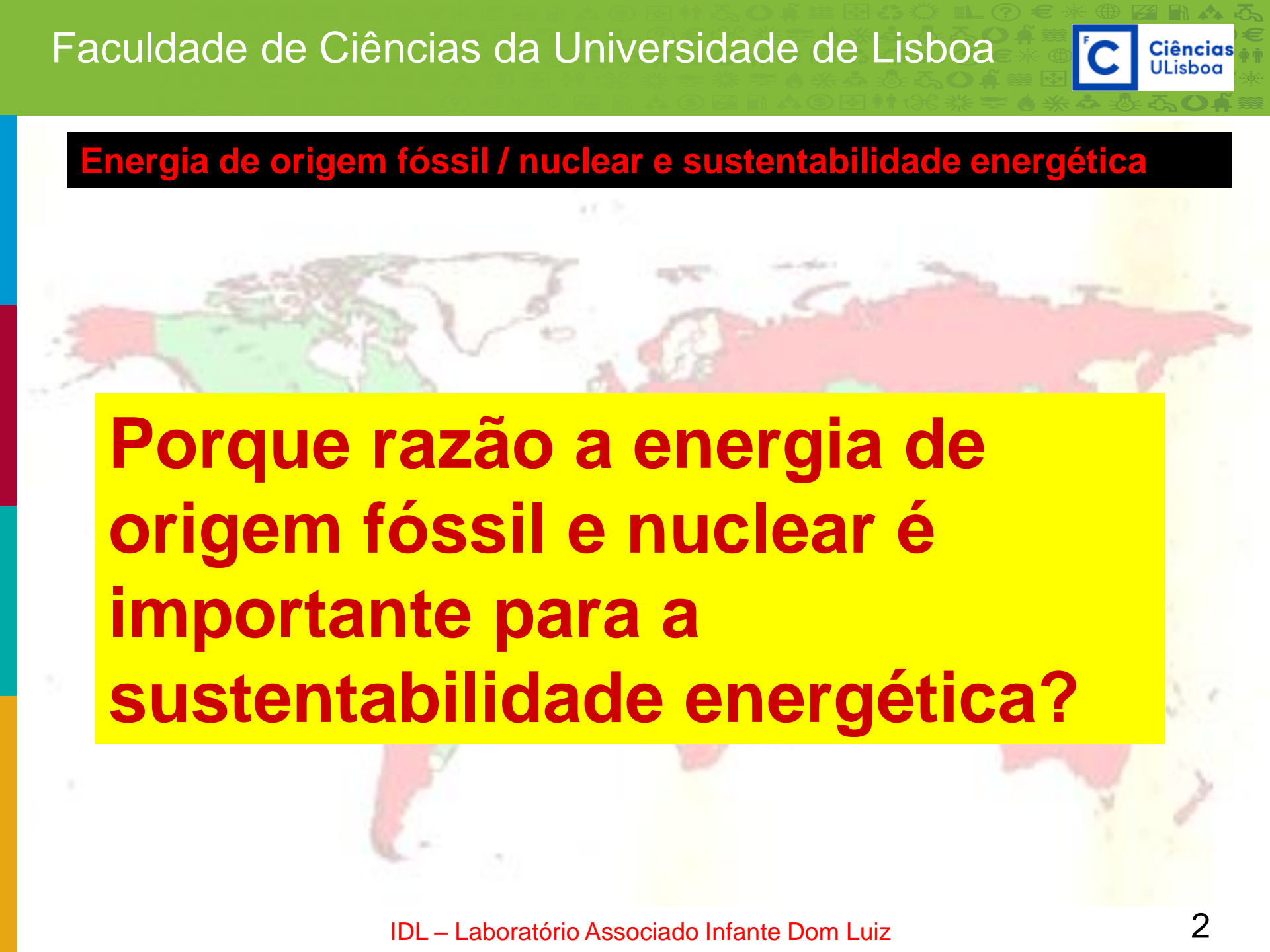


Sustentabilidade Energética

(Ano lectivo 2017/18 – Energia de origem fóssil / nuclear)

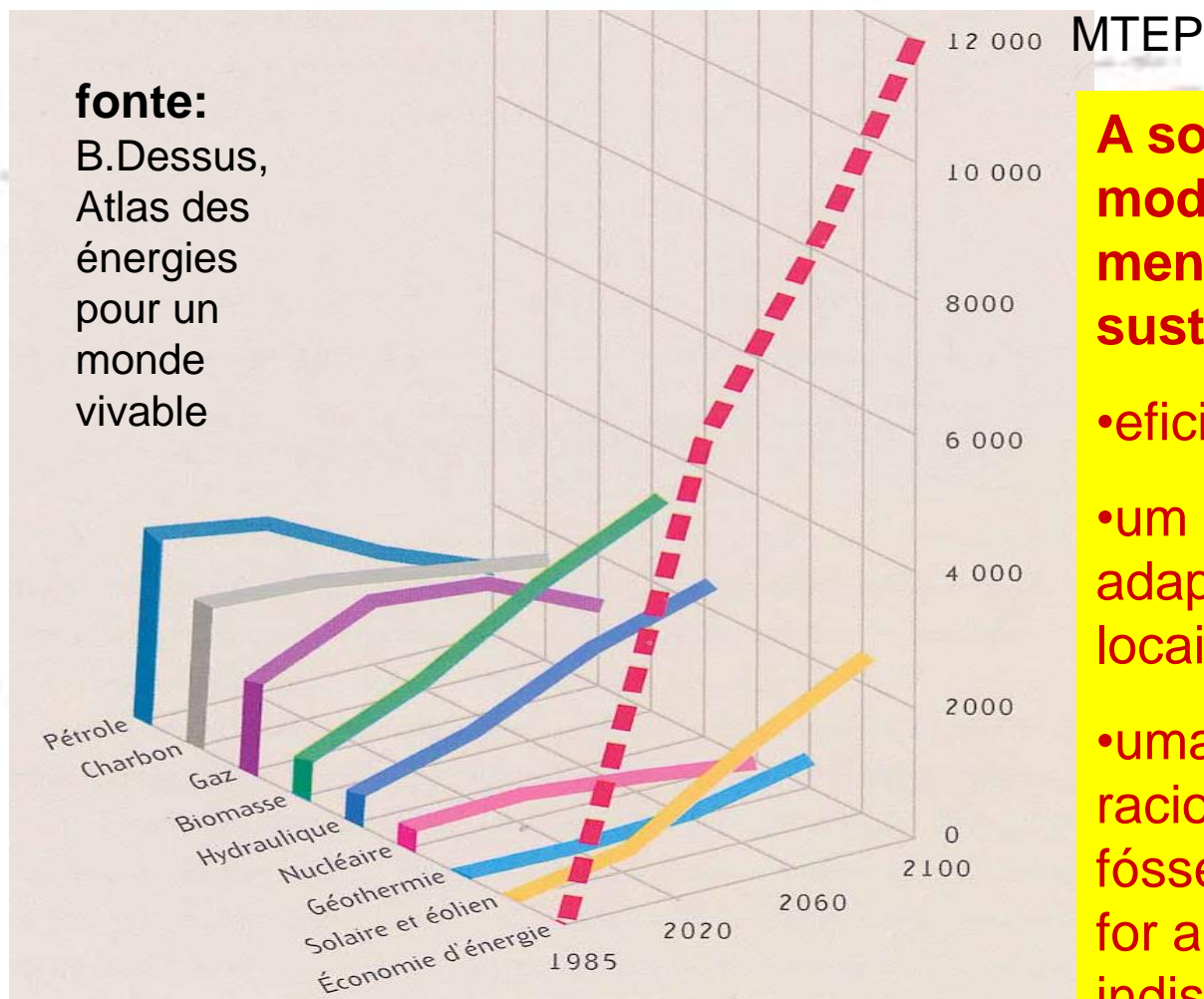
Jorge Maia Alves

Energia de origem fóssil / nuclear e sustentabilidade energética



Porque razão a energia de origem fóssil e nuclear é importante para a sustentabilidade energética?

Energia de origem fóssil / nuclear e sustentabilidade energética



A solução proposta pelos modelos de desenvolvimento energeticamente sustentáveis:

- eficiência energética;
- um mix de renováveis bem adaptado aos recursos locais;
- uma utilização mais racional de combustíveis fósseis e nuclear, enquanto for absolutamente indispensável

Energia de origem fóssil / nuclear e sustentabilidade energética

O que estes cenários nos mostram, portanto, é que não é possível nesta fase de transição dispensar o recurso a estas fontes de energia, se quisermos promover um desenvolvimento económico racional para o planeta.

Fontes fósseis de energia

Falemos então um pouco destas fontes fósseis de energia...

- **como se formam;**
- **o que são;**
- **como se extraem / processam;**
- **quais são as reservas existentes;**
- **quais são os principais problemas ambientais ligados à sua utilização**

Fontes fósseis de energia: o que são?

O carvão e os hidrocarbonetos (petróleo e gás natural) tiveram a sua origem geológica há cerca de 300 milhões de anos: são o resultado de uma lenta sedimentação de restos de organismos vivos.

É por esse motivo que se denominam combustíveis fósseis.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formou o carvão?

Resíduos orgânicos de origem vegetal – folhas, raízes, troncos ou mesmo árvores inteiras – foram-se acumulando no fundo dos pântanos, onde a água (ácida) os protegia, impedindo que fossem decompostos sob acção do oxigénio. Esta matéria foi-se transformando em **turfa**, ao longo de milhares de anos.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formou o carvão?

A turfa (carvão mineral inacabado), demora aproximadamente 20 000 anos a formar-se e é constituída por menos de 35% de carbono.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formou o carvão?

Posteriormente, ao longo de milhões de anos, a turfa foi sendo sujeita à acção de uma temperatura e pressão crescentes, à medida que foram sendo “soterradas” por camadas cada vez mais espessas de materiais sedimentares.

Fontes fósseis de energia: o que são?




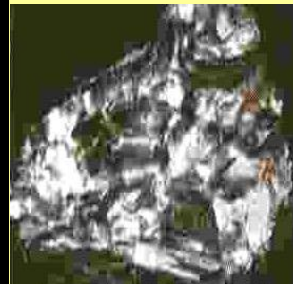
Como se formou o carvão?

Este processo transformou gradualmente a turfa em carvões com teor crescente de carbono...

...e deu origem às actuais **jazidas carboníferas** distribuídas um pouco por todo o planeta, a profundidades relativamente pequenas.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formou o carvão?

| | | | | |
|----------------------------|---|--|---|---|
| |  |  |  |  |
| | Turfa | Lenhite | Ulha | Antracite |
| Teor em Carbono (%) | <35 | 35 - 45 | 45 - 86 | 86 - 98 |
| GHV – kWh kg ⁻¹ | <3.9 | 4.1 – 5.7 | 6.7 – 7.8 | até 8.9 |

Quanto maior o teor em carbono, maior o poder energético dos diferentes estádios do carvão.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formou o carvão?

A composição química do carvão é bastante variável, e contém diversas impurezas não orgânicas, dependendo da sua origem.

Entre estas, são especialmente relevantes o enxofre e o azoto pelo efeito que têm sobre as emissões associadas à queima.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?

Resíduos orgânicos (pedaços de plantas ou de animais marinhos) são incorporados em maior ou menor percentagem em sedimentos nas bacias sedimentares marinhas, formando assim a **rocha-mãe**.

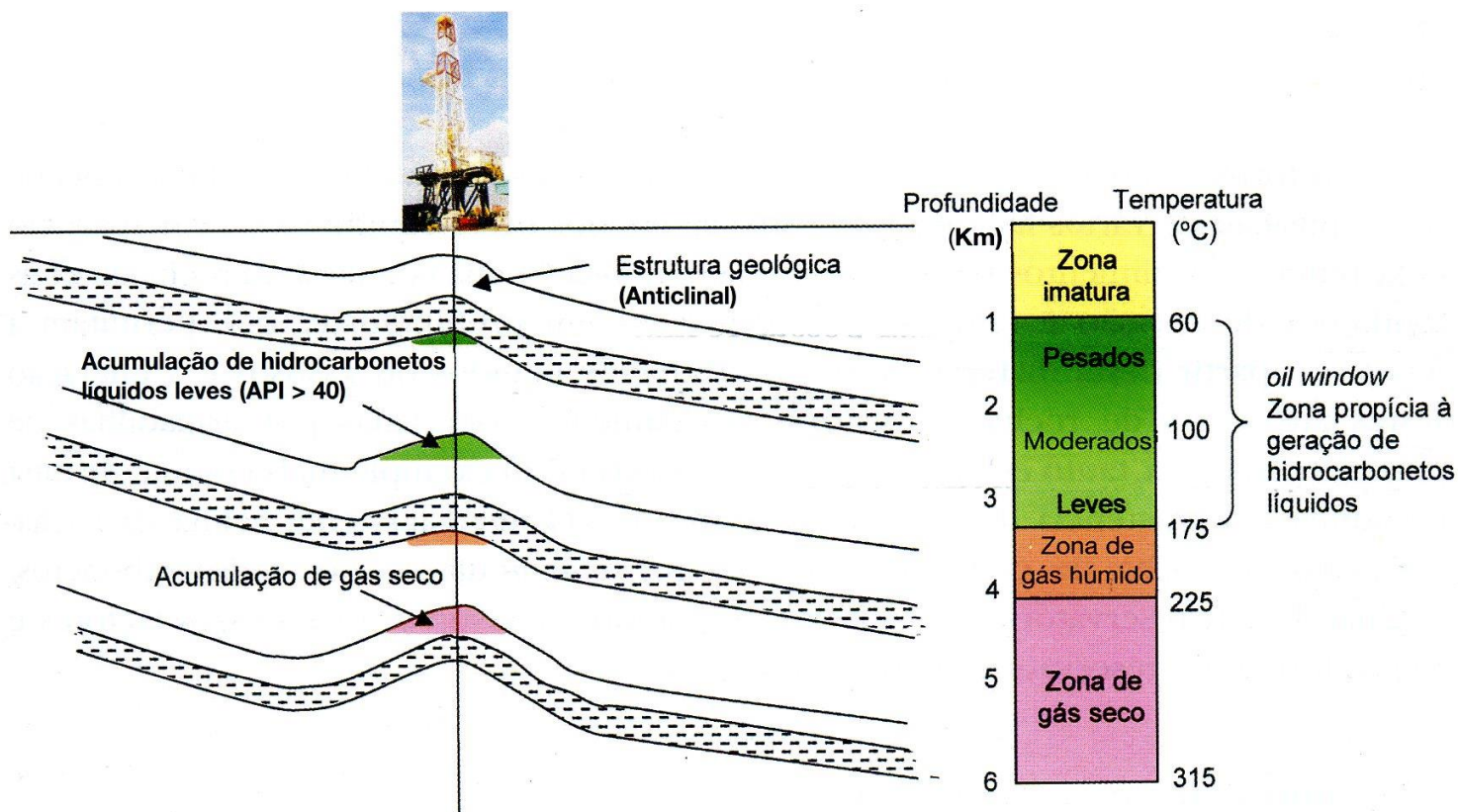
Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?

Tal como já foi referido no caso do carvão esta matéria orgânica é posteriormente processada pelo efeito da temperatura e da pressão...

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?



Fonte: O universo da indústria petrolífera, J.Gomes, F. Alves, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?

Numa bacia sedimentar média, que apresenta gradientes verticais de temperatura da ordem de $0.026^{\circ}\text{Cm}^{-1}$, a “oil window” corresponde à janela de profundidades 1500 – 6000 m.

Naturalmente, estes valores variam de local para local.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?

Mas não basta que os hidrocarbonetos se formem para que os possamos encontrar hoje.

Como a rocha-mãe é muito porosa, eles têm tendência para migrar para a superfície sob a acção da pressão.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?

Se encontrarem “caminho aberto” (do ponto de vista da estrutura geológica) até à superfície acabam por surgir à superfície, e entram em combustão por causa da presença de oxigénio, como sucedia na antiguidade na região de Kirkut (actual Iraque).

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?



