

# ASPECTOS INDUSTRIAIS DA ENERGIA NUCLEAR

ANTÓNIO GOUVÊA PORTELA

Engenheiro

COMPANHIA UNIÃO FABRIL

*A Primeira Reunião dos Técnicos Portugueses de Energia Nuclear realizada nos dias 20, 21 e 22 de Janeiro p. p. proporcionou, a vinte e cinco núcleos de estudo e investigação representados por cerca de duzentos participantes, uma oportunidade para apresentação das actividades já desenvolvidas e perspectivas de desenvolvimento futuro.*

*A índole dos trabalhos apresentados foi na sua grande maioria de carácter informativo em harmonia com a finalidade a que se propunha esta Reunião. Este facto, permitiu ao especialista obter uma ideia de conjunto dos múltiplos problemas que neste campo interessam ao nosso país verificando a importância da tarefa específica que lhe cabe e seu enquadramento no todo e ao dirigente, trouxe a apresentação e comparação de programas de trabalho em curso ou projectados de incalculável valor nesta fase inicial.*

*A Junta de Energia Nuclear, organizadora da Reunião alcançou sem dúvida os objectivos que pretendia, obtendo para além dos relatórios circunstanciados de laboratórios, centros de investigação e indústria, a certeza do muito interesse que estas entidades põem nos problemas de energia nuclear. A própria Junta, informando pormenorizadamente sobre a actividade já desenvolvida na prospecção dos jazigos de minério radioactivos e na construção e montagem do Laboratório de Física e Engenharia Nucleares, completou um quadro de acção estimulante para o desenvolvimento rápido e seguro da energia nuclear em Portugal.*

*«Electricidade» agradece à Junta de Energia Nuclear e aos autores das comunicações Eng.<sup>o</sup> António Gouvêa Portela (CUF), Fernando Soares David e António Braga Couto Soares (HICA) e Fernando Ivo Gonçalves (RNC) a autorização concedida para publicar nas suas colunas os trabalhos referentes à produção de energia eléctrica por via nuclear no nosso País.*

## A. — INTRODUÇÃO

Um novo domínio do conhecimento humano foi ocupado ao serem estudadas as reacções nucleares e de seguida dominada a técnica de as provocar e manter.

Quando novos conhecimentos são adquiridos, a sua propagação e difusão provoca uma evolução em toda a actividade humana. A indústria, profundamente vinculada na sociedade moderna, não escapa a esta regra, e a influência desses novos conhecimentos nos países mais evoluídos, permite já observar profundas alterações.

A indústria portuguesa será também arrastada por esse movimento e parece de interesse tentar prever e avaliar antecipadamente essa transformação, para que a indústria venha a desempenhar a função desejada com a oportunidade requerida.

A indústria está, porém, intimamente ligada ao conceito de *fábrica*, facilidade material onde é exercida a sua actividade. Será, pois, mister dispôr das fábricas na ocasião própria. Infelizmente entre o momento em que se manifesta ou se reconhece o interesse de possuir a fábrica e aquele em que esta ferramenta de trabalho está efectivamente em condições de operar, medeia largo tempo (alguns anos),

destinado à preparação do pessoal, aquisição de técnica, construção e arranque.

Este compasso de espera, confere um interesse dobrado aos estudos e previsões que possam ser hoje feitos, porque antecipa no tempo a discussão de problemas técnicos e económicos que, neste momento, não se revelam ainda como concretos ou prementes.

O tempo ganho no exame e discussão, permitirá eventualmente montar as indústrias novas e modificar as indústrias actuais, de forma que o País venha a dispôr das facilidades industriais que o advento da energia nuclear irá impôr a seu tempo.

## *Aspectos Industriais da Energia Nuclear*

A energia nuclear apresenta os seguintes aspectos:

— *Como fonte de energia calorífica* (Capítulo B).

A energia nuclear é susceptível de ser libertada em grandes quantidades por meio de duas reacções nucleares típicas:

*Fissão* de certos núcleos pesados (Urânio 235, Urânio 233, etc.).

*Fusão* de núcleos leves (Deutério, Trítio, Lítio, etc.).

Quanto à primeira das reacções (fissão), está hoje inteiramente dominada a técnica do seu controle e são inúmeras as realizações práticas.

Na verdade o reactor nuclear já tem mais de uma década de existência e a sua generalização está limitada, fundamentalmente, por razões de ordem económica — preço da caloria gerada.

Como é sabido, a obtenção de energia eléctrica faz-se hoje por meio de ciclos termodinâmicos, isto é, por meio de turbinas a vapor e respectivos alternadores.

Tem havido tentativas para transformar directamente a energia cinética da fissão nuclear em energia eléctrica mas, até hoje, não houve qualquer êxito prático.

Quanto à fusão nuclear, o problema reside na dificuldade de controlar esta reacção.

A promessa que a fusão nuclear constitui, conduz à realização de esforços notáveis em vários centros de investigação e registam-se já progressos, à escala laboratorial, na provocação de reacções de fusão controladas.

A energia nuclear como fonte de calor e respectivas implicações industriais é tratada no capítulo B.

— *Como agente de reacções químicas* (Capítulo C).

