - transformação isométrica (E-B); enquanto o volume diminui a pressão fica praticamente constante – transformação isobárica (B-A).

O ciclo termodinâmico completo do motor à combustão é mostrado na figura 31, em que são representadas as transformações relacionadas com cada tempo de funcionamento do motor.

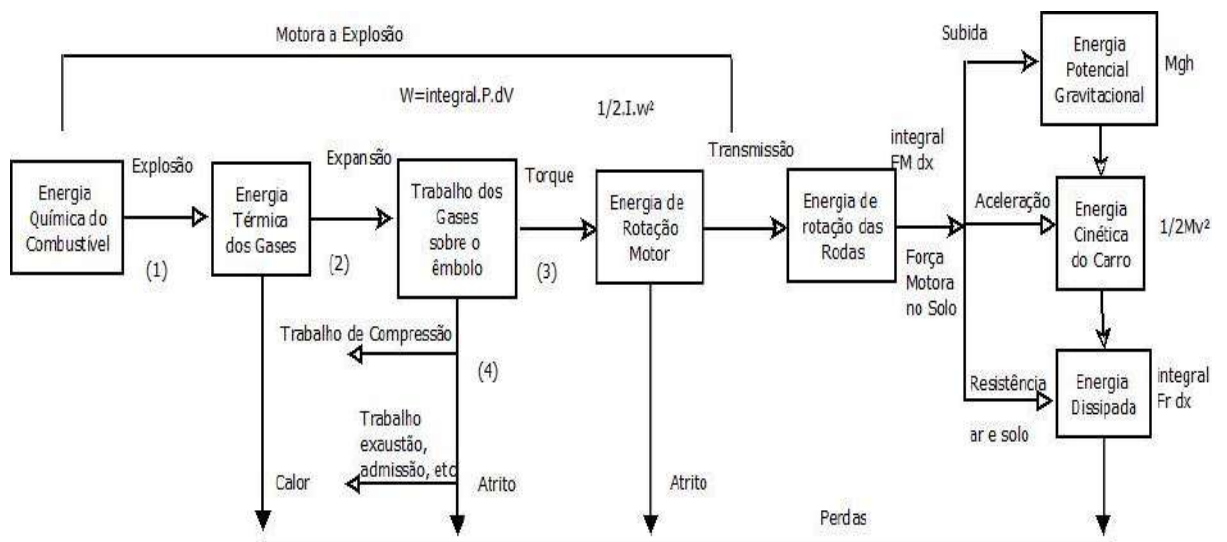
Figura 31 - Ciclo de Otto completo do motor.



Fonte: GREF, 2002a.

No diagrama da figura 32 são mostradas as transformações de energia durante o ciclo de funcionamento do motor do automóvel, bem como representações físicas fundamentais para locomoção do mesmo, como o torque τ , força motora F_M , força de resistência F_R , momento de inércia I e velocidade angular ω . Importante reparar na representação numérica nas figuras para fazer a relação das transformações energéticas com as fases do processo físico.

Figura 32 - Diagrama mostrando as transformações de energia em um motor à explosão.



Fonte: Rosa, 1998.

7.3 Energia Útil

A energia consumida pelo homem, que faz com que os equipamentos funcionem proporcionando lazer e conforto, é chamada de energia final ou útil. Sempre que se trata de energia útil esta pode determinar a eficiência do equipamento.

Qualquer transformação de energia sempre envolve a produção de outras formas de energia, que nem sempre podem ser aproveitadas para gerar trabalho útil. Assim, é impossível converter completamente energia em trabalho. Essa restrição é imposta pela Segunda Lei da Termodinâmica, que diz que é impossível construir uma máquina térmica que, operando em ciclos, transforme todo calor em trabalho. Em particular, o rendimento é muito ruim em qualquer motor à combustão, pois grande parte da energia se perde em calor.

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir a primeira lei da termodinâmica, descrever como os fluxos de calor e trabalho em um sistema alteram sua temperatura, volume e pressão, os ciclos de uma máquina térmica, as transformações isobáricas, adiabáticas, isovolumétricas e isotérmicas. Atividade: Pesquisar e comparar o funcionamento de várias máquinas térmicas: motor a vapor, motor a diesel e motor de Stirling.

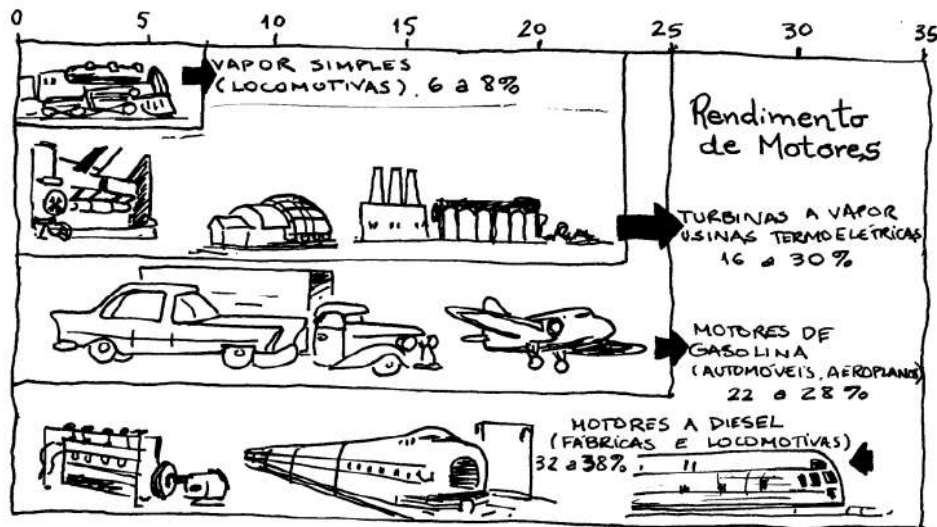
A eficiência ou rendimento de uma máquina é medida pela comparação entre a energia utilizada para produzir trabalho e a energia total gasta no processo, assim temos:

$$e = \frac{W_{\text{útil}}}{E_{\text{total}}} \quad (9)$$

A eficiência do fogão a gás é de cerca de 45%. Para medi-la em laboratório, compara-se o calor absorvido por uma massa de água aquecida numa panela e o calor liberado pela combustão da massa de gás necessário para este fim. (LA ROVERE; ROSA; RODRIGUES, 1985).

Nos transportes, a energia útil é calculada pela quilometragem por certa massa de combustível e também pela eficiência (rendimento) do motor. Na figura 33 é mostrado um comparativo das diferenças de rendimentos de determinados tipos de motores. A maior eficiência pode ser obtida com motores a diesel.

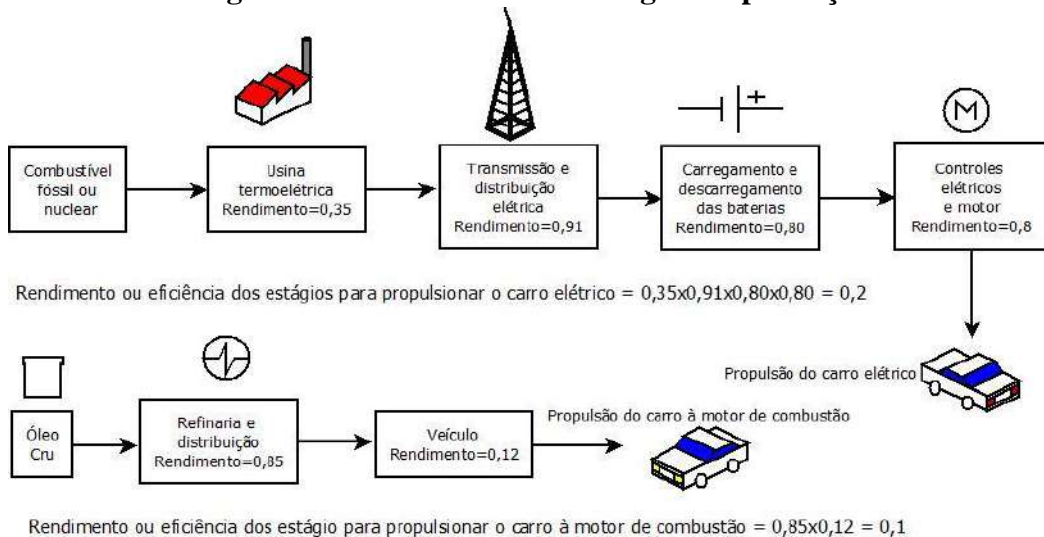
Figura 33 - Rendimentos de motores.



Fonte: GREF, 2002.

Devido aos baixos rendimentos observados, formas alternativas de melhorar esses rendimentos para tornar o transporte mais econômico tornam-se vital. O uso de hidrogênio como combustível, baterias, energia solar, dentre outras são alternativas que o homem vem criando, mas com a dificuldade de produção em escala. No Balanço Energético Nacional (BEN) não está incluso o rendimento dos meios que fornecem ou transformam a energia, mas pode-se fazer um comparativo de eficiências, como exemplo, na figura 34 é mostrado uma comparação da eficiência final, com vários estágios de conversões energéticas, para o funcionamento de um carro elétrico e um carro à combustão. A eficiência final do conjunto será o produto entre as eficiências de cada estágio.

Figura 34 - Rendimento dos estágios de produção.



Fonte: Modificado de Okuno; Caldas; Chow, 1982.

Setores como o industrial, serviços público e doméstico estão vinculados à eficiência do uso da energia elétrica, rendimentos de motores elétricos, de iluminação, etc. Planos de conservação de energia são bem vindos para otimizar a energia útil.

Tendo em vista ser o petróleo a fonte de energia por excelência nos nossos dias é usual contabilizar as outras formas de energia em toneladas equivalentes de petróleo (TEP): 1 tonelada de gasolina equivale a 0,75 TEP, 1t de diesel a 0,843 TEP, 1t de álcool hidratado a 0,625 TEP, 1MW/h de eletricidade a 0,29 TEP. (BEN, 2010). Em termos quantitativos, analisando um barril de petróleo (159 litros) a energia armazenada no óleo cru equivale a $6,12 \times 10^9$ J (1700kW/h).

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir eficiência ou rendimento de uma máquina térmica, o ciclo de Carnot, a segunda lei da termodinâmica, o valor calórico de várias substâncias.
Atividade: Comparar o rendimento de várias máquinas, incluindo o corpo humano.

8 Balanço Energético

O Balanço Nacional de Energia, de elaboração anual, foi criado pelo governo federal no intuito de analisar o balanço das energias produzidas e consumidas no país, as reservas e recursos energéticos, oferta e demanda de energia, consumo em todos os setores da economia. Segundo o Balanço Nacional de Energia, torna-se necessária a classificação das energias produzidas e consumidas no país pela sua utilidade.

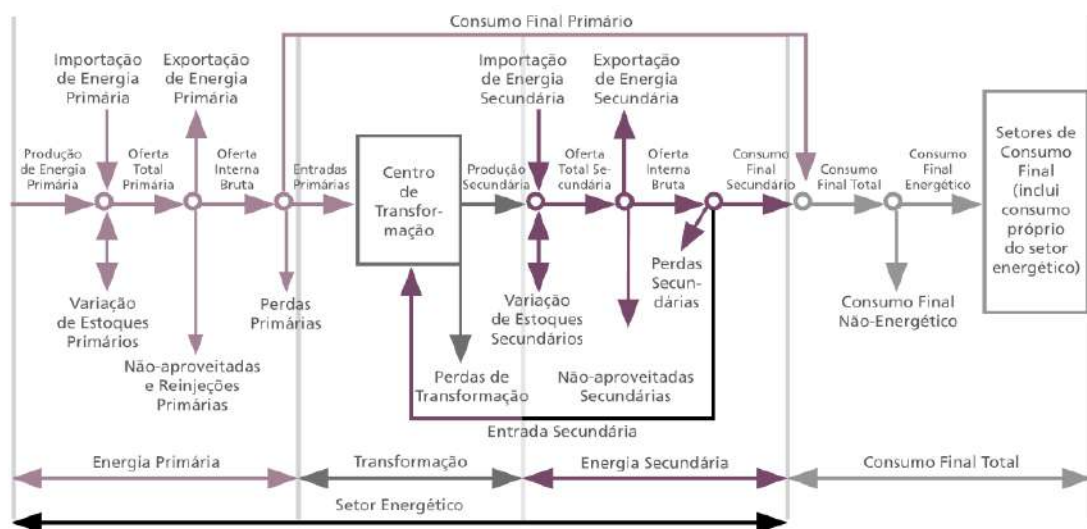
A energia primária é aquela diretamente apropriada da natureza, não renovável como o petróleo, o carvão, gás natural e urânio, e renovável como a energia hidráulica, a lenha, produtos da cana, a solar, a eólica e as demais alternativas renováveis. Chama-se de energia secundária aquela obtida de uma fonte primária por um processo de transformação, por exemplo, todos os derivados do petróleo são classificados como energia secundária. Os produtos energéticos resultantes dos diferentes centros de transformação têm como destino os diversos setores de consumo classificados como setor energético, industrial, agropecuário, transportes, comercial e serviços, e residencial, e eventualmente outro centro de transformação. (BRASIL, 2010).

Importante colocar que a energia elétrica obtida pela hídrica ou dos combustíveis fósseis (óleo diesel, carvão e gás natural) nas termoeletricas passa a ser energia terciária, em vista das definições anteriores.

Para a conversão da energia primária em secundária existem os centros de transformações, onde a energia que entra primária (e/ou secundária) se transforma em uma ou mais formas de energia secundária (ou terciária) com suas correspondentes perdas na transformação e o autoconsumo do centro de transformação. (BRASIL, 2010). Pode-se citar como exemplos de centros de transformação: centrais elétricas, refinarias de petróleo, destilaria de álcool, carvoarias, etc. Além disto, há o transporte e a distribuição de energia ao consumo final, que implicam também perdas entre esta energia final que chega ao consumo e a energia primária necessária para obtê-la. O Balanço Energético Nacional expressa o balanço das diversas etapas do processo energético: produção, transformação e consumo, conforme a figura 35 e conceituações apresentadas.

