

PEN 5002: Recursos e Oferta de Energia

Prof. Célio Bermann

3ª aula: Petróleo e Carvão Mineral

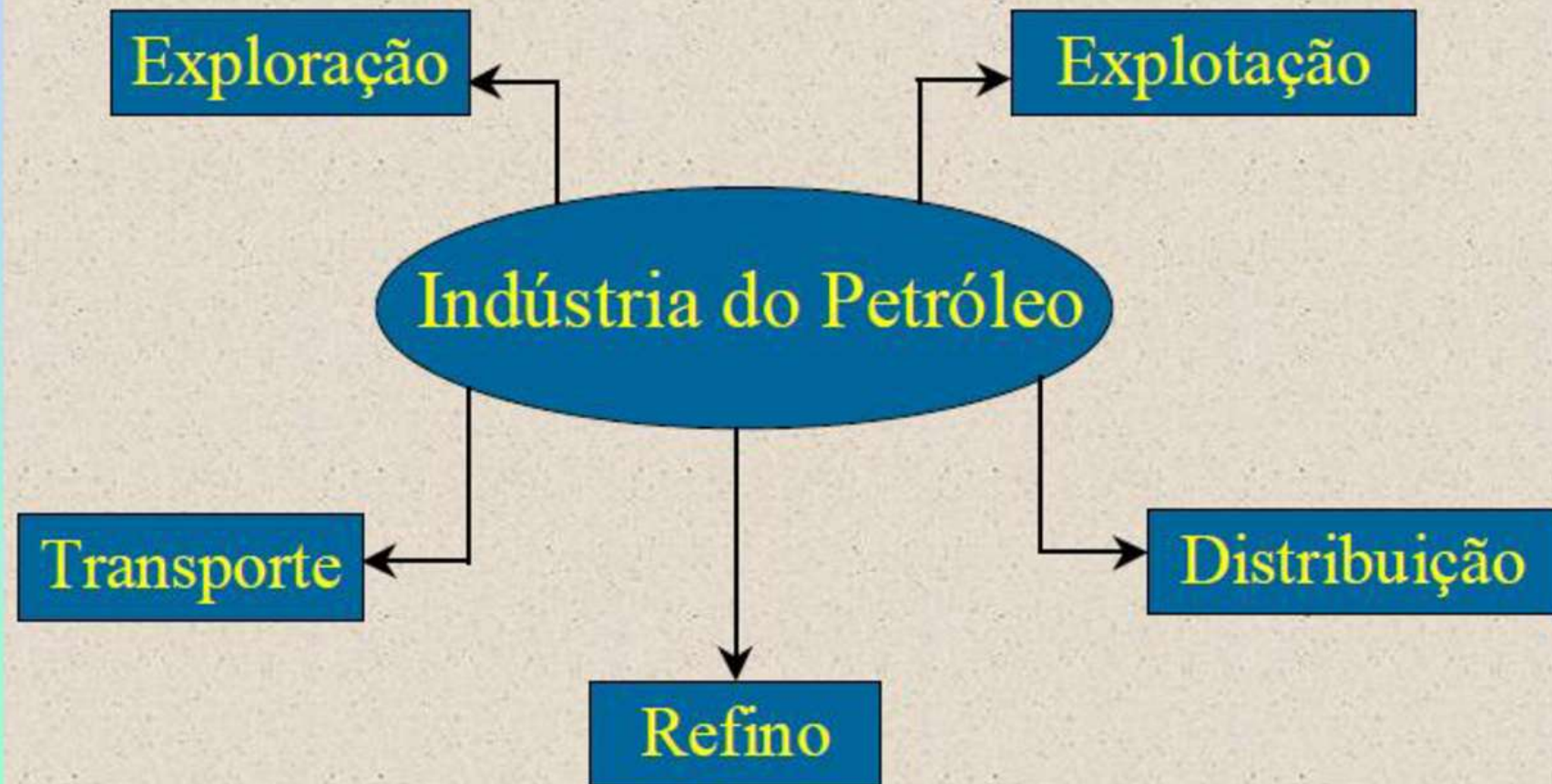
- . características físico-químicas; aspectos ambientais
- . exploração em campos terrestres e off-shore
- . o petróleo do pré-sal.
- . refino: fracionamento, craqueamento e coqueamento
- . termoeletricidade a derivados de petróleo e carvão
- . alternativas de combustão do carvão (direta, coqueificação, gaseificação, leito fluidizado)

- . Grupo de alunos: quantidades envolvidas: reservas estimadas (mundial, ALC e Brasil)

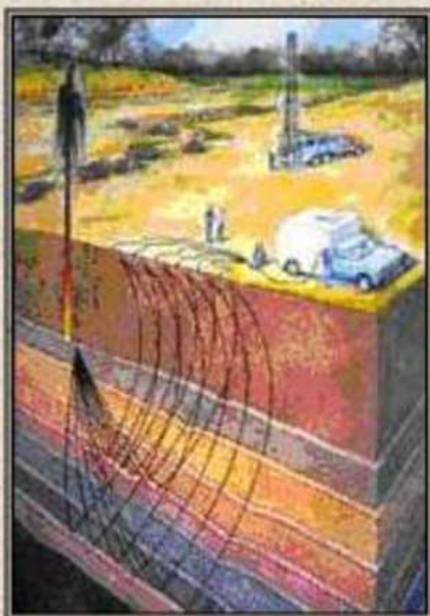
Introdução

- Indústria Petrolífera iniciou em meados do séc. XIX
- 1859: Perfuração do primeiro poço na Pensilvânia
- 1897: Primeiro poço no Brasil
- 1939: Criada CNP- Conselho Nacional do Petróleo
- 1953: Criada a Petrobrás
- No Brasil, o petróleo é encontrado em águas oceânicas profundas e ultra-profundas, o que encarece a sua extração
- O maior estado produtor é o Rio de Janeiro, na Bacia de Campos, cuja contribuição é de 75%.

- A indústria do petróleo é composta de cinco segmentos constitutivos básicos:

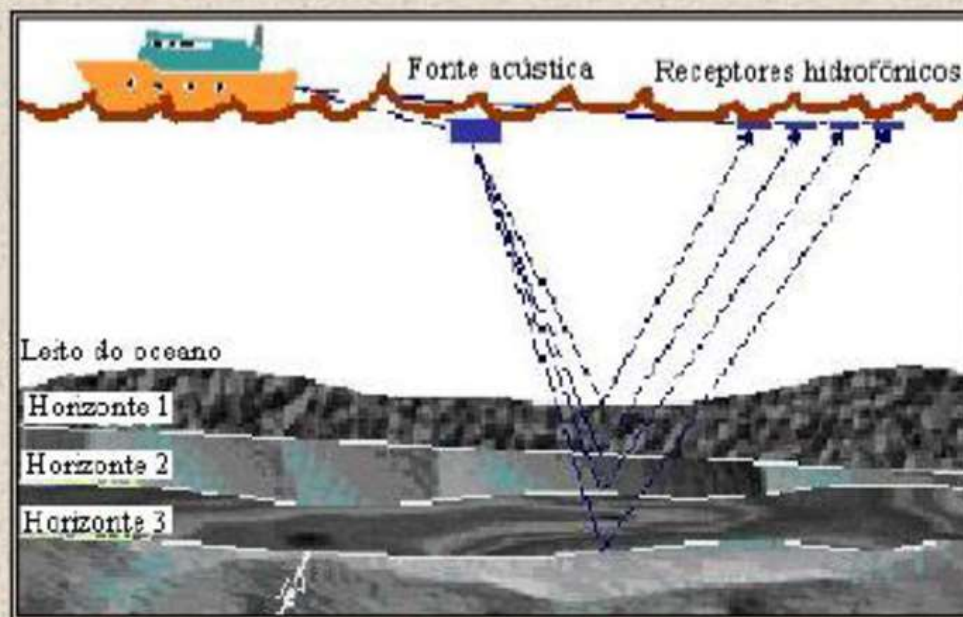


- **Exploração:** envolve a observação das rochas e a reconstrução geológica de uma área, com o objetivo de identificar novas reservas petrolíferas. Os métodos comuns empregados para se explorar petróleo são o sísmico, o magnético, o gravimétrico e o aerofotométrico.



Exploração sísmica em terra.

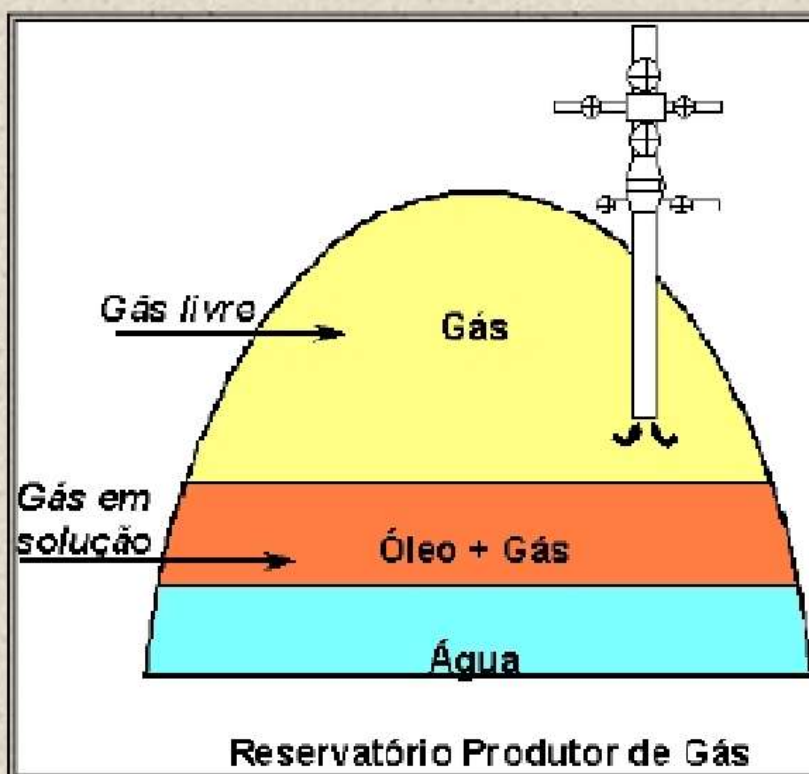
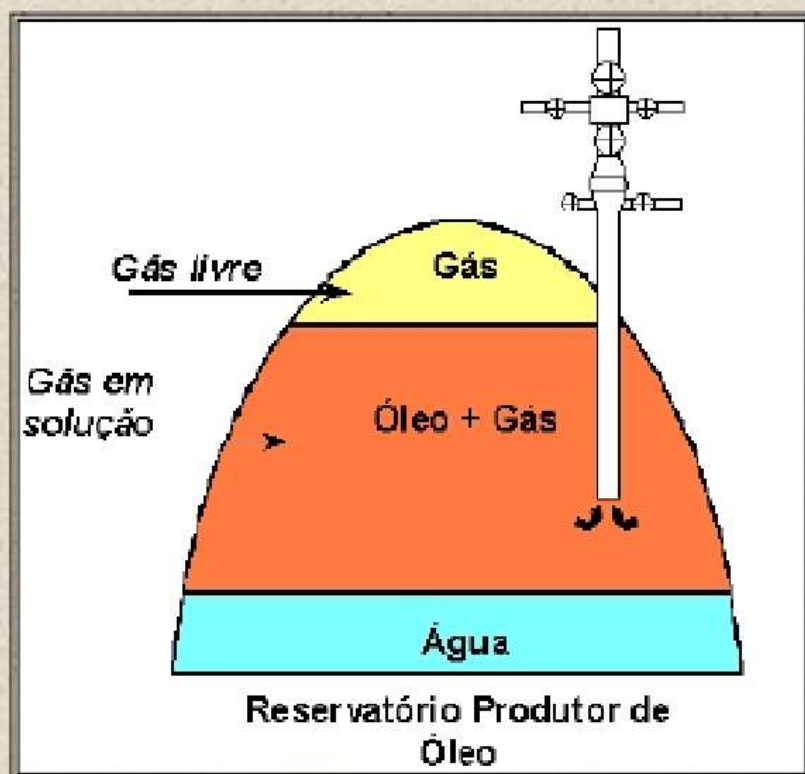
Fonte: *API*



Exploração sísmica em mar.

Fonte: *US Geological Survey*

- **Exploração:** O petróleo é encontrado em equilíbrio com excesso de gás natural (gás associado ou livre), água e impurezas, e contém certa quantidade de gás dissolvido (gás em solução) e água emulsionada. A quantidade relativa dessas fases determina o tipo de reservatório.



- **Exploração:** são empregadas técnicas de desenvolvimento e produção da reserva após comprovação de sua existência. O poço é então perfurado e preparado para produção, caracterizando a fase de completação.
- Em reservas terrestres, dependendo das condições físicas do poço, a produção é feita através de bombeamento mecânico, injeção de gás ou injeção de água.





Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014

Exploração terrestre



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



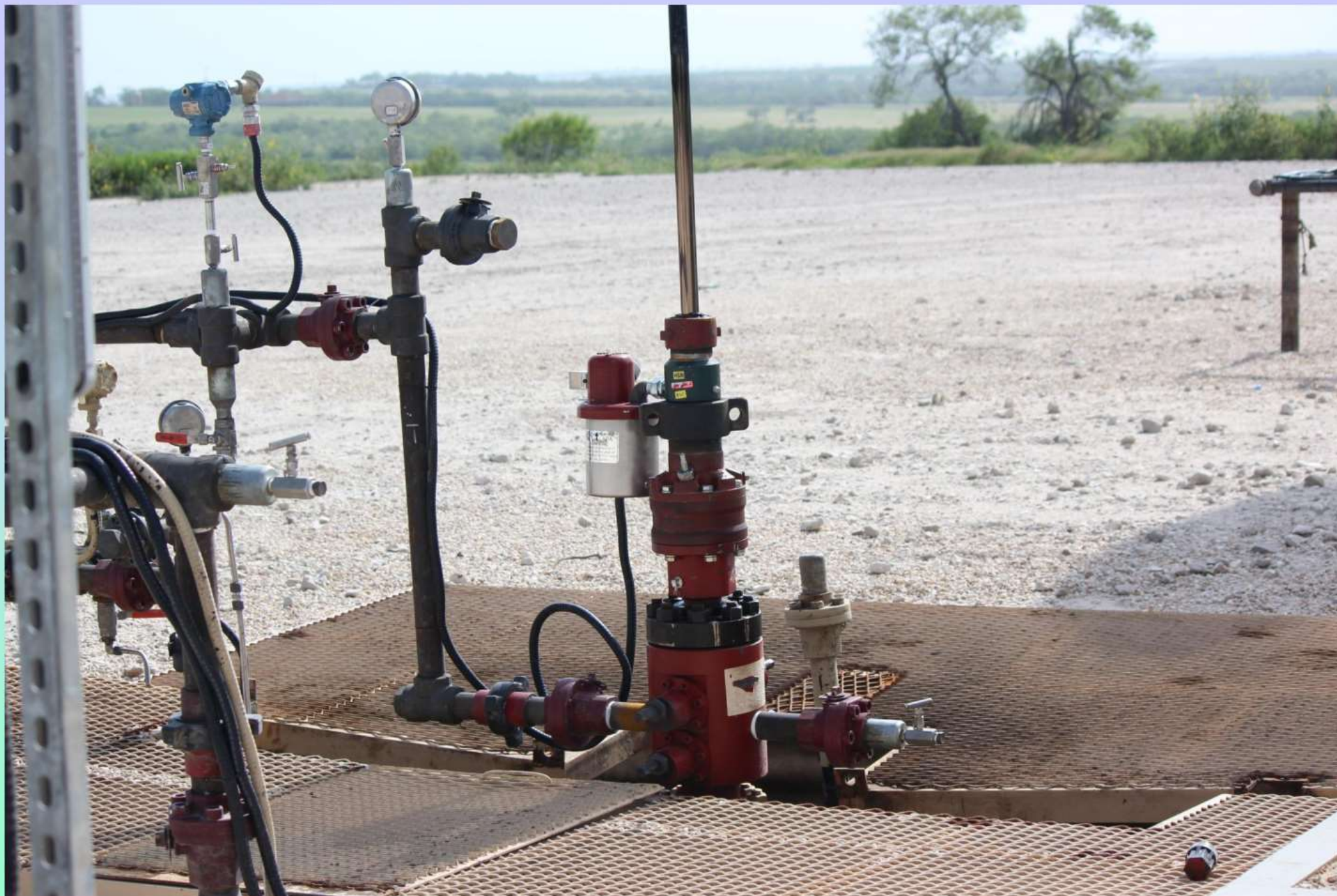
Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



IMG_2961.MOV



IMG_2962.MOV



IMG_2963.MOV



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014



Poços de Petróleo em atividade – Kenedy-Texas

Fonte: Foto de C. Bermann – 29/06/2014

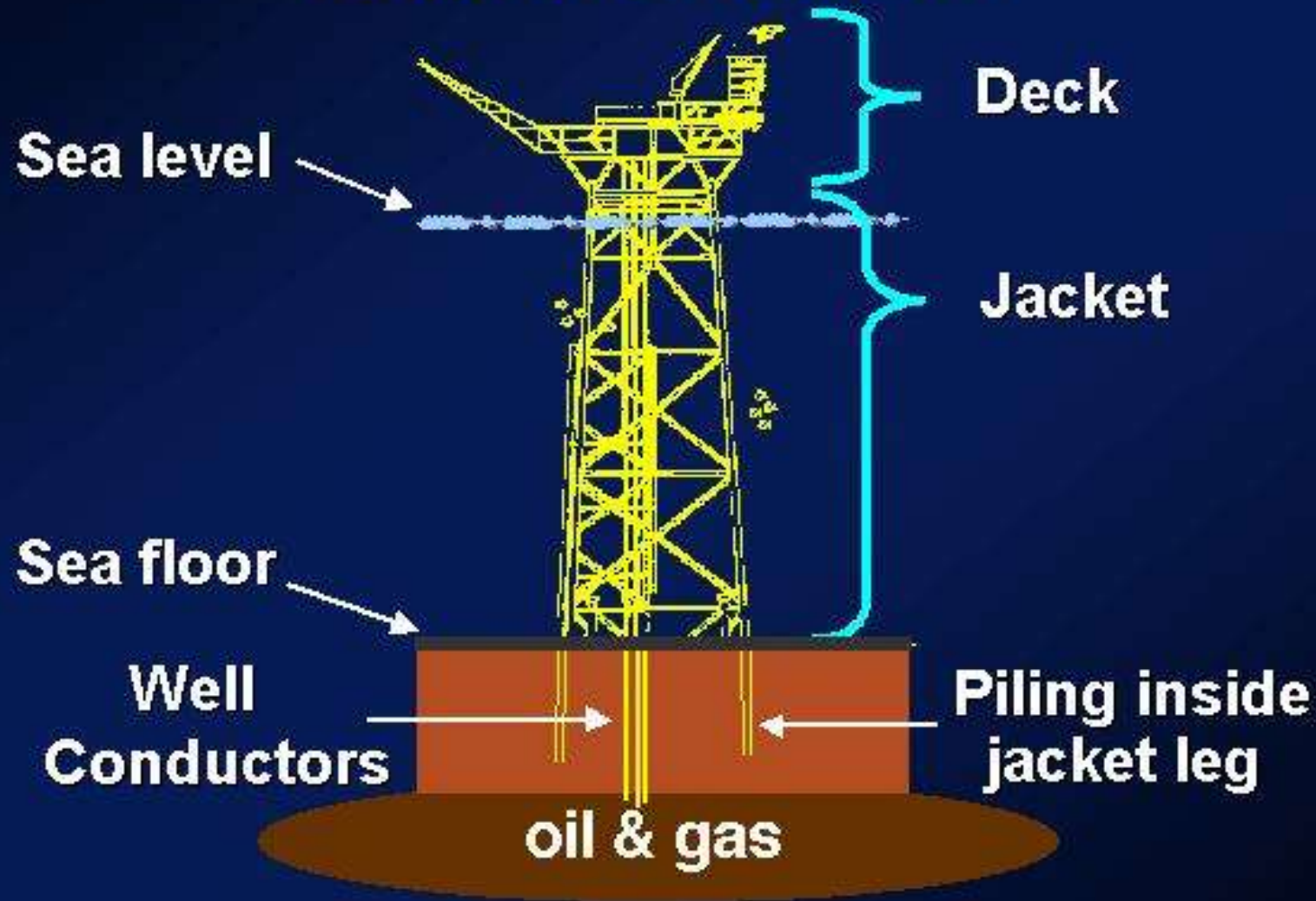
- **Exploração:** Em reservas marítimas, por sua vez, a produção poderá ser feita em plataformas fixas, plataformas auto-eleváveis (em águas rasas: aproximadamente 90 m) ou plataformas semi-submersíveis, e auxiliada por navios-sonda. Em determinados casos, pode haver integração entre esses métodos e adaptações.

