



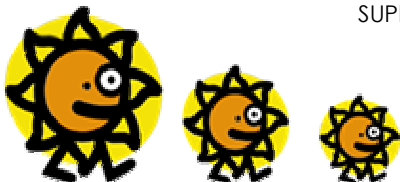
# ENERGIA NUCLEAR

ЭНЕРГИЯ ЯДРОВ

PARA ENTENDER COMO ESTA ENERGIA TÊM UM PAPEL TÃO IMPORTANTE HOJE, DEVEMOS NOS REMETER AO PASSADO... E MAIS, TEMOS QUE COMPREENDER NOSSO ASTRO MAIS IMPORTANTE, O SOL.

## NO SÉCULO XIX ...

OS CIENTISTAS ACREDITAVAM QUE O SOL OBTINHA SEU SUPRIMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE UM LENTO MAS CONTÍNUO ENCOLHIMENTO (QUEIMA) DE SEU CORPO GIGANTESCO.



DESTA FORMA, O SOL TERIA APENAS 20 MILHÕES DE ANOS...  
... A VIDA NA TERRA COMEÇA ANTES DISSO!!!

MAS...



## O PROBLEMA PIRAVA NO AR ...

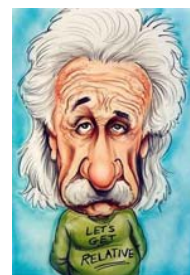
... EM 1896, HENRI BEQUEREL ANUNCIOU A DESCOBERTA DA RADIOATIVIDADE (emissão de partículas alfa do elemento Rádío). FORNECENDO A PRIMEIRA PISTA PARA A IMENSA ENERGIA DO SOL.

10 ANOS DEPOIS ...

**SURGE UMA NOVA EXPLICAÇÃO.**



**MATÉRIA** E **ENERGIA**  
PODEM SER ... *CONVERTIDAS* ...  
UMA NA OUTRA.



## O CONTRASTE ...

SE VOCÊ QUEIMAR 1,89 g DE GÁS HIDROGÊNIO, HAVERÁ ENERGIA SUFICIENTE PARA MANTER UMA LÂMPADA DE CEM WATTS ACESA POR 40 MINUTOS.



MAS, SE PUDERMOS TRANSFORMAR TODA A MASSA DESTES ÁTOMOS EM ENERGIA, A LÂMPADA PODERIA PERMANECER ACESA DURANTE 56 MIL ANOS!!!



## A FUSÃO NUCLEAR!!!

### VOLTANDO AO SOL....

OS CIENTISTAS COMPREENDERAM QUE O SOL ESTAVA PRODUZINDO ENERGIA POR FUSÃO DE SUA MASSA PROVOCADA POR SUA TEMPERATURA INTERNA COLOSSAL...



... ou seja, com 4 gramas de hidrogênio se produz 2 gramas de hélio e mais 2 gramas que são transformadas em energia ( $E = m.c^2$ ).

DESTA FORMA, A VIDA DO SOL É DE 20 BILHÕES DE ANOS!!! O QUE FAZ DELE UM SENHOR DE MEIA-IDADE COM 10 BILHÕES DE ANOS DE VIDA, 73 % DE HIDROGÊNIO E 26 % DE HÉLIO.

LIBERAR ENERGIA AQUI NA TERRA TAL COMO O SOL FAZIA PARECIA SER UMA TAREFA MUITO ÁRDUA, ATÉ **IMPOSSÍVEL**. ASSIM, OS CIENTISTAS DO INÍCIO DO SÉCULO XX ESTAVAM CERTOS DE UTILIZAR A ENORME ENERGIA PREVISTA PELA FÓRMULA DE EINSTEIN ATRAVÉS DE OUTRO PROCESSO QUE PODE OCORRER NO NÚCLEO ...



### A FISSÃO NUCLEAR (QUEBRA DO NÚCLEO).

MAS ANTES DEVIAMOS VENCER A ENERGIA QUE MANTÉM O NÚCLEO COESO...

A SAÍDA...