O BEN calcula o Balanço de Energia Útil (BEU) que é um estudo que permite processar as informações setoriais do Balanço Energético Nacional de consumo de energia, para obter estimativas da Energia Final destinada ao uso como: força motriz, calor de processo, aquecimento direto, refrigeração, iluminação, eletroquímica e outros usos e, com base nos rendimentos do primeiro processo de transformação energética, estimar a energia útil. A Energia Final é composta pela soma de duas parcelas: a Energia Útil e a Energia Perdida.

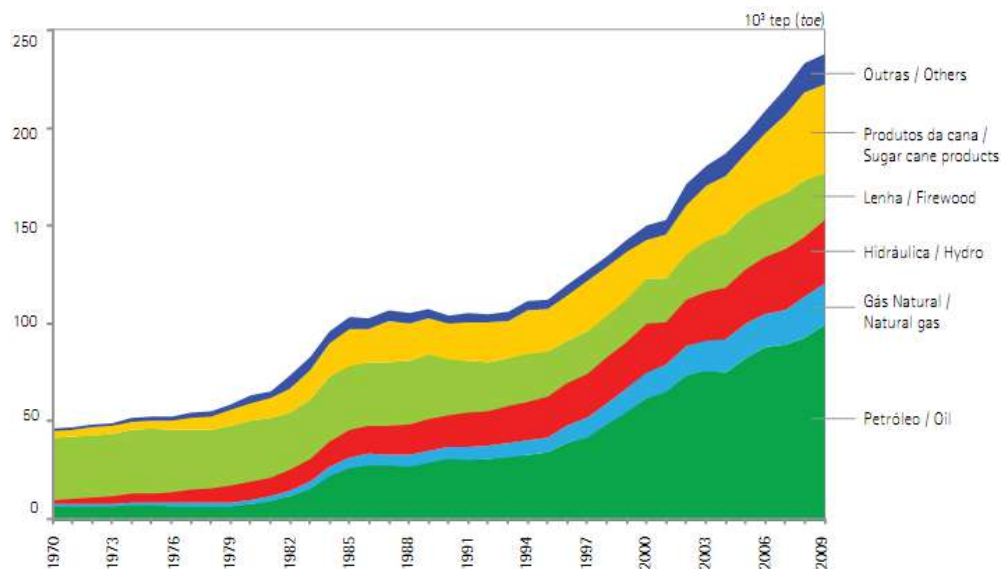
Figura 35 - Estrutura do BEN.



Fonte: Brasil, 2010.

No BEN pode-se analisar proporções energéticas que evidenciam a evolução da matriz energética brasileira, que vem mudando ao decorrer dos anos com o aumento forte da produção de petróleo e da cana. A energia hídrica sempre muito representativa não acompanhou esse aumento conforme pode-se analisar no gráfico 5.

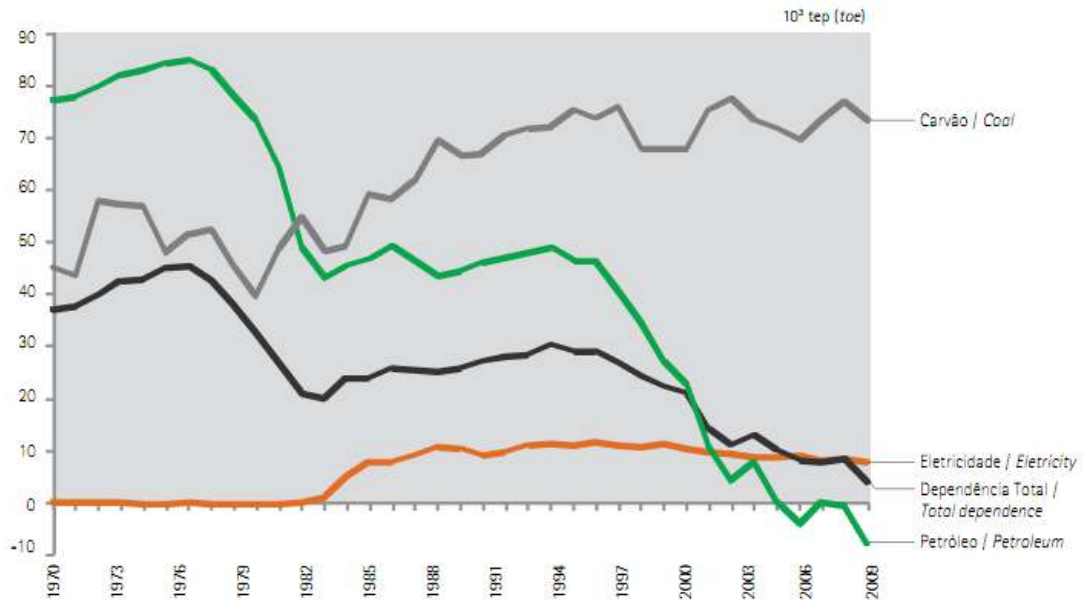
Gráfico 5 - Evolução do consumo de energia final por fonte.



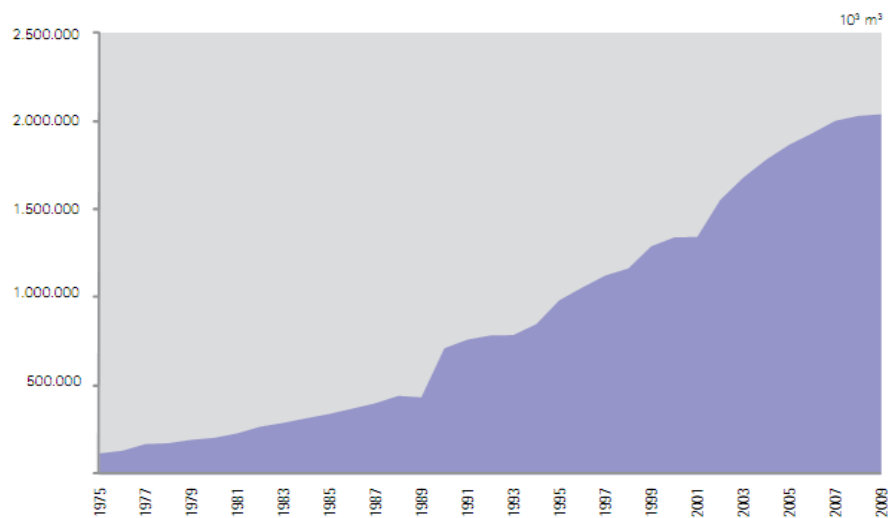
Fonte: Brasil, 2010.

Nossa dependência externa por petróleo diminuiu bastante conforme mostra o gráfico 6, em função do aumento das reservas provadas, mostrado no gráfico 7. Este aumento das reservas provadas¹² foi conseguido com os avanços tecnológicos do país e a quebra do monopólio estatal sobre o “ouro negro”.

¹² Reservas provadas segundo a Lei do Petróleo (Lei nº 9.478, de 6 de ago. 1997), significa o volume de petróleo de reservatórios conhecidos, que pela análise dos dados de geologia e de engenharia pode ser estimado com razoável certeza de ser recuperável comercialmente, sob as condições econômicas regulamentares e com métodos de recuperação vigentes na época da avaliação. Tem que ter 90% de probabilidade de que a quantia a ser recuperada (extraída) seja igual ou superior ao estimado. (BRASIL, 1997)

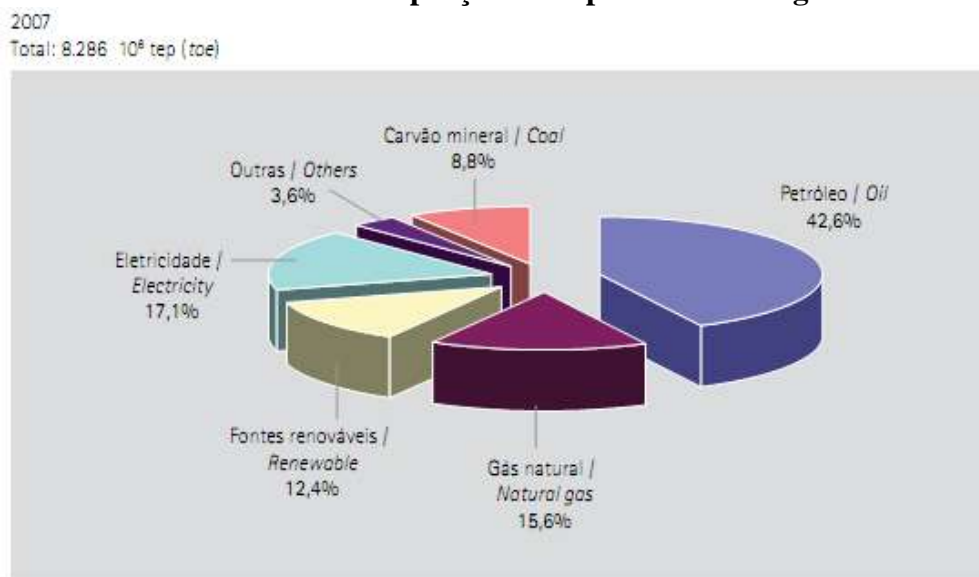
Gráfico 6 - Dependência externa de energia.

Fonte: Brasil, 2010.

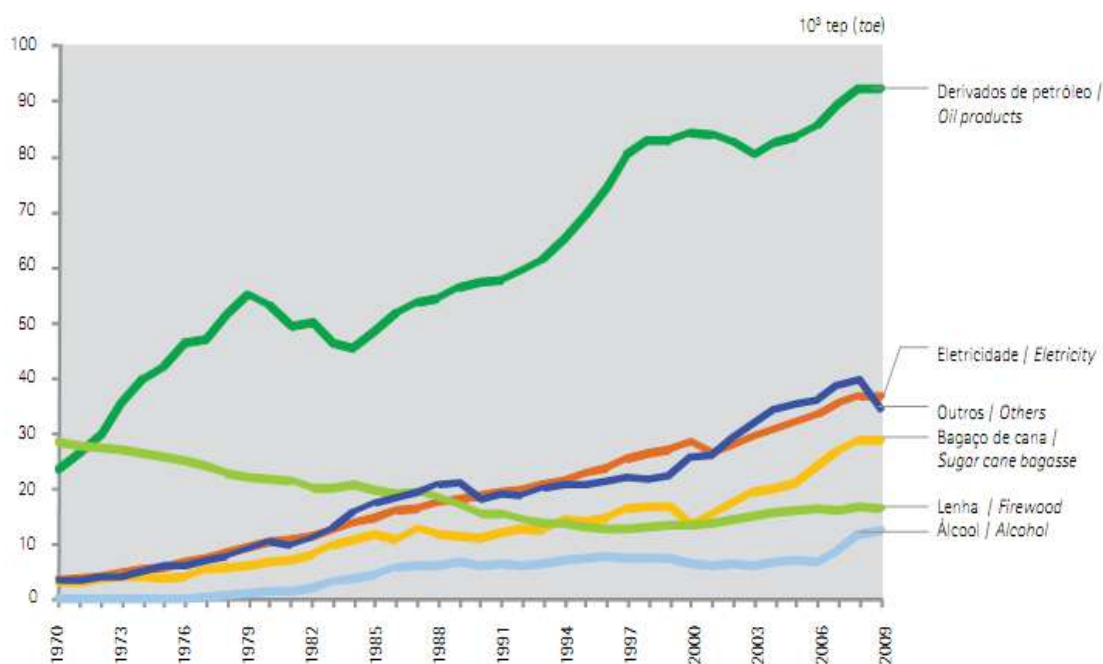
Gráfico 7 - Reservas provadas.

Fonte: Brasil, 2010.

Nossa dependência do petróleo ainda é grande, como podemos observar nos gráficos 8 e 9, este último demarca o aumento do consumo e da conseqüente dependência do petróleo como recurso energético para o país, o que é perigoso por ser uma energia não renovável e não limpa. Cabem políticas mais incisivas nos setores energéticos para reverter esse quadro.

Gráfico 8 - Proporção da dependência energética.

Fonte: Brasil, 2010.

Gráfico 9 - Evolução do consumo de energia final por fonte.

Fonte: Brasil, 2010.

9 Impactos Ambientais

Avaliações de impacto ambiental são estudos realizados para identificar, prever e interpretar, assim como prevenir, as consequências ou efeitos ambientais que determinadas ações, planos, programas ou projetos podem causar à saúde, ao bem estar humano e ao

entorno. (RIBEIRO, 1999). Instrumentos eficazes para uma política ambiental coerente devem passar pelos seguintes passos:

- a) pressão moral (pressão social, publicidade, etc.);
- b) controles diretos:
 - regulamentos limitando os níveis de emissão de poluentes dos combustíveis originados do petróleo;
 - obrigação de instalar determinado equipamento ou processo de tratamento (exemplo: catalisadores);
- c) controle através do mercado:
 - taxação aos danos ambientais (exemplo: multas);
 - subsídios (exemplo: pagamento por redução de emissão dos poluentes);
 - restituição contra danos ambientais (exemplo: vazamento de óleo dos petroleiros);
- d) investimento do governo:
 - sistemas de prevenção do dano ambiental (exemplo: estações de tratamento de esgotos nas refinarias, postos, etc.);
 - atividades de restauração (exemplo: reflorestamento);
 - disseminação de informação;
 - pesquisas na área ambiental;
 - educação tanto do público em geral como profissionais e especialistas.