Fonte: O universo da indústria petrolífera, J.Gomes, F. Alves, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian

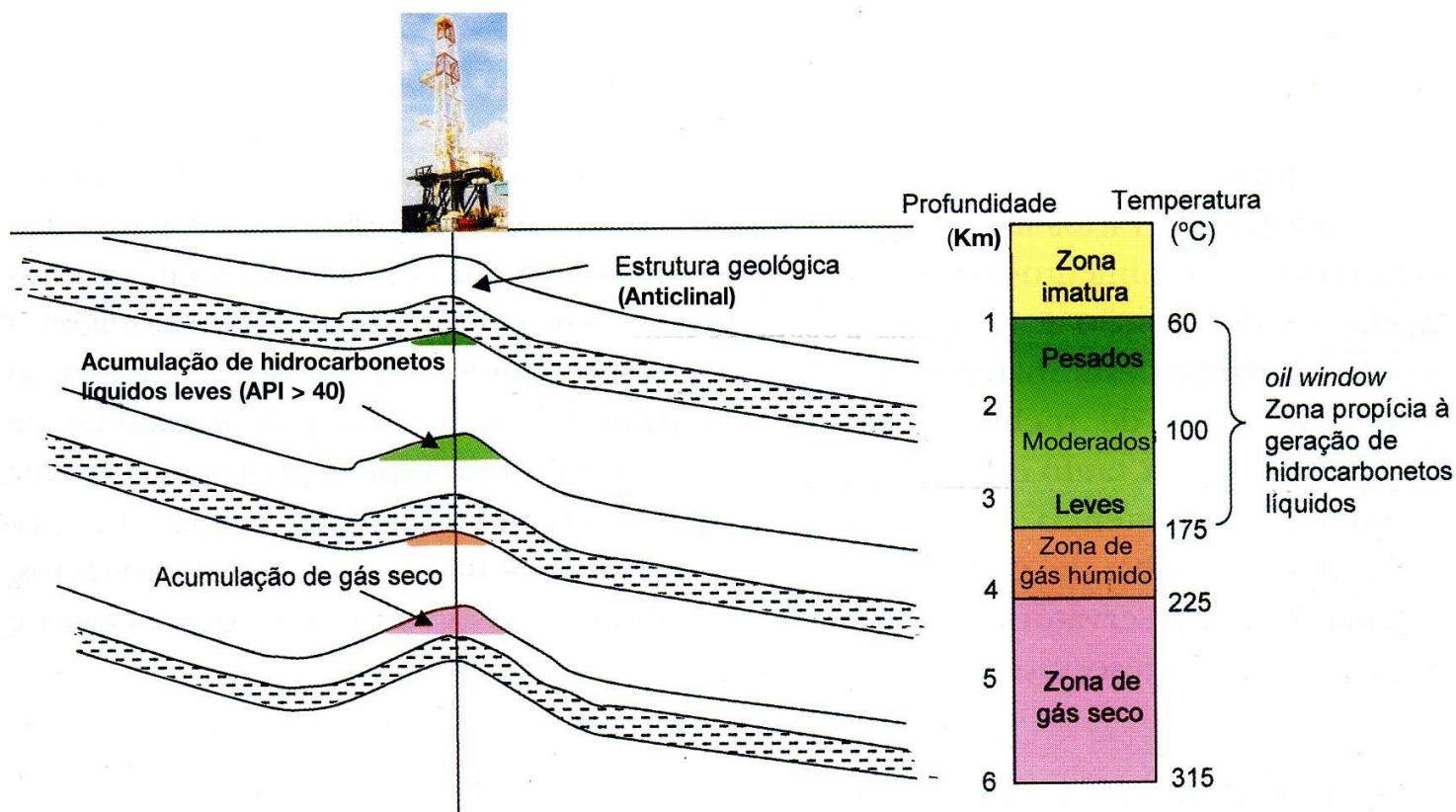
Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?

Se essa migração ascensional for interrompida por uma “armadilha geológica” – uma camada impermeável com a forma adequada para provocar a retenção – surgirá então uma jazida estável, que poderá ser acedida através de uma perfuração.

Fontes fósseis de energia: o que são?

Como se formaram os hidrocarbonetos?



Fonte: O universo da indústria petrolífera, J.Gomes, F. Alves, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Basicamente são moléculas formadas essencialmente por um número maior ou menor de átomos de carbono e de hidrogénio...

... mas que também contêm outros elementos químicos como o enxofre, o azoto ou o oxigénio.

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

| Elemento | % em peso no petróleo bruto | % em peso no gás |
|----------|-----------------------------|------------------|
| C | 82 – 87 | 65 – 80 |
| H | 12 – 15 | 1 – 25 |
| S | 0,1 – 5,5 | 0 – 0,2 |
| N | 0,1 – 1,5 | 1 – 15 |
| O | 0,1 – 4,5 | |

Fonte: O universo da indústria petrolífera, J.Gomes, F. Alves, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

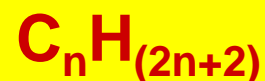
Basicamente são moléculas formadas por um número maior ou menor de átomos de carbono e de hidrogénio, organizados em cadeias lineares ou cíclicas, que, em condições normais de pressão e temperatura se podem encontrar no estado gasoso, líquido ou sólido.

Fontes fósseis de energia: o que são?

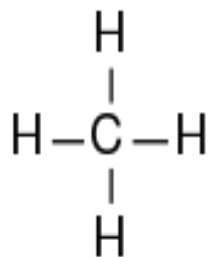
O que são os hidrocarbonetos?

Hidrocarbonetos parafínicos

Têm uma estrutura linear, saturada, cuja fórmula geral é:



Exemplos:



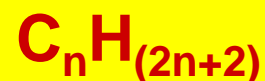
CH₄ - Metano

Fontes fósseis de energia: o que são?

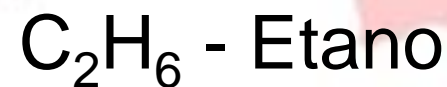
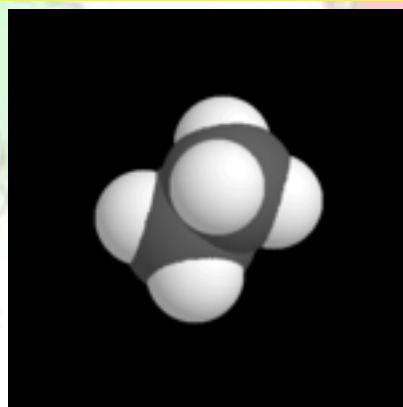
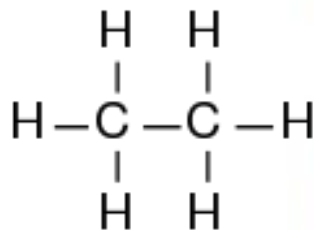
O que são os hidrocarbonetos?

Hidrocarbonetos parafínicos

Têm uma estrutura linear, saturada, cuja fórmula geral é:



Exemplos:

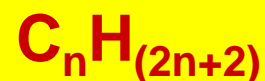


Fontes fósseis de energia: o que são?

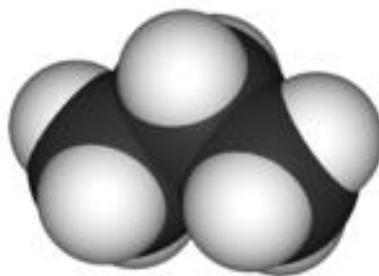
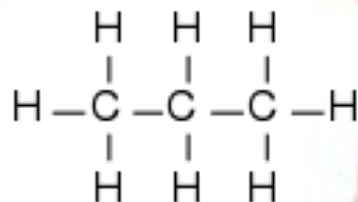
O que são os hidrocarbonetos?

Hidrocarbonetos parafínicos

Têm uma estrutura linear, saturada, cuja fórmula geral é:



Exemplos:



C_3H_8 - Propano

Fontes fósseis de energia: o que são?

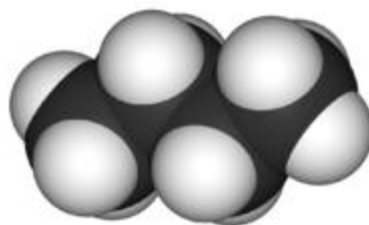
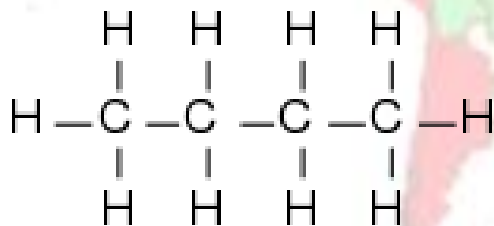
O que são os hidrocarbonetos?

Hidrocarbonetos parafínicos

Têm uma estrutura linear, saturada, cuja fórmula geral é:



Exemplos:



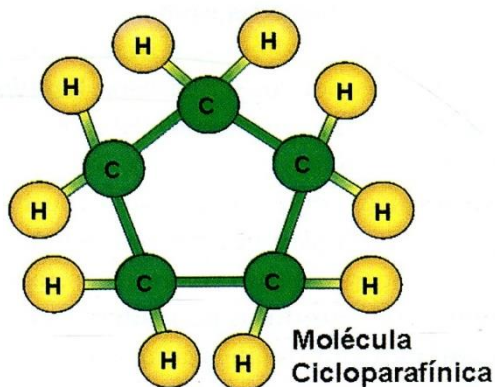
Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Hidrocarbonetos nafténicos

Têm uma estrutura, saturada, em forma de anel, cuja fórmula geral é C_nH_{2n}

Exemplo:



C_5H_{10} - Ciclopentano

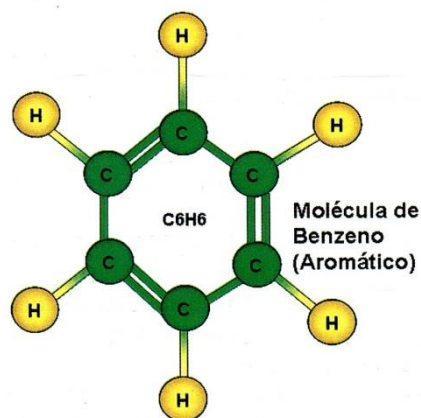
Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Hidrocarbonetos aromáticos

Têm uma estrutura em anel, não saturada, cuja fórmula geral é $C_nH_{(2n-6)}$

Exemplo:



C_6H_6 - Benzeno

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Hidrocarbonetos asfálticos

À temperatura ambiente encontram-se no estado sólido. Têm elevado ponto de ebulição e elevada massa molecular (tipicamente contêm entre 40 a 60 átomos de carbono).

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Em regra, em condições normais de pressão e temperatura:

- os hidrocarbonetos com menos de cinco átomos de carbono por molécula ocorrem no estado gasoso (principais constituintes do gás natural)
- os hidrocarbonetos que contêm entre cinco e 18 átomos de carbono por molécula ocorrem no estado líquido
- os hidrocarbonetos com mais de 18 átomos de carbono por molécula ocorrem no estado sólido

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Composição típica de um crude:

| Tipo de hidrocarboneto | % em peso |
|------------------------|-----------|
| Parafínico | 30 |
| Nafténico | 49 |
| Aromático | 15 |
| Asfáltico | 6 |

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Classificação do crude quanto à composição relativa de hidrocarbonetos:

Crude asfáltico: cor negra, contendo poucas parafinas. Depois de refinado produz gasolinas de alto valor e asfaltos.

Crude parafínico: cor esverdeada, contendo pouco ou nenhum asfalto. Depois de refinado produz parafinas, bons óleos lubrificantes e petróleo de iluminação.

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Classificação do crude quanto à densidade:

Escala API (American Petroleum Institute):

$$API = \frac{141,5}{\text{densidade a } 60^{\circ} F} - 131,5$$

Crude muito leve – API entre 42° e 55° (transparentes, ricos em gasolinas, maior valor comercial)

Crude médio – API entre 17° e 42°

Crude muito denso – API entre 5° e 17° (cores muito escuras, grandes percentagens de asfaltos, menor valor comercial)

Fontes fósseis de energia: o que são?

O que são os hidrocarbonetos?

Classificação do crude quanto às impurezas:

Principais impurezas: enxofre, metais pesados (vanádio, níquel, chumbo, mercúrio, arsénio)

Classificação relativamente ao teor em enxofre:

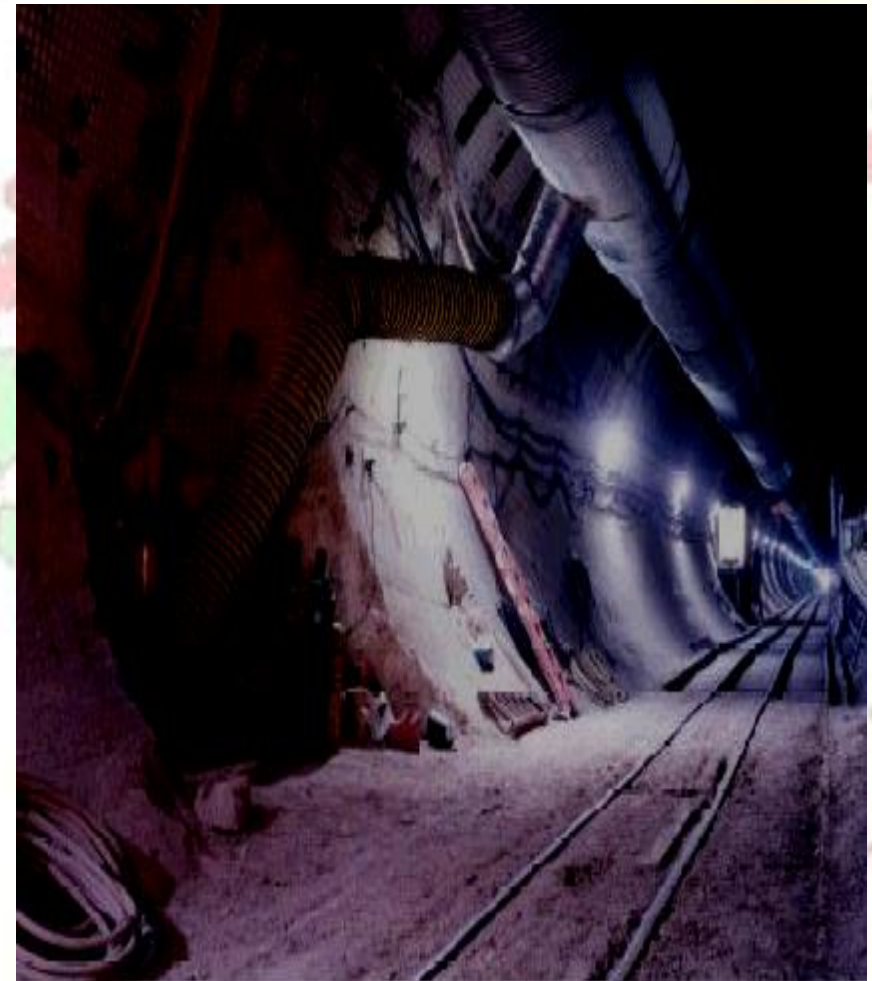
Crudes doces – menos de 1% de enxofre (normalmente muito densos - baixo API)

Crudes ácidos – mais do que 1% de enxofre (normalmente pouco densos – alto API)

Fontes fósseis de energia: como se extraem?

A extracção do carvão é feita em galerias horizontais, que também servem como vias de transporte.

Normalmente as minas de carvão encontram-se a 200 ou 300 metros de profundidade, mas muitas vezes é necessário perfurar poços de 1000 metros ou mais.

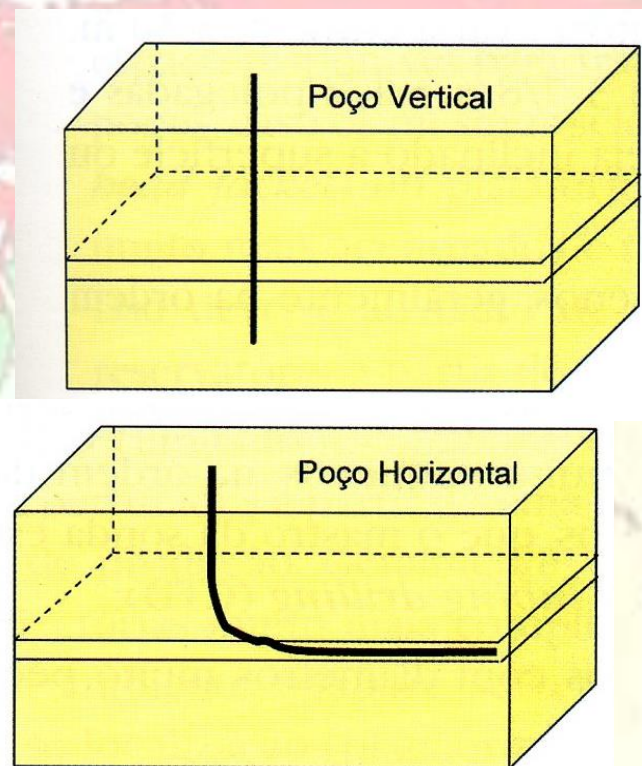


Fontes fósseis de energia: como se extraem?

Petróleo

Os **poços convencionais** são todos os poços verticais (ou com pequenos desvios).