... O NÊUTRON

- PODE SER OBTIDO DE ELEMENTOS RADIOATIVOS...
- É DESACELERADO POR SUBSTÂNCIAS RICAS EM HIDROGÊNIO, COMO A ÁGUA.
- DESACELERADOS A PROBABILIDADE DE CAPTURA PELO NÚCLEO ATÔMICO ALVO AUMENTA.

POR FIM, COM MAIS UM NÊUTRON, A FORÇA NATURAL DE REPULSÃO ENTRE OS PRÓTONS É MAIOR QUE A QUE MANTÉM O NÚCLEO ALVO UNIDO...

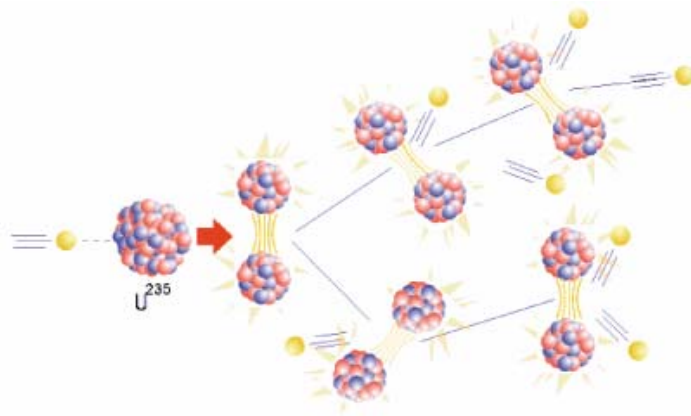
... É A FISSÃO.



*Acredito firmemente que, antes de se passarem muitos séculos, a ciência será a senhora do homem. As máquinas que ela terá inventado estarão além de sua capacidade de controle. Algum dia a ciência há de ter a existência da humanidade em seu poder, e a raça humana cometerá suicídio explodindo o mundo.*

HENRY ADAMS (1862)

TANTO O URÂNIO-235 COMO O PLUTÔNIO-239 APRESENTAM AS QUALIDADES ADEQUADAS PARA SEREM NÚCLEOS ALVOSE AINDA A DE GERAR O NÊUTRON NECESSÁRIO PARA INICIAR E PROPAGAR A FISSÃO ... PROCESSO CONHECIDO COMO REAÇÃO EM CADEIA.



... MAS PARA QUE NÃO ACABE LOGO APÓS O INÍCIO E SEJA "CONSTRUTIVA", É NECESSÁRIA UMA CONCENTRAÇÃO CRÍTICA DO ELEMENTO RADIOATIVO.



Tanto o  $^{238}\text{U}$  como o  $^{235}\text{U}$  podem sofrer fissão nuclear, contudo, o Urânio-238 só tem possibilidade de sofrer fissão por nêutrons de **elevada energia cinética** (os nêutrons rápidos). Já o Urânio-235 pode ser fissionado por nêutrons de **qualquer energia cinética**, preferencialmente os de baixa energia, denominados nêutrons térmicos ou lentos. Embora, o  $^{238}\text{U}$  não sofra fissão este processo permite sua conversão em  $^{239}\text{Pu}$ .

... ASSIM, O ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO COMO A OBTENÇÃO DO PLUTÔNIO SÃO ÁREAS CRUCIAIS ATUALMENTE.

## ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO ...

A CONCENTRAÇÃO DE URÂNIO-235 NA NATUREZA É **MUITO BAIXA**, PARA CADA 1000 ÁTOMOS DE URÂNIO, APENAS 7 SÃO DE URÂNIO-235 E O RESTANTE DE URÂNIO-238. O PROCESSO FÍSICO QUE RETIRA O URÂNIO-238 DO URÂNIO NATURAL, AUMENTANDO EM CONSEQUÊNCIA, A CONCENTRAÇÃO DE URÂNIO-235, É CONHECIDO COMO **ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO**.