Os derivados de petróleo e o gás natural são usados em diferentes setores da economia com a finalidade de gerar eletricidade (termoelétricas), calor (processos industriais e residenciais), força motriz (transporte) e matéria prima. Exceto no caso de utilização para matéria prima, o que se busca destes combustíveis é a energia liberada a partir da combustão.

A combustão produz a emissão de vários poluentes, dependendo da composição e da qualidade do combustível, do tipo de queima e da tecnologia empregada. (RIBEIRO, 1999).

Importante colocar que no processo de combustão o dióxido de carbono (CO_2) é inerente ao processo, pois a combustão envolve a oxidação do combustível. Quando um combustível constituído de hidrocarbonetos é queimado, o carbono e o hidrogênio são oxidados, como no exemplo da combustão do gás metano:



No processo de combustão também se observa que parte dos hidrocarbonetos não são queimados. A quantidade de ar presente na combustão é um parâmetro de grande importância, pois quando a quantidade de ar fornecida é menor do que a quantidade necessária para a combustão, a mesma é dita incompleta. Isso gera emissão de monóxido de carbono (CO), ao invés de dióxido de carbono (CO₂). (RIBEIRO, 1999).

A atmosfera parte mais atingida pela poluição é constituída de 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio, 0,05% de dióxido de carbono e 0,95% de outros gases. Esses gases representam um papel de enorme importância no equilíbrio do clima e das propriedades químicas da atmosfera. Entre estes gases se encontram aqueles que são chamados de gases de efeito estufa, principalmente o dióxido de carbono, essencial para o equilíbrio térmico do planeta.

Assim, segundo Ribeiro (1999), verifica-se que a atmosfera é um sistema dinâmico, com constantes trocas entre os gases que a constituem e a vegetação, oceanos e organismos biológicos. Os gases são produzidos através de processos químicos que ocorrem na própria atmosfera, devido a atividades biológicas, exatidão de gases vulcânicos, decaimento radioativo e atividades humanas.

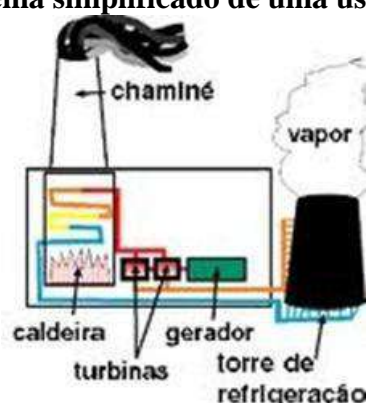
OFICINA DE QUÍMICA E BIOLOGIA

Neste ponto o professor poderá discutir sobre as camadas da atmosfera, em qual a poluição atua mais, suas propriedades químicas (composição). Discutir sobre os processos químicos da combustão e oxidação. Debater sobre o equilíbrio do clima na Terra diante das atividades do homem. Atividade: fazer experimentos no laboratório de química que envolva vários processos de combustão e oxidação, análise da composição do ar e ou observações de atividades microbiológicas no ar diante da poluição.

9.1 Impactos causados pela geração de energia em Termoelétricas

Nas usinas termoelétricas a queima do combustível fóssil é feita visando o aquecimento da água contida nas caldeiras, que é transformada em vapor, e esse é conduzido às turbinas com alta pressão, movimentando-a, gerando eletricidade. A figura 48 mostra um esquema do funcionamento de uma usina termoelétrica.

Figura 36 - Esquema simplificado de uma usina termoeletrica.



Fonte: Groundspeak, 2011.

As usinas termoeletricas apresentam vários tipos de impactos ambientais devido a efluentes sólidos (cinzas, lama, etc.), efluentes líquidos (contaminação de recursos hídricos pela disposição de vários poluentes) e efluentes aéreos. As emissões aéreas de uma termoeletrica resultam da descarga de material particulado e de gases resultantes da queima do combustível, cujas quantidades e composição variam conforme a tecnologia e o combustível utilizado (óleo diesel, carvão mineral ou gás natural). Neste sentido, o combustível menos impactante é o gás natural, seguido do óleo combustível, e por fim do carvão.

Os gases emitidos compreendem compostos sulfurosos (H_2S , SO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de carbono (CO_2) e ácidos (HCl – ácido clorídrico e HF – ácido fluorídrico).

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir com os alunos as transformações de energia (indicando as perdas) que ocorrem em uma usina termoeletrica. Atividade: Pesquisar métodos utilizados para diminuir a poluição causada por uma usina termoeletrica.

9.2 Impactos causados pelos motores de combustão

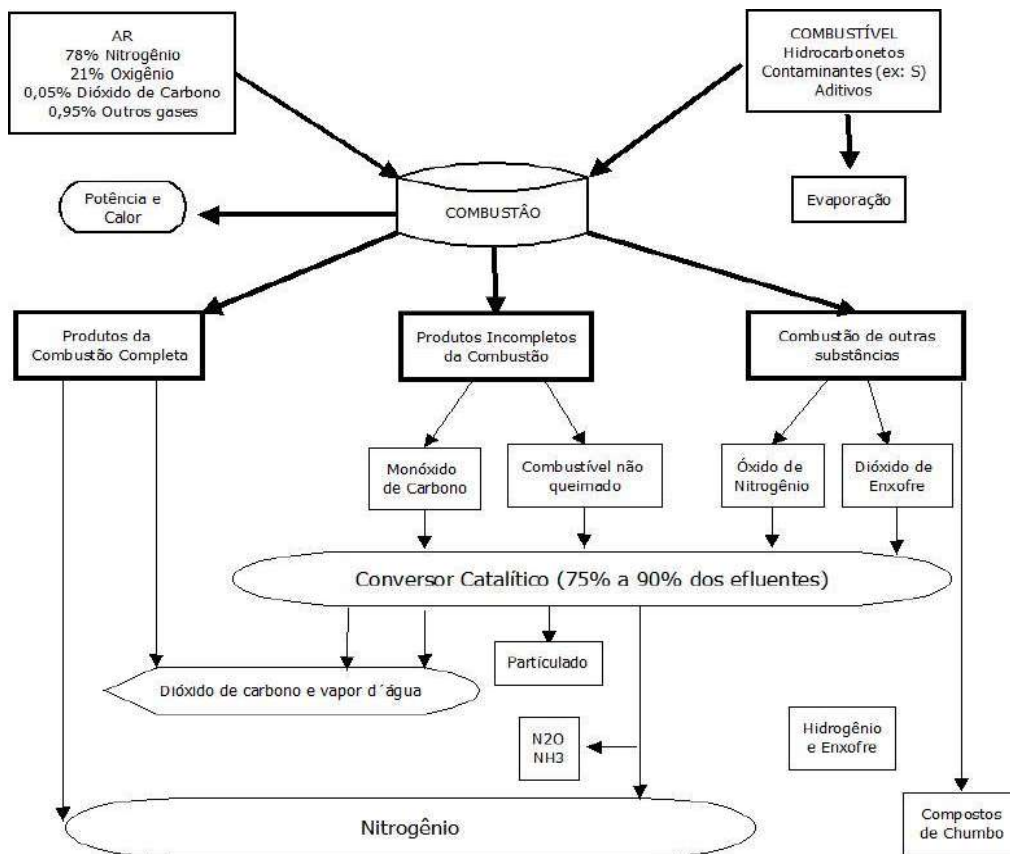
Nos motores a combustão, há uma etapa de escape dos gases formados durante o processo. Os principais gases emitidos são:

- a) óxido de enxofre (SO_2), no caso do diesel;
- b) óxidos de nitrogênio (NO_x), também em maior intensidade nos motores a diesel, devido a maior temperatura de operação;

- c) dióxido de carbono (CO₂) – principal gás do efeito estufa;
- d) compostos de chumbo para o caso de gasolinas adicionadas com chumbo;
- e) monóxido de carbono (CO), no caso de combustão incompleta.

Esses gases dependem da qualidade do combustível, da regulagem dos motores dos veículos e de dispositivos que reduzem a emissão, como conversores catalíticos. Além dos impactos atmosféricos, os motores provocam impactos sonoros e vibração. Na figura 37, é ilustrada num diagrama a poluição atmosférica causada pelos motores à combustão interna.

Figura 37 - Poluentes emitidos por veículos a gasolina e diesel.



Fonte: Ribeiro, 1999.

Ações concretas para o controle da poluição do ar podem ser feitas sob as seguintes perspectivas:

- a) perspectivas tecnológicas:
 - órgãos do governo federal responsáveis pela emissão de veículos e indústrias terem um controle mais eficaz;
 - melhoria da qualidade dos combustíveis;

- investir em energia limpa com a ampliação de uso da eletricidade, gás natural, álcool, etc.
- b) perspectivas não tecnológicas:
- transporte coletivo: investimento em tipos, formas, quantidades, qualidades;
 - melhoria na fluidez no trânsito;
 - transporte solidário;
 - ciclovias; etc.
- c) perspectivas Institucionais:
- imposto/preço do combustível;
 - restrição na circulação de caminhões;
 - rodízio de veículos; etc.

Nestas perspectivas, destaca-se uma inovação tecnológica que utiliza o CO₂ como matéria-prima, ou seja, esse gás pode se tornar um importante recurso renovável, e um reagente químico ambientalmente amigável. Cantat e sua equipe de pesquisadores desenvolveram uma nova técnica para converter o dióxido de carbono em compostos que podem ser usados para a síntese de químicos hoje derivados do petróleo, e até de novos combustíveis. (CANTAT *et al.*, 2011). Esses compostos resultantes têm um conteúdo de energia mais elevado do que o do dióxido de carbono, entretanto, não é possível produzir muitos compostos químicos por essa via, sendo inviável produzir combustíveis tradicionais por essa via.

OFICINA DE CIÊNCIAS

Neste ponto o professor poderá discutir com a turma o funcionamento de um catalisador.
Atividade: pesquisar as vantagens e desvantagens de cada combustível em termos de produção de gases para a camada atmosférica.

9.3 Chuva ácida

A deposição ácida é causada principalmente por emissões de enxofre e nitrogênio, em consequência da queima de combustíveis fósseis tais como o carvão e os derivados de petróleo em usinas e motores de carro. Quando estes poluentes são combinados com o vapor d'água, a luz do Sol e o oxigênio na atmosfera, eles criam uma “sopa” diluída de ácidos

sulfúrico (H_2SO_4) e nítrico (HNO_3). Em algumas regiões amplamente industrializadas, os gases de cloreto de hidrogênio na atmosfera, produzem ácido clorídrico (HCl), que também pode ser um ingrediente da chuva ácida.

Quando a chuva cai, aumenta a acidez da água doce dos lagos e correntes, dos cristais de neve, e em alguns casos dos solos.

OFICINA DE CIÊNCIAS

Neste ponto o professor poderá discutir o ciclo da água. Atividade: Quais as consequências indiretas da chuva ácida?

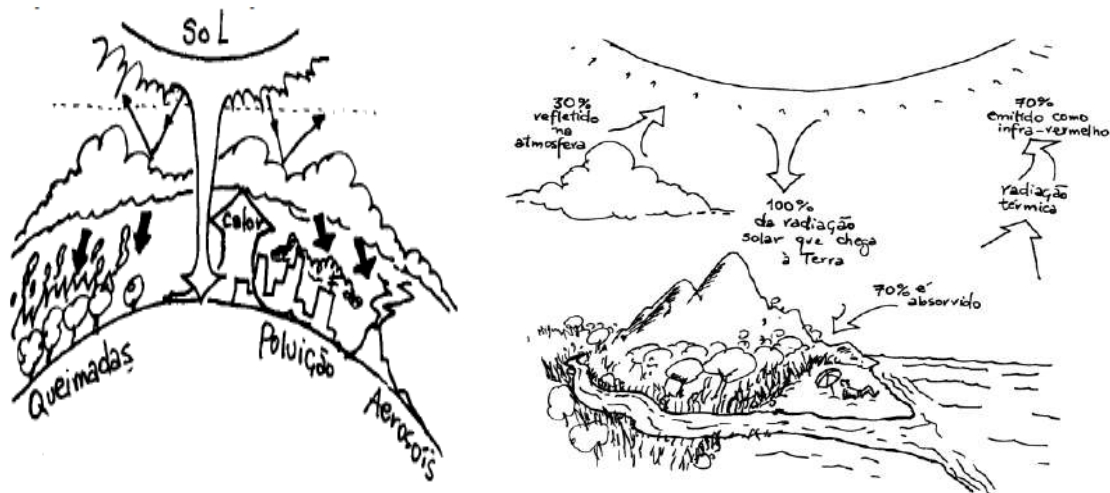
9.4 Grandes impactos

O clima da Terra envolve muito mais do que a atmosfera. O clima é um produto de interações complexas da atmosfera, oceanos, calotas glaciais, seres vivos e até mesmo rochas e sedimentos. Quando se fala em sistema climático, se mencionam todas estas categorias. A poluição atmosférica desequilibra o sistema climático. (RIBEIRO, 1999). A seguir discutem-se brevemente o efeito estufa e os grandes acidentes envolvendo o vazamento de petróleo no mar.

9.4.1 Efeito estufa

O efeito estufa é um dos mais presentes devido à poluição do ar. Há milhares de anos, a temperatura média da Terra tem sido de 15°C , isto porque toda energia que chega do Sol é emitida como radiação infravermelha para o espaço. Porém, no último século a temperatura média da Terra aumentou cerca de $0,5^\circ\text{C}$. Alguns pesquisadores atribuem esse aumento ao efeito estufa causado por um acréscimo da concentração de gás carbônico (CO_2) na atmosfera, devido à combustão de carvão, usado na geração de energia elétrica e do petróleo nos meios de transporte. Se a concentração de CO_2 na atmosfera aumentar muito, quase toda radiação infravermelha voltará para o planeta que se aquecerá cada vez mais. Este aquecimento poderia transformar terras férteis em solos áridos e provocar o derretimento das geleiras dos polos inundando as regiões litorâneas. Não é a toa que o efeito estufa é um sinônimo de ameaça. Na figura 38 representa-se de maneira simplificada o efeito estufa a partir do efeito físico da radiação solar com suas respectivas percentagem de reflexão e absorção.