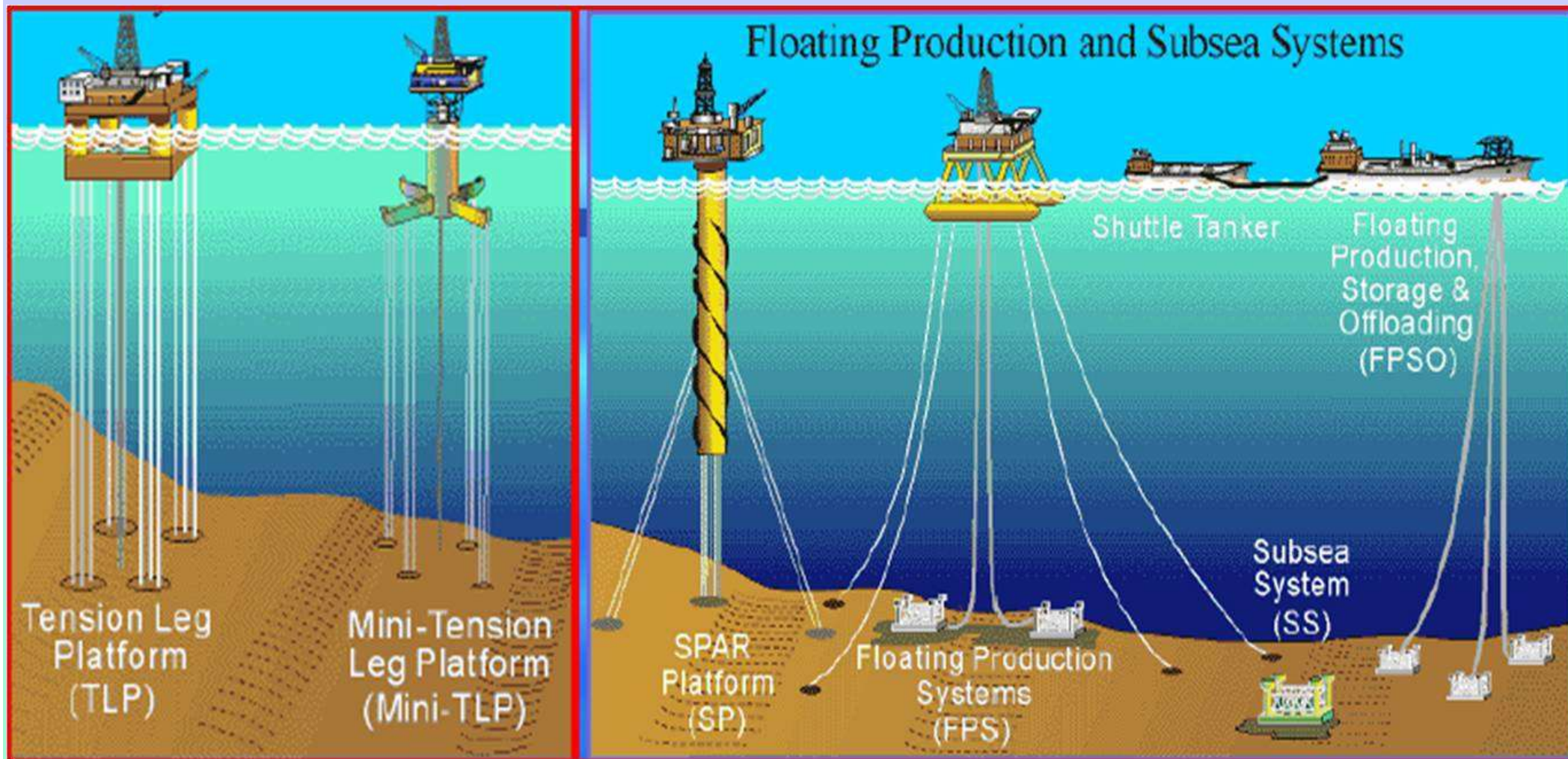


Explotação marítima



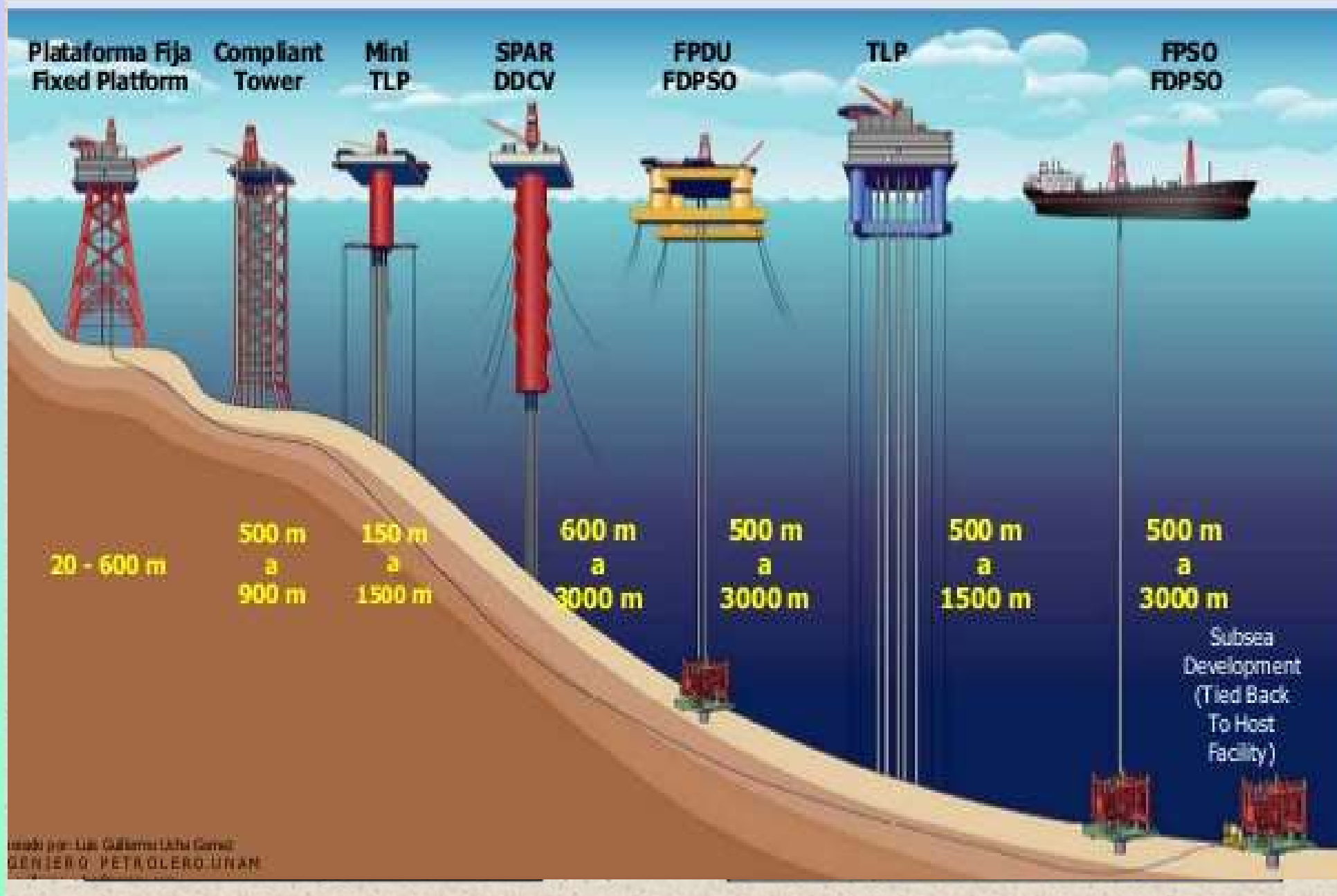
Offshore Platform

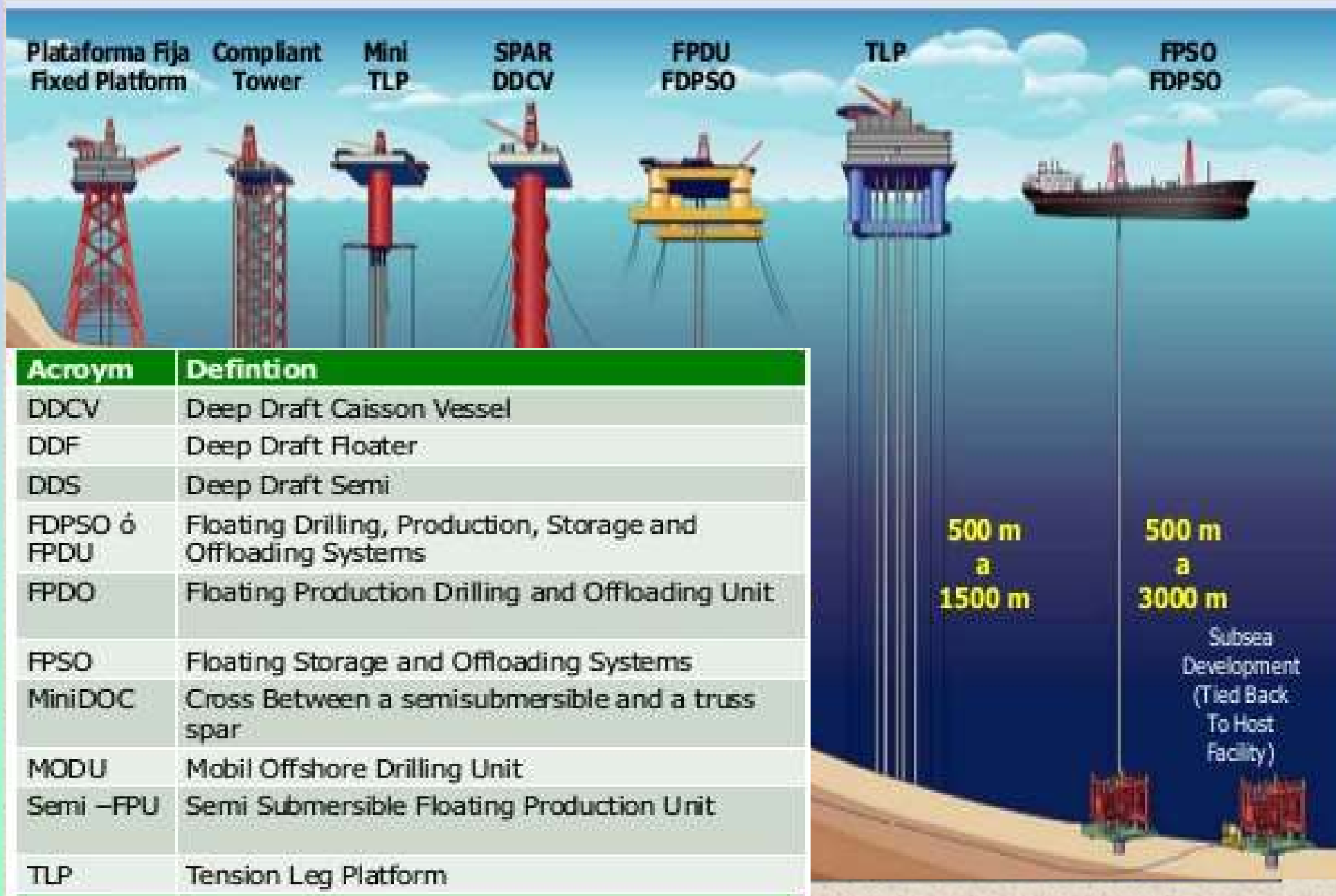




Fonte: <http://allnigerianschools.org/wp-content/uploads/2014/01/image0111.jpg>

Tipos de Floating Production - Process Units

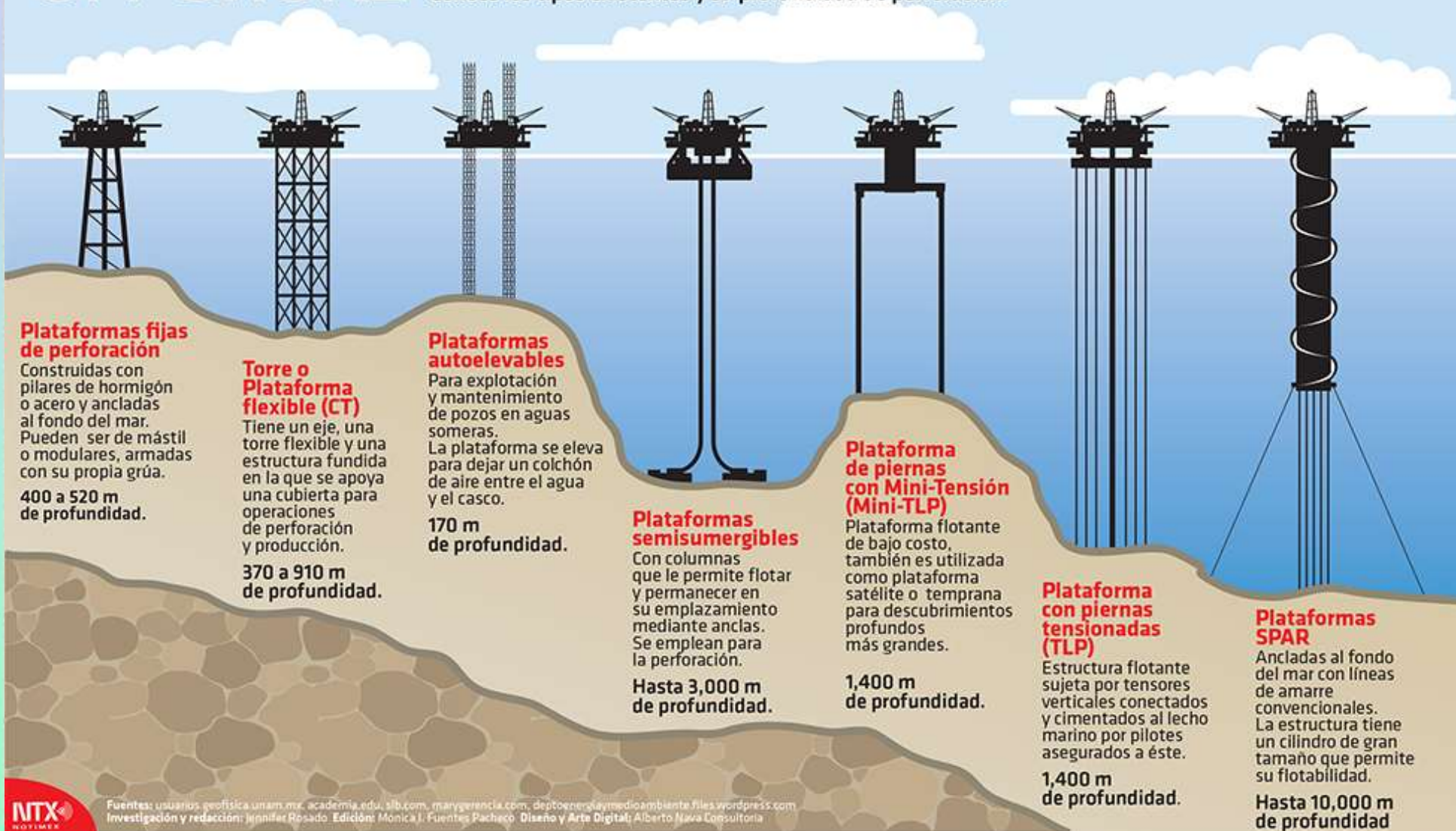




Acroym	Defintion
DDCV	Deep Draft Caisson Vessel
DDF	Deep Draft Floater
DDS	Deep Draft Semi
FDPSO ó FPDU	Floating Drilling, Production, Storage and Offloading Systems
FPDO	Floating Production Drilling and Offloading Unit
FPSO	Floating Storage and Offloading Systems
MiniDOC	Cross Between a semisubmersible and a truss spar
MODU	Mobil Offshore Drilling Unit
Semi -FPU	Semi Submersible Floating Production Unit
TLP	Tension Leg Platform
Acroym	Defintion
FPSO	Floating Storage and Offloading

PLATAFORMAS PETROLERAS OFF SHORE

El petróleo y el gas natural "off-shore" (en el mar, alejado de la costa) se extraen mediante plataformas que también son utilizadas para la producción y almacenaje de hidrocarburos. Conoce los tipos existentes y su profundidad de perforación.



CONHEÇA QUAIS SÃO E COMO FUNCIONAM
OS **TIPOS DE PLATAFORMA** QUE OPERAMOS NO MAR.

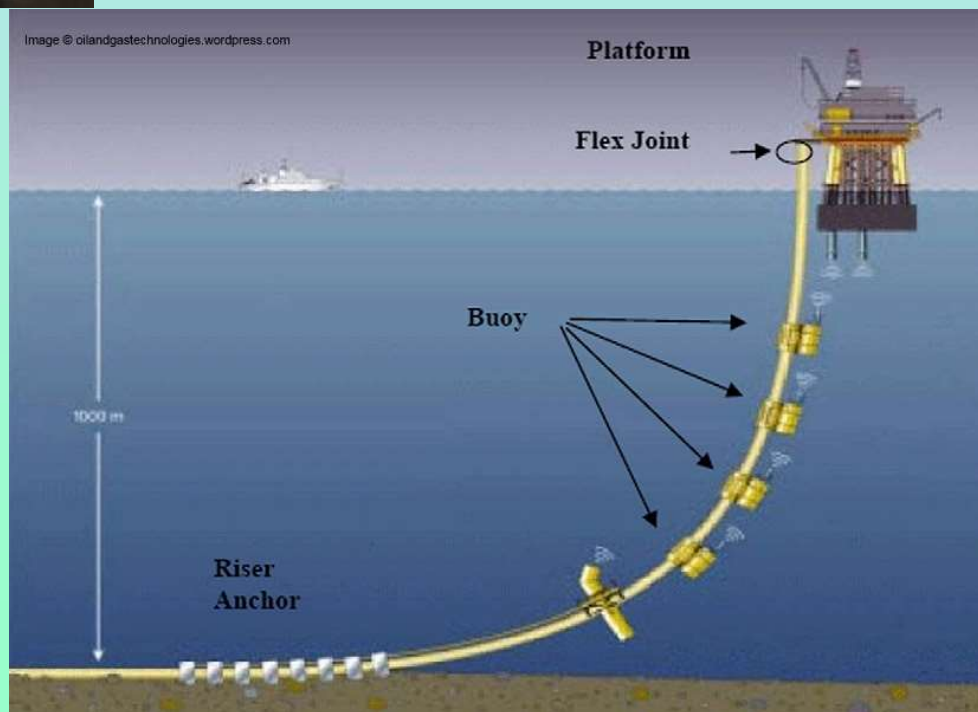


Módulos e principais equipamentos





Risers: tubos de aço de alta resistência que ligam uma estrutura de produção offshore flutuante, ou uma plataforma de perfuração, a um sistema submarino para fins produtivos, como a perfuração, produção, e injeção. Permitem a interconexão entre unidades de exploração e para reforçar a ancoragem das plataformas.