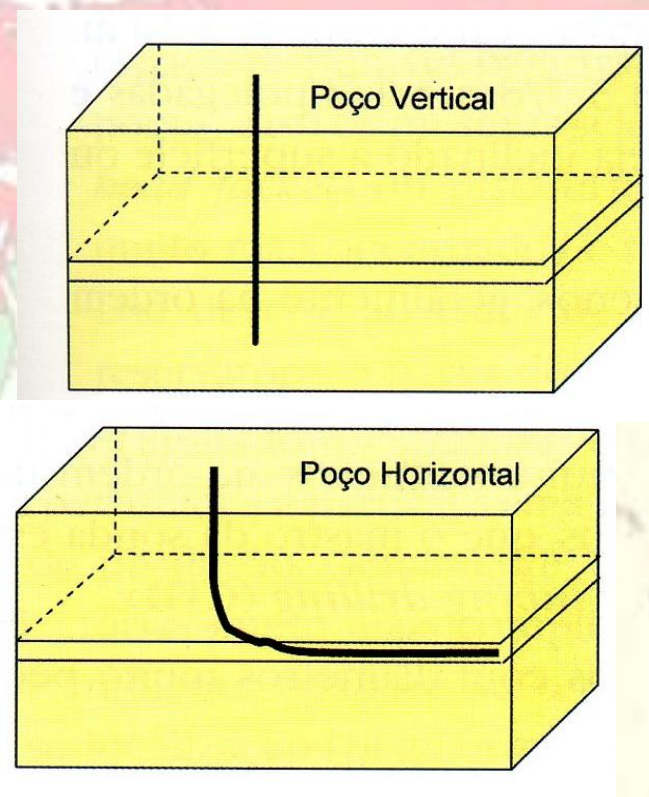
Os **poços horizontais** são poços com uma inclinação superior a $80-85^\circ$; geralmente têm curvas internas que atingem ângulos próximos dos 90°



Fonte: O universo da indústria petrolífera, J.Gomes, F. Alves, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian

Fontes fósseis de energia: como se extraem?

O “record” em **poços horizontais** foi obtido pela companhia Maersk Oil a operar no offshore do Qatar: poço com uma extensão de perto de 8200m, a uma profundidade de cerca de 950m.

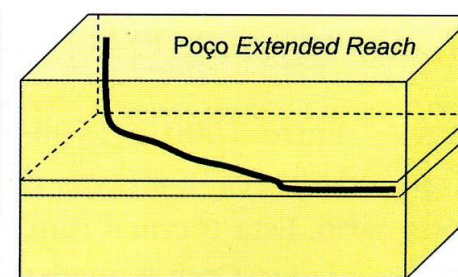
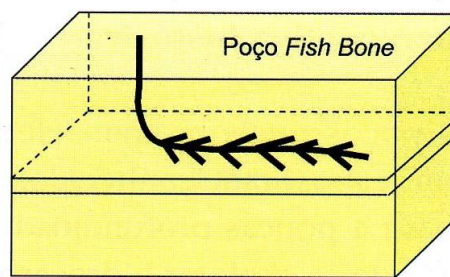
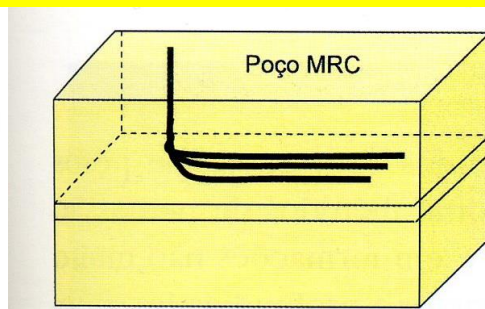
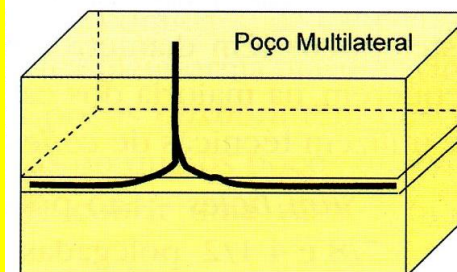


Fonte: O universo da indústria petrolífera, J.Gomes, F. Alves, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian

Fontes fósseis de energia: como se extraem?

Os **poços multilaterais** são basicamente dois ou mais poços horizontais ramificados a partir de um único poço vertical.

(MRC – Multi-reservoir contact)



Fonte: O universo da indústria petrolífera, J.Gomes, F. Alves, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian

Fontes fósseis de energia: como se processam?

Depois da mineração, o carvão é uma mistura muito pouco homogénea de vários tipos de resíduos vegetais, juntamente com pedaços de rocha, etc.

É necessário fazer a separação desta mistura heterogénea.

Essa separação é feita por métodos gravíticos.

Fontes fósseis de energia: como se processam?

O material tal como se obtêm à saída da mina é triturado para uma granulometria standard, é lavado, e é feita uma separação gravimétrica (que pode ser feita, por exemplo, através do método dos líquidos pesados ou recorrendo à utilização de ciclones)

Fontes fósseis de energia: como se processam?

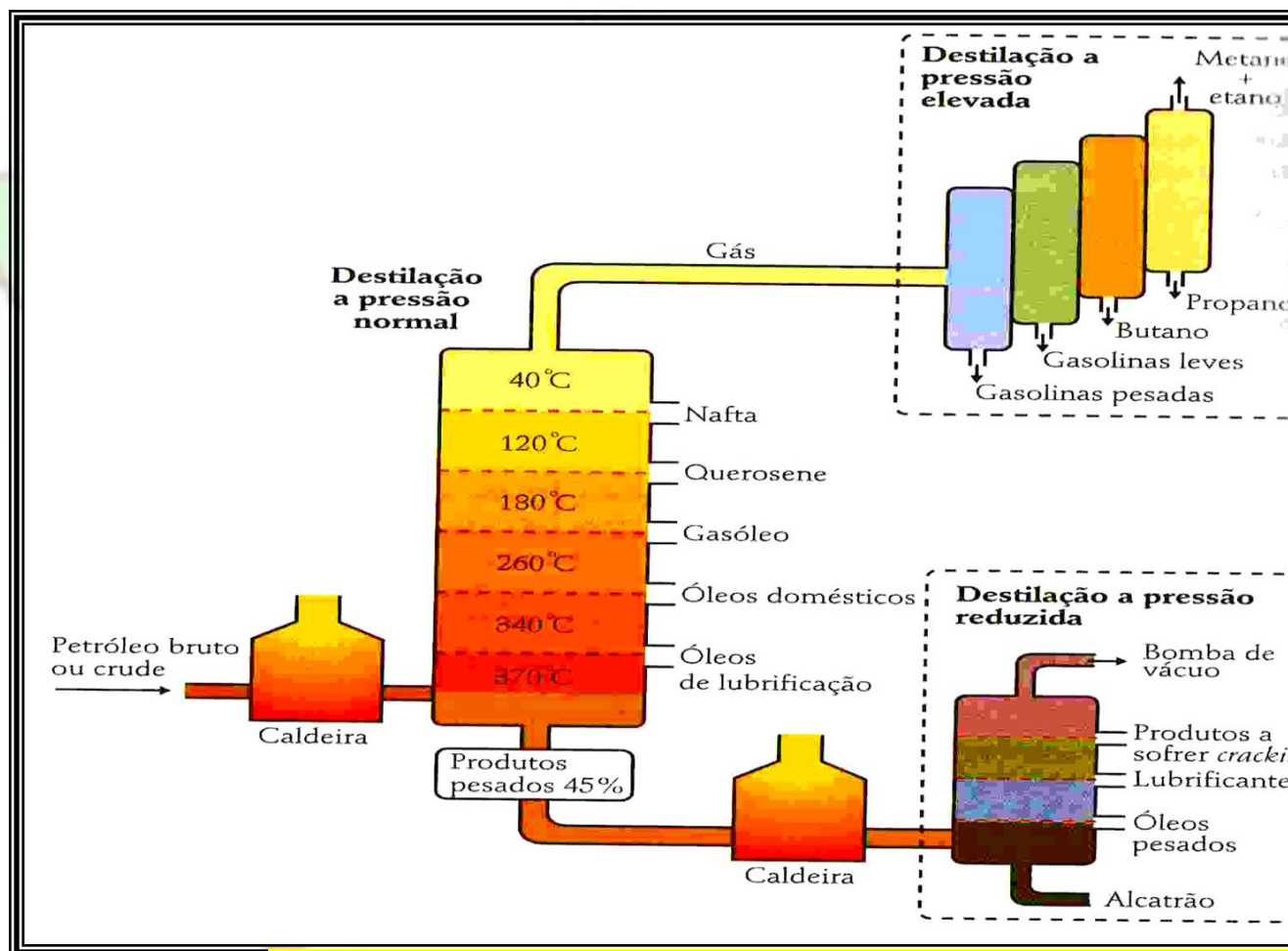
Com processos deste tipo (utilizados em toda a indústria mineira), é possível fazer uma separação de molde a obter o carvão desejado para cada tipo de aplicação (queima, ou para utilização química).

Fontes fósseis de energia: como se processam?

Relativamente aos hidrocarbonetos a situação é mais complexa.

O que é recolhido é sempre uma mistura de produtos gasosos (gás natural, gás sulfídrico...) e líquidos (petróleo, água de formação...) que é necessário separar.

Fontes fósseis de energia: como se processam?



Esquema simplificado do processo de refinação.

Fontes fósseis de energia: o conceito de reserva

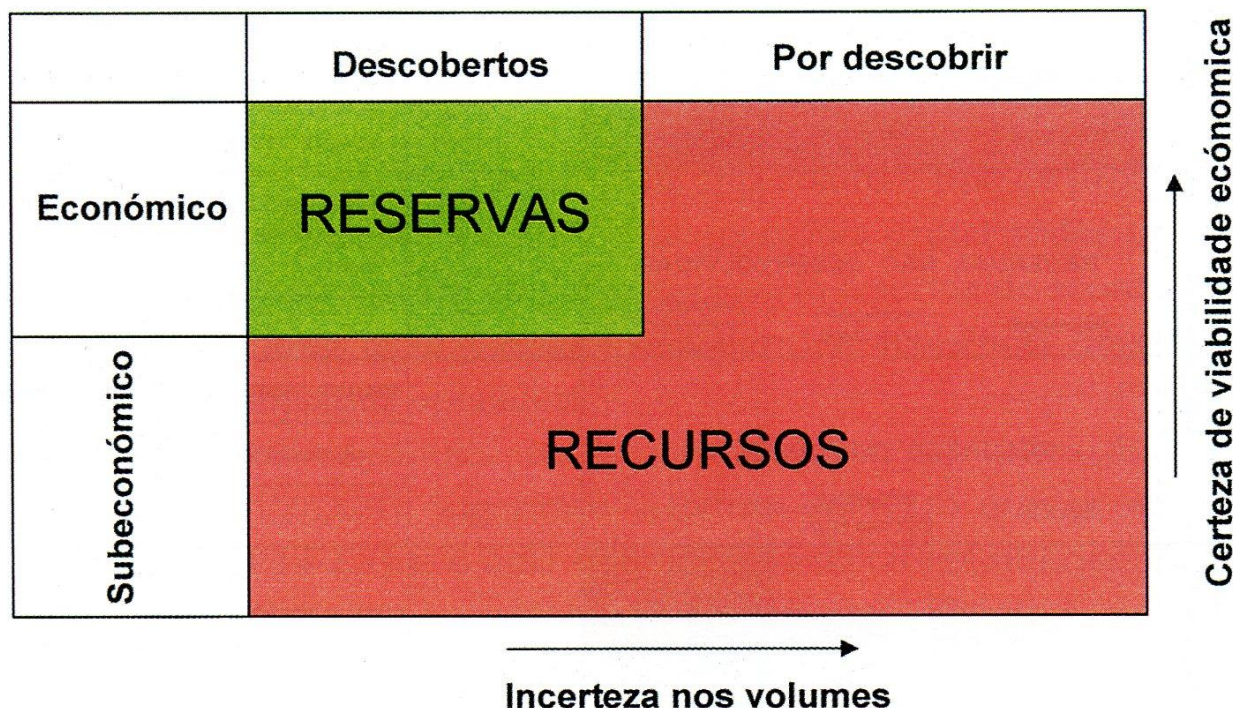
Vamos particularizar para o caso do petróleo, embora os conceitos sejam semelhantes relativamente às outras fontes.

O volume de hidrocarbonetos presente numa rocha é denominado por **STOIIP** (**S**tock **T**ank **O**il **I**nitially **I**n **P**lace)

O volume do **STOIIP** que pode ser recuperado com viabilidade económica constitui a reserva

Fontes fósseis de energia: o conceito de reserva

Estes conceitos podem ser ilustrados pelos diagramas de McKelvey:



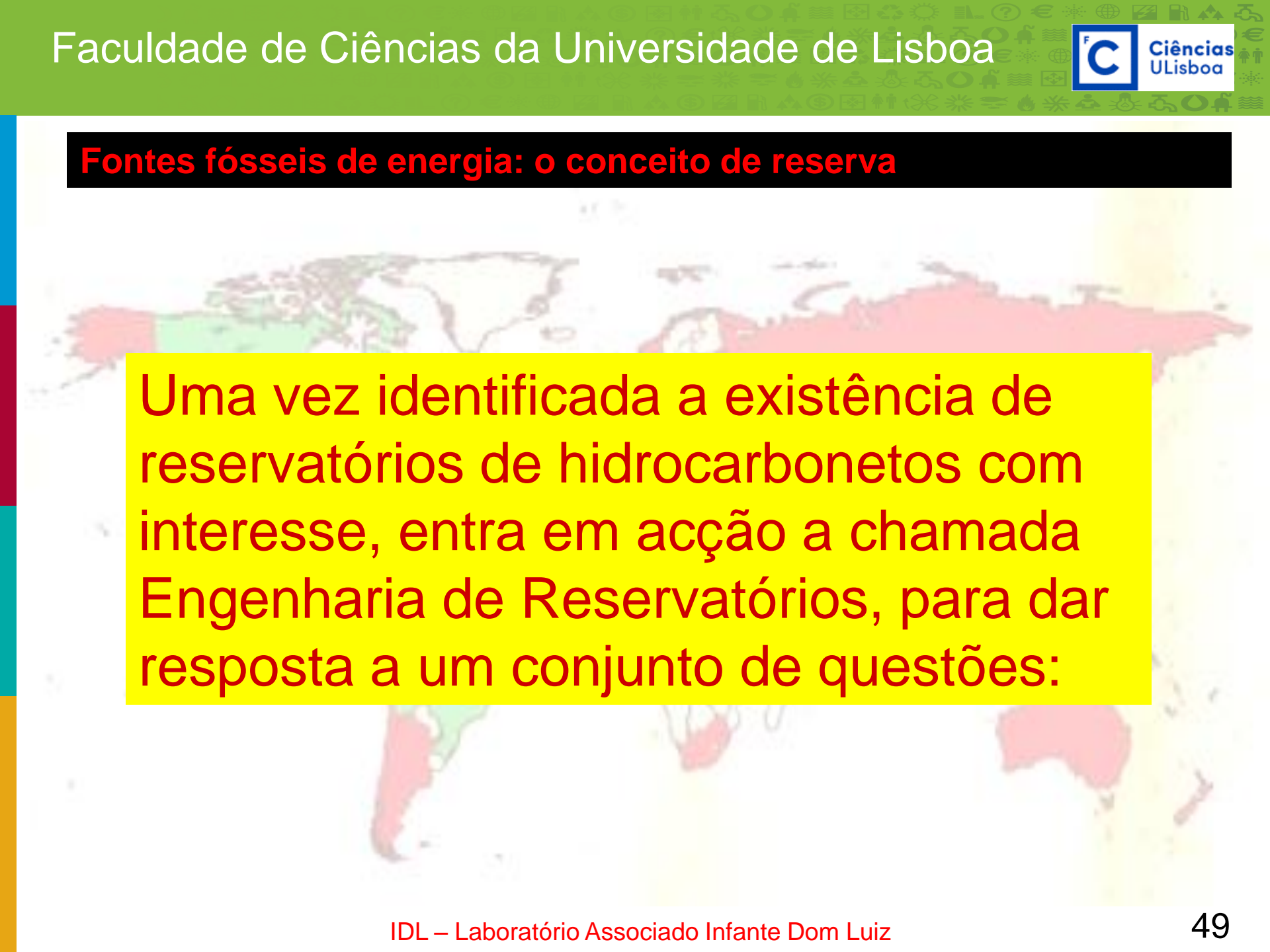
Fonte: O universo da indústria petrolífera, J.Gomes, F. Alves, Ed. Fundação Calouste Gulbenkian

Fontes fósseis de energia: o conceito de reserva

Como se chega a estes diagramas?

O primeiro passo é sempre o da identificação por métodos geológicos / geofísicos de zonas onde potencialmente poderão existir depósitos de hidrocarbonetos (zonas com rocha-mãe de boa qualidade, e existência de fluidos).