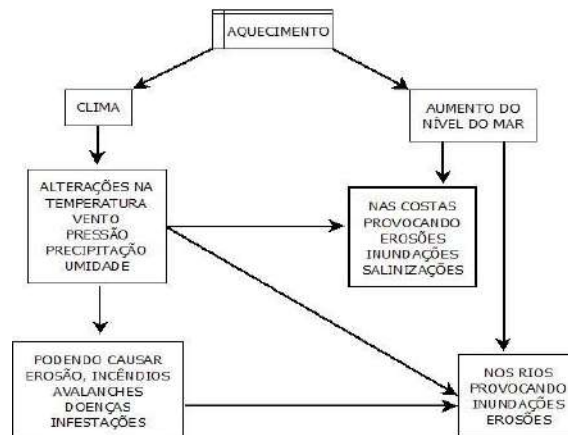
Figura 38 - À esquerda tem-se uma representação dos agentes causadores do efeito estufa, e à direita tem-se um esquema da absorção e reflexão da radiação que chega à Terra.



Fonte: GREF, 2002.

Possíveis acontecimentos do efeito do aquecimento global estão representados no diagrama da figura 39.

Figura 39 - Diagrama do aquecimento global.



Fonte: Modificado de Ribeiro, 1999.

Propõe-se, assim, com base nas leituras feitas, principalmente de artigos do *Intergovernmental Panel on Climate Change* e de Ribeiro (1999), algumas medidas que contribuiriam para reduzir o aquecimento global. São estas:

- a) aumentar a eficiência energética;
- b) substituir os combustíveis fósseis pelos renováveis;

- c) diminuir a emissão de metano e óxidos de nitrogênio (novas tecnologias, nos processos industriais, aterros sanitários, agricultura e transporte);
- d) planejar a implementação de medidas para uma adaptação à mudança climática;
- e) incentivar pesquisas sobre causas e efeitos da mudança climática (sumidouros e reservatórios de gases);
- f) instituir cooperações internacionais (transferência de tecnologia, implementação, etc.).

OFICINA DE FÍSICA

Neste ponto o professor poderá discutir em detalhes o efeito estufa, espectro eletromagnético, radiação infravermelha, radiação solar. Atividade experimental: Montar uma maquete representando o efeito estufa.

9.4.2 Acidentes petrolíferos

Acidentes envolvendo navios petroleiros e plataformas de petróleo são menos comuns, mas quando ocorrem afetam muito a natureza, afetando regiões bem distantes do evento. Dentre esses, pode-se citar o acidente ocorrido com o navio Exxon Valdez (1989), que despejou 41 milhões de litros de petróleo em uma área de vida selvagem no Alasca (EUA) e que até hoje compromete a vida animal da região (figura 40).

Figura 40 – Parte da área afetada pelo vazamento do navio Exxon Valdez (1989).



Fonte: Foto Discovery, 2011.

Levando em conta acidentes ocorridos em plataformas, pode-se citar o acidente mais recente que ocorreu no Golfo do México em 2010 (figura 41). A plataforma pegou fogo, causando a morte de onze funcionários. Dois dias depois, a plataforma afundou, a oitenta quilômetros da costa do estado americano da Louisiana, impactando muito o meio ambiente (figura 42).

Figura 41 - Acidente do Golfo do México - incêndio da plataforma (2010).



Fonte: Foto de Robert Amoedo, 2011.

Figura 42 - Consequências do vazamento de petróleo.



Fonte: Foto de Robert Amoedo, 2011.

10 Leitura Suplementar - Breve História do Petróleo

Na década de 1850, um professor de química da Universidade de Yale (Estados Unidos) chamado Benjamin Silliman, encarregou-se de um projeto, de custo relativamente baixo (US\$526,08), para estudar uma grandiosa e futurista substância conhecida na época como “óleo de pedra”, para diferenciá-la dos óleos vegetais e das gorduras animais. Este projeto foi patrocinado por um grupo de investidores liderados por um visionário chamado George Bissel (figura 43). (YERGIN, 1992).

Figura 43 - George Bissel, o pai da indústria petrolífera.



Fonte: Yergin, 1992.

O grupo sabia que este óleo borbulhava em demasia no noroeste da Pensilvânia (Estados Unidos). Já se extraía o óleo neste lugar de maneira primitiva, que era usado na fabricação de remédios; mas o grupo queria exportar o óleo para ser usado como lubrificante e em lâmpadas, convertendo energia química em luminosa, no intuito de concorrer com os “óleos de carvão” - na verdade destilado do carvão, também chamado de “gás urbano”. Três meses após iniciado o projeto, Sillimans prometeu um sucesso surpreendente no uso do “óleo de pedra”, principalmente no uso do produto destilado do óleo como iluminante em substituição ao óleo de baleia. Ele informou a seus clientes que o óleo poderia ser levado a vários níveis de ebulição e com isso ser refinado de modo a resultar em muitas frações, todas formadas por compostos de carbono e hidrogênio (hidrocarbonetos). Com base nestes estudos, Sillimans e seus investidores fundaram a *Pennsylvania Rock Oil Company*, em torno de 1855, com o intuito de encontrar o “óleo de pedra” e vender essa nova fonte de energia.

Na mesma época, um geólogo canadense, chamado Abraham Gesner, desenvolveu um processo para extrair óleo do asfalto ou de substâncias similares e para refiná-lo de forma a convertê-lo num óleo iluminante de boa qualidade, chamando-o de “querosene” – “keros” palavra grega que significa cera e “elaion” que virou “ene” (som parecido com o canfeno¹³) palavra grega que significa óleo. Gesner solicitou a patente do processo e instalou uma produção de querosene em Nova York em 1859. A distribuição do querosene era rudimentar como expressa a figura 44.

Em um âmbito geral, a humanidade não desconhecia de todo o petróleo, pois neste mesmo período, em várias regiões do Oriente médio, uma substância lodosa semissólida chamada betume¹⁴ brotava das fendas e fissuras. Essa substância já era mencionada na antiguidade – na Mesopotâmia¹⁵, três mil anos antes de Cristo. Segundo Rosa (1998), Heródoto, historiador grego que viveu há mais de 400 anos antes de Cristo, referiu-se explicitamente ao betume como um material usado nas construções da Babilônia. Como curiosidade histórica, ainda na Bíblia consta que o betume foi usado na Torre de Babel e como impermeabilizante na Arca de Noé. (ROSA, 1998).

¹³ Relacionado à cânfora, fluido iluminante mais popular na época derivado da terebintina. (YERGIN, 1992).

¹⁴ Betume é a porção do petróleo encontrada no estado sólido ou semissólido nas condições originais de reservatório. É bastante usado na construção de estrada, na argamassa das construções e na indústria farmacêutica. (ROSA, 1998).

¹⁵ A Mesopotâmia é um nome grego que significa "entre rios" (meso - pótamos) - é uma região de interesse histórico e geográfico mundial. Trata-se de um planalto de origem vulcânica localizado no Oriente Médio, delimitado entre os vales dos rios Tigre e Eufrates, ocupado pelo atual território do Iraque e terras próximas. (YERGIN, 1992).

Figura 44 - Entrega de querosene – “a nova luz” – de porta em porta com carroça.



Fonte: Yergin, 1992.

Em 1856, George Bissell, um dos fundadores da *Pennsylvania Rock Oil Company* teve a ideia de fazer adaptações na técnica de perfuração de poços de sal - tecnologia importada dos Chineses, que a Europa já utilizava para extrair o petróleo de poços de sal e produzir produtos farmacêuticos desde o século II Antes de Cristo. Assim, o pioneirismo no conhecimento e uso do petróleo não é exclusivo da Civilização Ocidental. Também os astecas e os incas o conheciam, além dos Chineses. (ROSA, 1998).

Estava lançada a ideia de perfurações de poços de petróleo no intuito de se produzir em escala o “óleo de pedra”, pois segundo Silliman, poderia existir, pelo refino, mais produtos agregados. O grupo conseguiu o capital necessário para o empreendimento com o banqueiro James Townsend, que por sua vez despachou o colega Edwin L. Drake, vulgo “o coronel” (figura 45), para a Pensilvânia para atuar como o desbravador dessa ideia de perfurações e explorações de poços de petróleo.

Só em 1859 depois de conseguir mão de obra para perfurar os poços de sal, e de financiar a empreitada do seu próprio bolso, pois os investidores desistiram devido à demora nos resultados, Drake achou o “óleo” numa escala razoável que foi suficiente para pagar suas dívidas, mas ainda aquém do sucesso financeiro do qual ele tinha certeza.

Figura 45 - Edwin L. Drake. O apelido “o coronel” adveio de sua capacidade de impressionar as pessoas.



Fonte: Edwin Drake, 2011.

Drake não desistiu e continuou abrindo mais poços, e como a mão de obra era adepta a um bom uísque, Drake começou a estocar o “óleo” nesses tonéis. Logo surgiu a dificuldade de

se conseguir mais barris, pois com o advento das perfurações, não havia escassez de petróleo e sim de barricas de uísque.

Registra-se na história que “o coronel” Drake perfurou o primeiro poço de petróleo nos Estados Unidos da América (figura 46). O poço perfurado por Drake tinha 21 metros de profundidade e produzia menos de 20 barris diários.

Figura 46 - O “coronel” Edwin L. Drake, de cartola, em frente ao primeiro poço de petróleo.



Fonte: Yergin, 1992.

Em 1860, cerca de 75 poços já estavam produzindo na pequena Titusville na Pensilvânia que ficou conhecida como a “*Oil Regions*” (Região dos óleos). Surgiram refinarias para processar o petróleo e transformá-lo em querosene e óleos lubrificantes. Havia, portanto, muita produção (em 1866 já se produziam 3,6 milhões de barris por dia?) e pouco consumo, o que fez despencar o preço por barril.

Essa corrida desenfreada, que danificava os reservatórios, provocou a exaustão prematura da pressão dos poços e com isso a inutilização de muitos deles, evidenciando a falta de tecnologia e conhecimento geológico. Mas o pequeno “boom” do petróleo (figura 47) continuou principalmente porque em 1865 a indústria americana estava preparada para prosperar com o impulso da Revolução Industrial.

A Revolução industrial consistiu em um conjunto de mudanças tecnológicas com profundo impacto no processo produtivo em nível econômico e social. Iniciada na Inglaterra em meados do século XVIII, expandiu-se pelo mundo a partir do século XIX. Com a Revolução Industrial o petróleo assumiu papel central como fonte de energia, deslocando o carvão na medida em que a máquina a vapor tradicional deu lugar ao motor de

combustão interna e às máquinas modernas. (ROSA, 1998). Ainda, o uso do petróleo como lubrificante das máquinas e como combustível nos motores de combustão externa e interna se tornou importantíssimo, especialmente com o advento do automóvel. (ROSA, 1998).

Figura 47 - A corrida do petróleo (1865)



Fonte: Yergin, 1992.

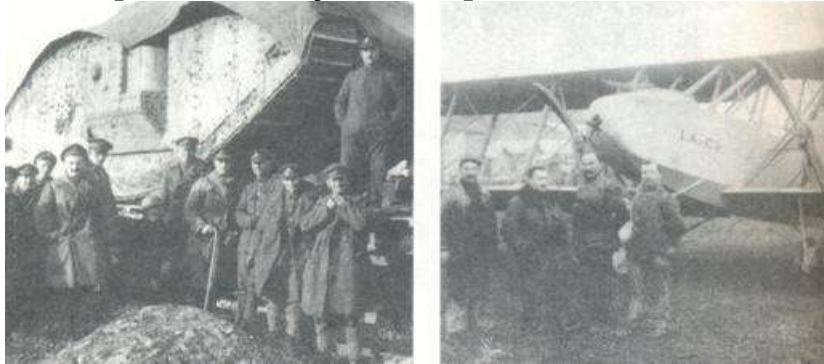
10.1 I Guerra mundial e o petróleo

Segundo Yergin (1992) toda engenhosidade mecânica do final do século XIX e início do século XX fora trazido para o conflito da primeira Guerra Mundial. Foi uma guerra feita com máquinas e essas por sua vez movidas a petróleo. Petróleo que, em particular, favoreceu, entre outros fatores, a ascensão dos Estados Unidos (rico no ouro negro), deslocando a Inglaterra e a Europa (ricos em carvão) da hegemonia do mundo capitalista. (ROSA, 1998).

O motor a combustão interna, explicado por princípios físicos da Termodinâmica, teve um impacto considerável principalmente devido à aviação, como grande auxiliar nas operações navais e militares (figura 48). Yergin (1992) destaca a vantagem do petróleo sobre o carvão na Primeira Guerra Mundial:

[...]. A Armada Alemã de Alto-Mar inicialmente queimava carvão; ela não dispunha de postos fora da Alemanha onde pudesse se reabastecer, o que limitava o seu alcance e flexibilidade. Na verdade, a dependência do carvão tornou inclusive o seu nome Armada Alemã de Alto-Mar, inadequado. Mas a Alemanha jamais estivera na posição que a Inglaterra estava: capaz de fazer uma aposta calculada sobre sua capacidade de manter o acesso ao petróleo durante a guerra. (YERGIN, 1992, p.167).

Figura 48 - A rápida mecanização do campo de batalha na I Guerra Mundial



Fonte: Yergin, 1992.

O ano 1916 foi marcado pela escassez do petróleo devido aos ataques à esquadra de navios tanques para abastecimento pelos submarinos alemães, ao rápido crescimento da demanda em virtude da escassez de carvão e à destruição de poços de petróleo na Romênia - pressionada pelos Estados Unidos da América, maior exportador na ocasião - devido ao avanço da Alemanha nas fronteiras da mesma.