A plataforma P-36 da Petrobrás, explodiu em 15 de março de 2001, com 175 trabalhadores, dos quais 11 morreram, todos integrantes da equipe de emergência da plataforma. A plataforma tombou em 16 graus, devido ao bombeio de água do mar para o seu interior, o suficiente para permitir alagamento que levou ao seu afundamento 5 dias depois, com 1500 toneladas de óleo ainda a bordo.



A plataforma P-36 da Petrobrás, explodiu em 15 de março de 2001, com 175 trabalhadores, dos quais 11 morreram, todos integrantes da equipe de emergência da plataforma. A plataforma tombou em 16 graus, devido ao bombeio de água do mar para o seu interior, o suficiente para permitir alagamento que levou ao seu afundamento 5 dias depois, com 1500 toneladas de óleo ainda a bordo.



No golfo do México, a plataforma Deepwater Horizon, da BP, explodiu em 20 de abril de 2010, matando 11 trabalhadores e lançando no mar cerca de 780 milhões de litros de óleo, no maior vazamento acidental da história da indústria petrolífera

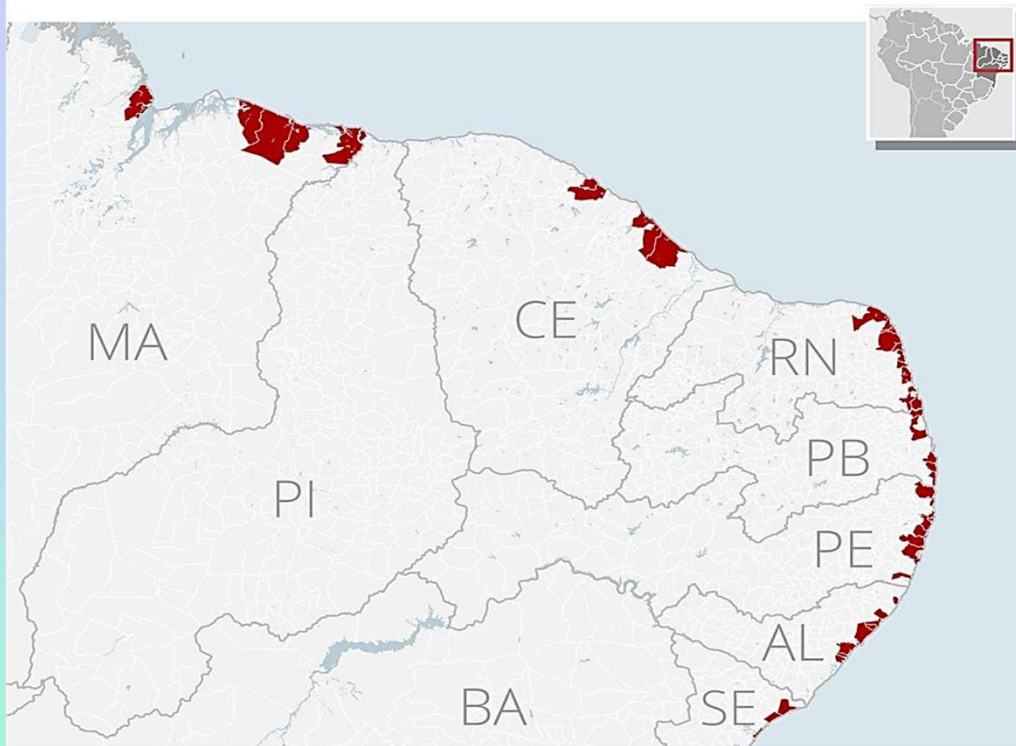


No golfo do México, a plataforma Deepwater Horizon, da BP, explodiu em 20 de abril de 2010, matando 11 trabalhadores e lançando no mar cerca de 780 milhões de litros de óleo, no maior vazamento accidental da história da indústria petrolífera

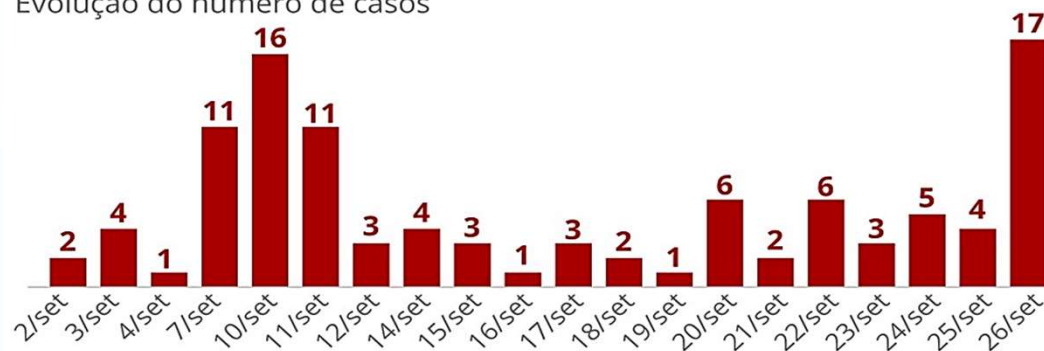
Manchas de óleo em praias do Nordeste

Ibama identificou 99 locais com sinais de petróleo cru

■ Área dos municípios afetados



Evolução do número de casos



Fonte: Ibama



➤ **Transporte:** feito em embarcações, caminhões, vagões, navios-tanque ou tubulações (oleodutos ou gasodutos) aos terminais e refinarias de óleo ou gás.

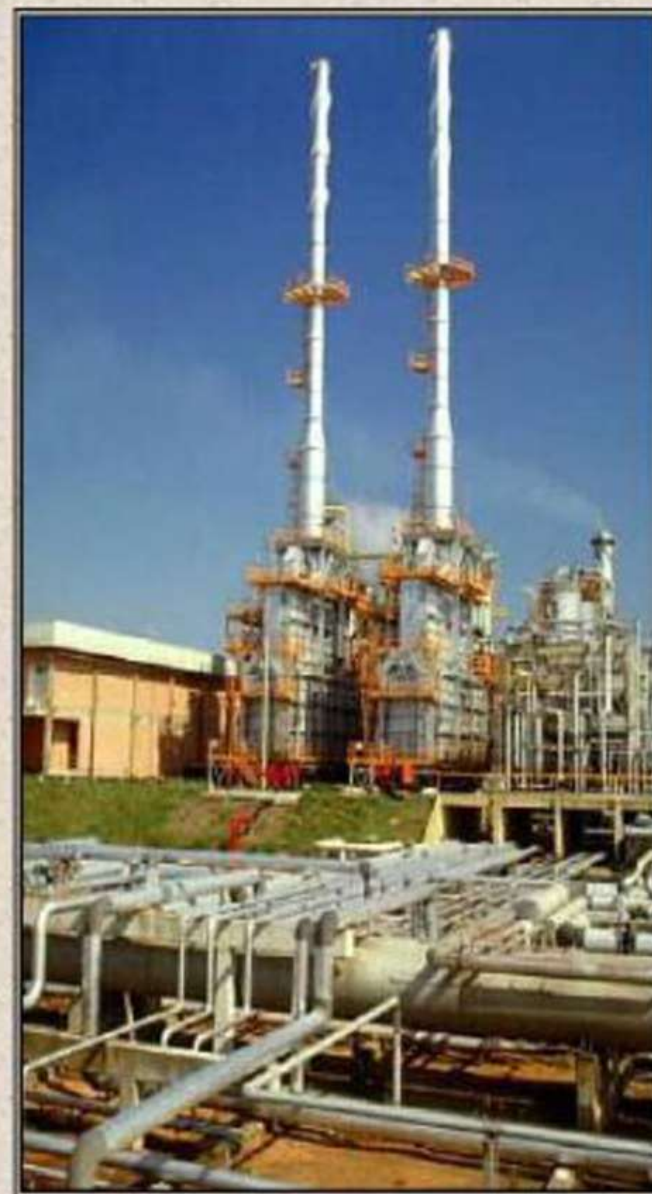
➤ **Transporte:** marítimo, os navios-tanque carregam cargas comumente classificadas como “escuras” (óleo cru, combustível ou diesel) ou “claras” (consistindo em produtos já bastante refinados, como gasolina de aviação).



- **Transporte:** em produção marítima, os oleodutos têm por função básica o transporte do óleo bruto dos campos de produção para os terminais marítimos, e então destes para as refinarias.
- Em produção terrestre, o transporte é feito dos campos de produção direto para as refinarias.
- Os oleodutos são também empregados para enviar alguns importantes produtos finais das refinarias para os centros consumidores.



➤ **Refino:** compreende uma série de operações físicas e químicas interligadas entre si que garantem o aproveitamento pleno de seu potencial energético através da geração dos cortes, ou produtos fracionados derivados, de composição e propriedades físico-químicas determinadas. Refinar petróleo é, portanto, separar suas frações e processá-las, transformando-o em produtos de grande utilidade.



A composição elementar média do petróleo é estabelecida da seguinte forma:

Elemento	Percentagem em Peso (%)
Carbono	83,9 a 86,8
Hidrogênio	11,4 a 14,0
Enxofre	0,06 a 9,00
Nitrogênio	0,11 a 1,70
Oxigênio	0,50
Metais (Fe, Ni, V, etc.)	0,30

Os hidrocarbonetos podem ocorrer no petróleo desde o metano (CH_4) até compostos com mais de 60 átomos de carbono.

Os alcanos têm fórmula química geral $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ e são conhecidos na indústria de petróleo como parafinas. São os principais constituintes do petróleo leve, encontrando-se nas frações de menor densidade. Quanto maior o número de átomos de carbono na cadeia, maior será a temperatura de ebulição.

$\text{C}_1 - \text{C}_4$
Hidrocarbonetos
Gasosos

Metano	CH_4
Etano	C_2H_6
Propano	C_3H_8
Butano	C_4H_{10}

$\text{C}_5 - \text{C}_{17}$
Hidrocarbonetos
Líquidos

Pentano	C_5H_{12}
Hexano	C_6H_{14}
Heptano	C_7H_{16}
Octano	C_8H_{18}
Nonano	C_9H_{20}
Decano	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$
Undecano	$\text{C}_{11}\text{H}_{24}$

$\geq \text{C}_{18}$
Hidrocarbonetos
Sólidos

Destilação: Forma de separar os constituintes básicos do petróleo.

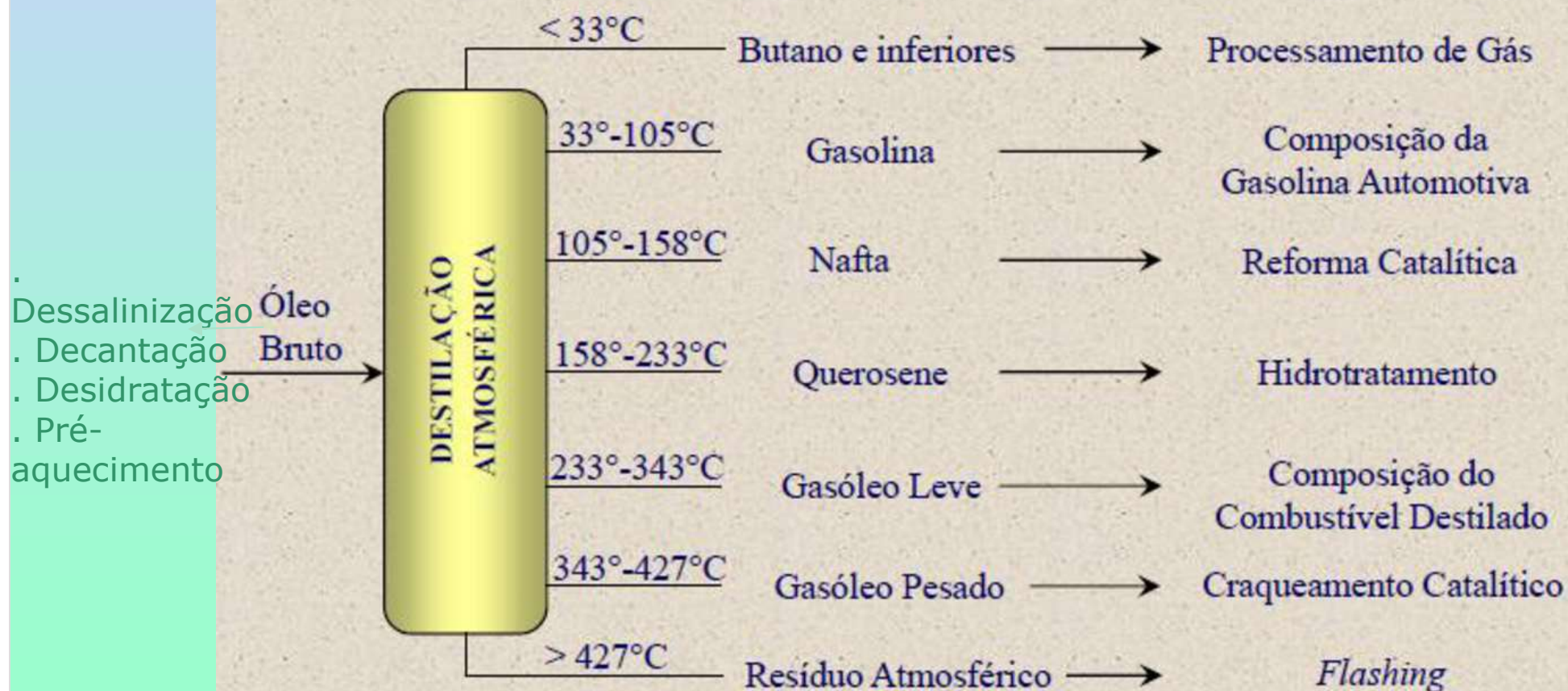
<u>Temperatura</u>	<u>Fração</u>
< 33°C	Butanos e inferiores
33°–105°C	Gasolina
105°–158°C	Nafta
158°–233°C	Querosene
233°–427°C	Gasóleo
> 427°C	Resíduo

Fonte: Prof. Afonso A. Dantas Neto & Alexandre Gurgel, PhD. Refino de Petróleo e Petroquímica. Depto. de Engenharia Química/Univ. Fed. Rio Grande do Norte – PRH ANP-14. Natal s/d.

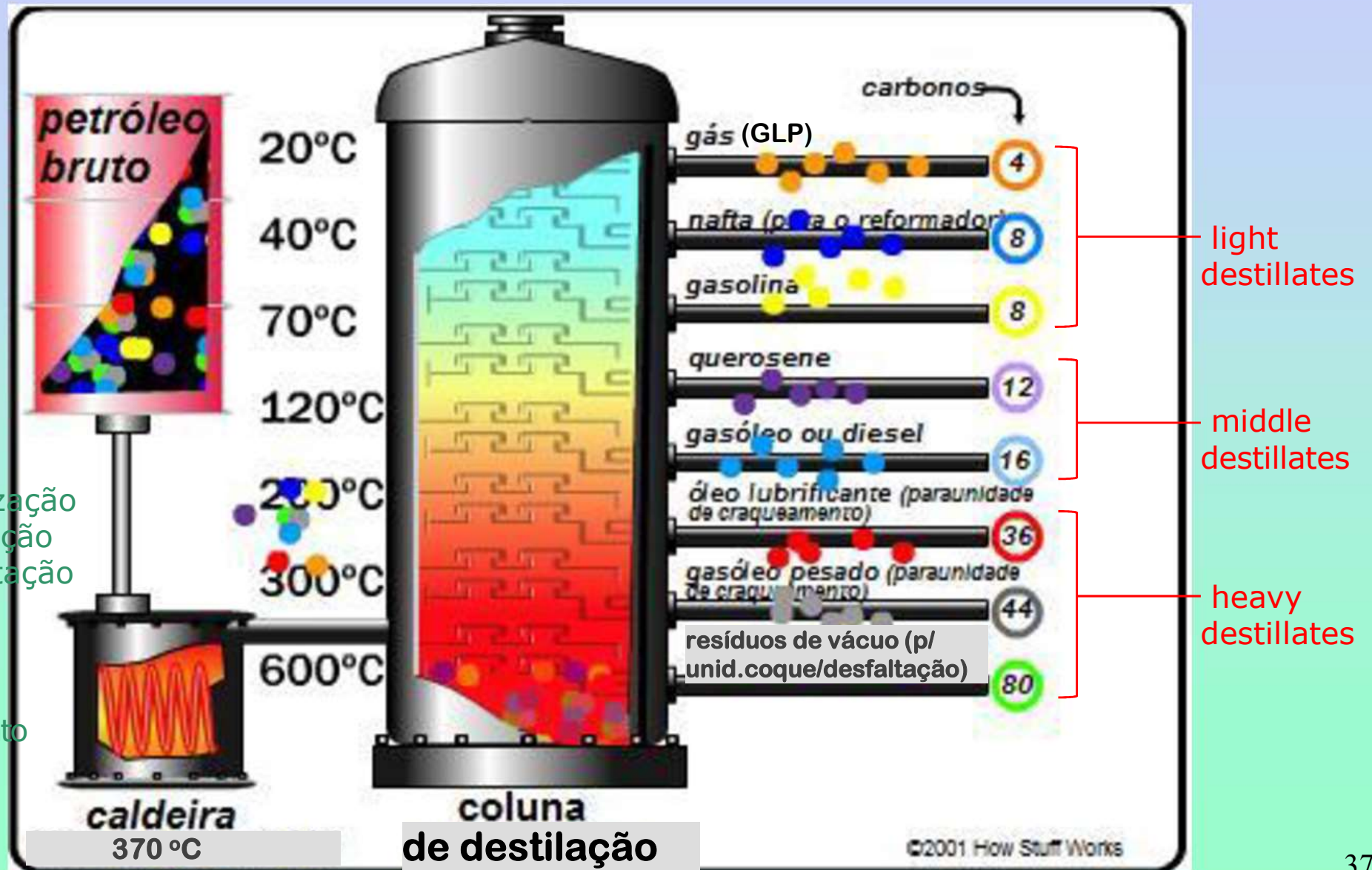
Destilação:

- **Atmosférica (Simples)**
- **Fracionada (mais utilizada)**
- **à Vacuo (utilizada para otimizar a obtenção de frações)**

A destilação atmosférica é normalmente a etapa inicial de transformação realizada em uma refinaria de petróleo, após dessalinização e pré-aquecimento. O diagrama abaixo oferece uma listagem dos tipos de produtos esperados e seu destino.