SE O GRAU DE ENRIQUECIMENTO FOR **MUITO ALTO** (ACIMA DE 90 %) ISTO É, HOVER QUASE SÓ URÂNIO-235, PODE OCORRER UMA REAÇÃO EM CADEIA MUITO RÁPIDA, DE DIFÍCIL CONTROLE, MESMO PARA UMA QUANTIDADE RELATIVAMENTE PEQUENA DE URÂNIO. PASSANDO A SE CONSTITUIR ATÉ EM UMA EXPLOSÃO: É A **BOMBA ATÔMICA!**



FORAM DESENVOLVIDOS VÁRIOS PROCESSOS DE ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO, ENTRE ELES O DA **DIFUSÃO GASOSA** E **ULTRACENTRIFUGAÇÃO** EM ESCALA INDUSTRIAL, O **JATO CENTRÍFUGO** (EM ESCALA DE DEMONSTRAÇÃO) E O **PROCESSO A LASER** (EM FASE DE PESQUISA).

POR SE TRATAREM DE TECNOLOGIAS SOFISTICADAS, OS PAÍSES QUE OS DETÊM OFERECEM IMPECÍLIOS PARA OS OUTROS.

DE UM MODO GERAL, O **PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO** OCORRE COMO SEGUE ...



1

O urânio é extraído da natureza



2

Adiciona-se flúor ao metal formando o gás **hexafluoreto de urânio** ( $UF_6$ )

3



O  $^{238}UF_6$  e o  $^{235}UF_6$  são separados, os métodos mais comuns são a **Difusão Gasosa** e a **Ultracentrifugação**.

O Urânio enriquecido é convertido em um pó de **dióxido de urânio** ( $UO_2$ ) que é prensado em pastilhas.

4



As pastilhas cilíndricas com cerca de 1 cm podem ser utilizadas para gerar energia. Seu uso vai depender do grau de enriquecimento: 3-5 % geram energia elétrica, 20 % movem um submarino nuclear e 95 % produzem uma bomba atômica.



## DIFUSÃO GASOSA

ESTE PROCESSO É BASEADO NA **EFUSÃO MOLECULAR** ATRAVÉS DE MINÚSCULOS POROS NO SENTIDO DE MENOR PRESSÃO. FOI O PRINCIPAL MÉTODO UTILIZADO PARA ENRIQUECER O URÂNIO QUE FOI EMPREGADO NAS PRIMEIRAS BOMBAS ATÔMICAS EM 1945. BASEIA-SE NA **LEI DE EFUSÃO DE GRAHAM**, A VELOCIDADE DE EFUSÃO É INVERSAMENTE PROPORCIONAL A RAIZ QUADRADA DA SUA MASSA MOLAR.

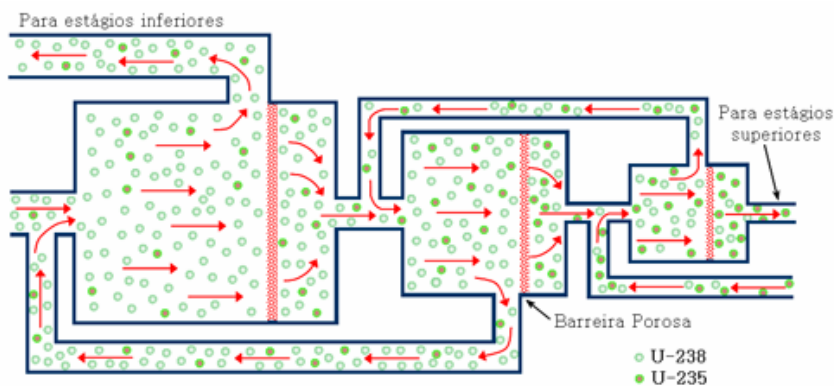
Para o urânio a relação entre o isótopo mais leve,  $^{235}\text{U}$  e o isótopo mais pesado,  $^{238}\text{U}$  pode ser expressa como pode ser observado abaixo ...