Fontes fósseis de energia: o conceito de reserva

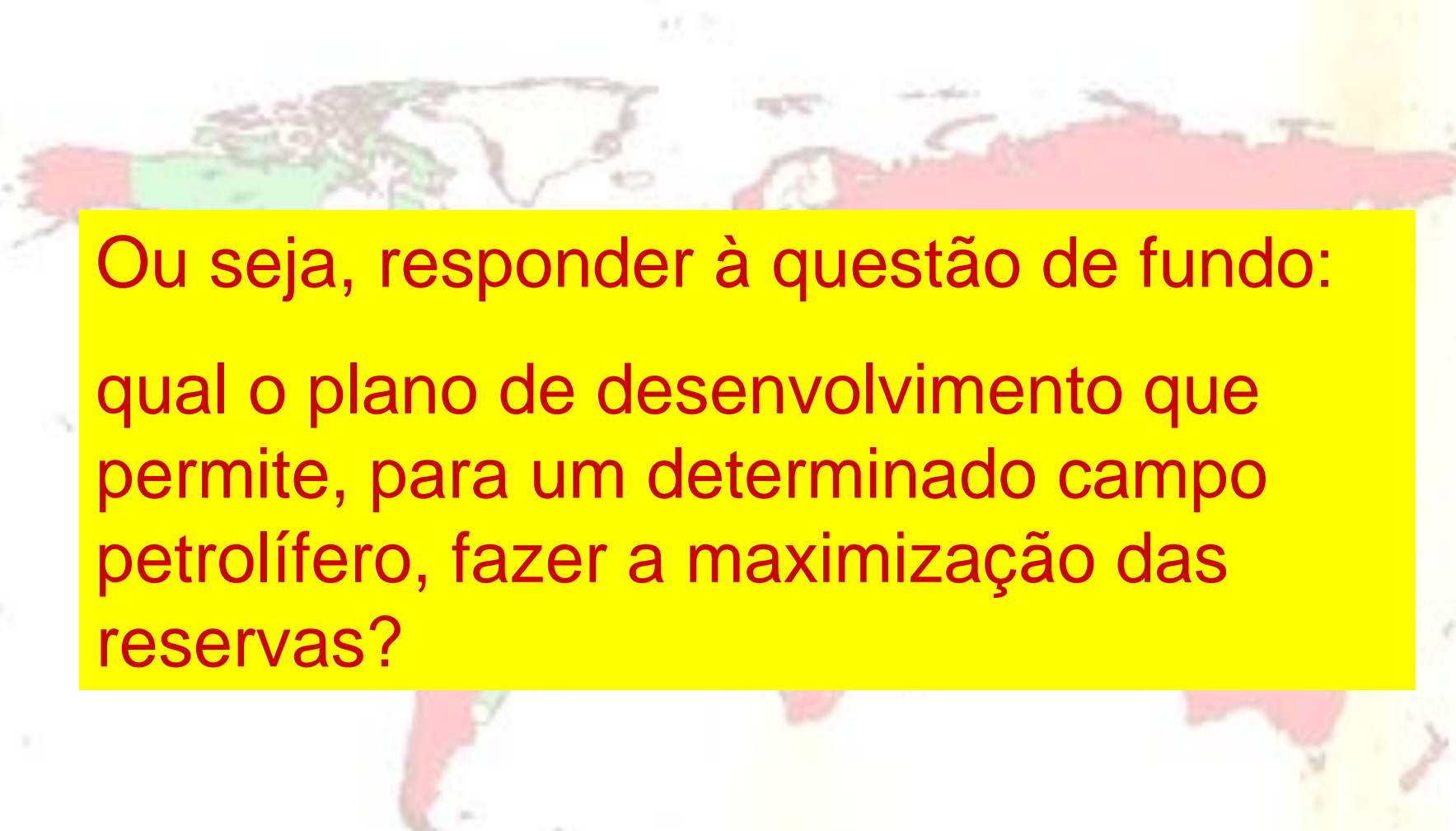
A world map is visible in the background, with several regions highlighted in red and green. The red regions include North America, Europe, and parts of Asia and Africa. The green regions include South America and parts of Africa and Asia.

Uma vez identificada a existência de reservatórios de hidrocarbonetos com interesse, entra em acção a chamada Engenharia de Reservatórios, para dar resposta a um conjunto de questões:

Fontes fósseis de energia: o conceito de reserva

- quantos poços serão necessários para o desenvolvimento do campo petrolífero?
- quais os poços mais adequados (verticais, horizontais ou multilaterais)?
- qual a sua localização ideal para maximizar a recuperação?
- qual o tipo de suporte de pressão (injecção de água, gás ou CO₂) necessário?
- quais os perfis de produção expectáveis?
- ...

Fontes fósseis de energia: o conceito de reserva



Ou seja, responder à questão de fundo:
qual o plano de desenvolvimento que
permite, para um determinado campo
petrolífero, fazer a maximização das
reservas?

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

No que se segue, iremos acompanhar de perto o trabalho de Hubbert (1956!)

Este trabalho incide sobre o que é expectável que aconteça relativamente à evolução temporal da taxa de extracção de um qualquer recurso natural que exista em quantidade finita.

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

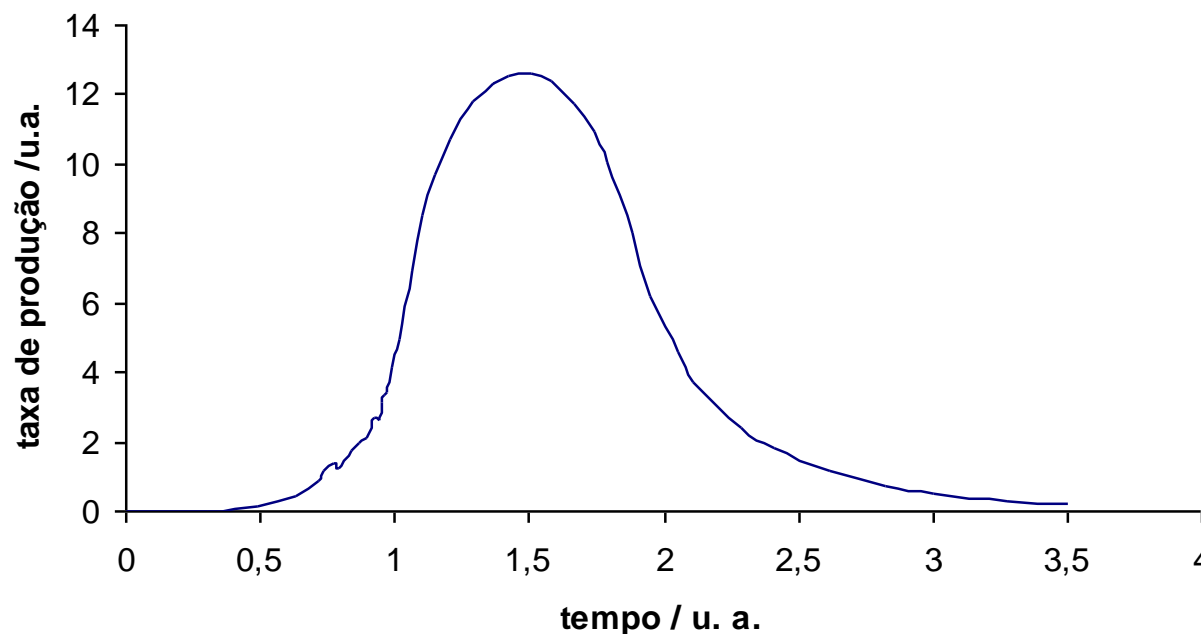
Os princípios são simples :

- a quantidade total a recuperar é finita (P);
- a taxa de produção inicial p_i é suposta ser nula numa qualquer data de referência;
- a taxa de produção final p_f terá também que ser nula, uma vez que o recurso é finito.

A consequência é imediata...

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

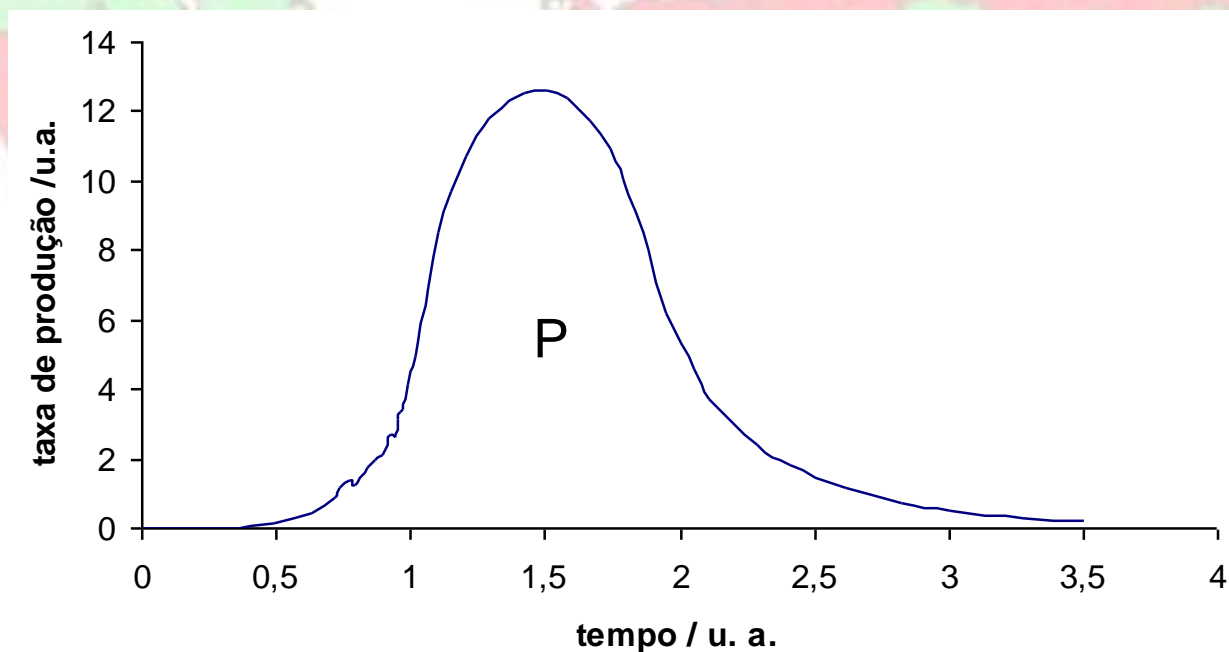
A função $p(t)$ tem forçosamente que ter pelo menos um máximo!



É no fundo daqui que vem o famoso pico do petróleo...

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

É fácil de perceber que a área debaixo da curva é igual...



...à quantidade total que pode ser recuperada!

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

Ou seja, o que o modelo de Hubbert prevê relativamente a qualquer recurso finito é que, no caso mais simples :

- a sua taxa de extracção começa por aumentar no tempo;
- se atinja um patamar correspondente a um máximo quando se tiver consumido aproximadamente metade do recurso;
- e seguidamente decresça até se anular (porque vai sendo cada vez mais difícil encontrar novas reservas).

...mas podemos dizer mais...

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

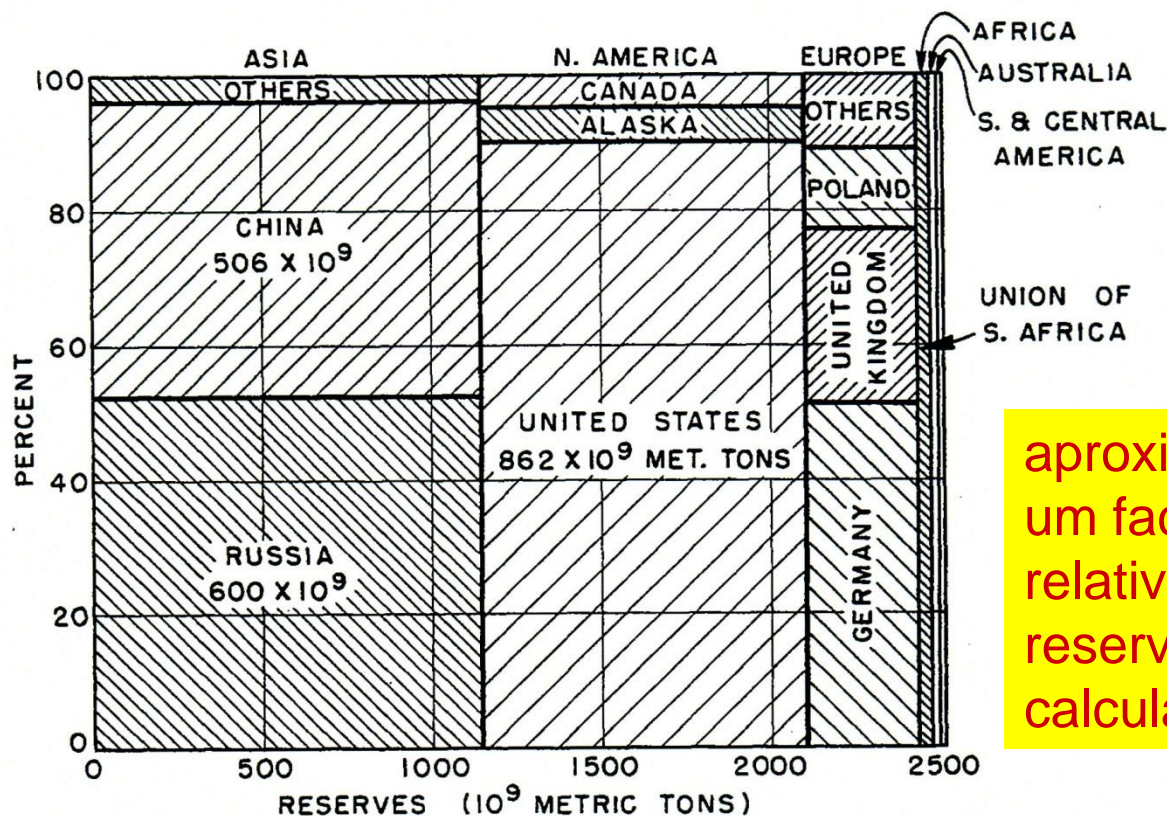
De facto, se eu souber qual é o recurso total existente P , e qual foi a produção acumulada até uma certa data, posso fazer previsões relativamente ao tempo ao fim do qual se esgotará o recurso (desde que admita um determinado máximo de produção).

Hubbert, em 1956, mostrou que a produção de combustíveis fósseis mundial (e em particular nos EUA) seguia uma função deste tipo, e fez ainda previsões relativamente aos respectivos picos de produção.

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

Estas previsões surgem num relatório da Exploration and Production Research Division da SHELL (publicação nº 95), e foram publicadas em Junho de 1956 na revista Drilling and Production Practice do American Petroleum Institute...

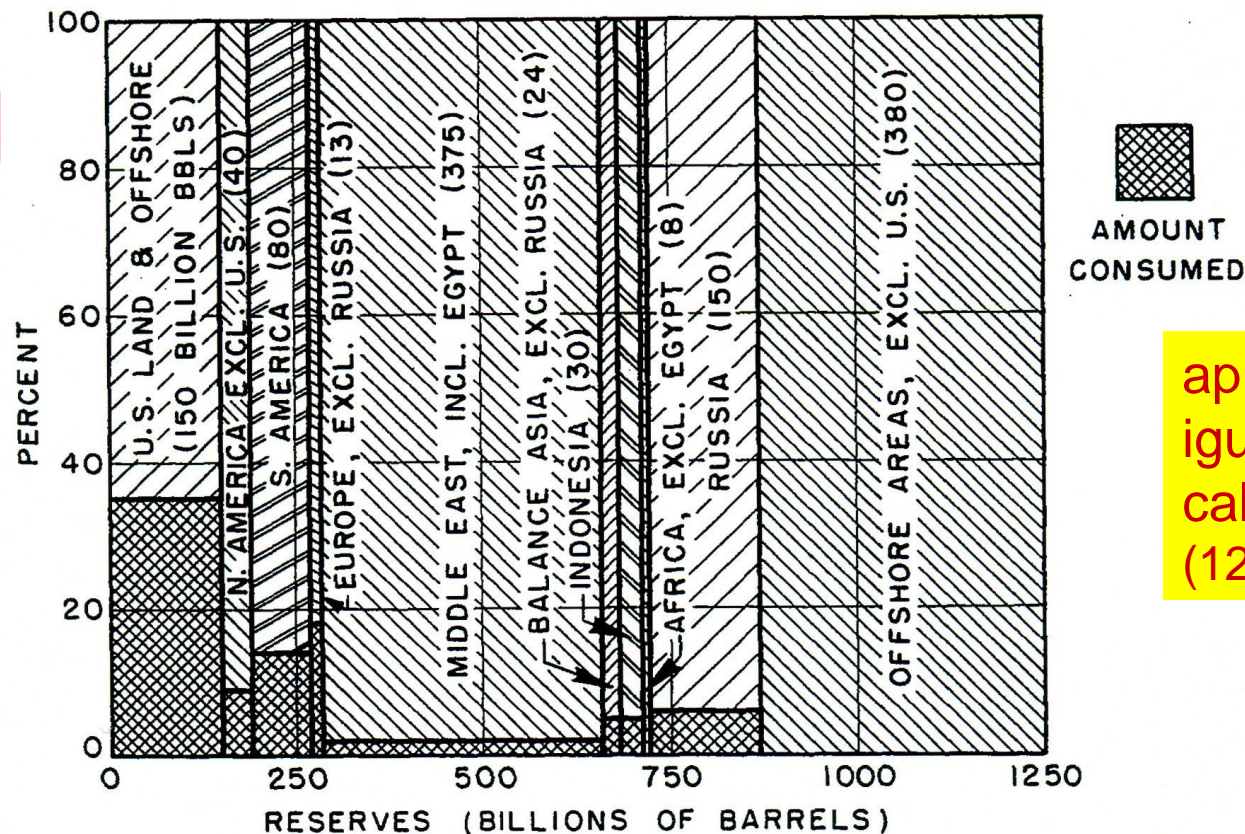
Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert



aproximadamente um factor 3 relativamente às reservas calculadas hoje

Figure 14 - World recoverable coal reserves assuming 50-percent loss in mining (U.S. Geol. Surv.).