No final da Primeira Guerra Mundial a indústria petrolífera americana sofria com o temor evidente da exaustão das jazidas, temor este, enfatizado pelos setores de engenharia e geologia americanos. O amor desenfreado dos americanos pelos carros cresceu vertiginosamente, houve grandes elevações dos preços dando mais apoio a evidente escassez do petróleo e conseqüentemente uma diminuição do seu consumo. Os olhos dos americanos cresceram então para o Oriente Médio, mais especificamente a Mesopotâmia (domínio britânico – Mapa 2).

Em 1925 uma expedição geológica conjunta de duas companhias americanas chegou para explorar a região, o atual Iraque; e com grandes perspectivas, as companhias anunciaram uma grande promessa no local, gerando com isso certa tensão entre americanos e ingleses. Entretanto, os ingleses tinham outras considerações econômicas e estratégicas em relação aos Estados Unidos que não permitiram que a tensão gerasse outros tipos de problemas.

Mapa 2 - Região da Mesopotâmia denominada Iraque.



Fonte: História do Mundo, 2011

A partir de então, o governo britânico teria que lidar, não apenas com o nacionalismo árabe no Iraque, que queria uma proporção direta nos lucros da exploração, como também com um território com poucas cidades importantes sob o controle de lideranças locais com culturas diferentes. Teria que lidar também com uma minoria árabe sunita¹⁶ que detinha o poder político, ao passo que os árabes xiitas eram, de longe, mais numerosos e acatar de certa maneira o interesse americano. Para complicar ainda mais as coisas, os judeus formavam o maior grupo entre a população de Bagdá, seguido pelos árabes e turcos. Para esse mosaico religioso e étnico a Inglaterra esperava importar o constitucionalismo e um parlamento responsável. A Inglaterra era favorável ao desenvolvimento do petróleo, esperando que o rendimento do mesmo ajudasse a financiar o novo governo iraquiano, o que não estava muito em acordo com as pretensões de Washington. (YERGIN, 1992).

A partir de 1927, com a descoberta de grandes poços de petróleo com potencial nesta região, respondia-se com certeza a principal pergunta: se havia enormes jazidas de petróleo no Iraque. Assim, um acordo entre as partes interessadas, Inglaterra, Estados Unidos, França e Iraque tornava-se urgente. Foi feito então o chamado “Acordo da Linha Vermelha”; um acordo de exploração de longa duração que dentro dos limites da linha vermelha seriam descobertos todos os maiores campos produtores de petróleo do Oriente Médio, com exceção dos da Pérsia (hoje Irã) e do Kuwait. Os países “parceiros” se comprometeram a não desenvolver operações de petróleo dentro daquele vasto território a não ser em cooperação.

10.2 Desenvolvimento da Geofísica

Muitas inovações geofísicas foram adaptadas da tecnologia projetada para a I Guerra Mundial, em um mundo completamente novo que se abria para o setor de exploração petrolífera. Dentre as principais tecnologias estavam:

- a) a balança de torção, usada para descobrir material diferente nas profundidades da superfície terrestre por atração gravítica;
- b) o magnetômetro, que mede as mudanças dos componentes verticais do campo magnético da Terra;
- c) o sismógrafo, mais especificamente a sismologia de refração, na qual explodem-se cargas de dinamite, cujas ondas de energia por elas provocadas, refratadas através de estruturas subterrâneas, eram captadas por sensores chamados “geofones” que fixados à superfície da terra, captavam vibrações (naturais ou induzidas) do terreno.

¹⁶ Sunitas - muçulmanos majoritários, que, ao contrário dos xiitas, reconhecem os quatro primeiros califas como sucessores diretos de Maomé. (SUNISMO, 2011).

Posteriormente inventaram o sismógrafo por reflexão superando a técnica de refração.

Assim, já não se dependiam mais dos sinais da superfície, pois agora era possível analisar o subsolo numa visão geológica fantástica, graças ao incremento tecnológico baseado em conceitos físicos.

Outra inovação importante veio com a implementação da análise de fósseis microscópicos – micropaleontologia. Essa técnica fornecia mais subsídios para o tipo de idades relativas de sedimentos. Tudo isso acompanhado de melhorias tecnológicas nas perfurações de poços.

Desde essa época já existia o que chamavam de *royalty*. Na antiguidade, *royalties* eram os valores pagos por terceiros ao rei ou nobre, como compensação pela extração de recursos naturais existentes em suas terras, como madeira, água, recursos minerais ou outros recursos naturais, incluindo, muitas vezes, a caça e pesca, ou ainda, pelo uso de bens de propriedade do rei, como pontes ou moinhos. Na atualidade, *royalties* é o termo utilizado para designar a importância paga ao detentor ou proprietário de um território, recurso natural, produto, marca, patente de produto, processo de produção, ou obra original, pelos direitos de exploração, uso, distribuição ou comercialização do referido produto ou tecnologia. (BRASIL, 1997).

A tecnologia não apenas contribuía para o aumento da produção, mas também estava alterando as exigências do consumo e fazendo com que novas frentes para exploração do petróleo se concretizassem, principalmente no Oriente Médio, mais especificamente no Golfo Pérsico conforme mostra o mapa 3. (YERGIN, 1992).

Mapa 3 - O Golfo Pérsico.



Fonte: Amarante, 2011.

10.3 II Guerra Mundial e o Petróleo

No início da década de 1930, o governo nipônico procurou assegurar a dominação sobre a indústria do petróleo para servir às suas necessidades, pois 60% do seu mercado interno estavam sob o controle de duas companhias ocidentais. O objetivo era proliferar mais refinarias japonesas e se preparar para uma guerra a favor do nacionalismo do petróleo. As companhias estrangeiras reconheciam estar prestes a serem esmagadas, enquanto americanos e britânicos condenavam esta tentativa de monopólio.

Em 1940, acontecimentos simultâneos em Tóquio e Washington colocaram o Japão e os Estados Unidos cada vez mais em rota de colisão. O petróleo foi a peça chave. Os japoneses buscam suprimento adicional de petróleo a qualquer custo nas Índias Orientais Holandesas (grande potencial) e importando mais gasolina para aviões dos Estados Unidos da América.

Enquanto isso na Alemanha, Hitler percebeu que um programa de combustível bem sucedido, poderia vir a ser muito valioso, talvez essencial, para seus objetivos a favor de uma Alemanha dominante. O petróleo correspondia apenas a 5% dos seus recursos energéticos, em contrapartida com o carvão que representava 90%. Como a Alemanha era reconhecida como líder mundial no setor químico, Hitler (figura 49) priorizou o desenvolvimento de combustíveis sintéticos a partir do carvão. (YERGIN, 1992). As palavras de Yergin mostram a importância do petróleo para Hitler:

[...]. Na área econômica a obsessão de Hitler era o petróleo. Para Hitler era o produto vital da era industrial e do poder econômico. Ele lia sobre esse assunto, falava desse assunto, e conhecia as histórias dos campos de petróleo do mundo [...]. (YERGIN, 1992, p.336).

Figura 49 - Adolf Hitler fez do petróleo a base de sua estratégia de conquista.



Fonte: Yergin, 1992.

Se o petróleo que viesse do Cáucaso¹⁷ (mapa 4), que juntamente com a terra fértil da Ucrânia (Terra Negra) fosse anexado ao império germânico, Hitler teria em termos de recursos energéticos um potencial para torná-lo invulnerável.

Mapa 4 - Região do Cáucaso atualmente.



Fonte: MORI, 2011

Segundo Yergin (1992), a importância do petróleo na guerra está nas palavras de Stalin¹⁸ que fez um brinde em homenagem a Churchill¹⁹ durante a II Guerra Mundial e disse: “Esta é uma guerra de motores e octanos. Bebo a saúde da indústria automobilística e da indústria petrolífera americana”.

10.4 Mudança do Centro da Produção Petrolífera

Em 1943, De Golyer (figura 50), geólogo aperfeiçoador do sismógrafo e responsável pela introdução da geofísica na exploração de petróleo, tinha como missão avaliar o potencial petrolífero em outros países para os Estados Unidos da América. Prognosticou a Arábia Saudita e outros países do Golfo Pérsico como a região produtora mais importante do mundo, com reservas estimadas na época em torno de 25 bilhões de barris de petróleo.

Em 1947, independente dos debates sobre reservas e ritmo de descobertas, os Estados Unidos estavam chegando à conclusão de que não poderiam manter-se somente com a

¹⁷ Uma região de conflitos, o Cáucaso pode ser considerada uma zona geoestratégica, e um verdadeiro barril de pólvora, com suas repúblicas separatistas e conflitos de múltiplos componentes étnicos. (YERGIN, 1992).

¹⁸ Sob a liderança de Stalin, a União Soviética desempenhou um papel decisivo na derrota da Alemanha nazista na Segunda Guerra Mundial (1939-1945) e passou a atingir o estatuto de superpotência, e a expandir seu território, para um tamanho semelhante ao do Antigo Império Russo. (YERGIN, 1992).

¹⁹ Winston Churchill foi famoso principalmente por sua atuação como primeiro ministro do Reino Unido durante a Segunda Guerra Mundial. Ele foi primeiro ministro por duas vezes (1940-45 e 1951-55). (WINSTON CHURCHILL, 2011).

produção interna. Estavam prestes a se tornarem importadores finais de petróleo e sua dependência em relação aos recursos externos de petróleo se intensificariam nos anos subsequentes. (YERGIN, 1992).

Figura 50 - O Geólogo Everette Lee DeGolyer, sentado.



Fonte: Yergin, 1992.

10.5 Pós-guerra e o Petróleo

No pós-guerra, a América estava novamente em paz com sua indústria do automóvel, o consumo de combustível aumentou principalmente depois da suspensão do controle dos preços e novas descobertas de regiões produtoras. Houve o primeiro grande “boom” do petróleo e a preocupação de não suprir a demanda.

Na Europa o quadro era diferente, a crise energética era evidente, havendo uma terrível escassez de alimentos e matérias-primas principalmente o carvão. Assim, o aumento gradual dos volumes de petróleo oriundo do Oriente Médio foi crucial para a recuperação pós-guerra da Europa devastada.

Nesta época sete grandes empresas (as sete irmãs) dominavam o setor petrolífero, além de controlar ou pelo menos intervir em alguns pontos do fluxo de petróleo em todo o mundo, essas companhias entraram em diversos outros ramos, principalmente no setor de energia. (ROSA, 1998).

Em 1954 houve o golpe que derrubou o governo nacionalista de Mossadeg no Irã, deposto pelo Aiatolá Khomeini (figura 51) que o substituiu pelo Xá. Mossadeg nacionalizara a indústria petrolífera iraniana em 1951. O Xá, assumindo o poder, distribuiu o controle da produção e da comercialização do petróleo do Irã entre as companhias norte americanas,

inglesa, e a estatal francesa. Nesta época havia o cartel²⁰ dos preços do petróleo que era baseado na extração do mesmo no Golfo do México, acrescido pelo custo do transporte. Essa situação de exploração do petróleo iraniano pelas multinacionais perdurou até que o Xá foi derrubado, em 1979, pelo movimento nacionalista islâmico liderado por Khomeini. (ROSA, 1998).

Apesar de existir desde 1960, foi a partir de 1974 que a OPEP - Organização dos Países Exportadores de Petróleo, organização composta por países que retêm algumas das maiores reservas de petróleo do mundo, como é o caso da Arábia Saudita – assumiu grande importância, jogando politicamente com os preços do petróleo e tirando proveito da situação alarmante causada pela propalada possibilidade de esgotamento das reservas mundiais conhecidas em um prazo de algumas décadas, mantendo-se a atual expansão do consumo. (ROSA, 1998).

Figura 51 - Khomeini, aplaudido ao retornar do exílio.



Fonte: Yergin, 1992.

Na década de 1970, governos nacionalistas no Oriente Médio e conflitos armados entre árabes e israelenses fazem com que a OPEP use o petróleo como arma de pressão política, com a consequente elevação dos preços do barril de petróleo.

²⁰ Cartel é um acordo explícito ou implícito entre concorrentes para, principalmente, fixação de preços ou cotas de produção, divisão de clientes e de mercados de atuação ou, por meio da ação coordenada entre os participantes, eliminar a concorrência e aumentar os preços dos produtos, obtendo maiores lucros, em prejuízo do bem-estar do consumidor. (ROSA, 1998).

10.6 Preços do Petróleo

O preço do petróleo sempre oscilou bastante ao longo dos anos devido a influências políticas e sociais, podendo ser usado como um índice para caracterizar o contexto político de determinadas épocas. O período de expansão do petróleo e gás natural se apoiou na inesgotabilidade dos recursos naturais, no mercado e na tecnologia, que tornou os preços mais baixos. Assim, o consumo se tornou crescente até a ocorrência do primeiro choque do petróleo, na década de 70 (1973), com os valores do barril subindo muito devido a razões políticas, com embargo do petróleo pela crise no Oriente Médio e endividamento dos países produtores.