$$\frac{\text{Velocidade de efusão, } ^{235}\text{UF}_6}{\text{Velocidade de efusão, } ^{238}\text{UF}_6} = \sqrt{\frac{MM, ^{238}\text{UF}_6}{MM, ^{235}\text{UF}_6}} = \sqrt{\frac{352,041}{349,034}} = 1,00430$$

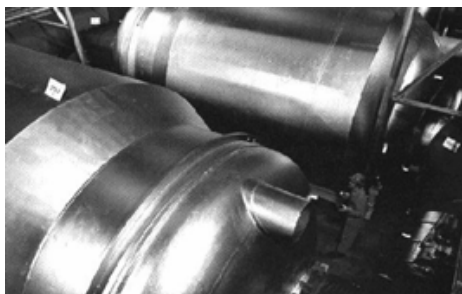
A PEQUENA DIFERENÇA ENTRE AS VELOCIDADES DE EFUSÃO DO  $^{235}\text{UF}_6$  E  $^{238}\text{UF}_6$ , NOS DIZ QUE SÃO NECESSÁRIAS MUITAS BARREIRAS DE EFUSÃO (ESTÁGIOS) PARA O ENRIQUECIMENTO.



AINDA HOJE, O PRINCIPAL PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO DE URÂNIO EMPREGADO PELOS ESTADOS UNIDOS É A DIFUSÃO GASOSA. EM 1945, NO COMPLEXO DE **OAK RIDGE (K-25)** FOI OBTIDO O URÂNIO-235 ATRAVÉS DE **3122** ESTÁGIOS. ABAIXO SE PODE VER UM ESQUEMA DE 3 DESTES ESTÁGIOS.



OS DIFUSORES ERAM ENORMES, E OS SISTEMAS ALTAMENTE RESISTENTES DEVIDO A ALTA CORROSIVIDADE DO  $\text{UF}_6$ , ACREDITASSE ATUALMENTE QUE AS BARREIRAS ERAM FEITAS DE NÍQUEL, FORMANDO **5.174.000** BARREIRAS INDIVIDUAIS QUE TINHAM UM COMPRIMENTO TOTAL DE **10.715** Km !!!



## ULTRACENTRIFUGAÇÃO

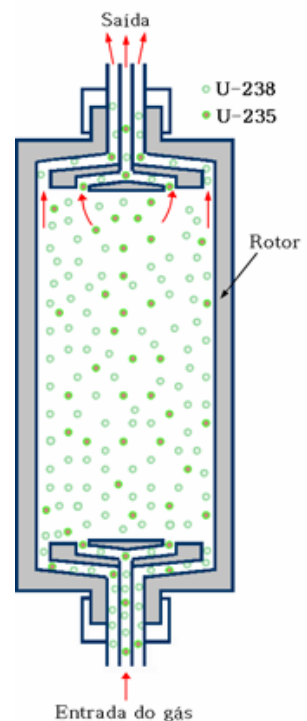


EM TERMOS SIMPLES, A ULTRACENTRIFUGA SEGUE O MESMO PRINCÍPIO DAS CENTRÍFUGAS DOMÉSTICAS USADAS PARA SEPARAR ALIMENTOS: PROPICIA A SEPARAÇÃO DO MATERIAL DE **MAIOR PESO**, QUE É JOGADO PARA A PAREDE DO RECIPIENTE, DAQUELE DE **MENOR PESO**, QUE FICA MAIS CONCENTRADO NO CENTRO. NO PROCESSO DE ENRIQUECIMENTO DO URÂNIO-235 ACONTECE ALGO SEMELHANTE.

UMA DAS GRANDES VANTAGENS DESTA TÉCNICA É QUE ENVOLVE UM **CUSTO** CERCA DE **25 VEZES MENOR** EM RELAÇÃO A DIFUSÃO GASOSA.