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert



aproximadamente igual às reservas calculadas hoje (1239 bbls)

Figure 15 - Estimated world crude-oil reserves initially present which are producible by present methods (modified after L. G. Weeks).

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

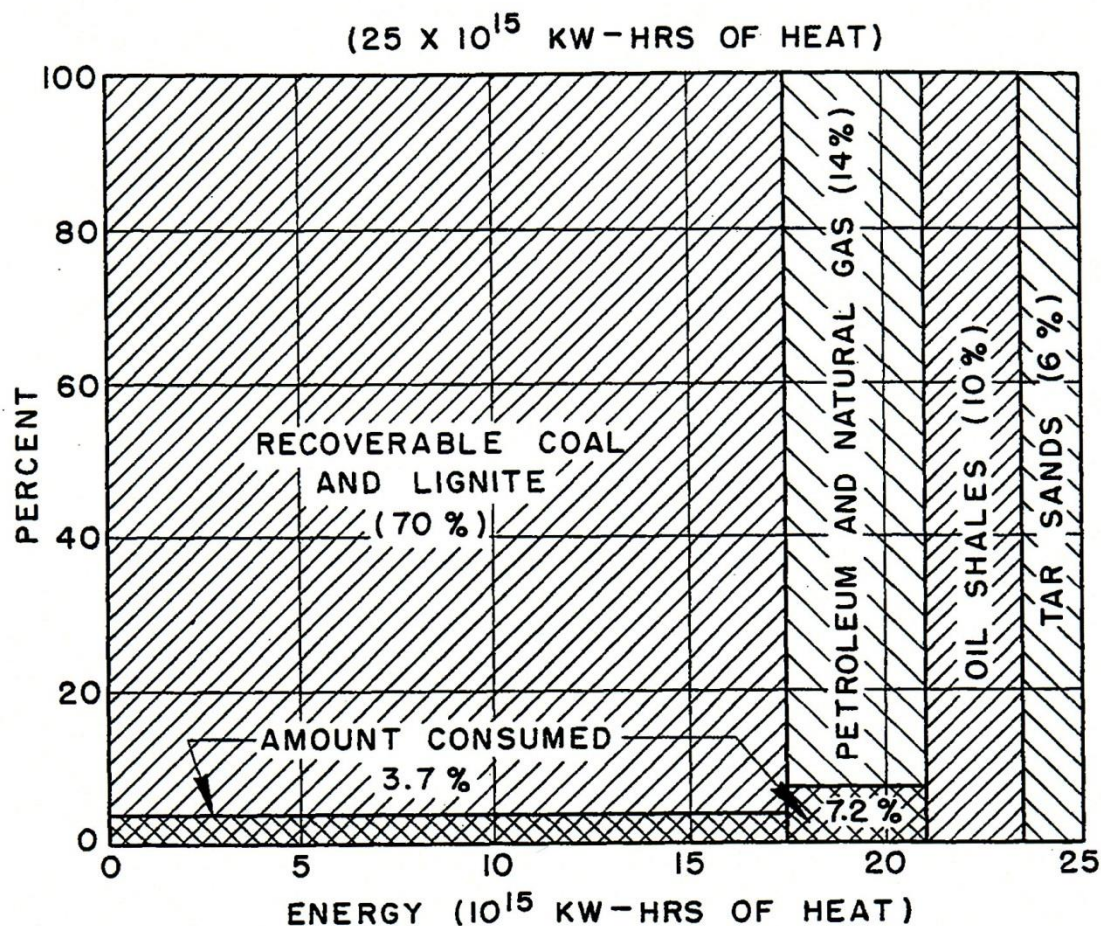


Figure 16 - Energy content of initial world reserves of fossil fuels, and amount consumed already.

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

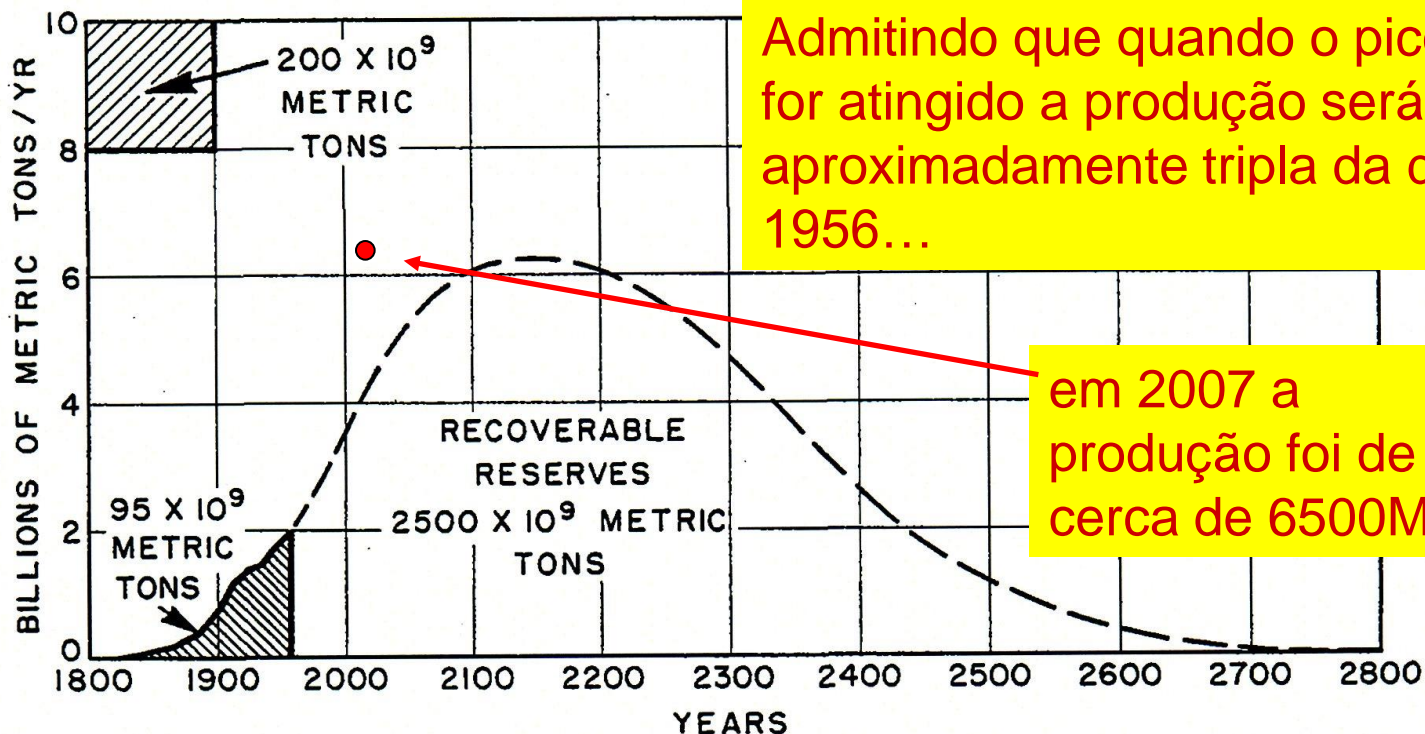
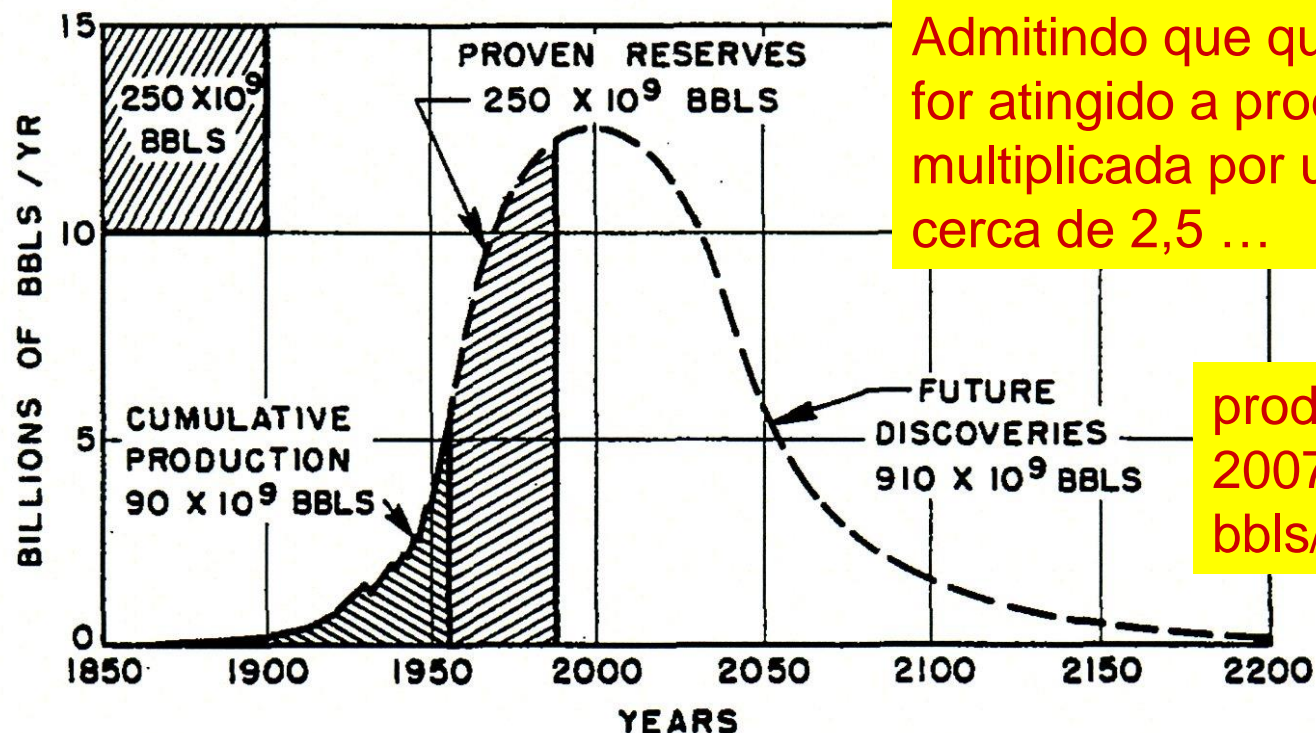


Figure 18 - Ultimate world coal production. The shape of the curve is variable but subject to the condition that the area under the curve cannot exceed thirteen squares.

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert

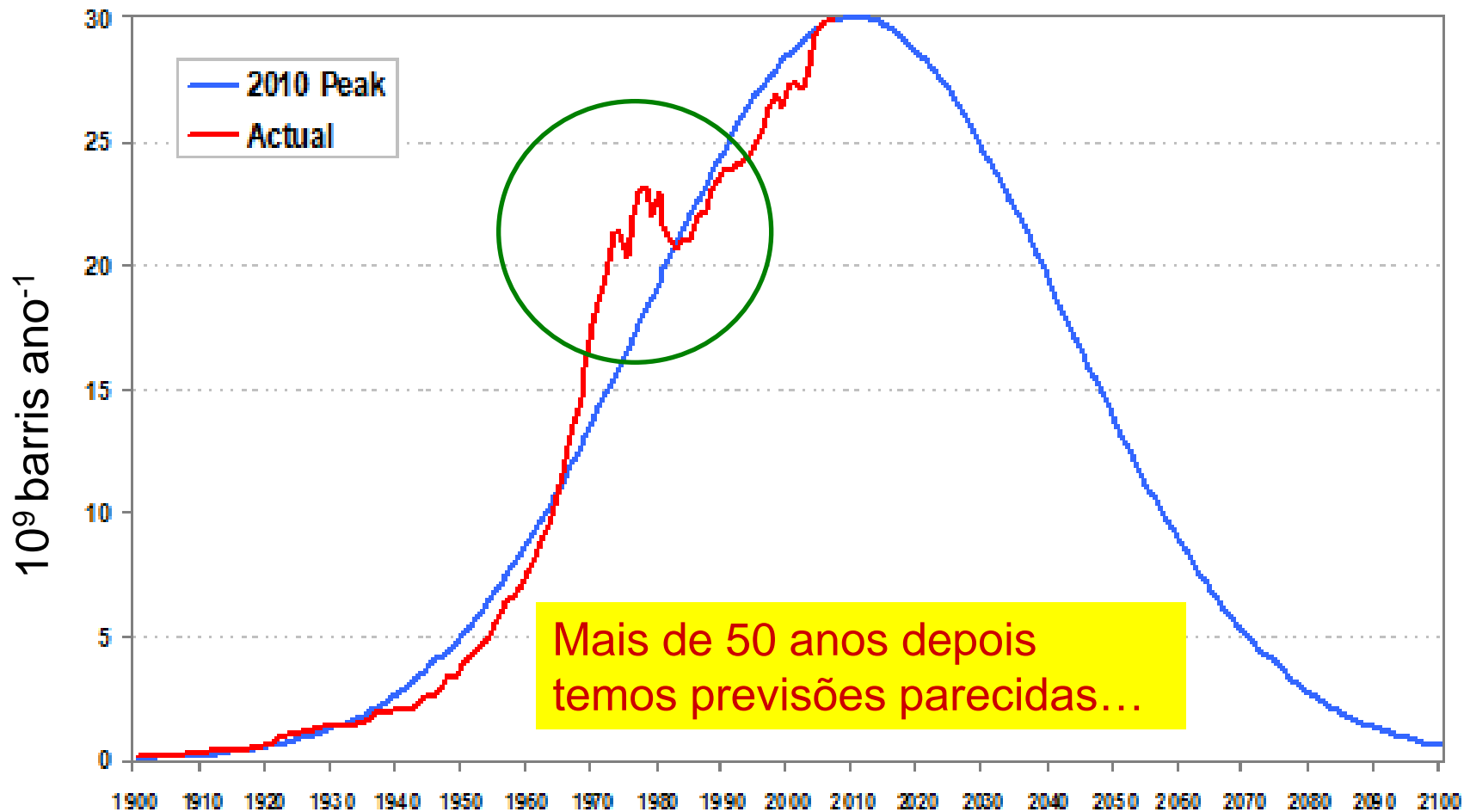


Admitindo que quando o pico for atingido a produção será multiplicada por um factor de cerca de 2,5 ...

produção em 2007: 26,7 billions bbls/Yr

Figure 20 - Ultimate world crude-oil production based upon initial reserves of 1250 billion barrels.

Fontes fósseis de energia: o modelo de Hubbert



Fonte: Worldwatch Institute; Dados: BP Statistical Review of World Energy.

As previsões de Hubbert quanto ao futuro da energia mundial

Vimos que Hubbert tinha, já em 1956, claramente a consciência de que a utilização dos combustíveis fósseis seria efémera.

Qual era a visão dele do futuro da energia?