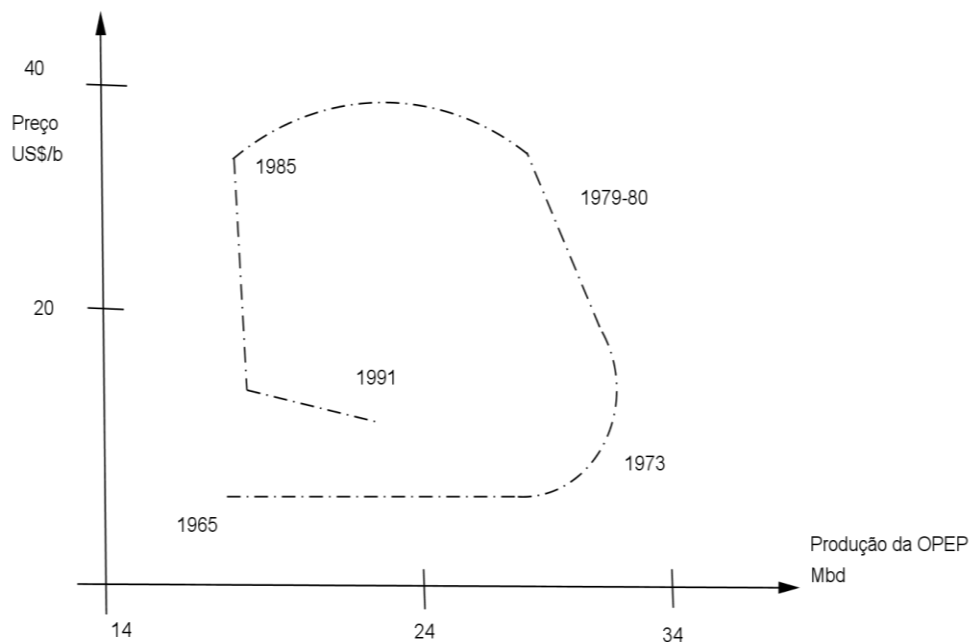
O segundo grande choque foi em 1979 devido à guerra entre o Irã e Iraque, culminando num período de transição entre as décadas de 70 e 80, do século XX, no qual as propriedades dos recursos / reservas passaram das grandes multinacionais para empresas estatais dos países produtores. Estes detinham 77% da produção e 90% das reservas e com isso determinavam os preços do petróleo (OPEP), desta maneira, logo houve uma estabilização do consumo.

Neste período o Brasil criou o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), cuja ideia era a substituição em larga escala dos combustíveis veiculares derivados de petróleo por álcool, financiado pelo governo do Brasil a partir de 1975.

Nas décadas de 80 e 90 do século XX, mudanças na economia global de energia devido a vários fatores, tais como viabilização de investimentos para a produção de petróleo, criação de fontes alternativas, redução da demanda, redução de participação da OPEP, crescimento dos produtores independentes e fusões de grandes empresas do petróleo, provocaram um antichoque dos preços do petróleo, os quais tornaram-se decrescentes.

Nos anos 1990, o petróleo volta a ser muito rentável, com o fim do papel monopolista do estado no controle total dos meios de produção, exploração e refino, e a constituição de uma indústria integrada em um só organismo para cuidar da pesquisa, lavra, exploração e transporte do petróleo. Tem-se assim, uma maior participação do estado como órgão regulador.

Pode-se sintetizar o descrito sobre as flutuações dos preços do petróleo num gráfico tipo “caracol” (gráfico 10), traçado pela relação preço em dólar por barril e a produção da OPEP em milhares de barris por dia.

Gráfico 10 - Evolução do preço do barril de petróleo.

Fonte: Modificado de Rosa (1998)

10.7 Um pouco da história do Brasil e seu petróleo

No Brasil a história do petróleo começa, para valer, com a luta pela Petrobras em 1953-54. Antes disso, alguns acontecimentos de relativa importância podem ser sumariados cronologicamente:

- 1864 – outorgada a primeira concessão para prospecção e lavra do petróleo, ao inglês Thomas Sargent;
- 1892 – primeiro poço para pesquisa de petróleo, perfurado por Eugenio Ferreira de Camargo em São Paulo;
- 1919 – primeira sondagem sob responsabilidade do governo realizado no Paraná;
- 1925 – achados vestígios de óleo e gás natural no Amazonas;
- 1932 – instalada a primeira refinaria de petróleo no Brasil, em Uruguaiana, processando 150 barris diários em destilação descontínua;
- 1938 – criado o Conselho Nacional do Petróleo;
- 1939 – encontrado petróleo em Lobato na Bahia;
- 1950 – primeira refinaria é instalada em Mataripe (Bahia), processando 500 barris diários.

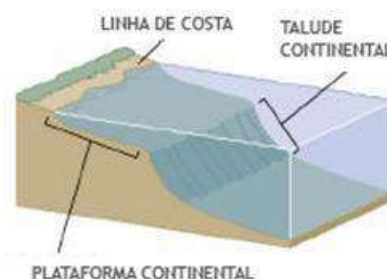
A luta pelo monopólio estatal do petróleo se intensifica após a II Guerra Mundial com a política de Getúlio Vargas. Posteriormente, o General Ernesto Geisel quebra a ideia com seu discurso de que a Petrobras deve conduzir-se segundo moldes de empresa privada propiciando lucros que remunerem o capital dos acionistas. (ROSA, 1998).

Fernando Collor de Mello com sua política econômica abriu totalmente o caminho para a quebra do monopólio da Petrobras que se concretizou no Governo de Fernando Henrique Cardoso com a lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, na qual dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética com a finalidade de promover o aproveitamento racional dos recursos energéticos do País e a Agência Nacional do Petróleo (ANP), que terá como finalidade promover a regulação, a contratação e a fiscalização das atividades econômicas integrantes da indústria do petróleo, do gás natural e dos biocombustíveis. (BRASIL, 1997).

Para entender melhor a quebra do monopólio é interessante evidenciar que todos os direitos de exploração e produção de petróleo, de gás natural e de outros hidrocarbonetos fluidos em território nacional, nele compreendidos a parte terrestre, o mar territorial, a plataforma continental (figura 52) e a zona econômica exclusiva (separa as águas nacionais das internacionais), pertencem à União, cabendo sua administração à ANP. (BRASIL, 1997). A quebra do monopólio se caracteriza pelas atividades de exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e de gás natural, que passam a ser exercidas mediante contratos de concessão, precedidos de licitações. (BRASIL, 1997).

Para uma melhor abstração do tamanho da nossa plataforma continental, pode-se comparar seu tamanho estimado em 900.000 km², com a bacia amazônica que possui 3.900.000 km² e a extensão total do território brasileiro que se encontra em torno de 8.512.000 km².

Figura 52 - Plataforma Continental, em média, a plataforma continental desce até uma profundidade de 200 metros, atingindo as bacias oceânicas.



Fonte: Plataforma, 2011.

10.8 Pré-Sal

O Pré-Sal estende-se, por 800 km de extensão e 200 km de largura, ao longo da costa entre Santa Catarina e Espírito Santo em profundidade superior a 5.000 m, com reserva estimada de 14 milhões de barris de petróleo, e produção de 2 milhões de barris/dia de petróleo até 2020. Para visualizar melhor estes números, na década de 1980, o Brasil já era um mercado de 1,036 milhão de barris/dia e a oferta local não passava de 181mil barris/dia, obrigando o País a grandes importações.

Examinada em detalhe, a demanda do Pré-Sal e dos grandes projetos da indústria petrolífera revela-se impressionante com demanda por bens e serviços estimada em R\$ 680 bilhões até 2020, isso porque as dimensões inéditas do salto na oferta de petróleo e gás natural do País exigem inovações em todas as áreas.

Portanto, a descoberta da camada pré-sal provoca uma mudança de paradigma, devido ao enorme potencial do pré-sal, graças à taxa de sucesso, determinada pelo modelo de exploração, que pode chegar a 100%.

Nesta região o controle do Estado está representado pela Petrobras como operadora única, que visa segundo especialistas garantir que a exploração e a produção de óleo e gás se traduzam em desenvolvimento da indústria do País. Desta maneira, além de exportador de petróleo, o Brasil tem a chance de tornar-se uma economia madura, com tecnologia de ponta, pois a distância e profundidade dos campos impõem ousadia logística e tecnológica através da alta qualificação profissional.

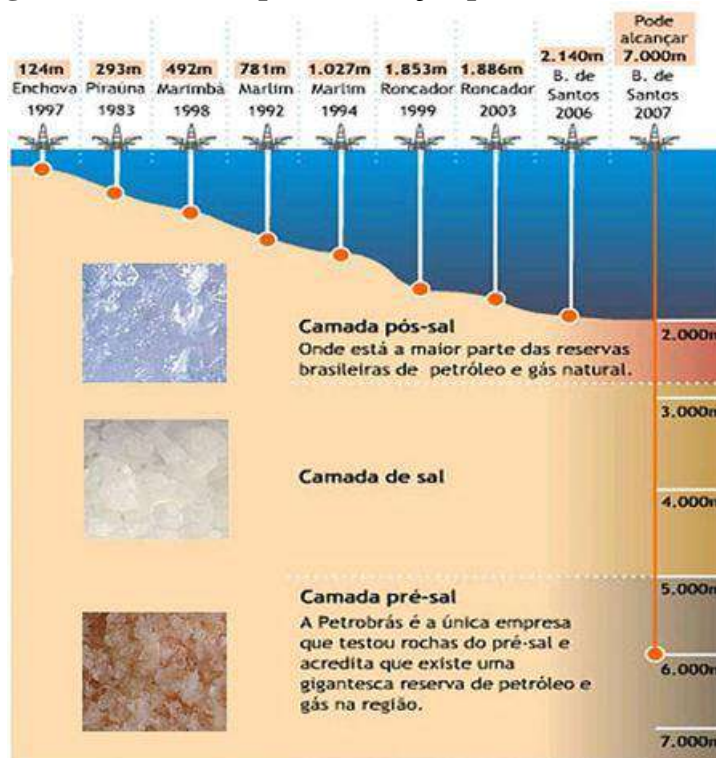
O mapa mostrado na figura 53 mostra a evolução da extração petrolífera brasileira ao longo dos anos, com uma tendência de exploração em águas mais profundas.

10.9 Considerações

Em nossos dias, todos os sistemas energéticos estão entrando em crise. As linhas energéticas dos países industrializados funcionam sob o duplo signo da dominação e da dependência. Dominação sob o aspecto financeiro, comercial e tecnológico das grandes redes petrolíferas que permite forçar a caracterização do consumo a seus próprios interesses. Dependência em relação aos recursos petrolíferos e minerais, que devem ser buscados em outras regiões do mundo. Em casos extremos, esta dominação de dependência se torna um obstáculo intransponível a qualquer forma de desenvolvimento, pois, muito além do consumo

imediate de energia (sobretudo do petróleo), é sobre o ritmo e os modos de desenvolvimento da sociedade como um todo que incide, a longo prazo, a restrição energética.

Figura 53 - Novo mapa da extração petrolífera brasileira.



Fonte: Petrobras, 2012.

As maiores companhias de petróleo do mundo (*majors*) souberam adaptar-se às novas condições internacionais de exploração do petróleo com o fim do papel do Estado e da tendência do fim da constituição de uma indústria integrada num só organismo para cuidar da pesquisa, da exploração e do transporte do petróleo, manipulando uma fonte de energia.

Segundo Rosa (1998), os investimentos privados, nacionais ou estrangeiros, no setor do petróleo brasileiro deverão objetivar:

- maior autonomia energética pelo aumento das reservas e produção de petróleo e gás natural;
- ampliação e adequação do parque de refino;
- melhoria da qualidade de produtos e do meio ambiente;
- a construção de gasodutos, de polidutos e modernização das instalações existentes.

As características prospectivas atuais se baseiam na taxa de crescimento da demanda dos países desenvolvidos, que está em decadência devido às soluções energéticas alternativas;

e ao aumento da demanda dos países em desenvolvimento. O petróleo, seguido do carvão, continua dominando o consumo de energia no mundo e nenhum outro energético ameaça tomar o seu lugar a médio prazo.

O Estado deve exercer o papel fundamental de fazer o planejamento do setor, para estabelecer, dentro de uma visão prospectiva, as diretrizes políticas que possam canalizar recursos públicos e privados, garantindo que a energia petrolífera não seja um limitante ao desenvolvimento do País.

PONTÍFICA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática

Ricardo Uzêda Pache de Paiva

PETRÓLEO E A FÍSICA:
uma visão contextualizada para o Ensino Médio.

Belo Horizonte

2012

Ricardo Uzêda Pache de Paiva

**PETRÓLEO E A FÍSICA:
uma visão contextualizada para o Ensino Médio.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ensino de Física.

Orientadora: Prof^a Dr^a Adriana Gomes Dickman

Belo Horizonte
2012

Ricardo Uzêda Pache de Paiva

PETRÓLEO E A FÍSICA:
uma visão contextualizada para o Ensino Médio.

Dissertação apresentada ao Mestrado em Ensino de Ciências e Matemática da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ensino de Física.

Adriana Gomes Dickman (Orientadora) – PUC - Minas

Belo Horizonte, 31 de outubro de 2012.

*Aos meus pais pelo incentivo e carinho.
A minha esposa pela compreensão, carinho e solidariedade.
Aos meus filhos pela alegria proporcionada diante dos esforços.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela renovação espiritual constante.

A meus pais, por terem sido o contínuo apoio em todos estes anos, ensinando-me, principalmente, a importância da construção e coerência de meus próprios valores.

A minha esposa, sua paciência infinita e sua crença absoluta na capacidade de realização a mim atribuída foram, indubitavelmente, os elementos propulsores desta dissertação.

A meus filhos pela alegria nata motivadora mesmo diante das minhas ausências.

A minha orientadora, minha grande guia, por todos os momentos de paciência, compreensão e competência.

Aos professores do Mestrado e funcionários, todos aqueles os quais tive a honra de poder compartilhar de seus conhecimentos, seja durante as disciplinas que cursamos, os seminários e palestras que assistimos ou mesmo nas conversas pelos “corredores” da Universidade.

Tudo isto compôs uma somatória fundamental não só para a construção do conhecimento que se traduz nas páginas desta tese, mas como para a maturidade de toda uma vida a seguir.

“O ser humano consegue imaginar tão bem uma felicidade infinita, e deveria conseguir entender a infinidade do espaço, o que eu considero ser bem mais fácil”. (MILEVA apud NEFFE, 2012).