DENTRO DA ULTRACENTRÍFUGA, GIRANDO A **70 MIL ROTAÇÕES POR MINUTO**, O ISÓTOPO DE **URÂNIO-235** TENDE A CONCENTRAR-SE MAIS NO **CENTRO**, E O **ISÓTOPO 238** FICA MAIS PRÓXIMO À **PAREDE** DO CILINDRO. DUAS TUBULAÇÕES DE SAÍDA RECOLHEM O URÂNIO, SENDO QUE NUMA DELAS SEGUIRÁ O URÂNIO QUE TIVER MAIOR CONCENTRAÇÃO DE ISÓTOPOS 235 (URÂNIO ENRIQUECIDO), E NA OUTRA, O QUE TIVER MAIS DO ISÓTOPO 238 (CHAMADO DE SUBPRODUTO).

DESSA CENTRÍFUGA O URÂNIO É REPASSADO PARA OUTRA CENTRÍFUGA E ASSIM POR DIANTE, NUM **PROCESSO EM CASCATA**. NO FINAL DESSA CASCATA É RECOLHIDO O URÂNIO COM MAIOR NÍVEL DE ENRIQUECIMENTO, ENQUANTO QUE NA BASE PERMANECE O SUBPRODUTO.



O BRASIL VÊM DESENVOLVENDO ESTA TÉCNICA DESDE O FINAL DA DÉCADA DE 70, A PRIMEIRA ULTRACENTRÍFUGA FOI CONSTRUÍDA EM 1982 E A PRIMEIRA CASCATA 6 ANOS DEPOIS. AS ULTRACENTRÍFUGAS BRASILEIRAS EMPREGAM UM SISTEMA DE ROTAÇÃO DIFERENTE DE OUTROS PAÍSES, QUE UTILIZAM UM SISTEMA SUSTENTADO POR MANCAL MECÂNICO, ENQUANTO O ROTOR DESENVOLVIDO NO BRASIL GIRA LEVITANDO POR EFEITO ELETROMAGNÉTICO, O QUE REDUZ O ATRITO E, EM CONSEQÜÊNCIA, OS DESGASTES E A MANUTENÇÃO.

## CONTROLE DA RADIAÇÃO DE FISSÃO NUCLEAR EM CADEIA

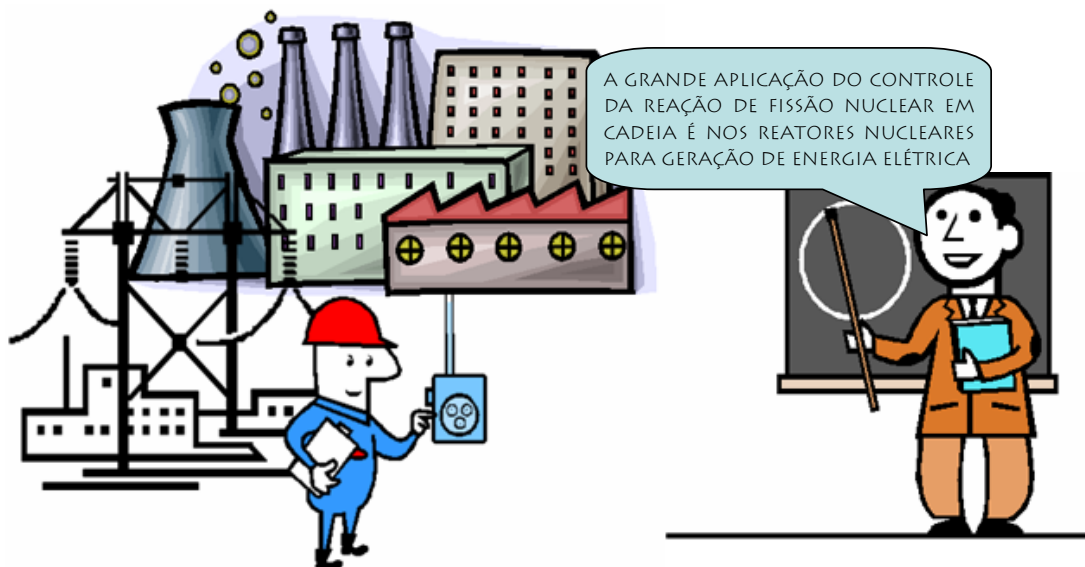
DESCOBERTA A GRANDE FONTE DE ENERGIA NO NÚCLEO DOS ÁTOMOS E A FORMA DE APROVEITA-LÁ, RESTAVA SABER **COMO CONTROLAR A REAÇÃO EM CADEIA**, QUE NORMALMENTE NÃO PARARIA, ATÉ CONSUMIR QUASE TODO O MATERIAL FÍSSIL, NO CASO O URÂNIO-235.