As previsões de Hubbert quanto ao futuro da energia mundial

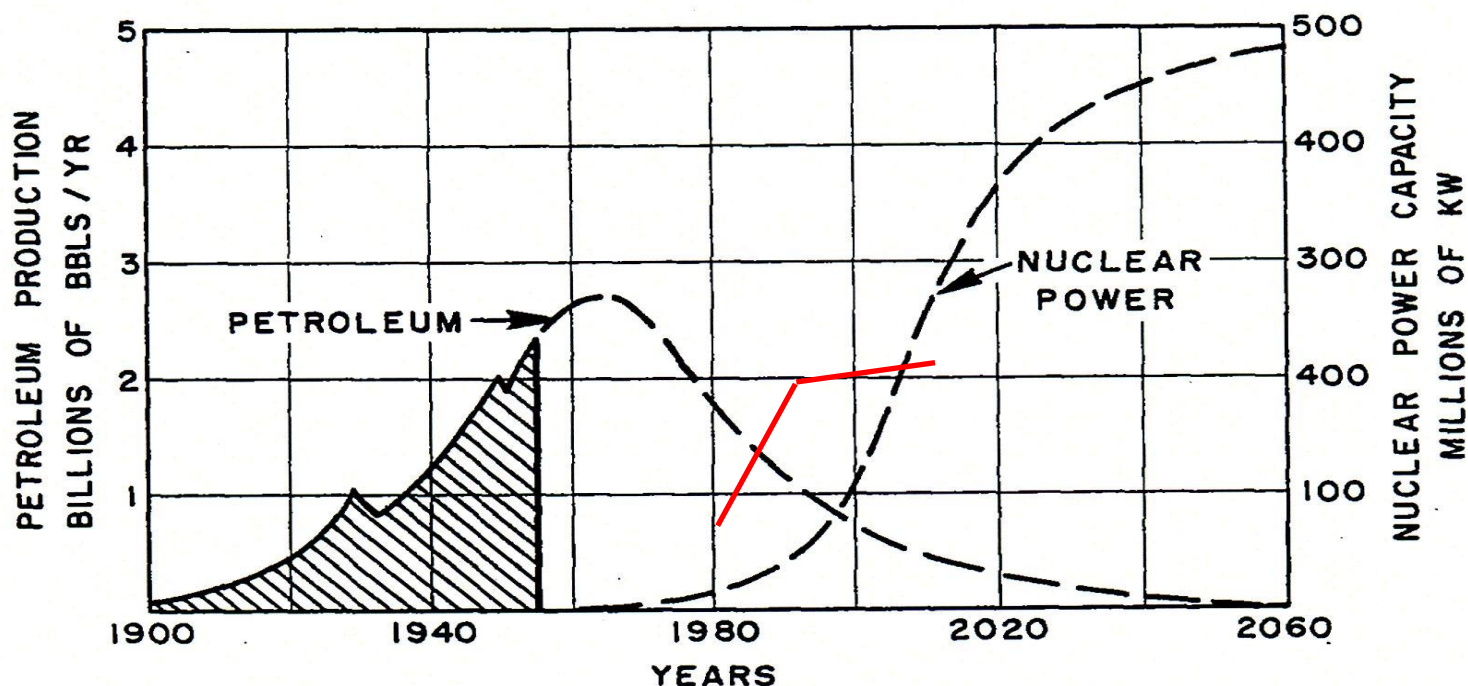
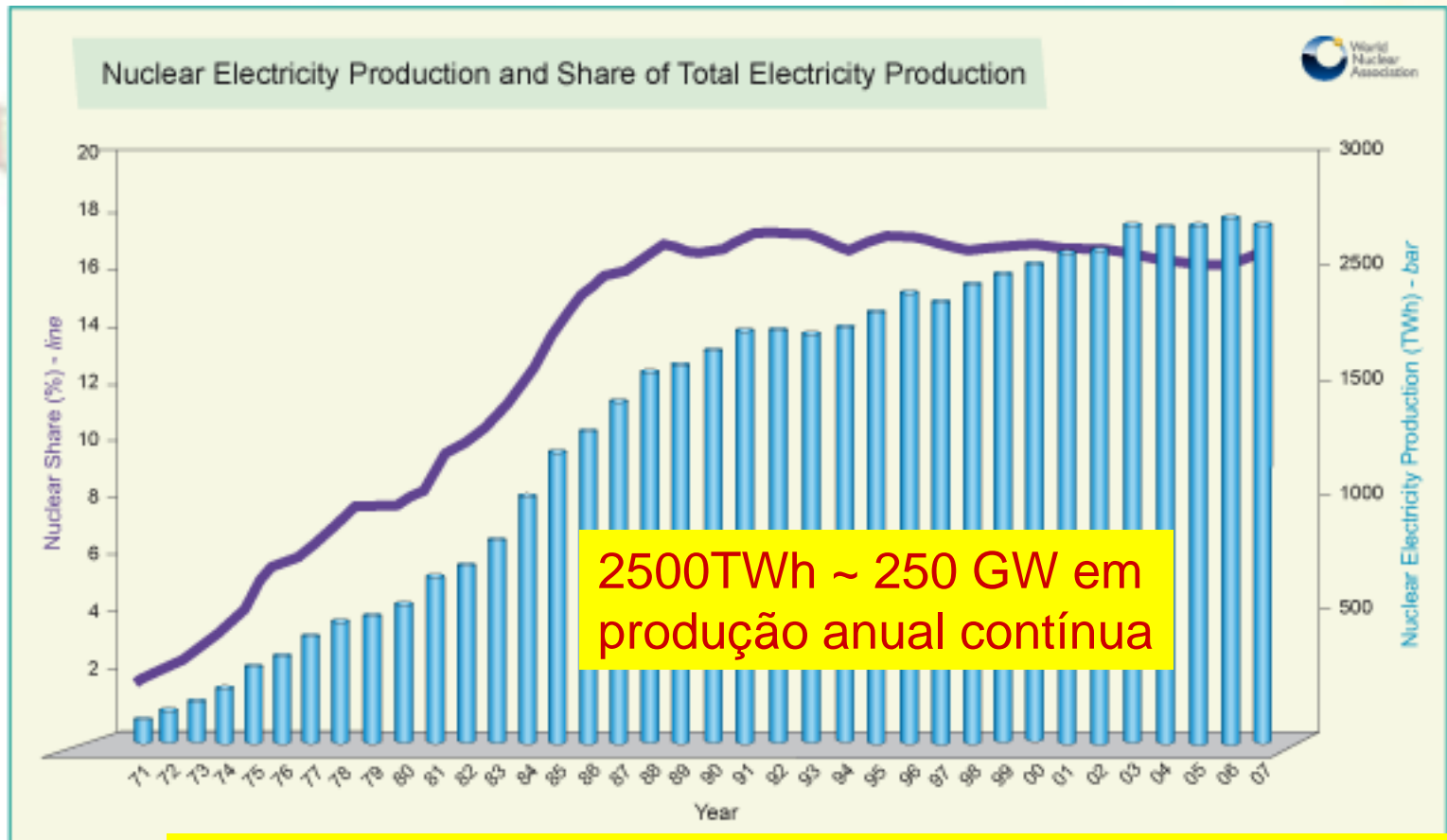


Figure 29 - Concurrent decline of petroleum production and rise of production of nuclear power in the United States. Growth rate of 10 percent per year for nuclear power is assumed; actual rate may be twice this amount.

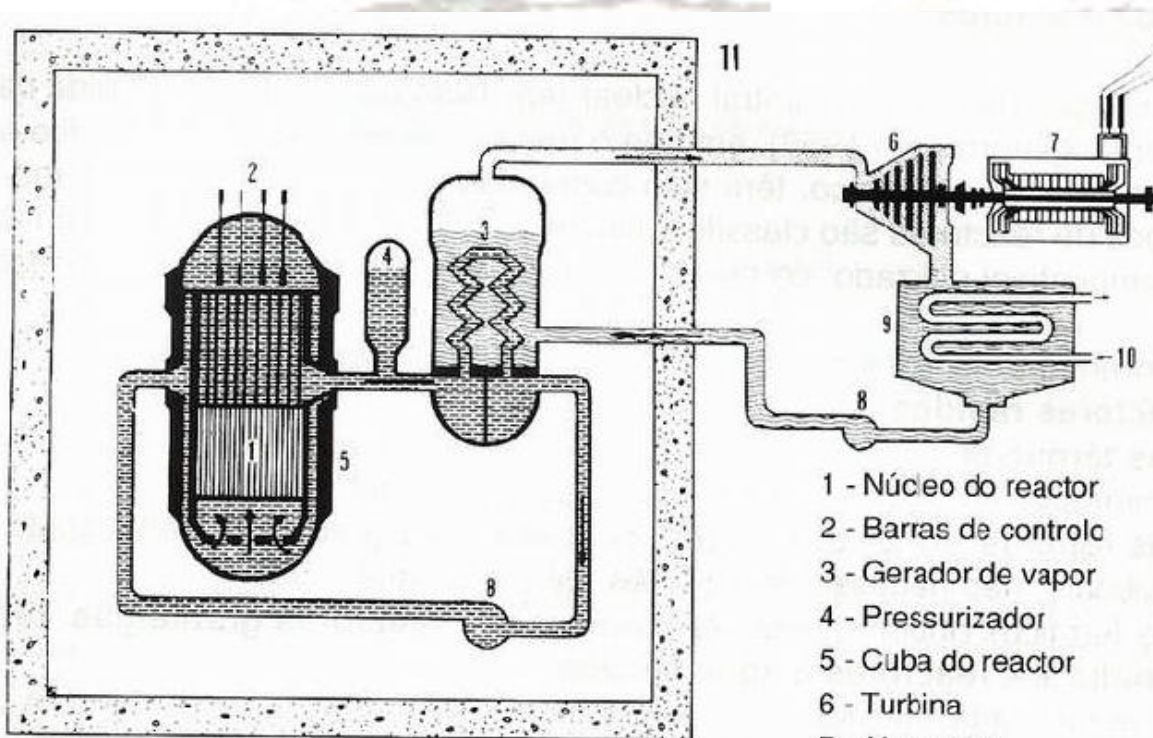
As previsões de Hubbert quanto ao futuro da energia mundial



2500TWh ~ 250 GW em produção anual contínua

Porque não se desenvolveu muito a energia nuclear?

Energia nuclear: princípios



Circuito primário

☒ Água

Circuito secundário

☒ Água

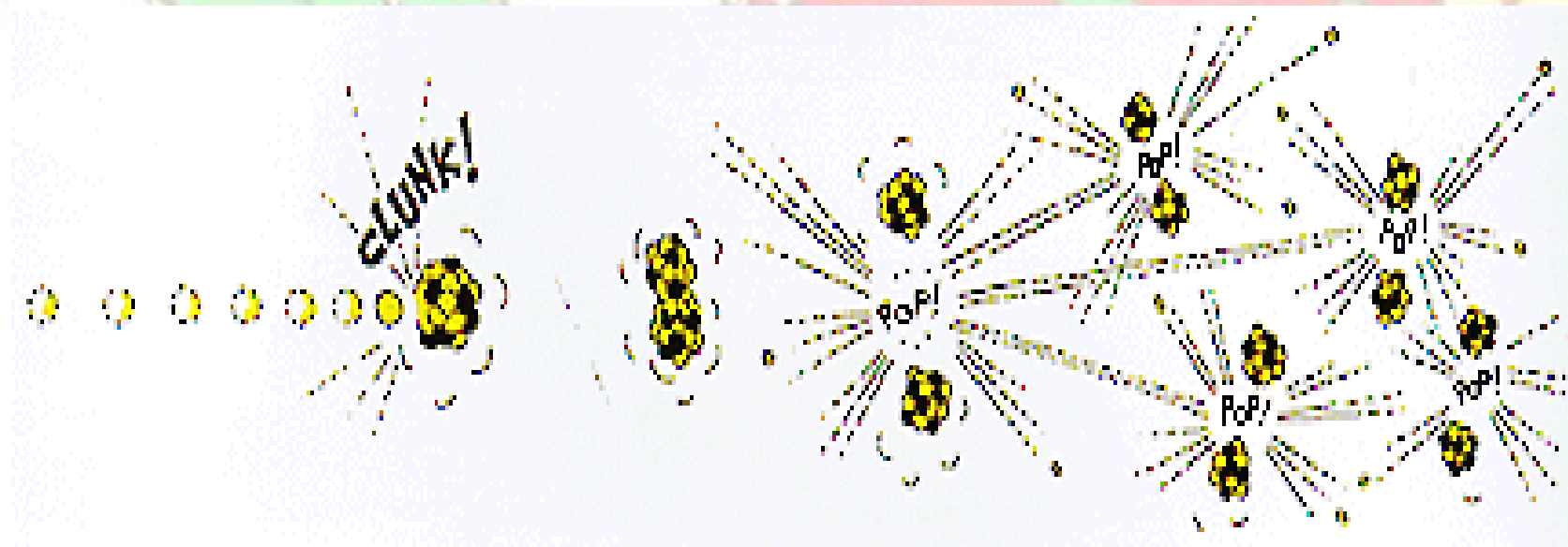
☐ Vapor

- 1 - Núcleo do reactor
- 2 - Barras de controlo
- 3 - Gerador de vapor
- 4 - Pressurizador
- 5 - Cuba do reactor
- 6 - Turbina
- 7 - Alternador
- 8 - Bomba
- 9 - Condensador
- 10 - Água de refrigeração
- 11 - Edifício de contenção

Um reactor nuclear: uma máquina térmica que aproveita o calor libertado numa reacção nuclear

Energia nuclear: princípios

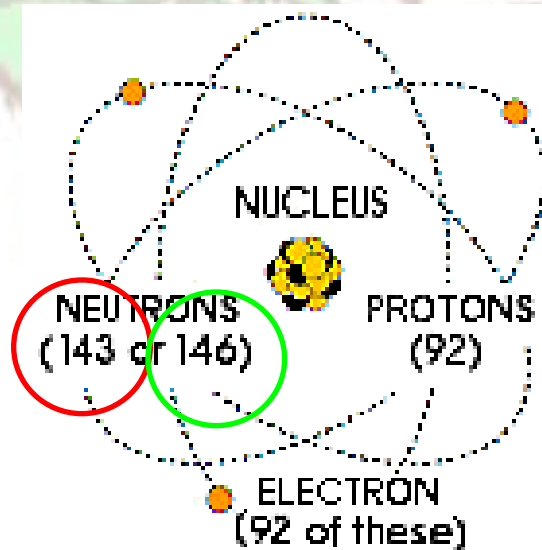
O que é uma reacção nuclear (de cisão ou fissão) ?



Fonte: <http://www.world-nuclear.org/education/uran.htm>

Energia nuclear: princípios

Por exemplo, no caso do Urânio:



Dois isótopos:

^{238}U

e

^{235}U



($155,8\text{MeV/átomo} = 2,5 \times 10^{-11}\text{J/átomo} \sim 1,3 \times 10^{13}\text{J/mole} \sim 4,2 \times 10^6\text{kWh/mole}$)

ou seja, 1g de ^{235}U fornece-nos tanta energia como 13 barris de petróleo!

Energia nuclear: princípios

Como se inicia o processo?



como em cada cisão (que consome um único neutrão) são gerados dois neutrões, é simples...

... , basta reunir uma massa de ${}^{235}\text{U}$ superior ao valor da massa crítica para este isótopo ... e controlar o processo, para evitar que se torne numa bomba nuclear!

Energia nuclear: princípios

A world map is shown in the background, with several regions highlighted in red and green. The red regions include North America, Europe, and parts of Asia and Africa. The green regions include parts of South America, Africa, and Asia. The map is semi-transparent and serves as a background for the text boxes.

Parece promissor!

Onde estão então os
problemas ?

Energia nuclear: isótopos férteis e isótopos cindíveis

O único isótopo natural que pode ser utilizado “directamente” num reactor nuclear é o ^{235}U .

Dizemos por isso, que este isótopo é o único isótopo cindível natural.

Outros isótopos cindíveis não naturais, são o ^{239}Pu , e o ^{233}U .

Energia nuclear: isótopos férteis e isótopos cindíveis

O que significa “não natural” neste contexto?

Significa que não existem na natureza mas podem ser “criados” a partir de outros isótopos naturais (mas não cindíveis)

Energia nuclear: isótopos férteis e isótopos cindíveis

O ^{239}Pu pode ser produzido a partir do ^{238}U , e o ^{233}U a partir do ^{232}Th (em ambos os casos por absorção de um neutrão).

Estes isótopos a partir dos quais se podem formar os isótopos cindíveis, denominam-se isótopos férteis.

Energia nuclear: reactores nucleares de 1ª geração

Os reactores nucleares de primeira geração funcionam exclusivamente com o isótopo ^{235}U .

O primeiro problema é que este isótopo representa apenas 0,7% da totalidade do urânio existente na Terra (o seu período de semi-vida é uma ordem de grandeza inferior ao do ^{238}U),

Energia nuclear: reactores nucleares de 1ª geração

Os reactores nucleares de primeira geração funcionam exclusivamente com o isótopo ^{235}U .

O segundo problema é que o processo de separação destes dois isótopos consome muita energia.

Energia nuclear: reactores nucleares de 1ª geração

O terceiro problema é que a reacção nuclear de cisão do ^{235}U



dá origem a um elemento radioactivo (o ^{137}Cs) cujo tempo de semi-vida é da ordem dos 2000 anos!

Ou seja, estes reactores produzem “lixo radioactivo” perigoso, que é preciso armazenar convenientemente por um tempo demasiado elevado!

Energia nuclear: reactores nucleares de regeneração

Em 1956, Hubbert já tinha perfeita consciência, pelo menos dos dois primeiros destes problemas:

“The objections to the sole use of ^{235}U are its scarcity and the large amounts of energy required to separate it from ^{238}U . Hence, very great importance attaches the possibility of converting the fertile materials, ^{238}U and ^{232}Th , into fissionable materials by means of a breeder reaction (reacção de regeneração).”

Energia nuclear: reactores nucleares de regeneração

E em que consiste esta reacção de regeneração (breeding)?

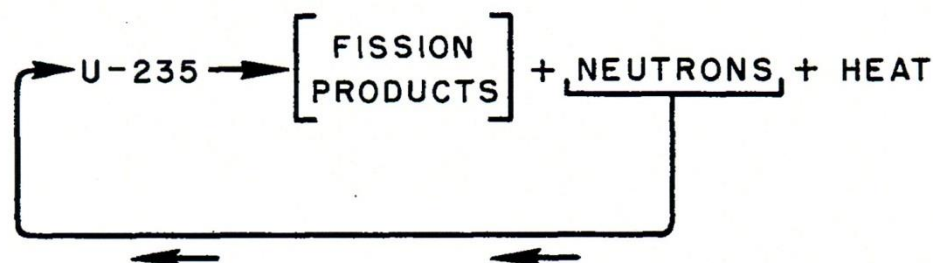


Figure 25 - Schematic representation of nuclear-power reaction involving the fissioning of uranium-235.