Destilação Fracionada



. Dessalinização
. Decantação
. Desidratação

. Pré-aquecimento

Derivados do petróleo

em % por barril

Derivados do petróleo	1998	2014	2018	2021
GLP (gás liquefeito do petróleo)	7,5	7,7	7,2	8,3
Gasolina	16,2	23,1	22,8	24,1
Óleo Diesel	33,9	38,2	40,2	37,0
Querosene ¹	5,0	4,7	6,2	3,5
Óleo Combustível	16,5	12,5	10,3	14,6
Asfalto	1,8	2,5	1,8	1,6
Lubrificantes	1,2	0,5	0,6	0,5
Naftas	11,2	3,9	3,9	4,0
Diversos ²	6,7	6,9	7,0	6,3

¹ inclui QAV e querosene iluminante

² inclui gasolina de aviação, coque, parafina, solventes, diluentes e resíduos não-energéticos

Fonte: ANP - Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: 2014, 2015

ANP - Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: 2018, 2019

ANP - Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis: 2021, 2022

Processos de Conversão

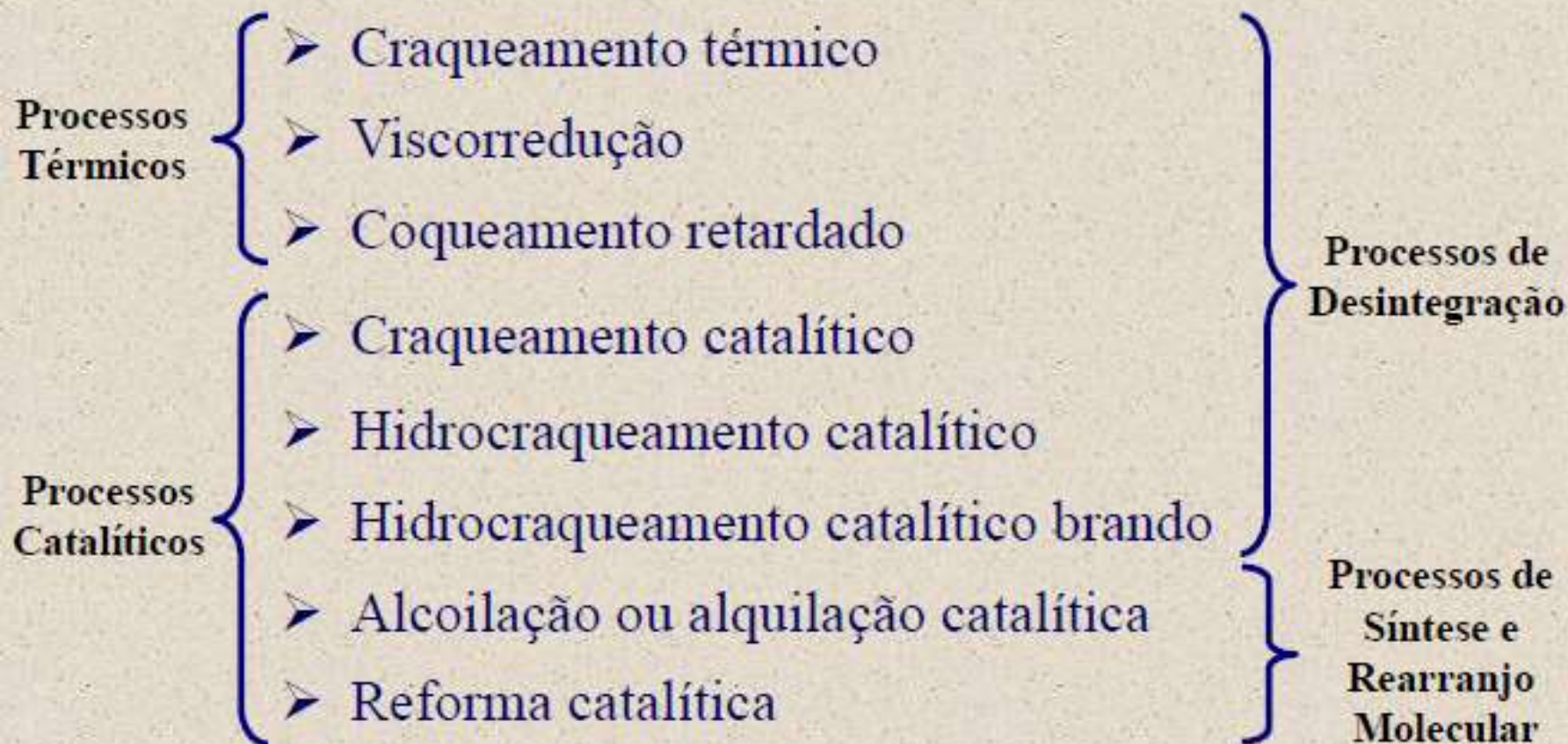
- São processos de natureza química que têm por objetivo modificar a composição molecular de uma fração com o intuito de valorizá-la economicamente. Essas modificações são através de reações de quebra, reagrupamento ou reestruturação molecular, podendo ou não ser transformada em outra(s) de natureza química distinta.
- Esses processos ocorrem com ação conjugada de temperatura e pressão nas reações, podendo haver ainda a presença de catalisadores, caracterizando processos catalíticos ou não-catalíticos (térmicos).
- As características dos processos de conversão são tais que seus produtos, quando misturados, não reconstituem de forma alguma a carga original, uma vez que a natureza das moléculas é profundamente alterada.

Processos de Conversão

- Sua rentabilidade é elevada, principalmente devido ao fato que frações de baixo valor comercial (gasóleos e resíduos) são transformadas em outras de maior valor (GLP, naftas, querosene e diesel).
- Apesar do investimento ser elevado, normalmente se trabalha com um curto tempo de retorno do capital investido, principalmente quando se consideram os processos de desintegração térmica ou catalítica.

Processos de Conversão

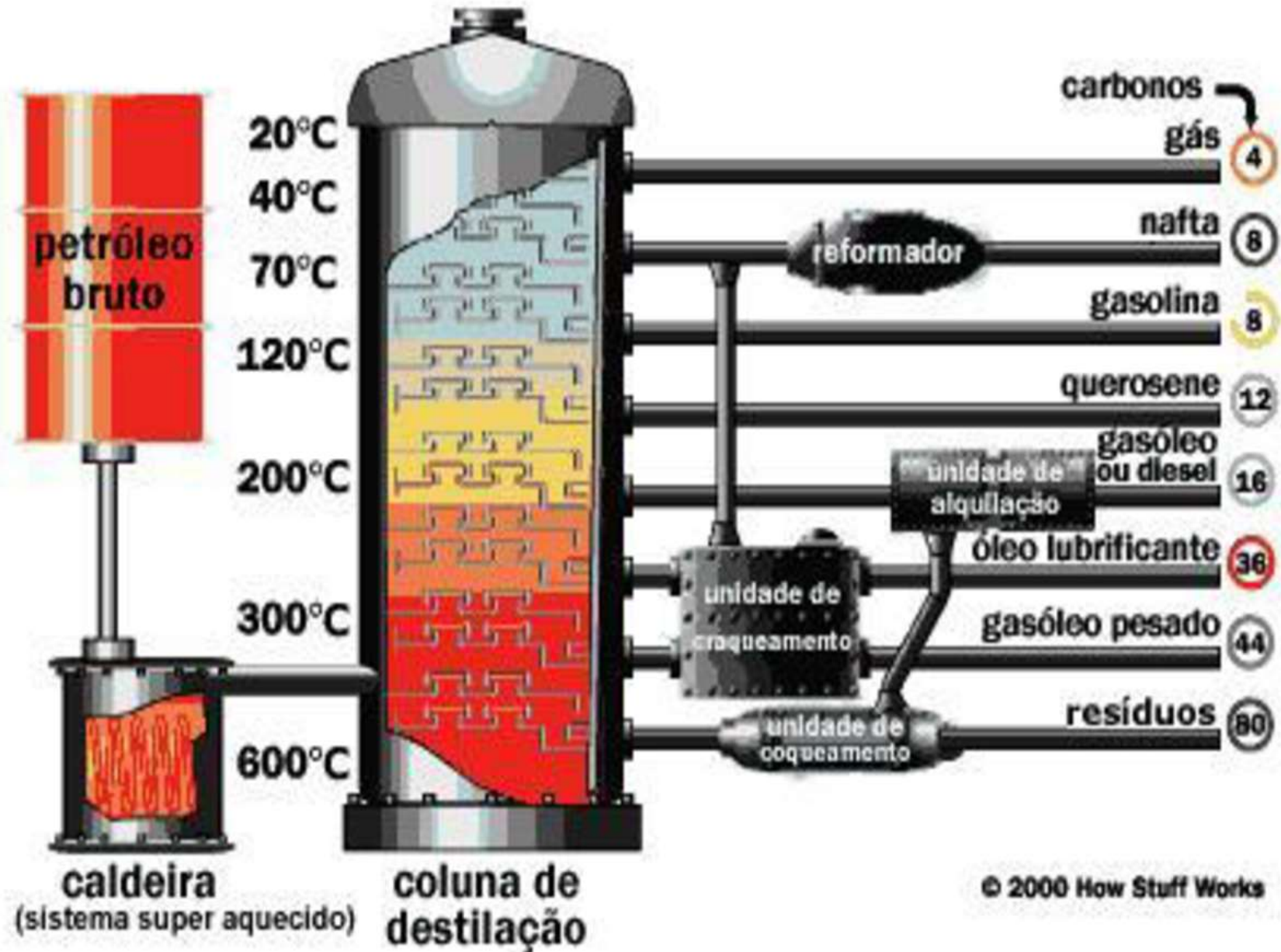
São exemplos de processos de conversão:



Processos de Conversão

Pode-se transformar uma fração em outra usando um destes três métodos:

- **Craqueamento:** divisão de grandes cadeias de hidrocarbonetos em pedaços menores
- **Reforma:** combinação pedaços menores para criar outros maiores
- **Alquilação:** rearranjo de vários pedaços para fazer os hidrocarbonetos desejados



Produtos do Refino

- Como **combustíveis**:

- GLP
- Gasolina
- Querosene
- Óleo Diesel
- Óleo combustível

- Óleo lubrificante

- Piche: Asfalto

- Nafta: Plásticos

- Parafinas: Cera

- Parafinas: Vela

não energéticos

Qualidade do Petróleo

O Grau API (em inglês, *API Gravity*) é uma escala arbitrária que mede a densidade do petróleo. Foi criada pelo American Petroleum Institute - API, juntamente com a National Bureau of Standards e utilizada para medir a densidade relativa de líquidos. Quanto mais densidade o óleo tiver, menor será seu grau API.

É obtido pela fórmula:

$$^{\circ}\text{API} = (141,5 \div \text{densidade da amostra}) - 131,5$$

onde a densidade é medida relativamente à densidade da água

O grau de API permite classificar o petróleo em:

- **Petróleo leve** ou de base Parafínica: Possui $^{\circ}\text{API} > 30$.
Contém, além de alcanos, uma porcentagem de 15 a 25% de cicloalcanos.
- **Petróleo médio** ou de base Naftênica: Possui $^{\circ}\text{API}$ entre 22 e 30.
Além de alcanos, contém também de 25 a 30% de hidrocarbonetos aromáticos.
- **Petróleo pesado** ou de base Aromática: Possui $^{\circ}\text{API} < 22$.
É constituído, praticamente, só de hidrocarbonetos aromáticos.

Nota: Quanto maior o grau API, maior o valor do produto no mercado.



WTI (West Texas Intermediate, usado no mercado americano, com 39,6 graus API), ou o Brent (adotado no mercado europeu, com 38 graus API)

Nota: A IEA utiliza a nomenclatura North Sea para o Brent.

Características do petróleo brasileiro:

Conforme a classificação da ANP, o grau API médio do petróleo nacional produzido no mês de novembro/2014 foi de 24,6°, sendo 9% de óleo leve ($> 30^{\circ}\text{API}$), 60% de óleo médio ($>22^{\circ}\text{API} < 30$) e 31% de óleo pesado ($<22^{\circ}\text{API}$).

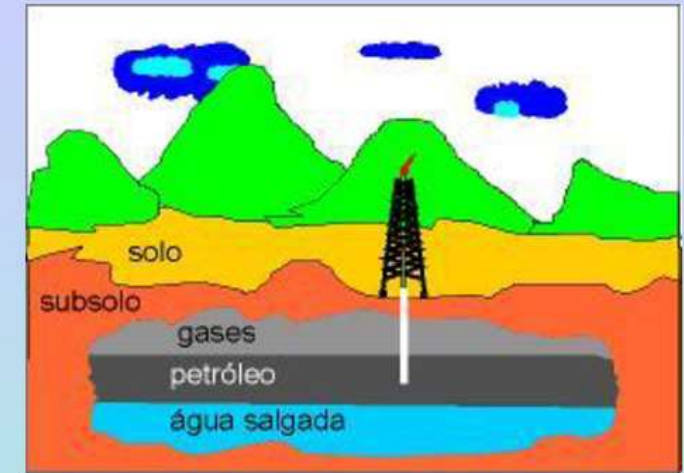
Fonte: SPG/MME. Boletim de Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural nº 33, novembro 2014.

Indústria do Petróleo

Resíduos e Meio Ambiente

- Meio ambiente

- estudos sísmicos
- produção de água
- fluido de perfuração
- ferramentas radioativas



- Resíduos

- resíduos oleosos
- resíduos líquidos
- emissão de gases

Impactos ambientais no Refino de Petróleo

Impactos Ambientais Potenciais	Medidas Atenuantes
Contaminação hídrica devido ao lançamento de efluentes, águas de lavagem, águas de resfriamento e lixiviação das áreas de depósitos de materiais ou rejeitos. OBS: Durante o processo de refino do petróleo, são utilizados em média 246 a 340 litros de água por barril de óleo cru, gerando uma quantidade de água residuária em torno de 0,4 a 1,6 vezes o volume de óleo processado	- Não deve ser lançada nenhuma água residuária, sem o tratamento necessário para sua depuração, nos rios ou em locais onde possa ocorrer infiltração. - Os efluentes hídricos podem ser tratados por meio de: neutralização, evaporação, aeração, floculação, separação de óleos e graxas, absorção por carbono, osmose reversa, troca iônica, tratamento biológico, etc., dependendo do tipo de carga contaminante que se quer remover. - Para lançamento de efluentes líquidos nos corpos hídricos receptores, devem ser observados, devem ser observados os padrões para emissão de efluentes constantes da resolução do CONAMA 020/86. - Os depósitos de materiais que possam ser lixiviados através das águas de chuva, devem ser cobertos e possuir sistema de drenagem, de forma a evitar a contaminação das águas pluviais. - As áreas de armazenamento e manuseio de matérias-primas e produtos devem ser impermeabilizadas e contar com sistema de canaletas ou ralos coletores, de forma que os derrames eventuais sejam conduzidos ao tratamento, assim como as águas de lavagem destas áreas.

Impactos ambientais no Refino de Petróleo

Impactos Ambientais Potenciais	Medidas Atenuantes
Emissões de partículas para a atmosfera, provenientes de todas as operações da planta.	- As emissões de partículas podem ser controladas pelo uso de equipamentos como ciclones, filtros de manga, precipitadores eletrostáticos e lavadores, entre outros. - A emissão de poeira dos pátios e áreas externas, onde não haja contaminantes químicos, pode ser controlada através de pulverização de água.
Emissões gasosas de óxidos de enxofre e nitrogênio, amoníaco, névoas ácidas e compostos de flúor.	O controle das emissões de gases pode ser feito pelo uso de lavadores de gases, ou absorção com carvão ativado, entre outras técnicas.
Liberação casual de solventes e materiais ácidos ou alcalinos, potencialmente perigosos.	- Manutenção preventiva de equipamentos e áreas de armazenamento, para se evitar fugas casuais. - Instalação de diques e bacias de contenção ao redor ou a jusante dos tanques de armazenamento de produtos perigosos ou que possam apresentar riscos para o meio ambiente.

Impactos ambientais no Refino de Petróleo

Impactos Ambientais Potenciais	Medidas Atenuantes
• Contaminação do solo e/ou de águas superficiais ou subterrâneas pela disposição inadequada de resíduos sólidos resultantes dos processos da indústria química, nos quais se incluem também os lodos de tratamento de efluentes hídricos e gasosos e partículas sólidas dos coletores de poeira.	• Os resíduos sólidos que não possam ser recuperados e reaproveitados devem ser tratados adequadamente antes da disposição final. • Para escolha do tratamento adequado, deve ser observada a classificação do resíduo, de acordo com a norma da ABNT – NBR 10004. • De acordo com a natureza do resíduo, as possibilidades de tratamento incluem: incineração, disposição em aterro industrial controlado, inertização e solidificação química, encapsulamento, queima em fornos de produção de cimento, etc. • Não havendo possibilidade de tratamento na área da indústria, o resíduo pode ser tratado em outra planta que disponha de instalações adequadas para tratamento, neste caso, deve-se ter cuidado especial com o transporte. • No caso de o resíduo não ser tratado imediatamente após a sua geração, deve-se prever, na área da indústria, locais adequados para seu armazenamento.

Impactos ambientais no Refino de Petróleo

Impactos Ambientais Potenciais	Medidas Atenuantes
• Alterações no trânsito local, decorrentes da circulação de caminhões de transporte de carga (inclusive cargas perigosas).	• Devem ser avaliadas as condições de acesso e sistema viário durante o estudo de viabilidade do empreendimento, selecionando-se as melhores rotas, de forma a reduzir os impactos e riscos de acidentes.
• Poluição sonora causada pelo uso de equipamentos e operações que geram ruídos elevados.	• Tratamento acústico por meio do enclausuramento de equipamentos ou de proteção acústica nas edificações onde estão instalados os equipamentos ruidosos e/ou nas unidades cujas operações gerem níveis de ruídos significativos.

Fonte: MARIANO, J. B. Impactos Ambientais do Refino de Petróleo. (Dissertação de Mestrado). PPE/COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro, 2001.

Petróleo do Pré-Sal



Fonte: Petrobrás, 2011.