COMO FOI VISTO, A FISSÃO DE CADA ÁTOMO DE URÂNIO-235 RESULTA EM 2 ÁTOMOS MENORES E DOIS OUTROS NÊUTRONS, QUE IRÃO FISSIONAR OUTROS TANTOS ÁTOMOS DE URÂNIO-235.



A FORMA DE CONTROLAR A REAÇÃO EM CADEIA CONSISTE NA ELIMINAÇÃO DO AGENTE CAUSADOR DA FISSÃO - **O NÊUTRON** - NÃO HAVENDO NÊUTRONS DISPONÍVEIS, NÃO PODE HAVER REAÇÃO DE FISSÃO EM CADEIA.

ALGUNS ELEMENTOS QUÍMICOS COMO O **BORO** NA FORMA DE ÁCIDO BÓRICO, E O **CÁDMIO**, EM BARRAS METÁLICAS, TÊM A PROPRIEDADE DE ABSORVER NÊUTRONS, PORQUE SEUS NÚCLEOS PODEM CONTER AINDA UM NÚMERO DE NÊUTRONS SUPERIOR AO EXISTENTE EM SEU ESTADO NATURAL, RESULTANDO NA FORMAÇÃO DE ISÓTOPOS DE BORO E DE CÁDMIO.



## O REATOR NUCLEAR

SIMPLIFICADAMENTE, UM REATOR NUCLEAR É UM EQUIPAMENTO ONDE SE PROCESSA UMA **REAÇÃO DE FISSÃO NUCLEAR**, ASSIM COMO UM REATOR QUÍMICO É UM EQUIPAMENTO ONDE SE PROCESSA UMA REAÇÃO QUÍMICA.

PARA GERAR ENERGIA ELÉTRICA O REATOR NUCLEAR É UMA CENTRAL, ONDE A FONTE DE CALOR É O URÂNIO-235, EM VEZ DE ÓLEO COMBUSTÍVEL OU DE CARVÃO, E PORTANTO É DENOMINADO COMO CENTRAL TÉRMICA NUCLEAR.

### O CONTRASTE ...



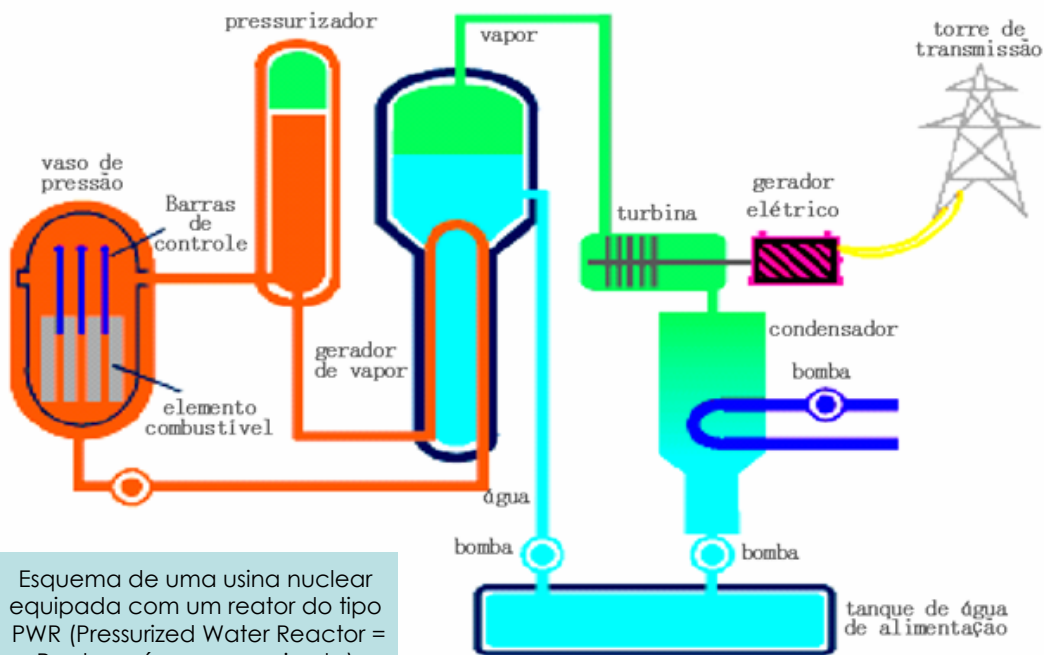
1 kg de **lenha** produz cerca de 1 Kwh de eletricidade;