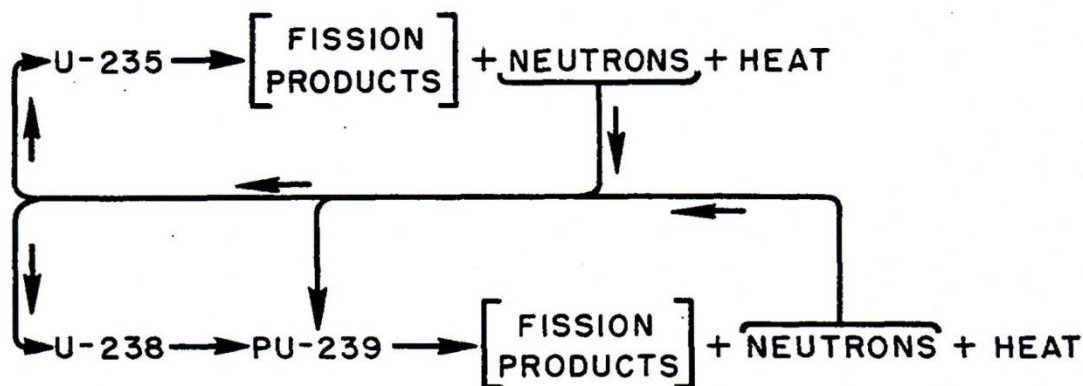


Figure 26 - Schematic representation of the breeder reaction for uranium-238. A similar reaction occurs for thorium-232.

Energia nuclear: reactores nucleares de regeneração

Aquilo de que, aparentemente, Hubbert não tinha tanta consciência, é que esta abordagem também dá solução ao terceiro problema:

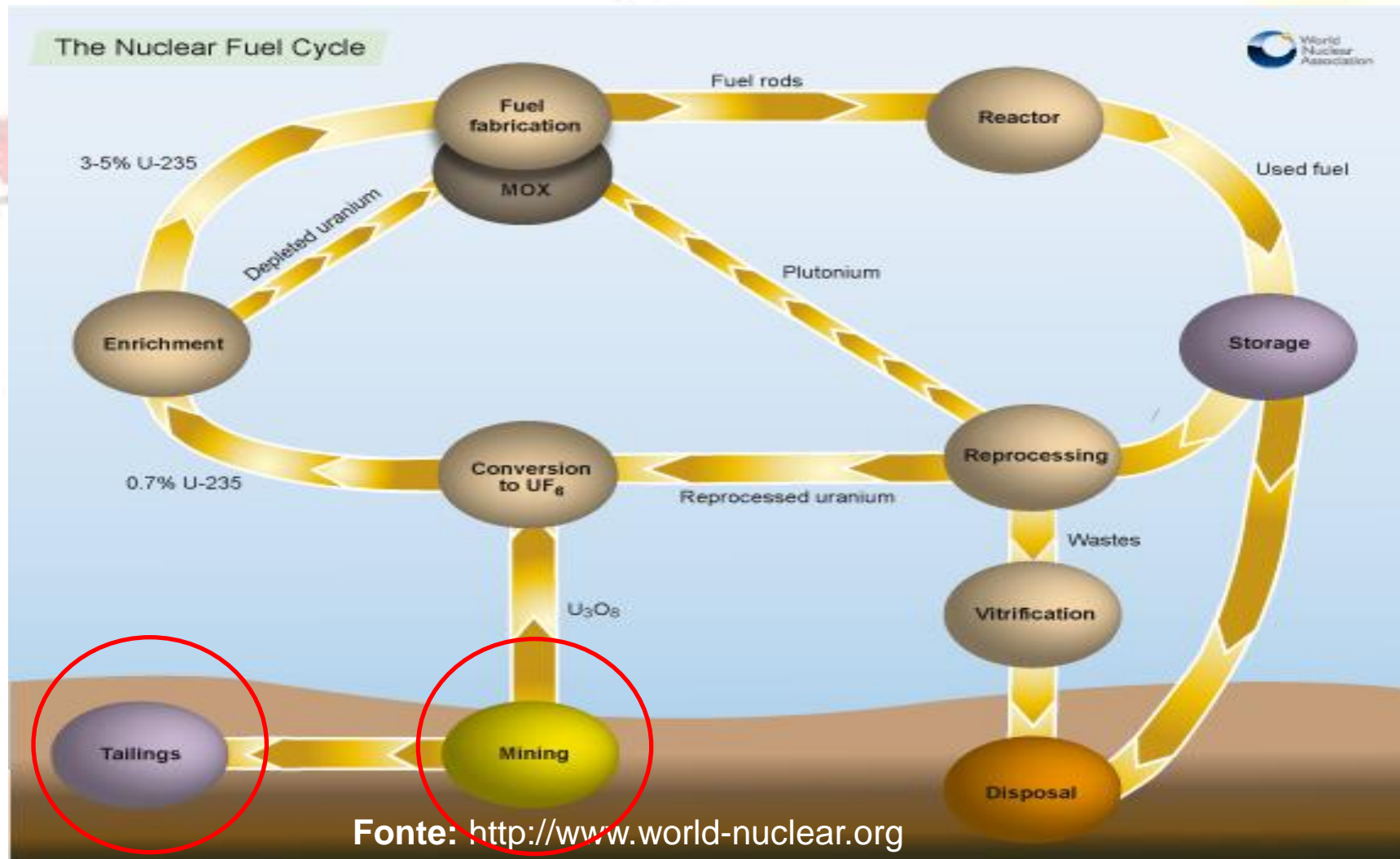
Os produtos de cisão que se obtêm usando ^{233}U e do ^{239}Pu , embora sejam radioactivos, têm períodos de semi-vida da ordem das dezenas de anos, ou seja, criam muito menos problemas que o ^{137}Cs .

Energia nuclear: reactores nucleares de regeneração

Mas também que esta solução cria novos problemas:

- Contrariamente ao que acontece com o urânio é relativamente simples fazer armas nucleares a partir do plutónio.
- A tarefa de colocar em funcionamento os reactores de regeneração não se tem revelado tão simples como inicialmente parecia.

Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear



Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Mineração:

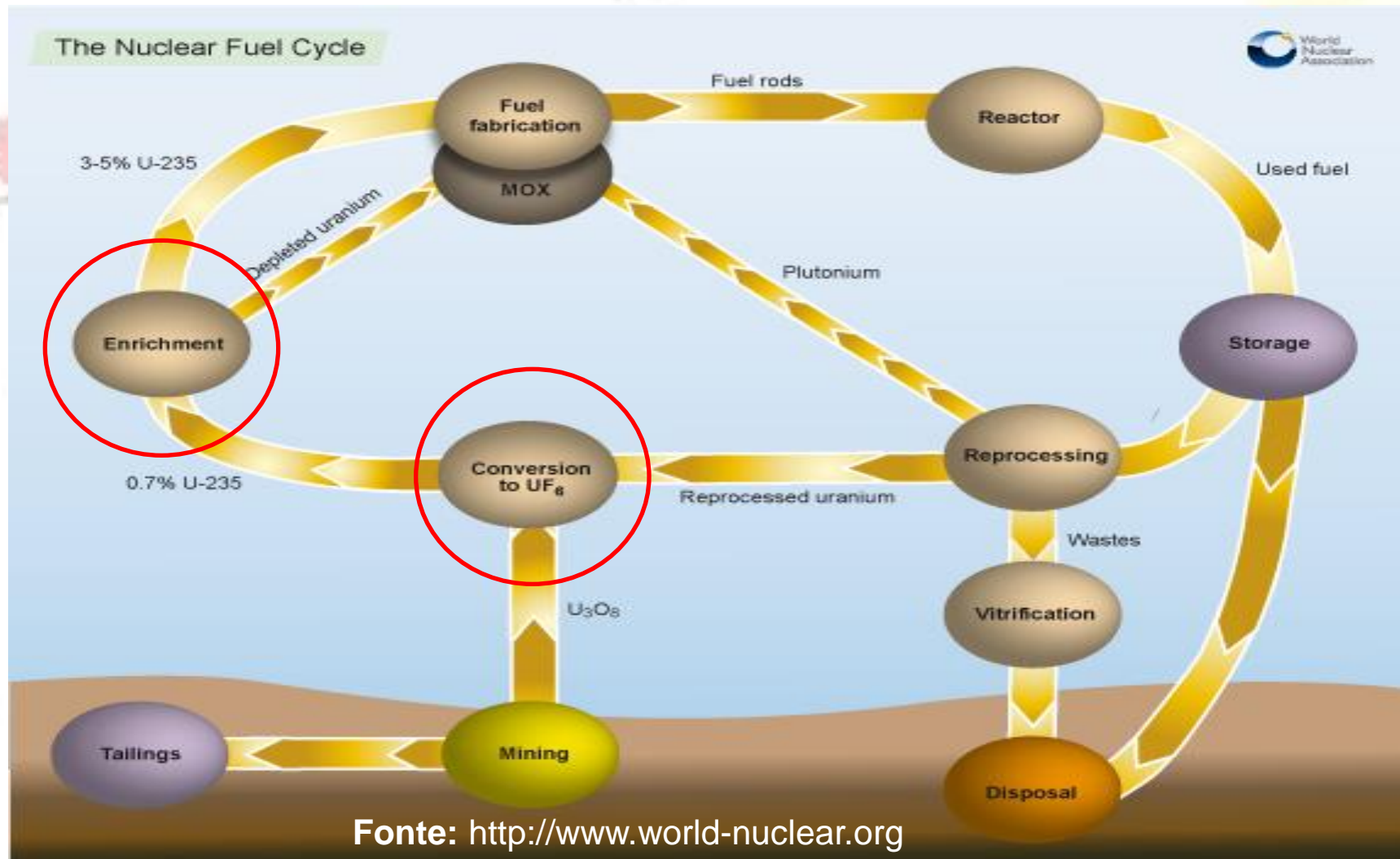
- minérios ricos em urânio natural (por exemplo no planalto do Colorado): $\sim 0.35\%$
- surge na maioria dos solos em concentrações muito baixas: $< 0.03\%$
- mineração a céu aberto (problemas de dispersão de partículas contendo materiais radioactivos)
- mineração a profundidades moderadas (necessidade de cuidados especiais de ventilação das galerias)

Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Separação:

- na própria mina ou em instalações anexas (para processamento de minério proveniente de um conjunto de minas próximas)
- técnicas tradicionais da indústria mineira (trituração e separação gravítica)
- depois da separação é produzido um concentrado com cerca de 80% de óxido de urânio (yellowcake)
- o restante material (taillings), embora menos rico em urânio, levanta problemas (dispersão de partículas)

Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear



Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Enriquecimento do urânio:

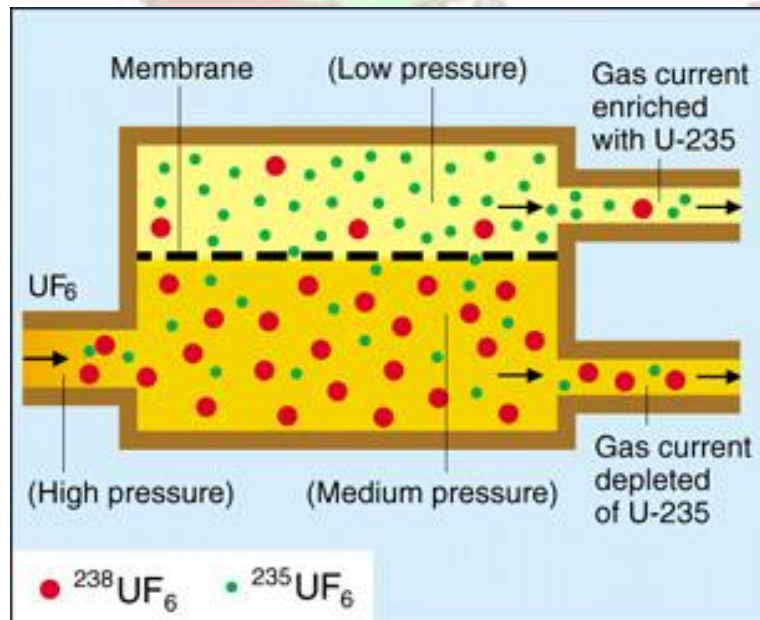
uma vez que o urânio natural contém apenas 0.7% do isótopo ^{235}U , é necessário fazer o denominado enriquecimento do urânio, o que significa aumentar a concentração de ^{235}U para valores entre 3,5% e 5%.

- este processo pode ser feito através de dois métodos: difusão ou centrifugação (em fase gasosa)
- o gás utilizado para esse efeito é o hexafluoreto de urânio - UF_6 (sólido à temperatura ambiente)

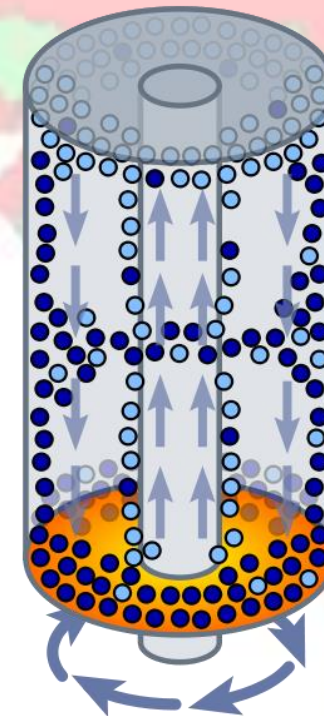
Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Enriquecimento do urânio:

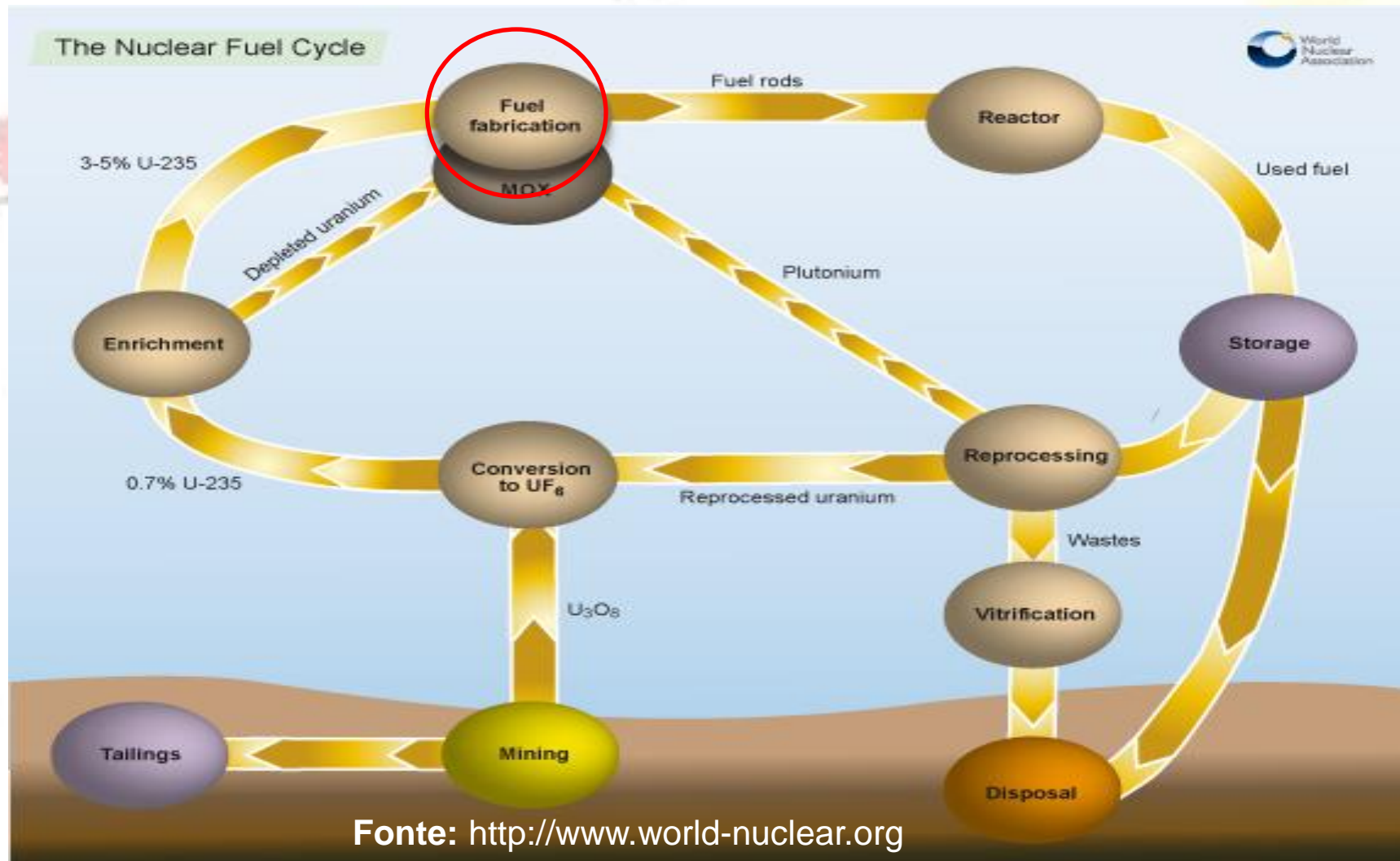
Difusão:



Centrifugação:



Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear



Fonte: <http://www.world-nuclear.org>

Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Produção do “combustível”:

- o óxido de urânio enriquecido é comprimido e sinterizado a alta temperatura ($\sim 1400^{\circ}\text{C}$);
- seguidamente é encapsulado em tubos metálicos para fabricar as barras de combustível;
- estas barras são depois montadas em grupos com a geometria apropriada para inserção nos núcleos dos reactores.