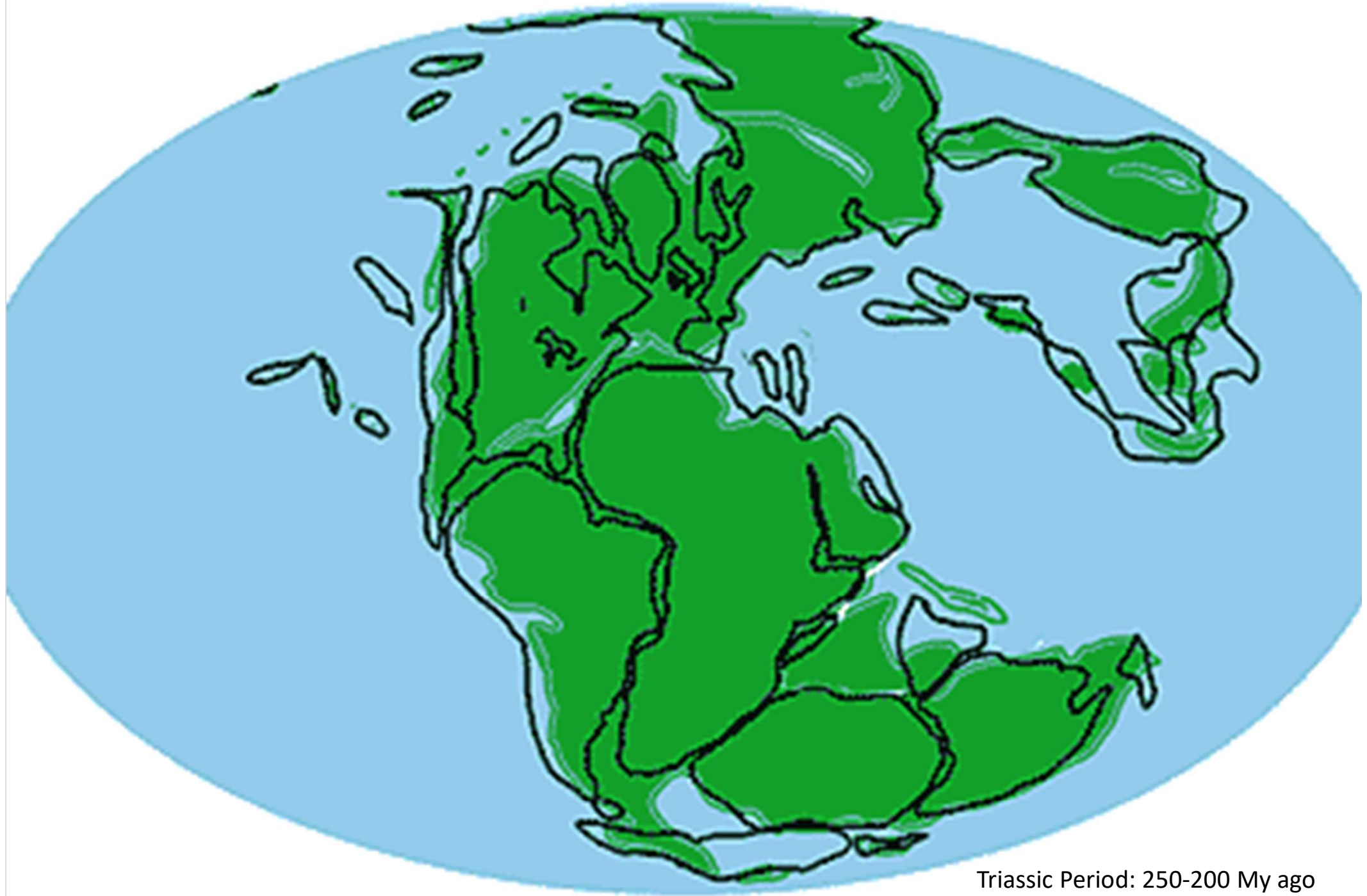
Pangea – 250 My ago



Fonte: <http://eatrio.net/pangea-maps>

Pangea – 250 My ago





Late Triassic

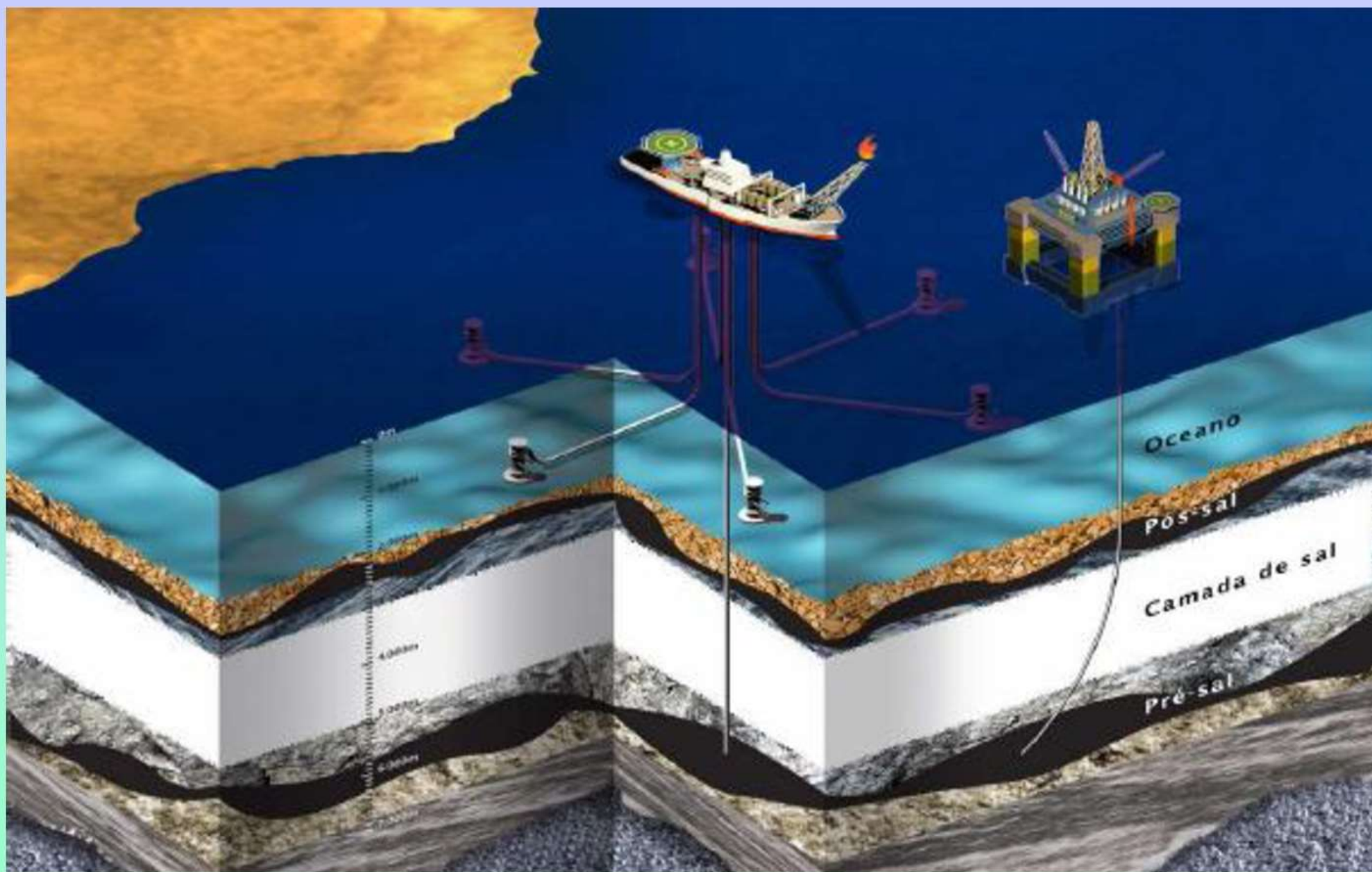
Triassic Period: 250-200 My ago
Jurassic Period: 200-145 My ago
Cretaceous Period: 145-65 My ago

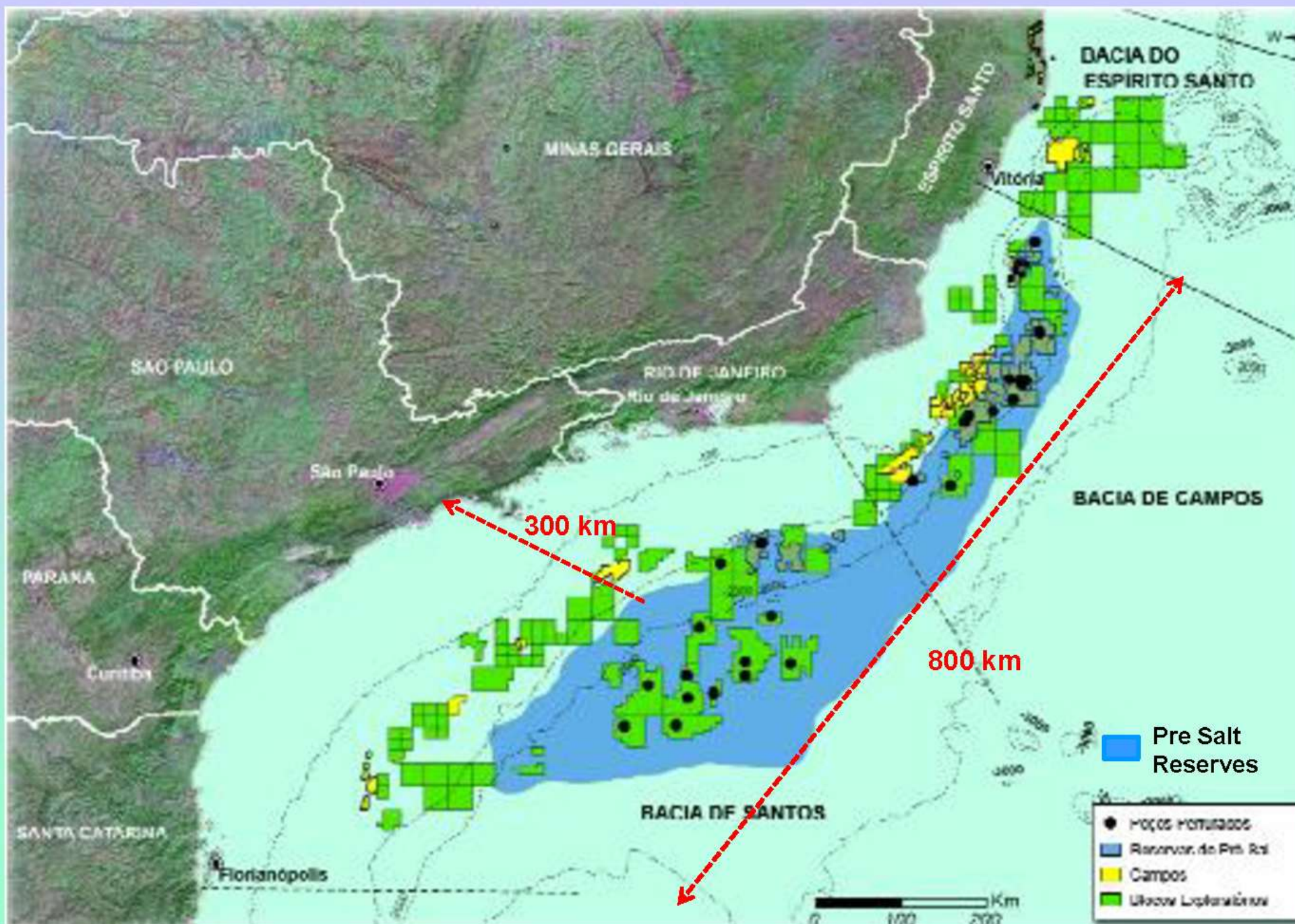


→ movimento das placas
tectônicas

O pré-sal é composto por uma sequência de rochas sedimentares formadas há 110 milhões de anos no espaço criado pela separação do antigo continente Gondwana (também conhecido como PANGEA), que começou há cerca de 150 milhões de anos. Entre os dois continentes formaram-se, inicialmente, grandes depressões, que deram origem a grandes lagos. Ali foram depositadas, ao longo de milhões de anos, as rochas geradoras de petróleo do pré-sal. Como todos os rios dos continentes que se separavam corriam para as regiões mais baixas, grandes volumes de matéria orgânica como algas e microorganismos produzidos sob ação da energia solar foram ali se depositando.

À medida que os continentes se distanciavam, em função do movimento das placas tectônicas, os materiais orgânicos então acumulados nesse novo espaço foram sendo cobertos pelas águas do Oceano Atlântico, que então se formava. A evaporação das águas formou uma camada de sal que atualmente chega até 2 mil metros de espessura. Essa camada de sal foi se tornando mais impermeável devido à sua consolidação. O material orgânico se entranhou abaixo desta camada numa feição geológica chamada de microbiólito, e ficou retido por milhões de anos enquanto que processos termoquímicos a transformasse em hidrocarbonetos (petróleo e gás natural).





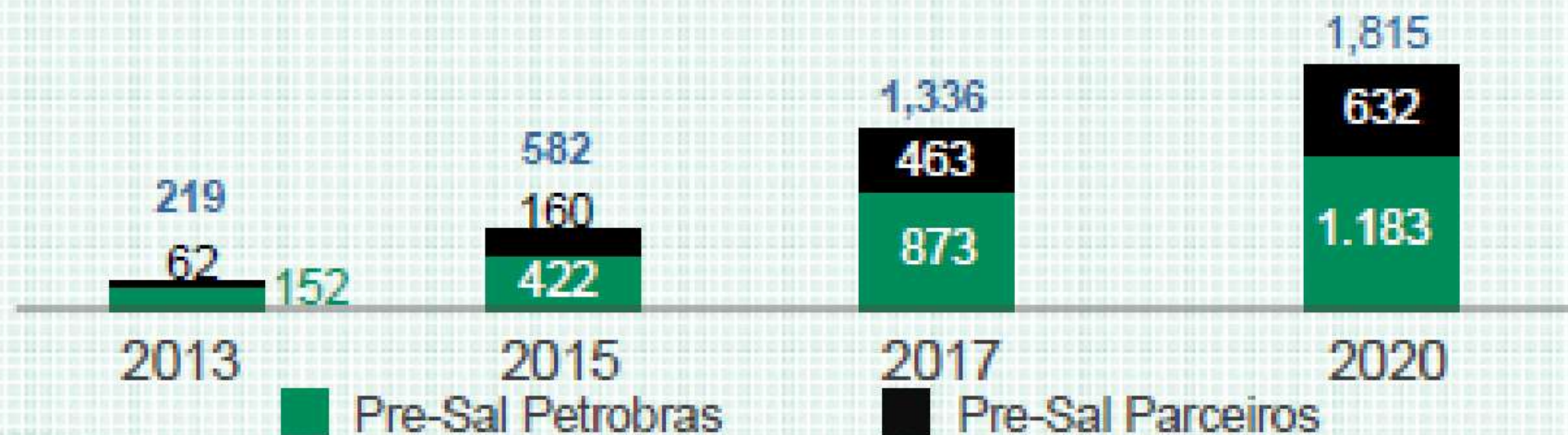
Fonte: Petrobrás, 2008.

Algumas questões sobre o Pré-Sal:

Não se sabe ainda, com o rigor científico necessário, se o petróleo existente no pré-sal está presente uniformemente no continente formado pela área de 159 mil quilômetros quadrados correspondente, ou se tratam de bolsões formando um “arquipélago”. Ou seja, se se trata de um campo único ou de uma sequencia de campos. Tal desconhecimento acabou por permitir que se especule reservas que variam entre 50 e 150 bilhões de barris de óleo equivalente, considerando petróleo e gás natural.

Na época da confirmação das descobertas (2007), estimava-se uma produção capaz de alcançar mais de seis milhões de barris de petróleo por dia. Com o petróleo acima de US\$ 100/barril, isso poderia representar um faturamento bruto mínimo diário de US\$ 600 milhões, ou de US\$ 216 bilhões anuais.

Produção de Petróleo do Pré-Sal (x 1000 b/d)



Fonte: Petrobrás, 2008.

Dados da evolução recente da produção no Pré-Sal:

- 2014: 492 mil b/d
- abril/2015: 800 mil b/d
- janeiro/2016: 1,029 milhão boed (barris de óleo equivalente/d)

Fonte: Petrobrás, 2016

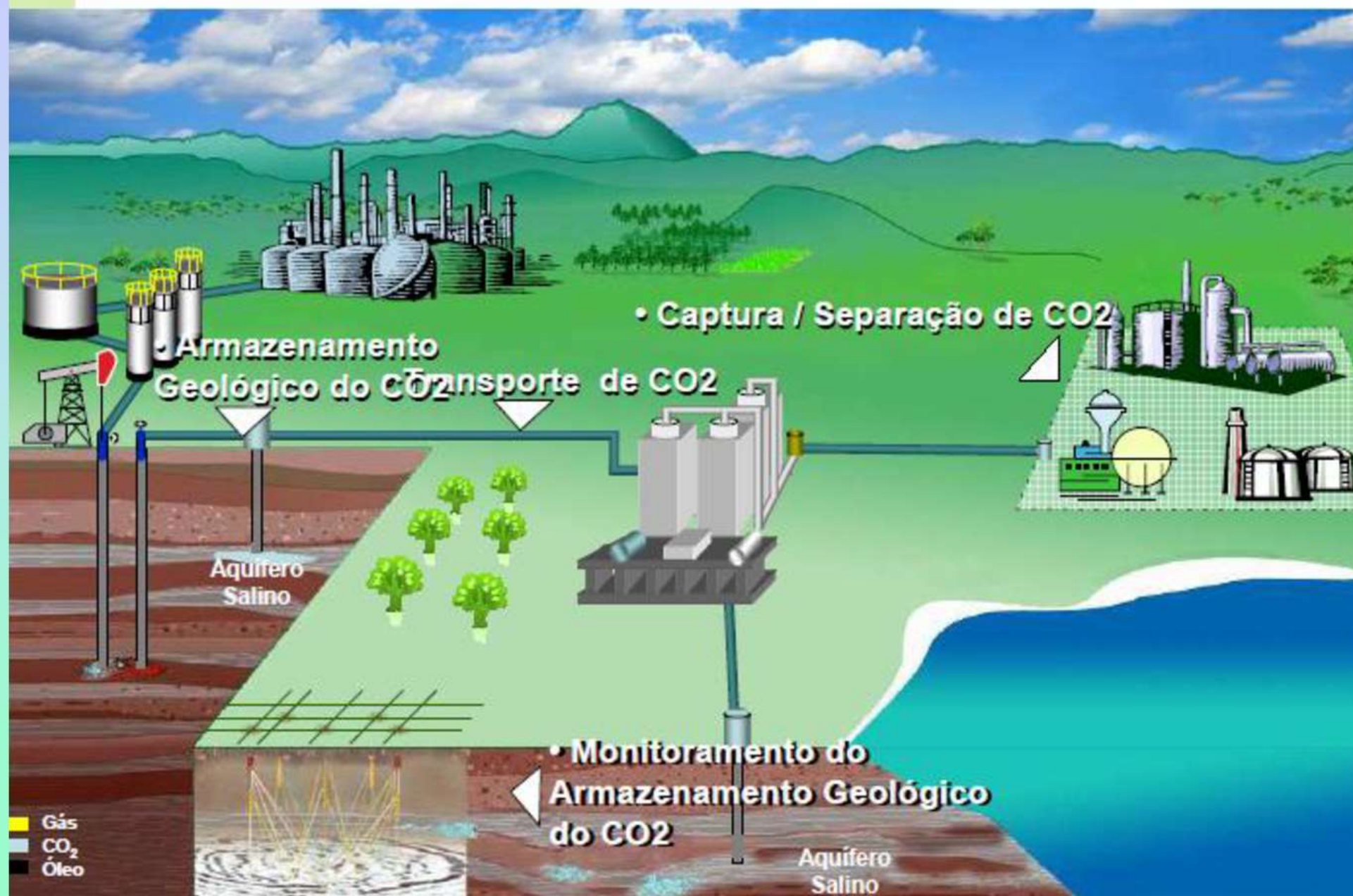
Outras questões sobre o Pré-Sal:

Muito embora o petróleo do pré-sal possa ser considerado de melhor qualidade (°API 28) que o extraído na bacia de Campos (°API 17-20), o campo de Tupi na bacia de Santos, tem entre 12% e 20% de gás carbônico, enquanto os demais campos na bacia de Campos têm, em média, 3%.