RESUMO

Neste trabalho é relatado o processo de elaboração e aplicação de um material didático, dirigido a professores do Ensino Médio, baseado na interface entre a física e a engenharia do petróleo. O material didático consiste de uma cartilha sobre a exploração, produção e propriedades físicas do petróleo. O impacto ambiental e a história do petróleo também são discutidos brevemente. Como uma aplicação, é elaborada uma aula exemplo com atividades envolvendo vídeos, experimentos e objetos de aprendizagem ilustrando os tópicos discutidos. As atividades propostas são baseadas na teoria de aprendizagem significativa de Ausubel. O objetivo deste produto educacional é auxiliar o professor a articular conceitos de física com tópicos do petróleo, preparando aulas interessantes, contextualizadas e ilustradas. A aula exemplo foi aplicada a estudantes do terceiro ano do Ensino Médio. Os dados coletados por meio de um questionário, aplicado antes e após as atividades, permite-nos identificar o envolvimento e motivação dos estudantes, participantes ativos do processo de construção do conhecimento. Os recursos computacionais e a ênfase na relação entre energia e petróleo contribuíram para o aprendizado dos alunos.

Palavras-chave: Ensino de física. Contextualização. Interface Física - Petróleo. Aprendizagem significativa.

ABSTRACT

In this work we report on an investigation carried out during the elaboration and application of didactic material for High School teachers, based on the interface between physics and petroleum engineering. The didactic material consists of a booklet about exploration, production and physical properties of petroleum. Its environmental impacts and history are also briefly discussed. As an application was elaborated an example class with activities involving videos, experiments and learning objects illustrating the discussed topics. The proposed activities are based on Ausubel's theory of meaningful learning. The aim of this educational product is to help the teacher to articulate physics concepts with petroleum topics, preparing contextualized, illustrated and interesting classes. The example class was applied to students in the final year of high school. Data collected through a questionnaire, applied before and after the activities, allow us to identify students' involvement and motivation, through their active participation in the process of knowledge construction. The computer resources and the emphasis of the relationship between energy and petroleum contributed to students' learning.

Keywords: Physics education. Contextualization. Petroleum – Physics interface. Meaningful learning.

REFERÊNCIAS

ALONSO, Marcelo; FINN, Edward J. **Física: Um Curso Universitário**. v.1. São Paulo: Edgard Blucher, 1972.

ALVARENGA, Beatriz; MÁXIMO Antônio. **Física**. São Paulo: Scipione, 2005.v1.

AMARANTE, Dora. **Geografia Geral e Bíblica**. 1 jan. 1997. Disponível em: <<http://geografiageralebiblica.blogspot.com.br/search?updated-min=1997-01-01T00:00:00-02:00&updated-max=1998-01-01T00:00:00-02:00&max-results=1>>. Acesso em 21 ago. 2011.

AMOEDO, Robert. **Acidente do Exxon Valdez**. Disponível em <<http://www.solcomhouse.com/valdez.htm>>. Acesso em: 14 jun. 2011.

AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. Disponível em <<http://www.api.org/>>. Acesso em: 03 mai. 2011.

AMOEDO, Robert. **Acidente do Exxon Valdez**. Disponível em <<http://www.solcomhouse.com/valdez.htm>>. Acesso em: 14 jun. 2011.

AUSUBEL, D.P.;NOVAK, J.D. e HANASIAN, H. **Psicologia Educacional**. 2 ed. Rio de Janeiro: Editora Interamericana, 1980.

BAHMIALEE. **Petróleo- Principal fonte de energia do mundo**. YouTube, 29 de outubro de 2007. Disponível em: < <http://www.youtube.com/watch?v=l751O5Zfr-4>>. Acesso em 18 jul. 2011.

BARBOSA, João P.; BORGES, Antonio. O Entendimento dos estudantes sobre energia no início do ensino médio. **Caderno Brasileiro do Ensino de Física**. Belo Horizonte, v. 23, n. 2: p. 182-217, ago. 2006.

BARDIN, L. **Análise de Conteúdo**. Lisboa, Portugal: Edições 70, 1977.

BEAURY, Jean-Pierre; BILLON, Yves. The Epic of Black Gold. **A história do Petróleo (Dublado (Pt)) parte 1-5**. YouTube, 27 de janeiro de 2007. Disponível em:<<http://www.youtube.com/watch?v=1HwHkAaHis4>>. Acesso em: 10 out. 2011.

BEAURY, Jean-Pierre; BILLON, Yves. The Epic of Black Gold. **A história do Petróleo (Dublado (Pt)) parte 2-5**. YouTube, 27 de janeiro de 2007. Disponível em:<<http://www.youtube.com/watch?v=rYILaXrgAlw>>. Acesso em: 10 out. 2011.

BEAURY, Jean-Pierre; BILLON, Yves. The Epic of Black Gold. **A história do Petróleo (Dublado (Pt)) parte 3-5**. YouTube, 27 de janeiro de 2007. Disponível em:<http://www.youtube.com/watch?v=x_orelbFkRw>. Acesso em: 10 out. 2011.

BEAURY, Jean-Pierre; BILLON, Yves. The Epic of Black Gold. **A história do Petróleo (Dublado (Pt)) parte 4-5**. YouTube, 27 de janeiro de 2007. Disponível em:<<http://www.youtube.com/watch?v=P5IAIUMw85c>>. Acesso em: 10 out. 2011.

BEAURY, Jean-Pierre; BILLON, Yves. The Epic of Black Gold. **A história do Petróleo (Dublado (Pt)) parte 5-5**. YouTube, 27 de janeiro de 2007. Disponível em: <http://www.youtube.com/watch?v=2xJ-_XQijrk>. Acesso em: 10 out. 2011.

BENGALY, Alessandro P.; LANDAU, Luiz; BEDREGAL, Ricardo P.; Modelagem Geométrica e Termal Tri-Dimensional de Corpos Salíferos em Bacias Sedimentares. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS, 2, 1995, Rio de Janeiro. Disponível em <<http://www.portalabpg.org.br/PDPetro/2/2035.pdf> >. Acesso em: 23 mai. 2011.

BONJORNO, Regina *et al.* **Física Completa**. 1 ed. São Paulo: FTD, 2002.

BRAGA, Luiz F. S. e DIAS, Marcelo S. Uso do campo potencial na exploração dos recursos minerais marinhos. Universidade do Rio de Janeiro. Instituto de Geociências. **Revista Brasileira de Geofísica**, vol.18. n.º3. 2000. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0102-261X2000000300005&script=sci_arttext>. Acesso em: 01 jun. 2011.

BRASIL. **Balanco Energético Nacional**. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME, 2010. Disponível em <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioFinal2010.aspx>>. Acesso em: 18 abr. 2011.

BRASIL. Lei nº 9394, de 20 dez. 1996. Estabelece as diretrizes e bases da educação nacional (LDB). **Diário Oficial da União**, Brasília, 20 dez. 1996. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9394.htm>. Acesso em 20 mai. 2011.

BRASIL. Lei nº 9.478, de 6 de ago. 1997. Dispõem sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, institui o Conselho Nacional de Política Energética e a Agência Nacional do Petróleo e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 7 ago. 1997.

BRASIL. **Orientações Educacionais Complementares aos Parâmetros Curriculares Nacionais (PCN+)**. Ensino Médio. Ciências da Natureza, Matemática e suas Tecnologias. Ministério da Educação. Brasília: MEC, 1998a. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/CienciasNatureza.pdf>>. Acesso em 20 mai. 2010.

BRASIL. **Parâmetros Curriculares Nacionais Ensino Médio**. Ministério da Educação. Brasília: MEC, 1998b. Disponível em: <<http://portal.mec.gov.br/seb/arquivos/pdf/ciencian.pdf>>. Acesso em: 21 mai. 2010.

BRIE, A. Sonic. **Measurements Overview**. Março, 2011.

BUNGE, M. **Teoria e Realidade**. São Paulo: Perspectiva, 1974.

CARDOSO, Stênio. **Ensinando o Efeito Fotoelétrico por Meio de Simulações Computacionais**: Elaboração de roteiro de aula de acordo com Teoria da Aprendizagem Significativa. 2011. 117f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CASTRO, Luciano. Ensino e Aprendizado Significativo de Física Geral nas Graduações em Engenharia: **o Hiperdocumento FG1 como recurso mediador**. 2011. 266f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CANTAT, Thibault *et al.* A Diagonal Approach to Chemical Recycling of Carbon Dioxide: Organocatalytic Transformation for the Reductive Functionalization of CO₂. **Angewandte Chemie International Edition**. v. 51, n.1, p. 187-190, nov.2011.

CHASSOT, Attico. **Educação Consciência**. 1 ed. Rio Grande do Sul: EDUNISC, 2007.

CONTEÚDOS EDUCACIONAIS DIGITAIS MULTIMÍDIA. **Conteúdos Digitais Multimídias Química, Química Orgânica**. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. CCEAD. Disponível em: <http://objetoseducacionais2.mec.gov.br/bitstream/handle/mec/19407/Condigital_base.swf?sequence=29>. Acesso em: 20 jul. 2011.

DELIZOICOV, Demétrio; ANGOTTI, José André; Colaboração Alice Campos Person. **Física**. 2 ed. São Paulo: Cortez, 1992.

DISCOVERY. **Emergências e desastres**. O derramamento do Exxon Valdez. Disponível em: <http://discoverybrasil.uol.com.br/navios/emergencias_desastres/derramamento_exxon_valdez/index.shtml?cc=US>. Acesso em: 20 abr. 2011.

EDWIN DRAKE. Wikipédia. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/Edwin_Drake>. Acesso em: 26 abr. 2011.

EMULSÃO. Wikipédia. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Emuls%C3%A3o>>. Acesso em 13 set. 2011.

ENVIROMENT CANADÁ. **Chuva Ácida**. Disponível em <<http://www.ns.ec.gc.ca/>>. Acesso em: 13 jun. 2011.

EXPERIÊNCIA de Cavendish: imagem. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Experi%C3%Aancia_de_Cavendish>. Acesso em: 28 abr. 2011.

EYRE, Walkíria. Nanoestruturas Magnéticas. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica. Brasília: UnB, 2006. Disponível em <<http://nano.wikispaces.com/file/view/nanomag.pdf?>> Acesso em: 03 jun. 2011.

FAGGION, Pedro L. **Gravimetria**. Paraná. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Geomática. Disponível em <http://www.cartografica.ufpr.br/docs/levgeod1/alt_grav_polig.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2011.

FALABELLA, Eduardo. **Tecnologia de Gás e Refino**. Rio de Janeiro: COPPE/COPPETEC/UFRJ, 1998.

FANTINE, José. **Recursos e Reservas de Petróleo e Gás Natural**. Rio de Janeiro: COPPE/COPPETEC/UFRJ, 1998.

FEYNMAN, Richard; LEIGHTON, Robert B.; SANDS, Matthew. **Lições de Física**. Tradução Adriana Válio Roque da Silva. Porto Alegre: Bookman, 2008. v1.

FIELD'S, K; SANTOS, R.; BENITE, A. O Uso Contextualizado de Recursos Multimídia Como Estratégia Para Aulas de Química Mais Atrativas e Motivadoras: O Petróleo do Pré-sal Como Temática. In: ENCONTRO NACIONAL DE PESQUISA EM EDUCAÇÃO E CIÊNCIAS, 8, e CONGRESSO LIBEROAMERICANO DE INVESTIGACIÓN EN ENSEÑANSA DE LAS CIÊNCIAS, 1, 2011, Campinas, SP. **Multimídia, Contextualização, Ensino de Química, Petróleo do Pré-sal**. São Paulo: Universidade Estadual de Campinas, 2011.

FIGUEIREDO, Edgar Romeo. **Condutividade Térmica de Rochas: Uma aplicação para Granitos Ornamentais**. 2006. Dissertação (Mestrado em Geodinâmica e Geofísica). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Pernambuco.

FILHO, Aurelio G.; TOSCANO, Carlos. **Física**. 1 ed. São Paulo: Scipione, 2008

FJAER, Erlin *et al.* **Petroleum Related Rock Mechanics**. 2 ed. Amsterdam, Boston, Heidelberg, London, New York, Oxford. Ed. Elsevier, 2008. Paris – San Diego – San Francisco – Singapore – Sydney – Tokyo.

GASPAR, Alberto. **Física**. 3 ed. São Paulo: Ática, 2005. v. único.

GRF:GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. **Leituras em Física: Física Térmica Óptica**. Física 2: física térmica óptica. São Paulo: EDUSP, 2002a. v.2.

GRF:GRUPO DE REELABORAÇÃO DO ENSINO DE FÍSICA. **Leituras em Física: Eletromagnetismo**. Física 3: eletromagnetismo. São Paulo: EDUSP, 2002b. v.3.

GROUNDSPeAK. Geocaching. **Termoelétrica**. Disponível em < http://www.geocaching.com/seek/cache_details.aspx?guid=86e88472-7065-4353-ada1-0921731f11cc>. Acesso em: 13 jun. 2011.

HECKLER, Valmir. **Uso de simuladores e imagens como ferramentas auxiliares ensino/aprendizagem de ótica**. 2004. Dissertação (Mestrado Profissionalizante em Ensino de Física) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

HEIWTT, Paul G. **Física Conceitual**. Trad. Trieste Freire Ricci e Maria Helena Gravina. 9.ed. Porto Alegre: Bookman, 2002.

HISTÓRIA DO MUNDO. **Mapa do Império Persa e Mesopotâmia**. Goiânia: Portal BrasilEscola.com, 2011. Disponível em:< <http://www.historiadomundo.com.br/persa/mapa-do-imperio-persa-e-da-mesopotamia.htm>>. Acesso em: 19 ago 2011.