1 kg de **carvão** produz cerca de 3 Kwh de eletricidade;

1 kg de **óleo** produz cerca de 4 Kwh de eletricidade;

1 kg de **urânio** natural produz cerca de 50.000 Kwh de eletricidade;

1 kg de **plutônio** produz cerca de 6.000.000 de Kwh de eletricidade.



Esquema de uma usina nuclear equipada com um reator do tipo PWR (Pressurized Water Reactor = Reator a água pressurizada)

ANGRA I e II

## DIFERENÇA ENTRE REATOR E BOMBA ATÔMICA

A BOMBA É FEITA PARA SER POSSÍVEL EXPLODIR, OU SEJA, A REAÇÃO EM CADEIA DEVE SER RÁPIDA E A QUANTIDADE DE URÂNIO MUITO CONCENTRADO EM URÂNIO-235 (Quer dizer, enriquecido acima de 90%). ALÉM DISSO, TODA A MASSA DE URÂNIO DEVE FICAR JUNTA, CASO CONTRÁRIO NÃO OCORRE A REAÇÃO EM CADEIA DE FORMA EXPLOSIVA.



Na bomba de Hiroshima, **duas porções subcríticas** de urânio separadas no compartimento interno da bomba colidiam após uma explosão química de TNT, gerando uma **massa supercrítica**, isto é, a quantidade necessária para que a bomba explodisse.

UM REATOR NUCLEAR, PARA GERAR ENERGIA ELÉTRICA, É CONSTRUÍDO DE FORMA A SER IMPOSSÍVEL EXPLODIR COMO UMA BOMBA ATÔMICA. PRIMEIRO PORQUE A CONCENTRAÇÃO DE URÂNIO-235 É MUITO BAIXA (cerca de 3,2%), NÃO PERMITINDO QUE A REAÇÃO EM CADEIA SE PROCESSE COM RAPIDEZ SUFICIENTE PARA SE TRANSFORMAR EM EXPLOSÃO. SEGUNDO, PORQUE DENTRO DO REATOR NUCLEAR EXISTEM MATERIAIS ABSORVEDORES DE NÊUTRONS, QUE CONTROLAM E ATÉ ACABAM COM A REAÇÃO EM CADEIA.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS



- BRODY, R. L. e BRODY, D. E. *As Sete Maiores Descobertas Científicas da História*. São Paulo: Companhia das Letras, 1999.
- CARDOSO, E. M. *Apostila Educativa - Comissão Nacional de Energia Nuclear*, <http://www.cnen.gov.br>.
- PROGRAMA NUCLEAR DA MARINHA DO BRASIL, <http://www.mar.mil.br>.
- UNITED STATES ENRICHMENT CORP., <http://www.usec.com>.
- DEPARTMENT OF ENERGY OF THE UNITED STATES, <http://www.doe.gov>.
- QMC WEB, <http://quark.qmc.ufsc.br/qmcweb>.

## CRÉDITOS

HAIDI FIEDLER

TIAGO A. S. BRANDÃO

LABORATÓRIO DE CATÁLISE E FENÔMENOS INTERFACIAIS  
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA  
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
FLORIANÓPOLIS – SC – BRASIL



JUNHO, 2004