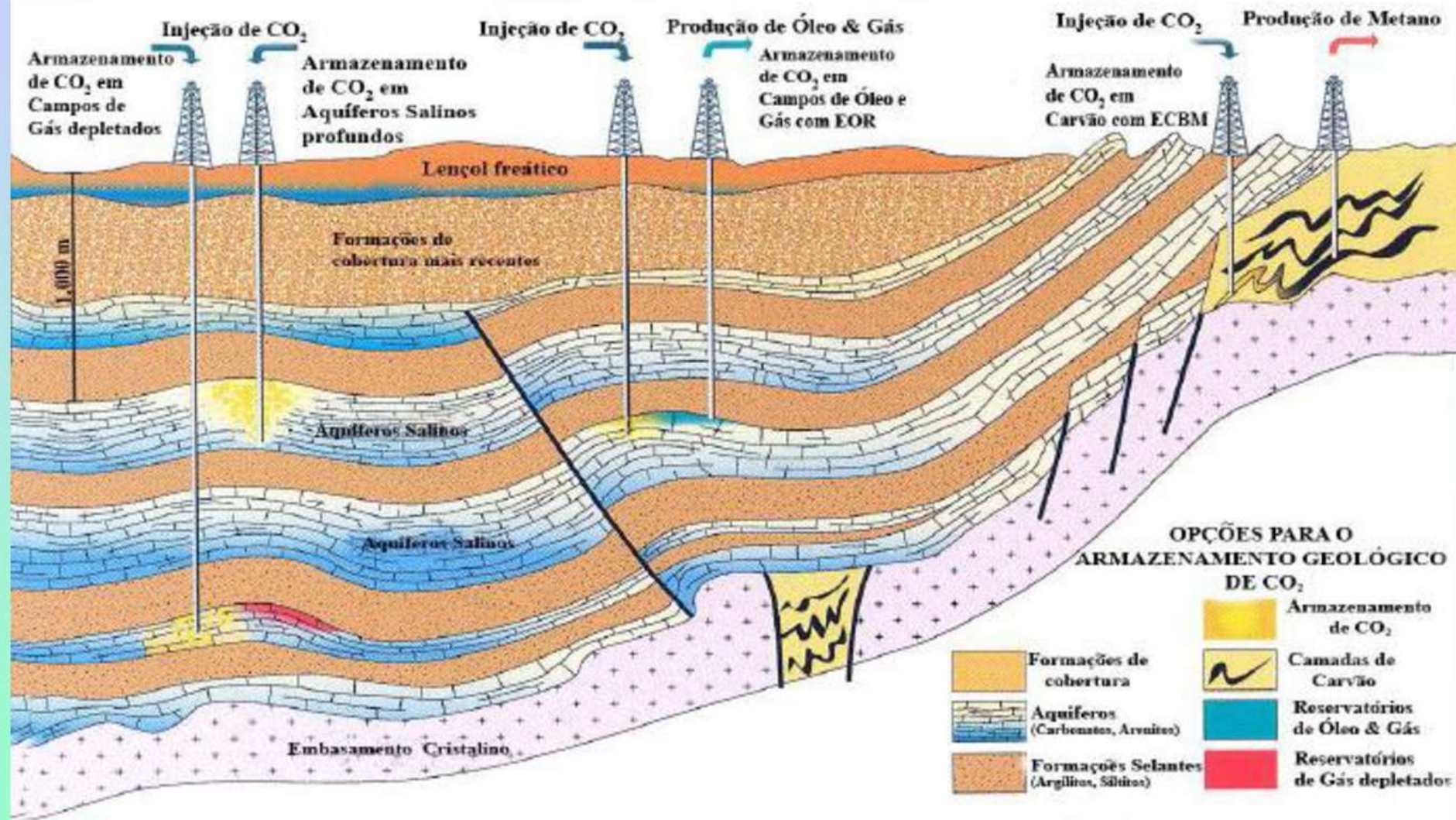
Para evitar que as emissões de CO₂ no país aumentem com a exploração do pré-sal, é necessário recorrer às tecnologias de CCS – Carbon Capture and Storage.

Relatório do governo da Noruega (2009), um dos primeiros países a investir no desenvolvimento destas tecnologias, estima que o custo da captura e do armazenamento de gás carbônico pode representar um acréscimo de 20% a 30% no custo da exploração do petróleo.

Tecnologias em CCGS

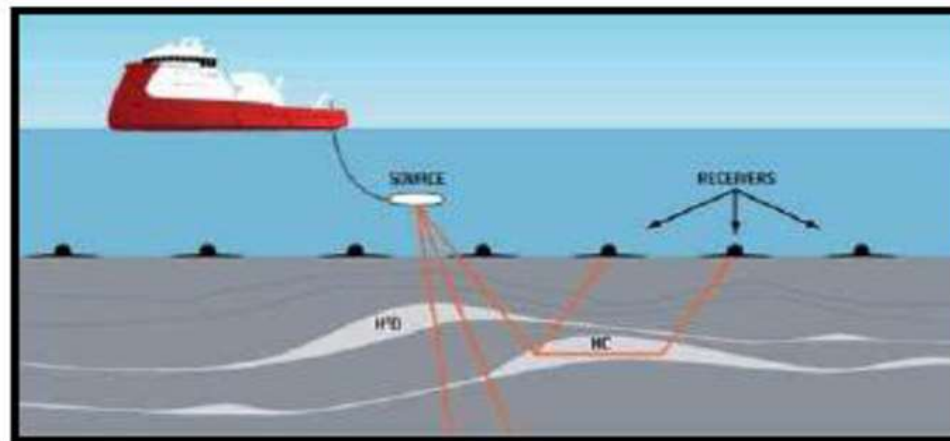


Alternativas para armazenamento geológico de CO₂



Fonte: BRGM – Annual Report (2004)

- O CO₂ armazenado, precisa ser **verificado e monitorado**
- As técnicas sísmicas e não sísmicas disponíveis precisam ser **validadas** para as condições do Pré-Sal ou necessitam de **avanços tecnológicos**.



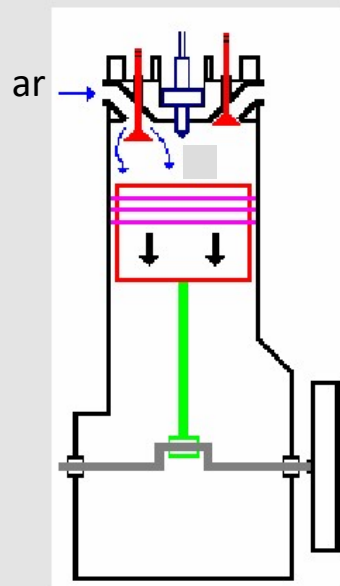
Nota: Estima-se em cerca de US\$ 63 o custo da captura e armazenamento por tonelada de gás carbônico, da separação do CO₂ ao monitoramento posterior do lugar onde o gás será armazenado, para evitar vazamentos.

Motores de combustão interna: aspectos técnicos

- Motores Diesel**

- Motores Ciclo Otto (gasolina/etanol/GNV)**

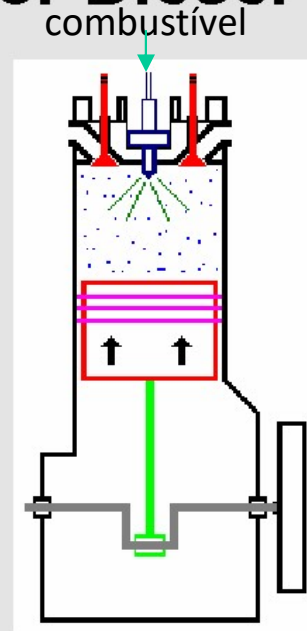
Motor Diesel - funcionamento



1- Admissão:

Válvula de admissão aberta.
Válvula de escape fechada.

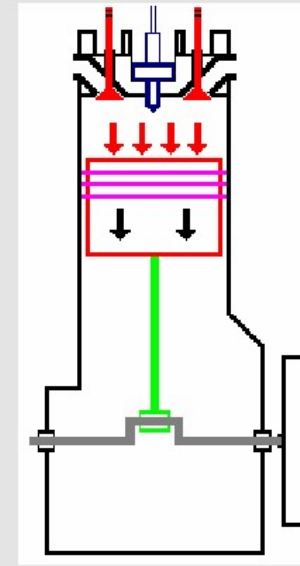
O pistão se desloca do PMS ao PMI admitindo para dentro do cilindro apenas ar



2 - Compressão:

Válvula de admissão fechada.
Válvula de escape fechada.

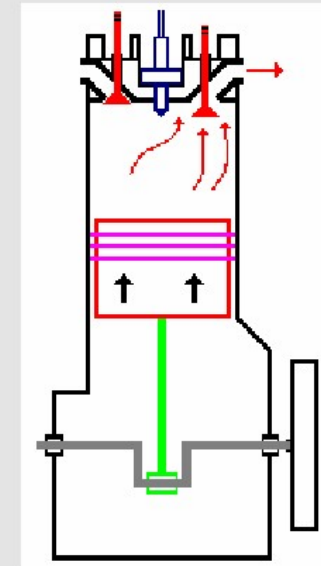
O pistão se desloca do PMI ao PMS, comprimindo o ar. Antes do pistão atingir o PMS, ocorre a injeção do combustível, que se mistura com o ar, que está aquecido devido à compressão, dando origem à combustão



3 - Expansão:

Válvula de admissão fechada.
Válvula de escape fechada.

A combustão provoca a expansão dos gases que empurram o pistão, fazendo-o se deslocar do PMS ao PMI.

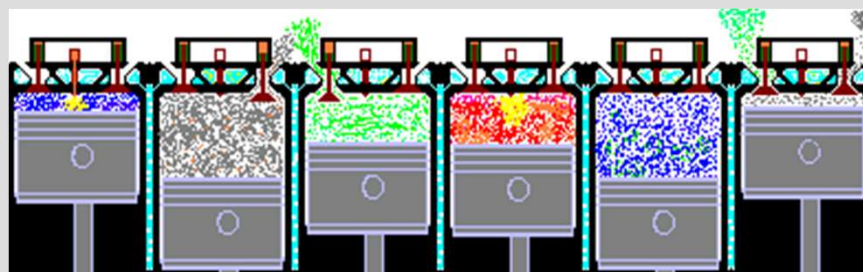


4 - Escape:

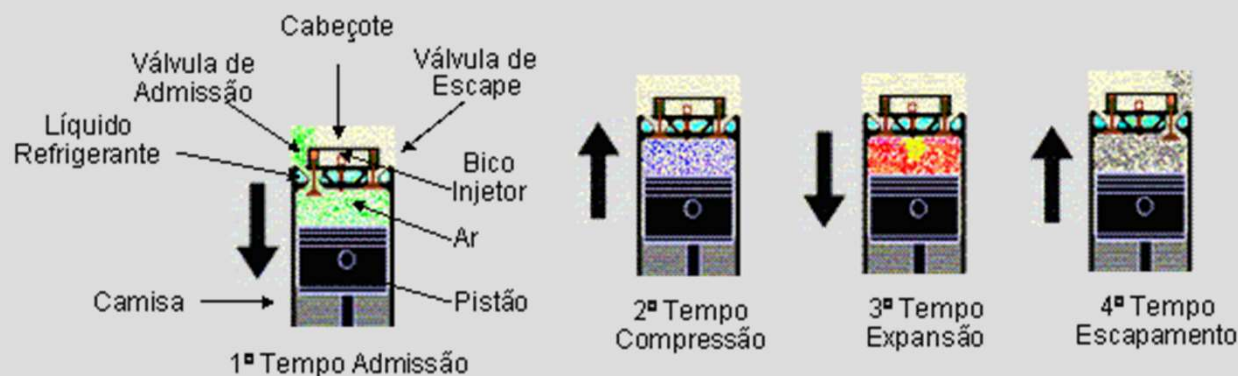
Válvula de admissão fechada.
Válvula de escape aberta.

O pistão se desloca do PMI ao PMS, empurrando para fora os gases queimados.

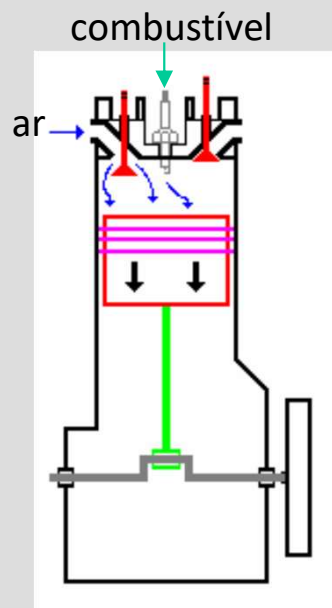
Nota: **PMS - Ponto morto superior** - É o ponto de máximo afastamento da cabeça do pistão em relação à árvore de manivelas
PMI - Ponto morto inferior - É o ponto de mínimo afastamento da cabeça do pistão em relação à árvore de manivelas



A figura representa um motor Diesel de 4 tempos, 6 cilindros em linha e ordem de ignição 1 - 5 - 3 - 6 - 2 - 4. Pode-se observar a seqüência dos tempos pelas cores: **Verde = Admissão**; **Azul = Compressão**; **Vermelho = Combustão** (tempo motor) e **Preto = Escapamento**. Também pode ser vista a seqüência de abertura e fechamento das válvulas de admissão e escape.



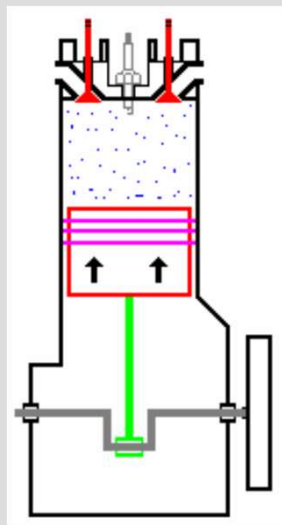
Motor Ciclo Otto (gasolina/etanol/GNV)



1- Admissão:

Válvula de admissão aberta.
Válvula de escape fechada.

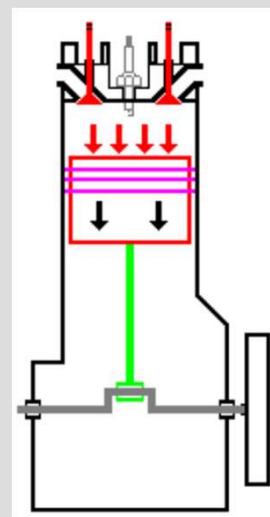
O pistão se desloca do PMS ao PMI admitindo para dentro do cilindro a mistura



2 - Compressão:

Válvula de admissão fechada.
Válvula de escape fechada.

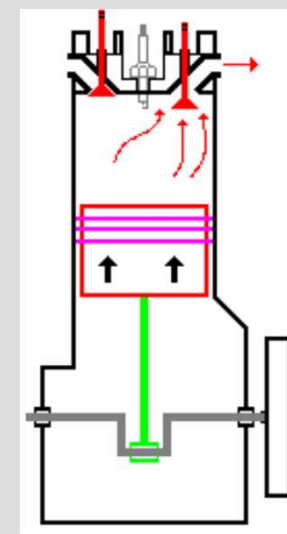
O pistão se desloca do PMI ao PMS, comprimindo a mistura. Antes do pistão atingir o PMS, ocorre a faísca,



3 - Expansão:

Válvula de admissão fechada.
Válvula de escape fechada.

A combustão provoca a expansão dos gases que empurram o pistão, fazendo-o se deslocar do PMS ao



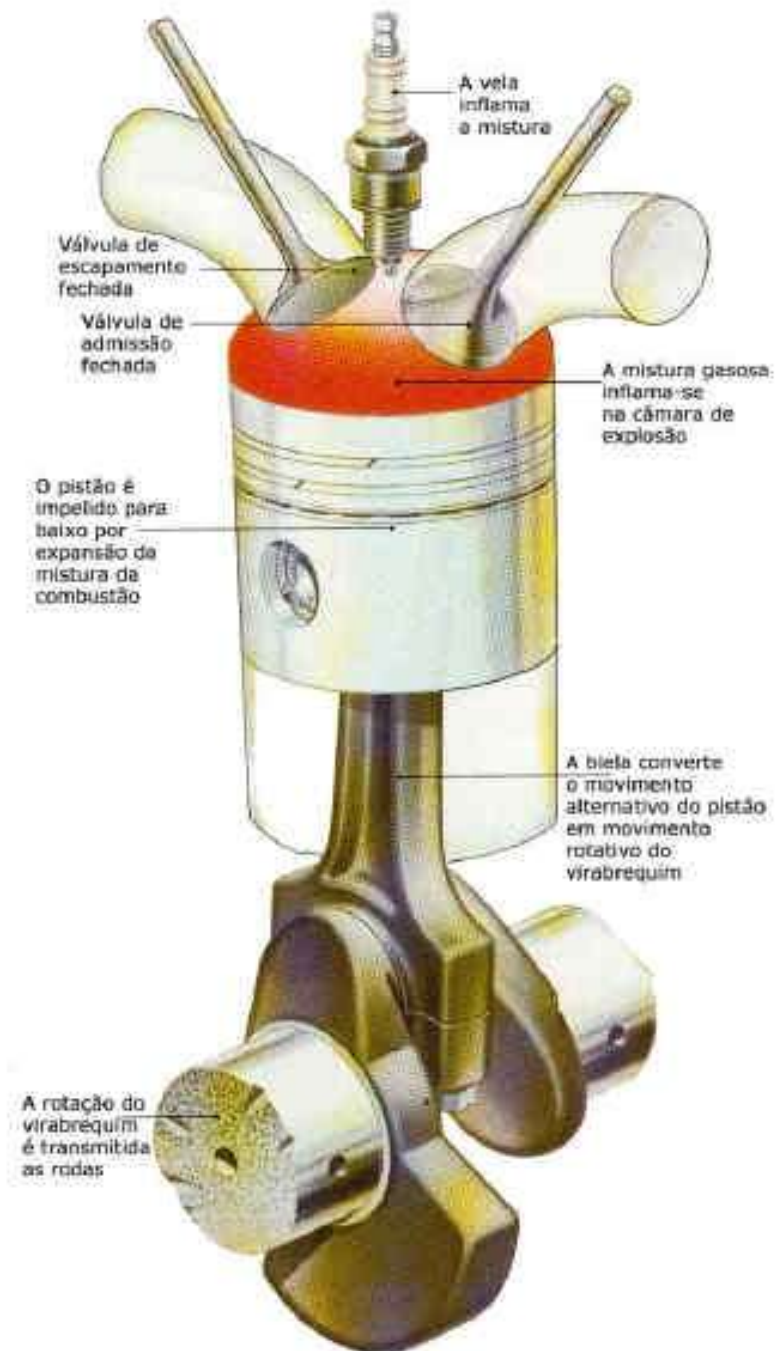
4 - Escapamento:

Válvula de admissão fechada.
Válvula de escape aberta.

O pistão se desloca do PMI ao PMS, empurrando para fora os gases queimados.