HODSON, D. (1994). Hacia un enfoque más crítico del trabajo de laboratorio. **Enseñanza de las ciencias**, v.12 n.3, pp.299-313.

INSTITUTO DE FÍSICA. Estados da Matéria. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul**. <<http://www.if.ufrgs.br/cref/leila/fase.htm>>. Acesso em: 18 nov.2011.

IONOSFERA. Wikipédia. Disponível em: <<http://pt.wikipedia.org/wiki/Ionosfera>>. Acesso em 27 abr. 2011.

JUNIOR, Edmundo. **Possíveis Efeitos Biológicos das Radiações Não ionizantes**: Uma temática para o ensino médio. 2008.143f. Dissertação (Mestrado em Ensino de Física) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

KAWAMURA, L.K. **Novas Tecnologias e Educação**. São Paulo: Ática, 1990.

KENYON, Bill *et al.* **Nuclear Magnetic Resonance Imaging – Technology for the 21st Century**. NUMAR Corporation. 1995.

KHUN, Márcia e PEREZ, Elio. **Estudos de Métodos Potenciais (Magnometria)**. Projeto Ambiente Computacional Integrado de Análise, Simulação e Visualização de Bacias Sedimentares e sistema Petrolíferos em águas Profundas. HP-COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

LABORATÓRIO VIRTUAL DA ESTAÇÃO CIÊNCIAS. **Máquina Térmica de Heron**. São Paulo: Universidade de São Paulo. Disponível em: <<http://www.ideiasnacaixa.com/laboratoriovirtual/>>. Acesso em: 24 nov.2011.

LABORATÓRIO VIRTUAL MOLECULARIUM. História da Termodinâmica Coimbra: Universidade de Coimbra. Disponível em: <<http://www.molecularium.net/pt/histterm/index.html>> Acesso em: 24 nov. 2011.

LARMOR. Joseph Larmor. Wikipédia. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Joseph_Larmor>. Acesso em: 13 set. 2011.

LA ROVERE, Emílio L. ROSA, L.Pinguelli; RODRIGUES, Adriano P. **Economia e Tecnologia da Energia**. Rio de Janeiro: Marco Zero, FINEP, 1985.

LIMA, Edison C. Prates; ELWANGER, Gilberto; JACOB, Breno P. **Tecnologia de Exploração de Petróleo**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1998.

LITWIN, Edith. **Tecnologia Educacional: Política, Histórias e Propostas**. Porto alegre: Artes Médicas, 1997.

LUCCHESI, Celso F. **Reservas e Reservatórios**. Rio de Janeiro: COPPETEC/UFRJ, 1998.

NUSSENZVEIG, H. Moysés. **Curso de Física Básico**. 4.ed. São Paulo:Blucher,2002. v.2.

MACIEL, Patrícia. **Educação Tecnológica e Pré-Sal**: Necessidades e urgências.2011. 173f. Dissertação (Mestrado em Economia) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MANSANO, Renato Brandão. **Engenharia de Perfuração e Completação em Poços de Petróleo**. Universidade Federal de Santa Catarina. Engenharia de Petróleo. 2004. Disponível em <http://www.petroleo.ufsc.br/palestras/2004_08_05.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2011.

MELLO, Márcio, FILHO, Nilo C.; BETTINI, Claudio. **Sistemas Petrolíferos e Geologia**. Rio de Janeiro: COPPE/COPPETEC/UFRJ, 1998.

MELLO, Márcio; HESSEL, Maria H., SOLDAN, Ana L. **O Petróleo**. Rio de Janeiro, PETROBRÁS/CENPES, 1998.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Educação. **Centro de Referência Virtual** Disponível em <<http://www.crv.educacao.mg.gov.br>>. Acesso em: 24 mai. 2011.

MINAS GERAIS. Secretaria de Estado de Educação. **Conteúdo Básico Comum** Disponível em <<http://www.crv.educacao.mg.gov.br>>. Acesso em: 20 mai. 2011.

MOREIRA, Mar A. **A Teoria da Aprendizagem Significativa e sua Implementação em Sala de Aula**. 1 ed. Brasília: UnB, 2006a.

MOREIRA, Marco A. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. **Mapas Conceituais e Diagramas em V**. Rio Grande Do Sul: Instituto de Física, 2006b. Disponível em <http://cienciamia.com/Fisedufiles/Livro_Mapas_conceituais_e_Diagramas_V_COMPLETO.pdf>. Acesso em: 12 de abr. 2011.

MORI, Mario Fernando. **Tensões Internacionais Atuais**. Foco 15 : as questões russas do cáucaso : daguestão, inguchétia e ossétia do norte.6 set. 2008. Disponível em <<http://focosdetensoesinternacionais.blogspot.com/2008/09/foco-15-as-questes-russas-do-cucaso.html>>. Acesso em: 29 abr. 2011.

MOTTA, Regis da Rocha. **Análise de Investimento e Risco**. Rio de Janeiro: COPPE/COPPETEC/UFRJ, 1998.

NEFEE, Jürgen. **Einstein: uma biografia**. Tradução Inês Antonia Lohbauer. São Paulo:Novo Século Editora, 2012.

O MUNDO DE BEAKMAN. **Sabão Beakmania e Gasolina 1992 (3)**. YouTube, 21 de fevereiro de 2007. Disponível em:<<http://www.youtube.com/watch?v=3WTsQbxiDmY&feature=related>>. Acesso em: 20 out. 2011.

OKUNO, Emico; CALDAS, Iberê L.; CHOW, Cecil. **Física Para Ciências Biológicas e Biomédicas**. São Paulo: Heper & Row do Brasil, 1982.

PELIZZARI, Adriana *et al.* Teoria da Aprendizagem Significativa segundo Ausubel. **Revista Psicologia Educação Cultura**, Curitiba, v.2, n. 1.37-42 p. 2001/2002. Disponível em: <http://www.bomjesus.com.br/publicacoes/pdf/revista_PEC/teoria_da_aprendizagem.pdf>. Acesso em: 12 out. 2010.

PETROBRAS. **Fatos e Dados**. Blog da Petrobrás. 20 fev. 2011. Disponível em <<http://fatosedados.blogspot.com.br/2011/02/20/seguranca-pre-sal-ambiente/#more-36383>>. Acesso em: 31 jan. 2012.

PHYSICAL SCIENCE STUDY COMMITTEE – **Massachusetts Institute of Technology (MIT)**. Física parte 3. Ed. Universidade de Brasília, 1963.

PINHEIRO, Nilcéia; SILVEIRA, Rosemari; BAZZO, Walter. Ciência, Tecnologia e Sociedade: a relevância do enfoque CTS para o contexto do ensino médio. **Revista Ciência & Educação**, Ponta Grossa, v. 13, n. 1, p. 71-84, 2007.

PIRES, Antonio. **Evolução das ideias da Física**. São Paulo: Ed. Livraria da Física, 2008.

PLATAFORMA continental. Wikipédia. Disponível em: <<http://focosdetensoesinternacionais.blogspot.com/2008/09/foco-15-as-questes-russas-do-cucaso.html>>. Acesso em: 20 ago. 2011.

PRATAVIEIRA, Manoel B.; SCHIEL, Dietrich. **Pêndulo Simples**. São Paulo. Universidade de São Paulo. Instituto de Física de São Carlos. Licenciatura em Ciências Exatas. Disciplina: Instrumentação para o Ensino. Disponível em <http://educar.sc.usp.br/licenciatura/2001/pendulo/PenduloSimples_HTML.htm>. Acesso em: 25 mai. 2011.

REZENDE, Flávia. **Tecnologia da Educação**. Rio de Janeiro: UFRJ/ CFCH/CEP/NuCEAD UFRJ, 2000.

RIBEIRO, Suzana K. **Impactos Ambientais**. Rio de Janeiro: COPPETEC/UFRJ, 1999.

RICHARDSON, R.J. **Pesquisa Social: Métodos e Técnicas**. São Paulo: Atlas, 1999.

ROSA, L. Pinguelli. **Mercado e Política do Petróleo**. Rio de Janeiro: COPPETEC/UFRJ, 1998.

SALMONI, Bruno; TANAKA, Ana Paula; FERREIRA, Talita. **National Geologic**: Trapa. 10 jan. 2010. Disponível em: <<http://natgeologic.wordpress.com/2010/04/>>. Acesso em: 04 mai. 2011.

SANTOS, Júlio César. **Aprendizagem Significativa, Modalidade de Aprendizagem e o Papel do Professor**. 1 ed. Porto Alegre: Meditação, 2008.

SANTOS, Karine; NETO, José M.; A perspectiva ambiental no curso de Licenciatura em Física da UFPI: reflexões sobre o atual Projeto Político Pedagógico. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo. v.33, n.3, set.2011.

SAMPAIO, José Luiz; CALÇADA Caio Sergio. **Física**. 1 ed. São Paulo: Atual, 2003.

SCIENCE FOR A CHANGING WORLD. **Connecticut Magnetic Map**: imagem. Disponível em <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1258/HTML/CT_small_mag_map.htm>. Acesso em: 03 de jun. 2011.

SCHLUMBERGER. **Brocas**. Disponível em <<http://www.slb.com/services.aspx>>. Acesso em: 06 jun. 2011.

SHERMAN VISUAL LAB. **Motor Otto / Motor Diesel**. Universidade de Delaware em Sunnyvale, Califórnia (EUA). Disponível em: <<http://www.shermanlab.com/science/physics/thermo/engines/DieselG.php>>. Acesso em: 17. set. 2011.

SHICLLING, Voltaire. **Iraque**, imagem. Disponível em <<http://educaterra.terra.com.br/voltaire/atualidade/2003/04/15/003.htm>>. Acesso em: 29 abr. 2011.

SÍTIO DOS MIÚDOS. **Combustão**. Laboratório Porto Editora. Disponível em: <<http://www.sitiodosmiudos.pt/laboratorio/brincareaprender.asp?fich=combustao.xml>>. Acesso em: 12 nov.2011.

SILVA, Adriana V. R. **Nossa Estrela: o Sol**. 1 ed. São Paulo: Livraria da Física, 2006.

SILVA, Luciano F.; CARVALHO, Luiz Marcelo. A Temática Ambiental e o Ensino da Física na Escola Média: Algumas possibilidades de desenvolver o tema produção de energia elétrica em larga escala em uma situação de ensino. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, São Paulo, v. 24, n. 3, set. 2002.

SILVEIRA, Fernando. **Imagens sobre temas de Física Geral**. Disponível em <<http://www.if.ufrgs.br/~lang/fisica%20geral.html>>. Acesso em: 19 maio. 2012.

SOLBES, J., TARÍN, F. Algunas dificultades en torno a la conservación de la energía. **Enseñanza de las Ciencias**, Valencia, v.16, n.3, p.387-397, 1998.

SOLBES, J., TARÍN, F. La conservación de la energía: un principio de toda la física. Una Propuesta y unos resultados. **Enseñanza de las Ciencias**, Valencia, v.22, n.2, p.185-194, 2004.

SOUZA, Amorezio Coelho; *et al.* **Teoria de Ausubel: Cognoscitiva ou Cognitiva**. Disponível em <<http://www.meuartigo.brasilecola.com/pedagogia/teoria-ausubel-cognoscitiva-ou-cognitiva-1.htm>>. Acesso em: 2 nov. 2010.

SUNISMO. Sunitas. Wikipédia. Disponível em:<<http://pt.wikipedia.org/wiki/Sunismo>>. Acesso em: 30 abr. 2011.

TAVARES, Romero. Animações interativas e mapas conceituais: uma proposta para facilitar a aprendizagem significativa em ciências. **Ciência & Cognição**. Rio de Janeiro. v.13, n.2, 99-108, 2008. Disponível em: < <http://www.fisica.ufpb.br/~romero/pdf/2008AIMC.pdf>>.

THOMAS, José *et al.* **Fundamentos de Engenharia de Petróleo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

TIPLER, Paul; MOSCA, Gene. **Física Para Cientistas e Engenheiros**, v.1 e 2. Tradução Fernando Ribeiro da Silva, Gisele Maria Ribeiro Vieira. Rio de Janeiro: LTC 2006

Tn PETRÓLEO. **Árvore de Natal Molhada**. Disponível em <http://www.tnpetroleo.com.br/sala_de_aula/equipamentos-submarinos>. Acesso em: 29 jun. 2011.

TUKE, Mike. **Faça seu próprio reservatório de petróleo e gás**. Earth Science Teachers' Association Earth Science Experiments for a Level. Disponível em <http://www.ige.unicamp.br/lrdg/pdf/64_Oil_gas_reservoir_pt.pdf>. Acesso em: 23 nov.2011.

UNIVERSITÁRIA, 2, 2004, Belo Horizonte-MG. **Educação**. Centro Federal de Educação Tecnológica do Rio Grande do Norte - CEFET/RN. Disponível em: <<http://www.ufmg.br/congrent/Educa/Educa173.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2010.

VALENTE, José A .Uso Inteligente do Computador na Educação. **Pátio - Revista Pedagógica**. Editora Artes Médicas Sul Ano 1, Nº 1, pp.19-21. Disponível em <<http://gladston.menezes.vilabol.uol.com.br/micromundos/Valente.htm>>. Acesso em: 02 de nov. 2010.

YERGIN, Daniel. **O Petróleo, uma História de Ganância, Dinheiro e Poder**. Tradução: Leila Marina Di Natale, Maria Cristina Guimarães, Maria Cristina L. de Gós. São Paulo: Scritta 1992.

ZYLBERSZTAJN, Arden. Concepções espontâneas em física: exemplos em dinâmica e implicações para o ensino. **Revista de Ensino de Física**, São Paulo v.5 n.2, p. 3-16, 1983.

WINSTON CHURCHILL. Wikipédia. Disponível em <http://pt.wikipedia.org/wiki/Winston_Churchill>. Acesso em: 29 abr. 2011.