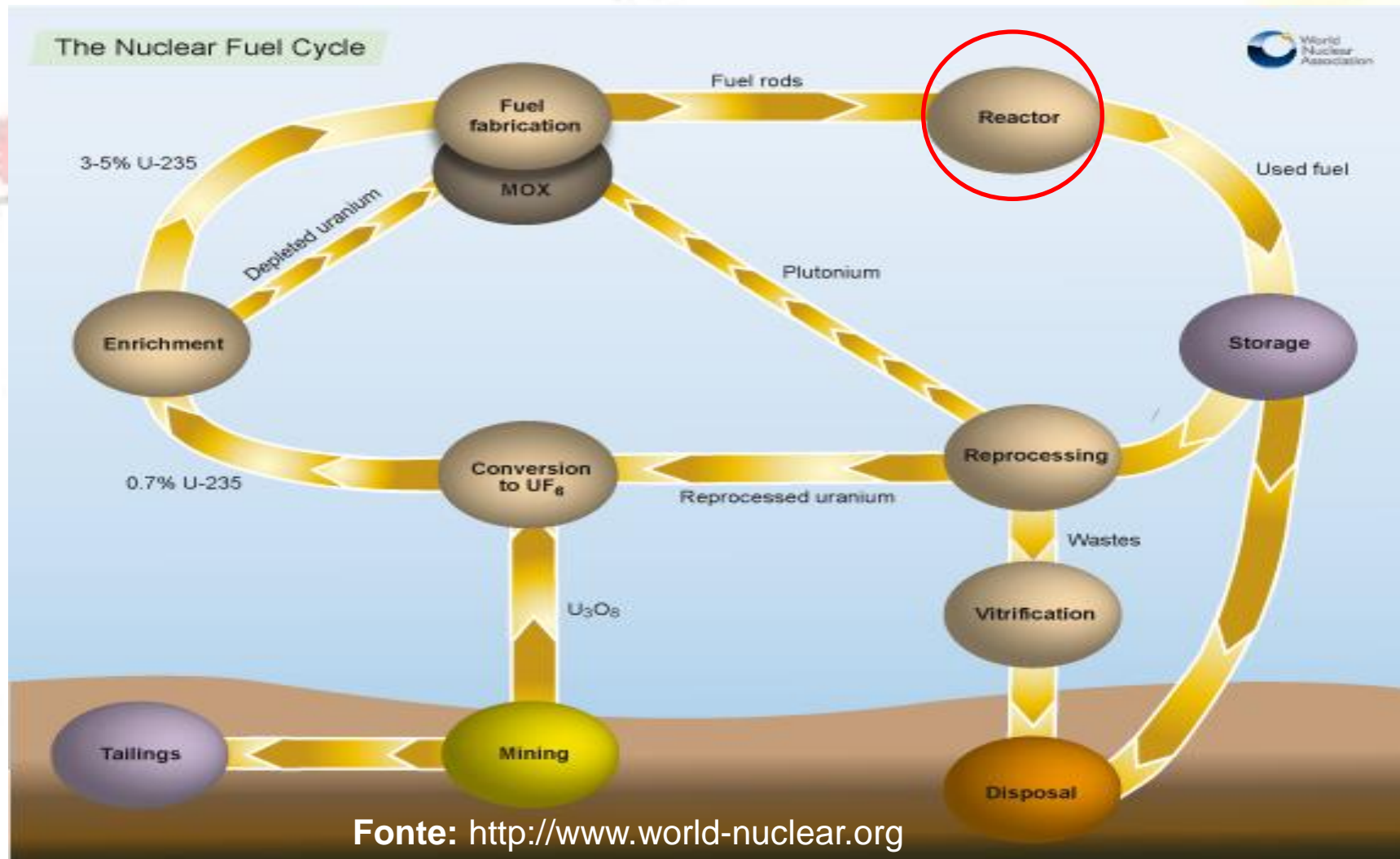
Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Produção do “combustível”:

Em todo este processo, é muito importante um controlo muito apertado das dimensões das barras e da geometria da sua associação para evitar que se atinja a massa crítica.

Este problema é tanto mais grave quanto maior for o enriquecimento previamente efectuado.

Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear



Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Operação do reactor:

O tempo de vida do “combustível” nuclear depende do nível de enriquecimento do urânio com que o reactor opera (é tanto maior quanto mais enriquecido for), podendo variar entre os 12 e os 24 meses.

Na prática, as barras de combustível acabam por ter que ser substituídas por causa do enfraquecimento do encapsulamento, e pelo aumento gradual da concentração dos produtos de cisão no seu interior.

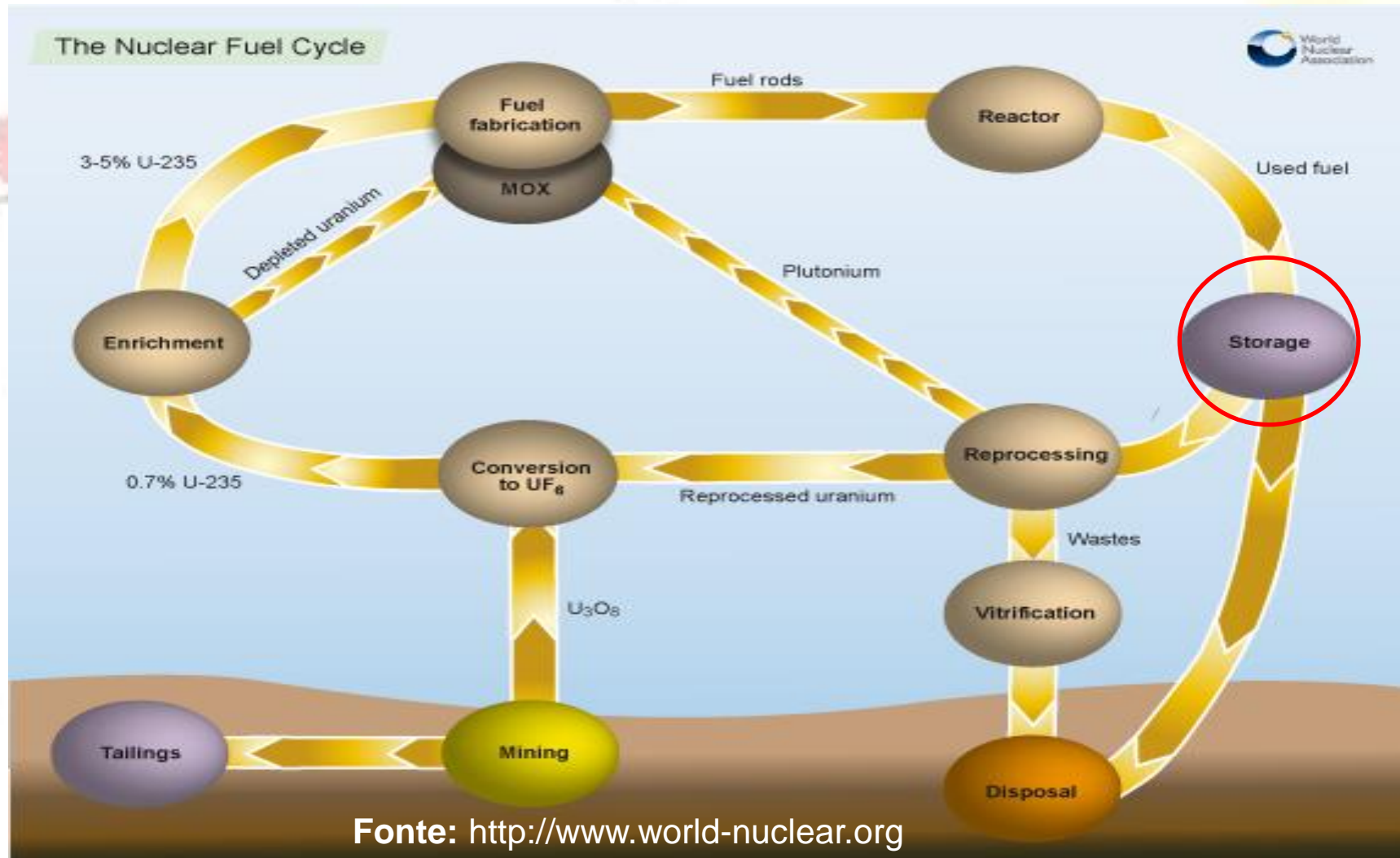
Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

O “combustível” utilizado:

Depois de retiradas do núcleo do reactor as barras de combustível libertam quantidades apreciáveis de radiação (proveniente dos fragmentos de cisão) e também de calor. Tanto uma como a outra irão decair no tempo (a radiação muito mais lentamente).

São depositadas em instalações próximas dos reactores. A absorção da radiação e do calor é feita por água.

Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear



Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Ordens de grandeza associadas ao funcionamento anual de um gerador de 1000MW:

60 000 toneladas de mineral com 0,35% de Urânio

230 toneladas de concentrado de óxido de urânio
(aproximadamente 195 toneladas de urânio)

288 toneladas de UF_6 mineral com 0,35% de Urânio

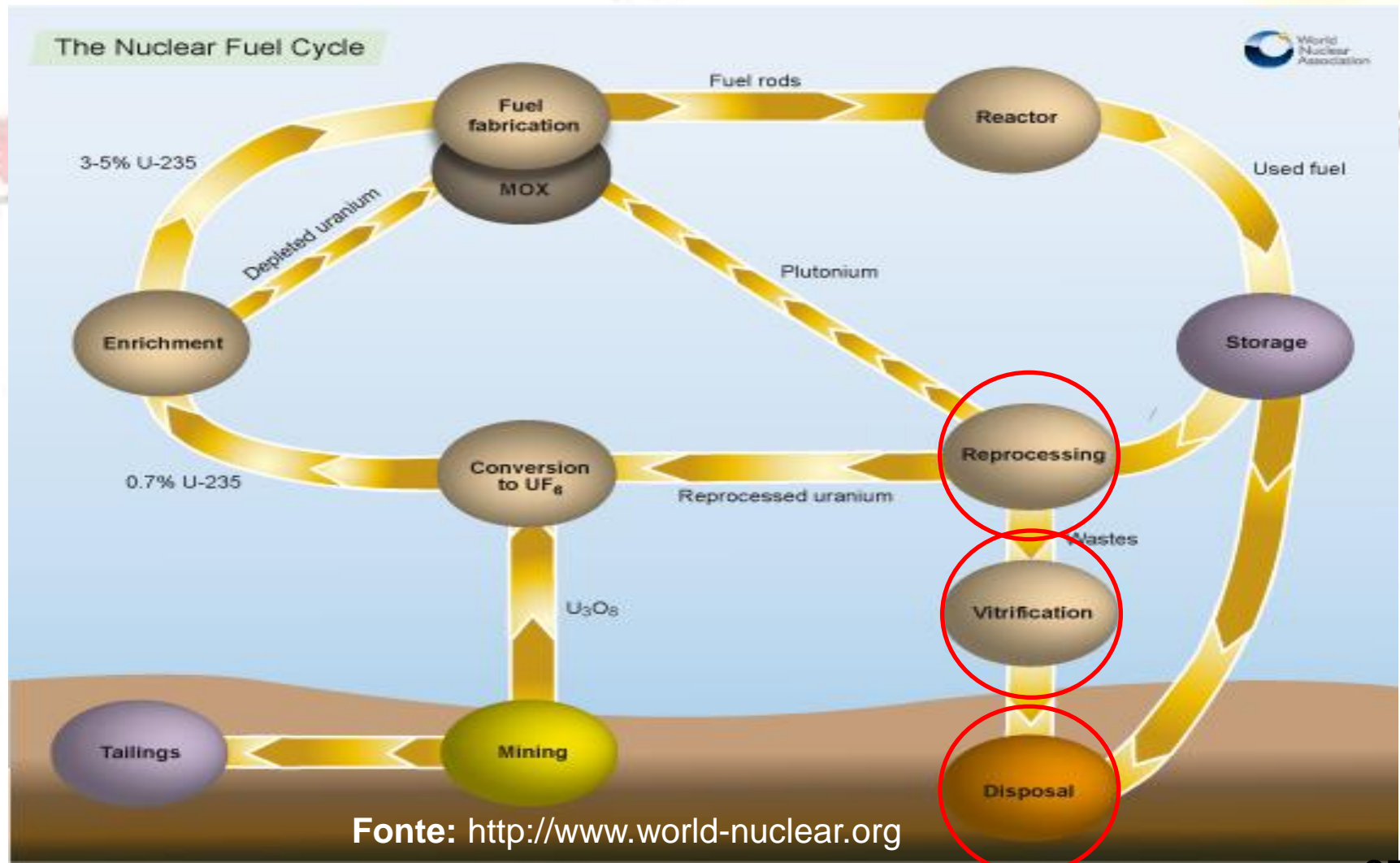
35 toneladas de UF_6 enriquecido

27 toneladas de óxido de urânio enriquecido

8.64 TWh (admitindo que o reactor é sempre operado na máxima potência)

27 toneladas de “lixo radioactivo” perigoso

Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear



Energia nuclear: o ciclo do combustível nuclear

Devemos ainda dizer, em verdade, que o resto do ciclo do combustível nuclear é, ainda hoje, aproximadamente ficção científica...

... ou pelo menos seguramente uma ficção económica!

Energia nuclear de cisão: conclusão

São, no fundo, estas as razões do insucesso do sonho nuclear de Hubbert

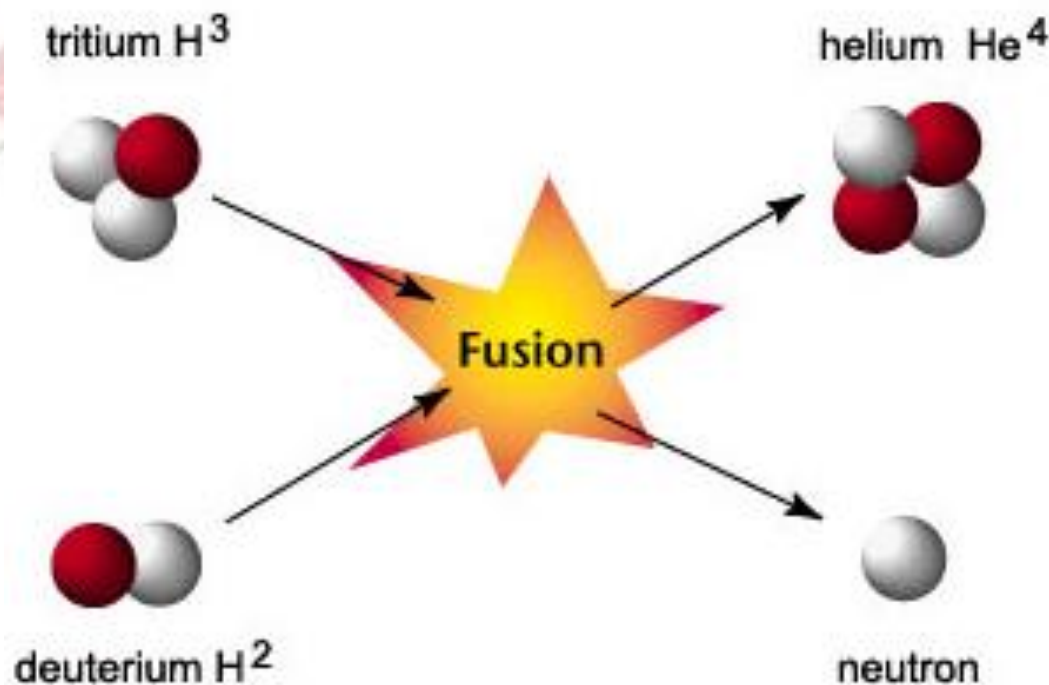
50 anos depois, não conseguimos verdadeiramente resolver as questões relevantes que ele próprio se encarregou de levantar e evitar portanto a inviabilidade económica (e energética) decorrente da utilização exclusiva do ^{235}U .

Energia nuclear de cisão: conclusão

São, no fundo, estas as razões do insucesso do sonho nuclear de Hubbert

A verdade é que em nenhum sítio do mundo existe uma única companhia privada (ou associação de companhias) que assuma sozinha, ou seja, sem utilizar massivamente recursos públicos, o risco económico associado à produção de electricidade pela via da cisão nuclear.

Energia nuclear: a fusão nuclear



Enquanto que na cisão nuclear um núcleo pesado se fragmenta libertando energia, na fusão nuclear dois núcleos leves juntam-se libertando igualmente energia.



Energia nuclear: a fusão nuclear

O grande problema é que esta reacção ocorre a temperaturas equivalentes da ordem de 40×10^6 K, sendo, portanto, muito difícil de controlar.

Mesmo admitindo que alguma vez seremos capazes de controlar o processo de fusão nuclear para a produção de energia, estamos suficientemente longe disso para podermos acreditar que essa será a solução que nos irá permitir rapidamente substituir os combustíveis fósseis!