Nota: **PMS - Ponto morto superior** - É o ponto de máximo afastamento da cabeça do pistão em relação à árvore de manivelas
PMI - Ponto morto inferior - É o ponto de mínimo afastamento da cabeça do pistão em relação à árvore de manivelas

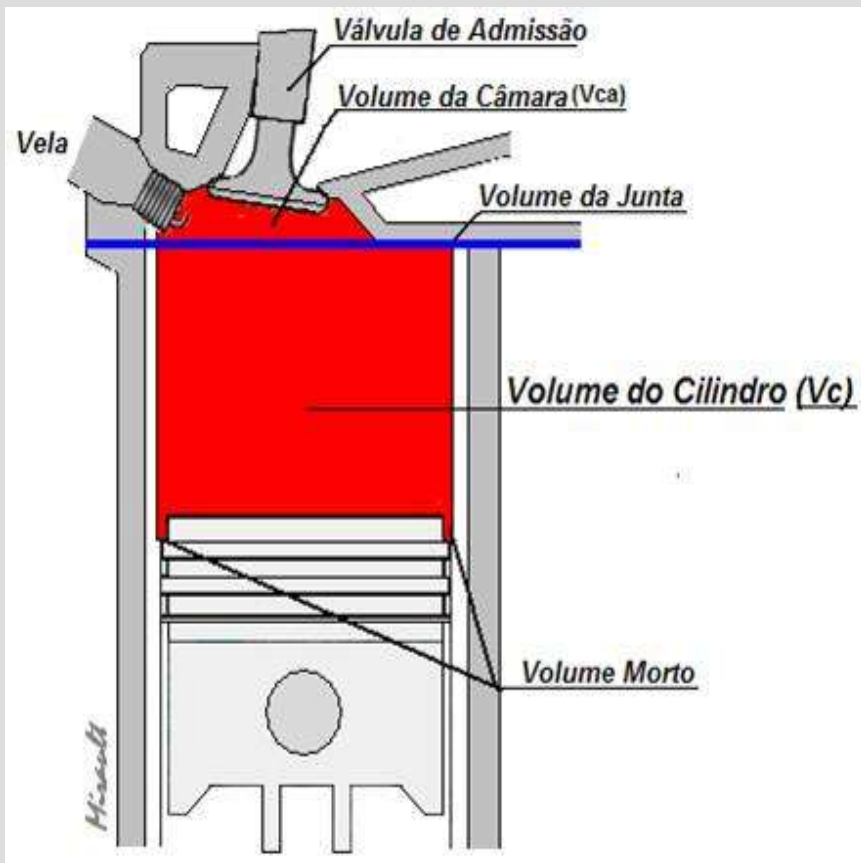
COMO SE PRODUZ A FORÇA MOTRIZ DO MOTOR



Principais diferenças entre os Motores:

	Diesel	Otto
Admissão	Ar	Combustível/Ar
Ignição	espontânea	faísca das velas

Taxa de compressão dos combustíveis:



A taxa de compressão (TC) é o volume do cilindro (V_c) mais o volume da câmara de combustão (V_{ca}), dividido pelo volume da câmara de combustão.

$$TC = \frac{V_c + V_{ca}}{V_{ca}}$$

TC para cada combustível:

Diesel: 15:1 a 25:1

Gasolina: 9:1

Etanol: 12:1

GNV: 14:1 a 16:1

CARVÃO MINERAL

Carvão mineral - tipologia

Tipo de Carvão	Poder Calorífico (Kcal/kg)
Antracito	7.800 – 9.100
Betuminoso (hulha)	6.400 – 7.800
Sub-betuminoso	4.650 – 6.400
Lignito	3.650 – 4.650
Turfa	4.000 – 4.500 (base seca)

Fonte: LAPEDES, W. Encyclopedia of Energy. McGraw Hill, 1975.

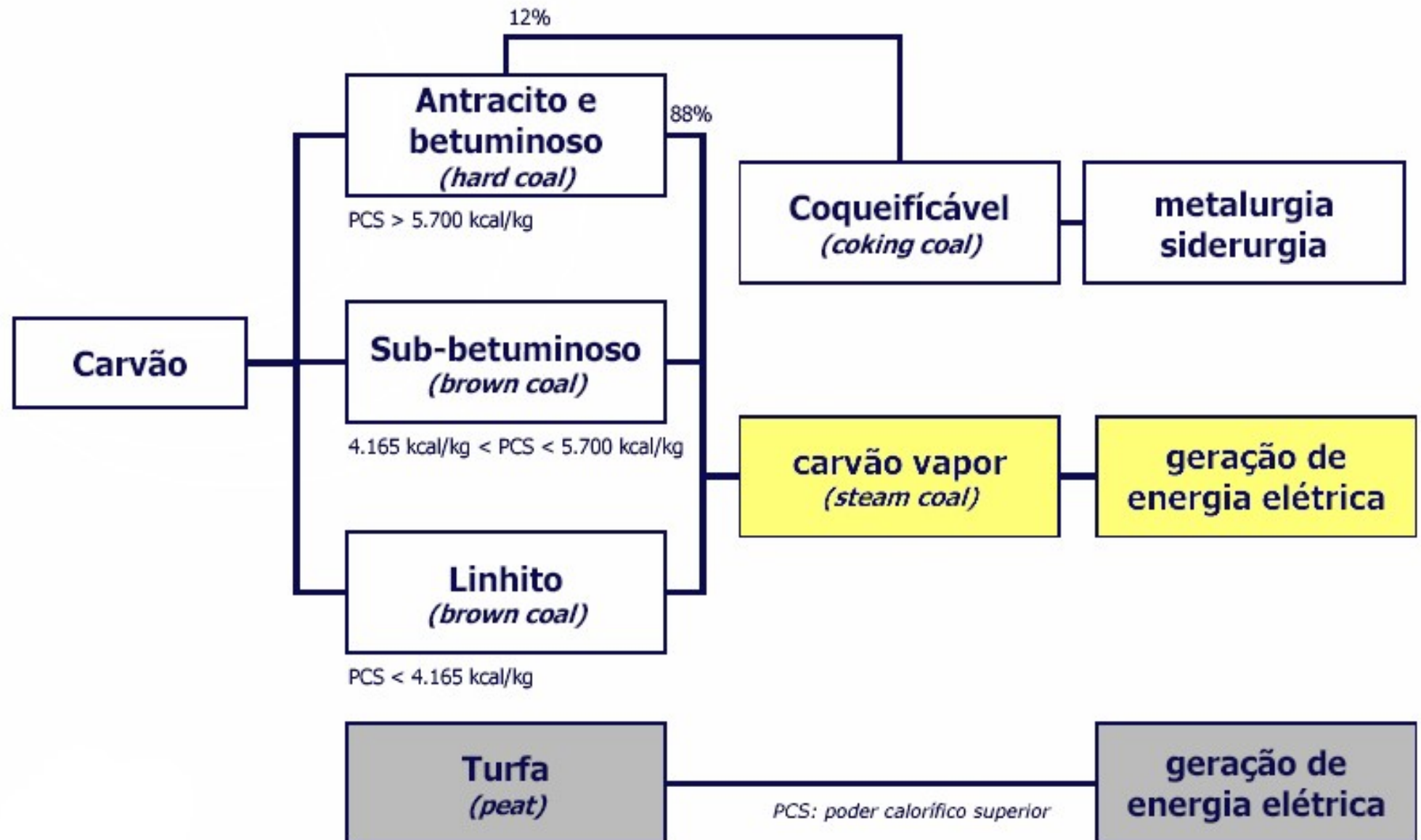
Carvão mineral - tipologia

Tipo de Carvão	C (%)	Umidade (%)	Cz* (%)	Material Volátil (%)
Antracito	81,8	4,4	9,0	4,8
Betuminoso	63,6	3,1	9,9	23,4
Sub-betuminoso	40,3	22,2	4,3	32,2
Lignito	30,2	36,8	5,2	27,8

* Cinzas: é a denominação genérica dada à matéria não-orgânica (mineral) presente no carvão. Esta fração raramente é inferior a 4%, podendo atingir 30% em carvões de baixa qualidade. Em geral, ela é da ordem de 10%.

Fonte: LAPEDES, W. Encyclopedia of Energy. McGraw Hill, 1975.

Tipos e usos do carvão



Carvão mineral – análise comparativa EUA / Brasil

Origem	PCS (Kcal/kg)	C (%)	S (%)	N (%)	Cz (%)
PR	4.200	53,2	4,4	0,4	42
SC	4.500	57,2	1,5	1,3	40
RS	3.200	42,7	3,1	1,2	53
KY (EUA)	4.300	62,8	0,6	1,6	35
IL (EUA)	3.530	58,5	2,5	1,0	38

Fonte: WEC-World Energy Council, 2001
CIENTEC, 1998

	Austrália	África do Sul	Colômbia	EUA (Ohio)
Poder Calorífico (kcal/kg)	5.370	6.760	7.000-8.000	6.378-7.728
Umidade (%)	6,9	4,3	2,0-7,0	nd
Voláteis (%)	24,8	35,3	34,0-39,0	38,1
Carbono (%)	44,3	50,3	nd	64,2-77,4
Cinzas (%)	24,0	10,1	1,0 - 6,0	7,5-19,8
Enxofre (%)	0,35	0,70	0,35 - 1,0	1,0-2,5

	PCS Kcal/kg	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Paraná	4.850	30	44	7,0
Sta. Catarina	2.750	21-26	58-62	4,3-4,7
Candiota	3.200	23	52	1,6
Outros RS	3.000-4.500	23-30	40-55	0,5-2,5

PCS: poder calorífico superior

Fonte: WCI - World Coal Institute
CPRM

Exploração do Carvão Mineral

- Céu aberto



Extração de carvão
Local: Mina Candonga
Fonte: Gomes, 2002.



Mineração de carvão a céu aberto.
Local: Mina do Recreio, Butiá - Leão, RS.
Fonte: Gomes, 2002.

Exploração do Carvão Mineral

- Escavação subterrânea



Plano inclinado em lavra subterrânea de carvão, observando-se, à esquerda, a correia transportadora e, acima, os dutos de drenagem e ventilação. À direita, o sistema de extração de vagonetas.

Local: Mina Santa Augusta, SC. Fonte: Gomes, 2002.



Pilha de rejeitos piritosos na região de Crisciúma (SC)

Fonte: SEVÁ Fo., A.O.-Relatório de Pesquisa, 1992-2004, FEM/UNICAMP.



Mina de carvão abandonada-
Criciúma/SC



Depósitos de Rejeitos com Formação de Lagoas
Poluídas, nas Proximidades do Município de
Criciúma, Santa Catarina. Ao Fundo, Destaque
de Comunidade Próxima à Área.

Centrais Termelétricas

O funcionamento das termelétricas se dá pela conversão de energia térmica em mecânica, e desta em energia elétrica.

Dois tipos de combustão utilizados: o de **combustão externa**, (Ex.: termelétricas a vapor), e o de **combustão interna**, (Ex.: turbinas a gás, e máquinas térmicas a pistão como motores a diesel).

Os combustíveis mais utilizados nas centrais a vapor são: óleo combustível, carvão, biomassa e derivados pesados de petróleo.

Termelétrica - Classificação

➤ **Centrais a combustão** – termelétricas (convencionais)

□ Combustão interna - o combustível não entra em contato com o fluido de trabalho.

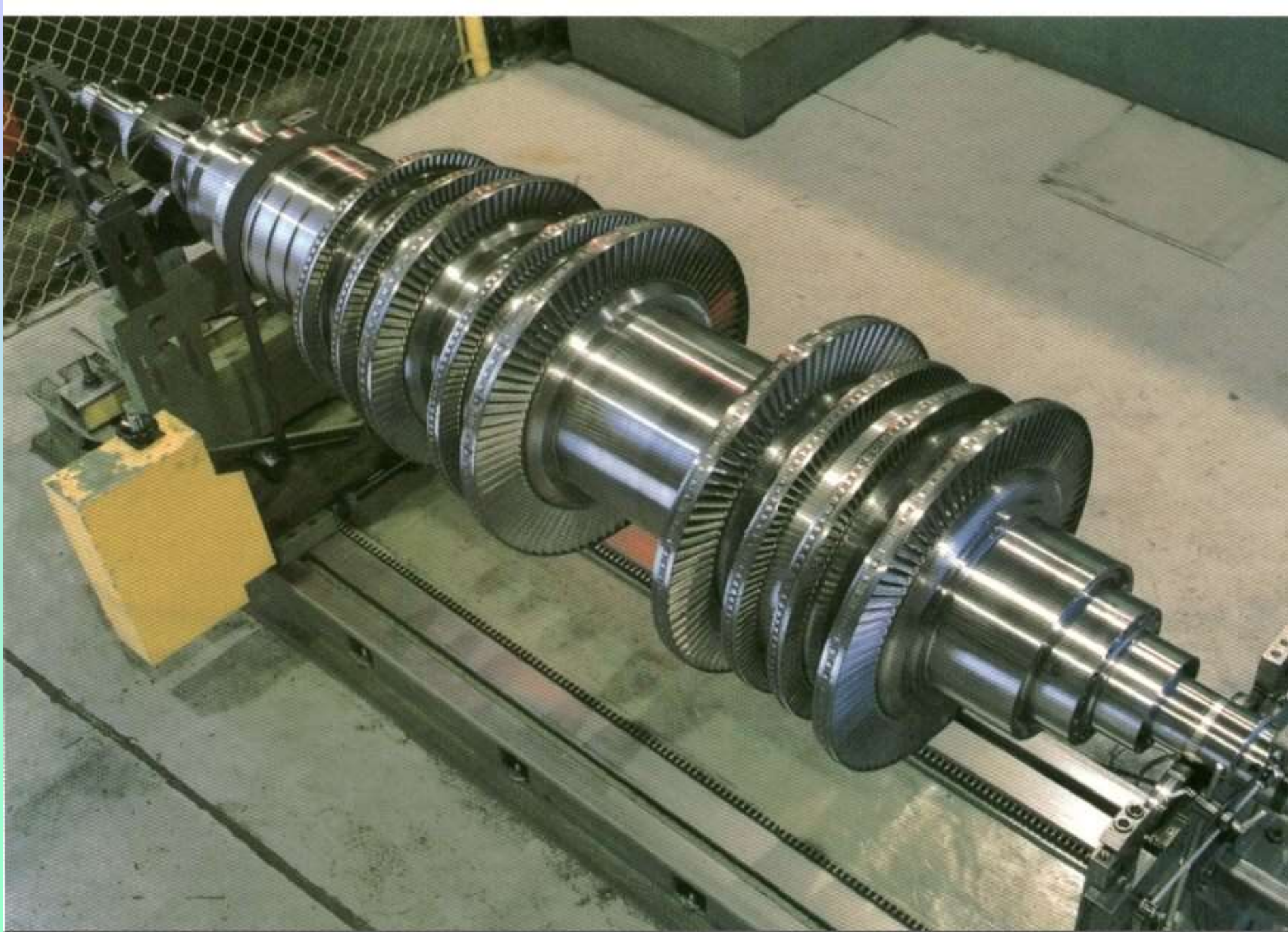
O combustível aquece o fluido de trabalho (água) em uma caldeira até gerar vapor que, ao se expandir em uma turbina, produz trabalho mecânico.

◆ Combustão externa - a combustão se efetua sobre uma mistura de ar e combustível

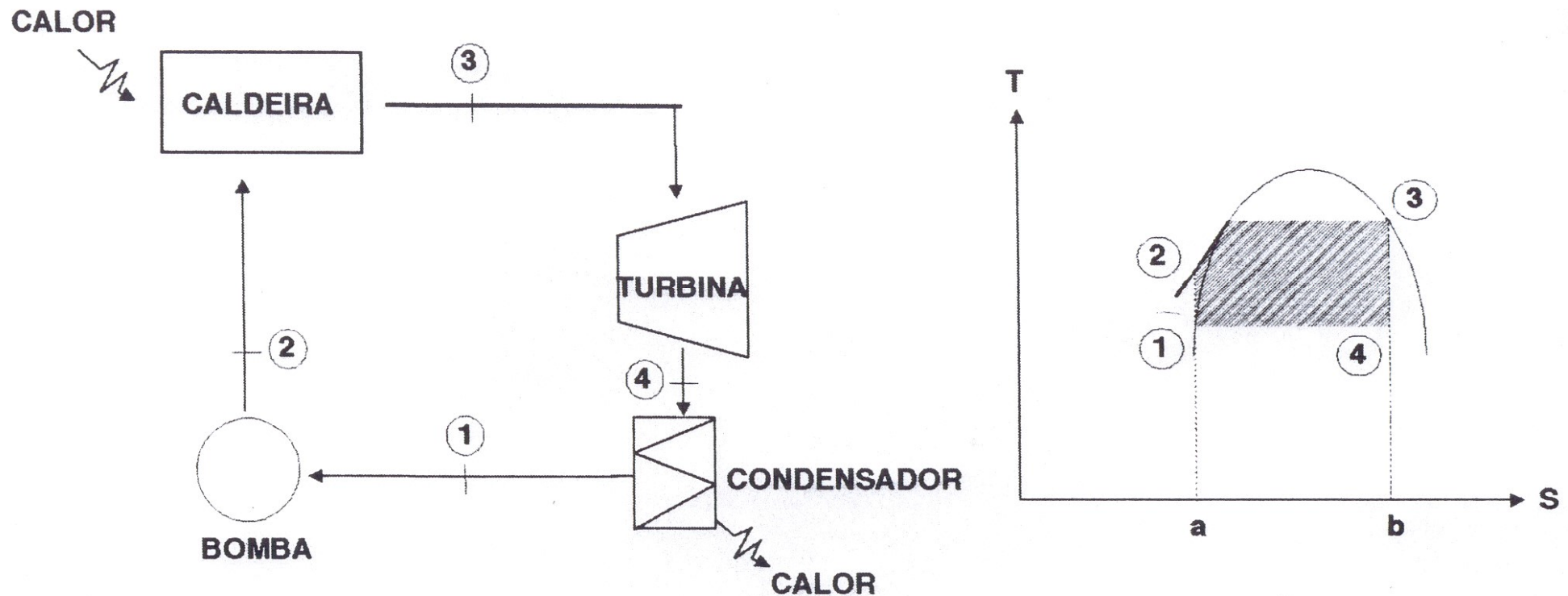
➤ **Centrais nucleares**

Turbinas a Vapor

Turbinas a Vapor



Ciclo Rankine



Transformações:

1 - 2: bombeamento adiabático ($dQ=0$)

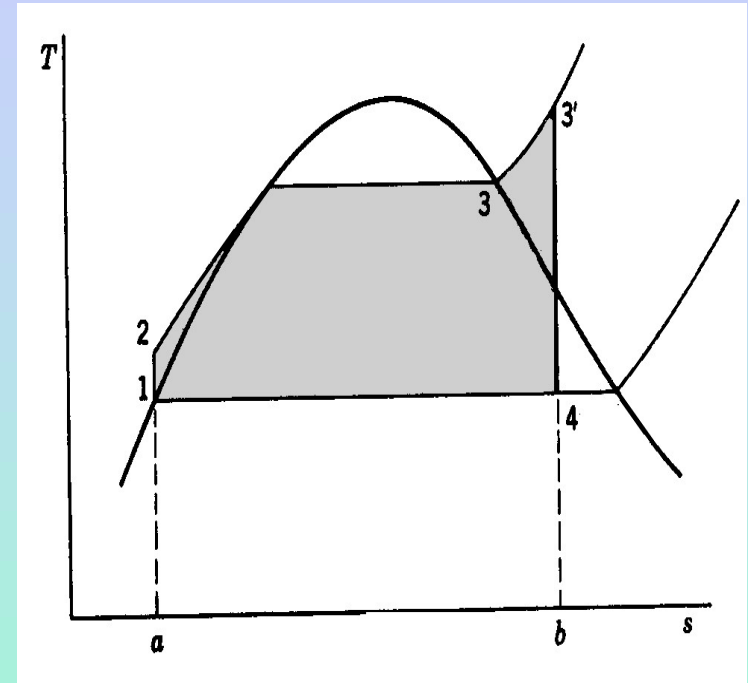
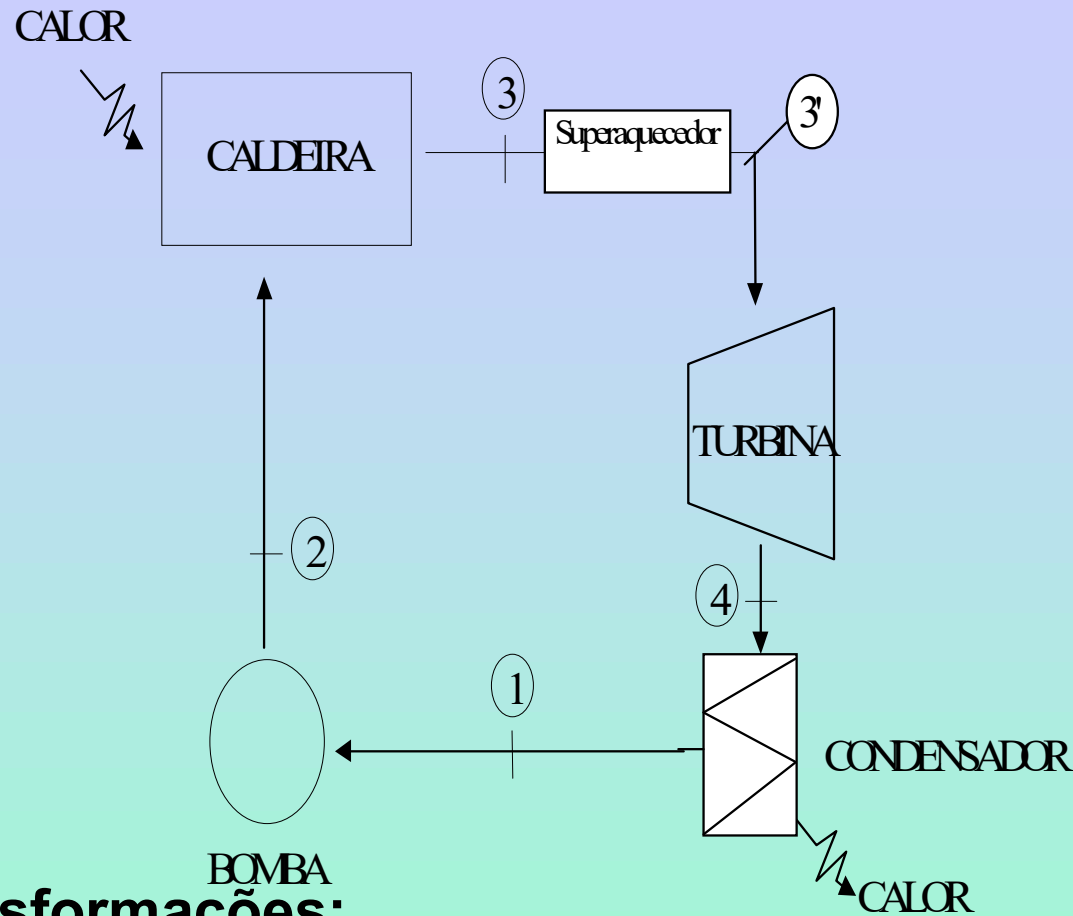
2 - 3: troca de calor a pressão constante na caldeira

3 - 4: expansão adiabática na turbina ($dQ=0$)

4 - 1: troca de calor a pressão constante no condensador

onde, processo de transformação adiabático: não ocorrem trocas térmicas com o exterior ⁹¹

Ciclo Rankine



Transformações:

- 1 - 2: corresponde ao bombeamento do líquido (consumo de energia pelo ciclo)
- 2 - 3: corresponde ao fornecimento de calor ao vapor na caldeira e no superaquecedor, calor advindo da queima de combustível externo
- 3 - 4: corresponde ao fornecimento de energia para a turbina que irá transformá-la em energia mecânica, acionando o gerador para produzir energia elétrica
- 4 - 1: corresponde à retirada de calor (resfriamento) – vapor p/ líquido

Ciclo Rankine

$$P_u = \eta \cdot m \cdot (h_3 - h_4)$$

onde:

P_u = potência útil

η = rendimento da turbina a vapor

m = massa do fluido (vapor), sujeita à transform. térmica, por unidade de tempo (kg/s)

h_3, h_4 = entalpias específicas (kJ/kg) do fluido na entrada e saída da máquina

$$h = \mu + \frac{p}{\rho}$$

sendo:

μ = medida da energia do fluido

p = pressão a que está submetido

ρ = sua densidade

A Potência elétrica pode ser calculada por:

$$P_e = \eta_T \cdot \eta_G \cdot P_u$$

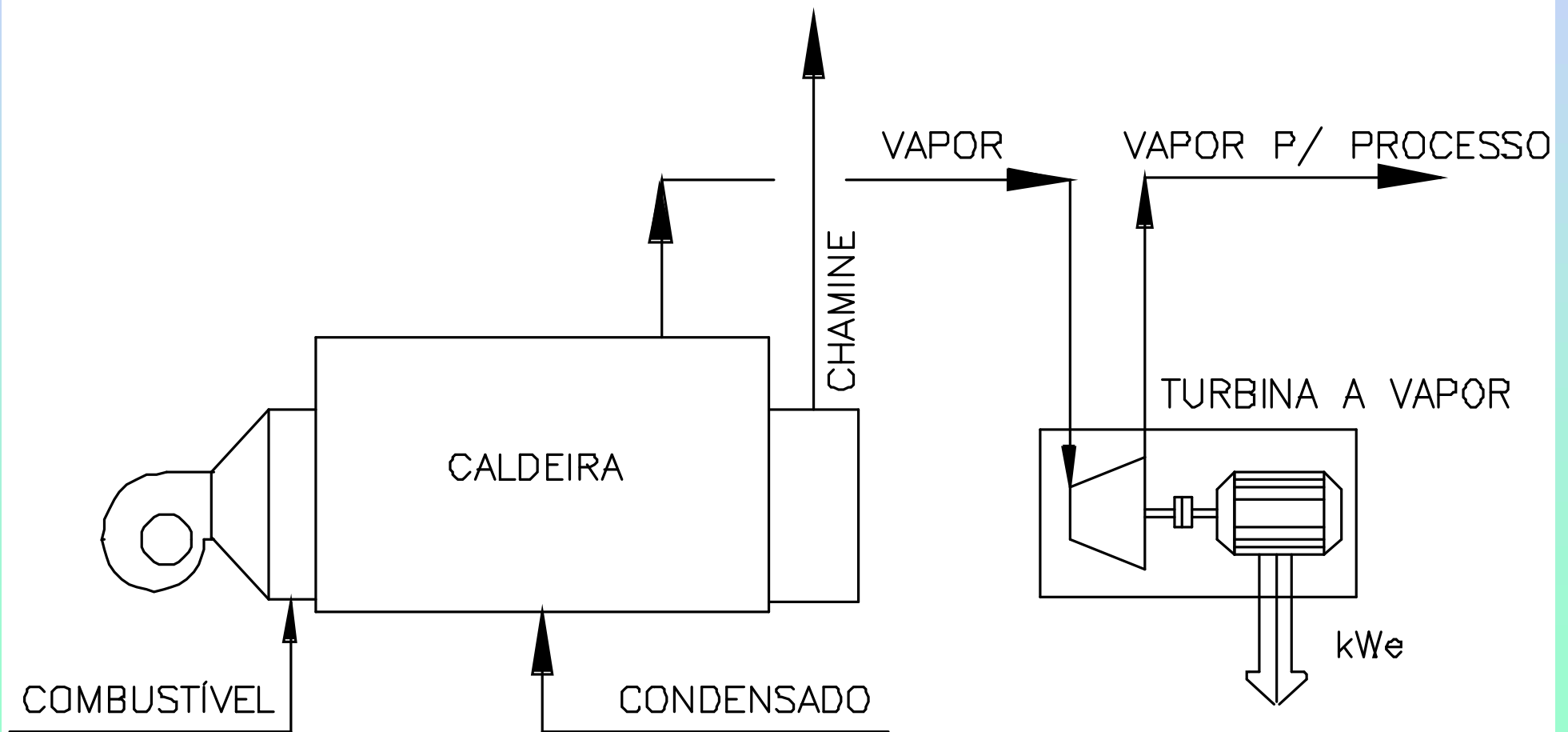
onde: η_T e η_G são os rendimentos da turbina e do gerador

A entalpia tem a mesma unidade de energia, isto é, joule (J) no Sistema Internacional. E a **entalpia específica** h (entalpia por unidade de massa, J/kg) é definida de forma similar, como as demais grandezas na forma específica.

Podemos interpretar o significado físico da entalpia como sendo o trabalho realizado para "criar espaço" para a massa gasosa ocupar o volume V sob pressão p . Ou seja, pode ser vista como a "energia total" da massa de gás no ambiente.

Isto significa que, num processo sob pressão constante, o calor trocado é igual à variação da entalpia.

Centrais a vapor

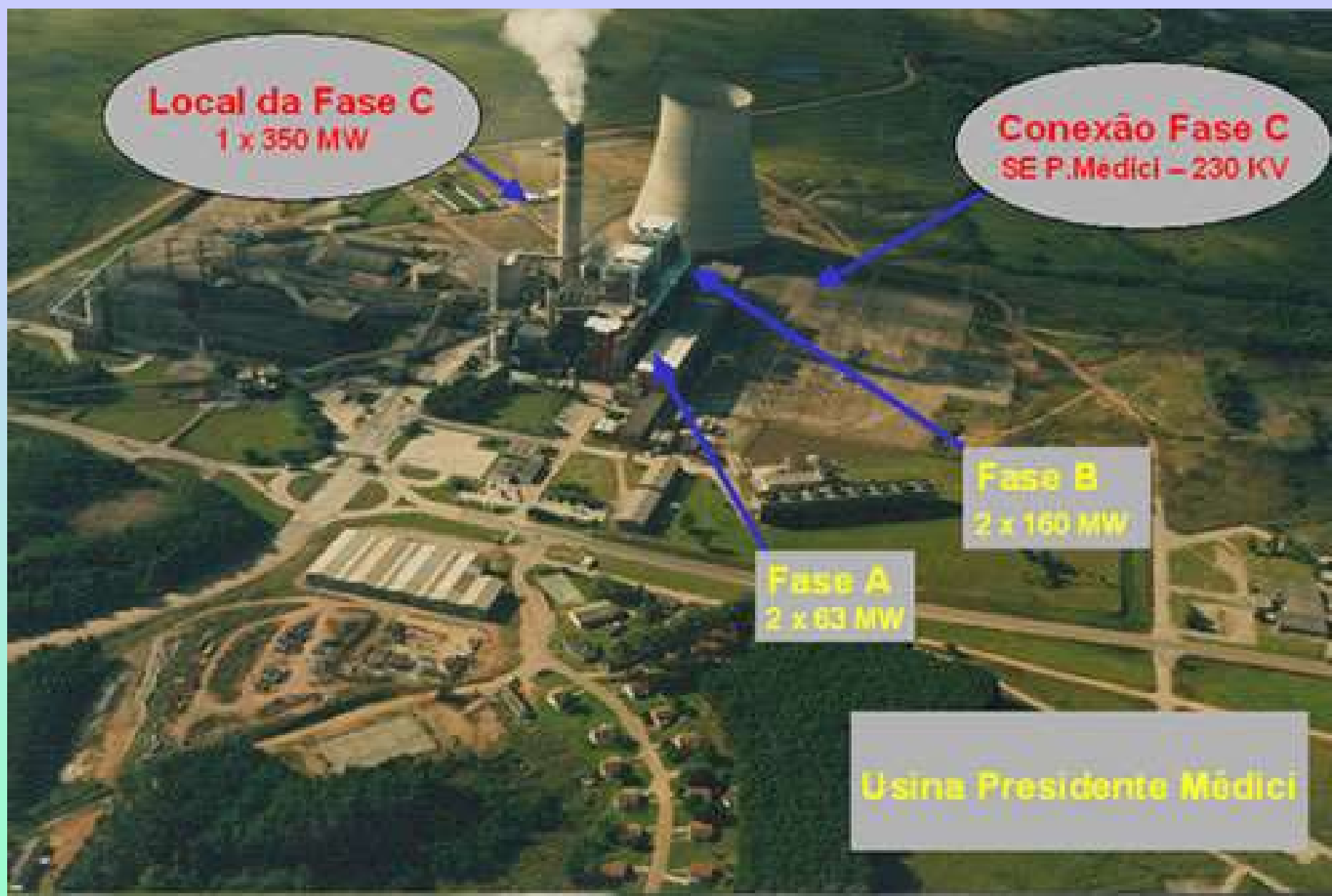


O Ciclo Rankine (ou Vapor)

- Mais tradicional
- Os 4 equipamentos principais: caldeira, turbina a vapor, condensador e gerador elétrico
- A eficiência térmica é da ordem de 38%
- O limite de t^o dos metais dos tubos da caldeira e a rejeição de calor na condensação são as restrições para o alcance de maiores eficiências.
- Admite qualquer combustível - fluido de trabalho (vapor) não participa da combustão



UTE CANDIOTA II (RS) – 446 MW



Ampliação da UTE Candiota II: + 350 MW



USINA TERMELÉTRICA DE SANTA CRUZ (RJ) – 775 MW (imagem de 1973)
Atualmente possui 2 turbinas à gás natural de 175 MW cada)

Centrais a Diesel

- Potências até 40 MW
- Sistemas isolados (Amazônia)
- vantagens:
 - rápida entrada em operação
 - fácil operação e manutenção
- problemas:
 - dificuldades nas peças de reposição
 - altos custos do combustível em locais distantes (CCC)

Alternativas de combustão do Carvão Mineral

> Coqueificação



O **carvão coque** é obtido a partir do carvão betuminoso (ou hulha), levado a fornos e submetido a altas temperaturas na ausência de oxigénio. O **carvão coque** é um material carbonáceo sólido, poroso, leve e de brilho metálico.

Principais etapas do processo de coqueificação:

- Libertação da humidade presente no carvão, que ocorre a temperaturas entre 100 °C e 120 °C.
- Libertação de hidrocarbonetos pesados e alcatrão, que é o primeiro estágio da coqueificação e ocorre a temperaturas entre 350 °C a 550 °C. Esta etapa é chamada de desvolatilização primária.
- Transformação e inchamento do material numa substância fluida e pastosa, que ocorre a temperaturas entre 450 °C e 600 °C.
- Resolidificação, que forma o semicoque e determina, em grande parte, a qualidade do carvão coque. Essa etapa ocorre em temperaturas próximas a 700 °C.
- Libertação de algumas substâncias, principalmente de hidrogénio. É a última etapa da coqueificação e recebe o nome de desvolatilização secundária. Ocorre a temperaturas entre os 850 °C e os 1.300 °C.

> Coqueificação

O maior consumidor de **carvão coque** é a indústria siderúrgica.

Nesta, o material é utilizado na redução do minério de ferro a ferro metálico. Ou seja, o coque é considerado um agente redutor. Isto porque, quando o **carvão coque** queima, o seu carbono capta o oxigénio da hematita, que é um minério de ferro constituído de óxido de ferro. Assim, o ferro fica livre para fundir e forma o ferro-gusa.

O equipamento onde o processo de redução do ferro ocorre é chamado de alto-forno, onde há a separação do ferro de seu minério. Esta separação se dá por meio da redução química que envolve a separação de um metal de seu óxido, através de um agente redutor. O agente redutor utilizado na siderurgia é o coque.

Alternativas de combustão do Carvão Mineral

> Gaseificação

A gaseificação do carvão mineral consiste na conversão termoquímica do carbono em syngas, através de reações sólido-gás e gás-gás, tendo como agentes gaseificantes vapor d'água e oxigênio subestequiométrico, isto é, quantidades de oxigênio inferiores à quantidade estequiométrica para a combustão completa.

A gaseificação expõe o carvão a temperaturas que normalmente provocariam a sua combustão mas regulando a quantidade de oxigênio fornecida e adicionando vapor de água, o carvão origina gás de síntese (syngas: Monóxido de Carbono, Hidrogênio, Dióxido de Carbono e Metano)

Desenvolvida originalmente nos Estados Unidos e na China, a tecnologia ainda enfrenta dificuldades econômicas e ambientais nestes países.

Na China, estudos acadêmicos e projetos-piloto apontaram elevadas emissões de CO₂, consumo intenso de energia e água, além de relatos de contaminação. Nos Estados Unidos, a primeira gaseificadora construída em escala comercial, em Dakota do Norte, acumulou sucessivos prejuízos em razão da concorrência com fontes mais baratas, como o gás de folhelho (shale gas).

No Brasil, estudos estão sendo desenvolvidos no RS e SC, para aplicação na geração de energia elétrica nas usinas termelétricas à carvão mineral.

> Combustão em leito fluidizado

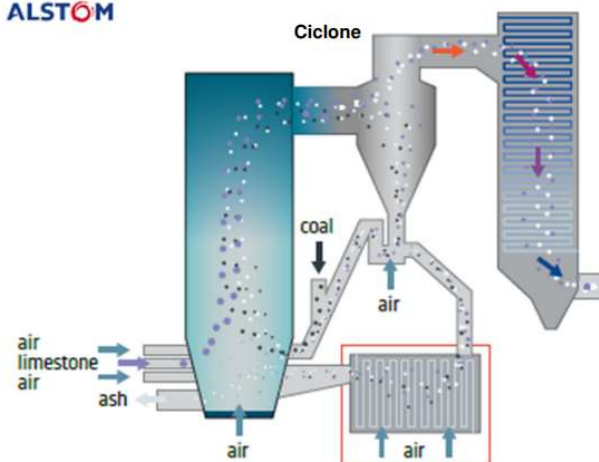
Os leitos fluidizados permitem que a queima do carvão seja feita a partir de temperaturas mais baixas do que no modelo por grelhas – cerca de 800 °C contra temperaturas acima de 1.000 °C. Isso é especialmente vantajoso para o Brasil porque o minério nacional tem um elevado teor de cinzas na sua composição, que varia de 40% a 60%. Na queima de carvão em temperaturas acima de 1.000 °C, existe a possibilidade de ocorrer o processo de sinterização das cinzas, com a consequente formação de aglomerados que prejudicam a operação.

Ainda, no leito fluidizado, a adição de calcário é realizada no próprio reator, de tal forma que os óxidos de enxofre gerados pela queima sejam absorvidos no local. Ao final desse processo, obtém-se o sulfato de cálcio (gesso), subproduto que pode ser aproveitado.

> Combustão em leito fluidizado

Caldeira de Leito Fluidizado

ALSTOM



Model of CFB boiler arrangement with external FBHE

As Caldeiras CFB (circulating fluidised bed), leito fluidizado circulante, apresentam menor temperatura de combustão, 900 oC. Vantagens:
Ocorre a Dessulfuração na Câmara Combustão pela injeção de Calcário
Menor emissões de Nox
Podem queimar carvão e biomassa
Aceitam mais de um tipo de carvão dentro de uma faixa de PCS.
O Carvão não é pulverizado é somente triturado

Caldeiras de 100 a 350 MW
Desenho mais usual



Reator de leito fluidizado circulante em escala piloto em funcionamento no Laboratório de Processos Térmicos e Engenharia Ambiental da FEM/UNICAMP

Um ciclone, instalado na saída da coluna principal do reator, coleta as partículas sólidas que atingem o topo da coluna, direcionando-as para a coluna de retorno, onde uma válvula de recirculação as conduz novamente à coluna principal, o que faz com que as partículas sólidas cumpram uma trajetória em forma de looping. Com isso, é possível reter as partículas de carvão por mais tempo no reator, além de assegurar uniformidade de temperatura na coluna principal do reator, em função do elevado arraste de partículas pelo gás, fazendo com que a queima seja mais eficiente.