As reacções nucleares constituem também uma fonte poderosa de partículas de massa muito variável animadas de velocidades que chegam a aproximar-se da velocidade da luz e que chocando com a matéria podem provocar reacções químicas.

Este aspecto não escapou ao exame pormenorizado dos investigadores e têm sido realizados, à escala laboratorial, ensaios para esclarecer fundamentalmente as reacções  $N+O_2$ , cross-linking de moléculas comprimidas, polimerização, etc.

Outro aspecto da interferência das partículas incidentes na promoção de reacções químicas, é a radiólise da água que constitui um problema importante nos reactores moderados ou arrefecidos por este fluido.

Procura-se ainda aproveitar a energia gerada nos reactores para promover toda uma série de reacções químicas que exigem altas temperaturas e quantidades apreciáveis de energia calorífica.

Em rigor esta matéria deveria ser tratada também no capítulo B; porém, prefere-se incluir no capítulo C, dado que o objectivo é também a promoção de uma reacção química.

## B. — ENERGIA NUCLEAR COMO FONTE DE CALOR

A energia calorífica resultante da fissão de 1 grama de  $U_{235}$  é 24 000 kWh que transformados em electricidade por meio de uma máquina térmica e respectivo gerador eléctrico correspondem a ~ 5 000 kWh.

A energia é libertada a uma temperatura que só está limitada superiormente pelos materiais de que é constituído o reactor. As possibilidades potenciais são enormes e justifica-se examinar:

- 1.º) se os reactores nucleares são adequados a fornecer energia vendável no país quando forem exauridos os recursos hidroeléctricos.
- 2.º) qual a participação que a indústria pode ter na construção desses reactores e indústrias derivadas ou complementares.

Para responder às duas questões postas fazem-se adiante considerações sobre:

- B.1. Quando se dará o esgotamento dos recursos hidroeléctricos em Portugal metropolitano e quais as necessidades nessa altura?
- B.2. Qual a forma de energia a recorrer (fusão nuclear, fissão, combustíveis fósseis)?
- B.3. Há indústrias conexas que interessa instalar, por exemplo: reprocessamento de combustível irradiado, fabricação de combustível, preparação de urânio, etc.
- B.4. Finalmente, definido um programa de realizações, quais as implicações nas indústrias manufactureiras, de modo que permitam a estas participar fortemente na montagem e construção desses reactores e indústrias conexas.

### B.1. DATA PROVÁVEL DO ESGOTAMENTO DOS RECURSOS HIDROELÉCTRICOS EM PORTUGAL

Não se deseja aqui entrar na polémica que hoje se trava a respeito do «trend» do desenvolvimento do consumo de energia eléctrica no País, bem como da avaliação dos recursos totais hidroeléctricos.

O objectivo é apenas tentar definir uma data e tudo o que adiante se conclui ou afirma terá de ser diferido ou antecipado na medida em que a data escolhida estiver errada.

- B.1.1. Recorre-se, para tanto, a métodos gráficos que são mais do que suficientes para definir um valor aproximado que se situa, como se verá, dentro de 15 anos, prazo suficientemente dilatado para que a tecnologia e o invento humano tenham realizado descobertas novas que fatalmente vêm modificar o condicionalismo do problema e daí a necessidade de rever as previsões obtidas por métodos mais rigorosos.

No gráfico referido foram marcadas:

- a curva *a* representando a produção de energia eléctrica até 1956 (1).
- a curva *b* representando a potência instalada também até 1956 (2).

A partir do ponto A (1956) foram marcadas as previsões (c) respectivamente feitas: no relatório 9,0

apresentado ao 2.º Congresso da Indústria Portuguesa (3), para o ano de 1964, e as previsões (d) avaliadas em Maio de 1956 pelo Conselho Superior de Obras Públicas, também para o ano de 1964 (4), e, ainda foi traçada a recta (e), simples prolongamento dos pontos correspondentes a 1956 e 1975.

Por outro lado, servimo-nos dos trabalhos do Eng.º MANZANARES apresentados ao 2.º Congresso dos Economistas (5), para definir, respectivamente, as duas horizontais:

- $12 \times 10^6$  MWh para a energia permanente da totalidade dos nossos recursos hidroeléctricos.
- $19 \times 10^6$  MWh para a energia total dos mesmos recursos.

A intersecção das três linhas extrapoladas com os dois «plafonds» referidos, define vários pontos que são as datas em que se esgotarão os nossos recursos hidroeléctricos de acordo com as hipóteses feitas.

Essas datas são arrumadas no quadro abaixo:

	$19 \times 10^6$ MWh	$19 \times 10^6$ MWh
Extrapolação da linha e) ....	~ 1970	~ 1973
Extrapolação da linha c) ....	~ 1975	~ 1980
Extrapolação da linha d) ....	~ 1977	~ 1986

Parece-nos prudente que sejam tomados em consideração apenas os números relativos ao «plafond» de  $12 \times 10^6$  MWh e, por isso, seria escolhido o ano de 1975 como a data alvo para a entrada em funcionamento das grandes centrais térmicas (eventualmente nucleares) em consequência do esgotamento dos nossos recursos hidroeléctricos.

As extrapolações efectuadas têm uma confirmação no trabalho do Sr. KARL MAYER do *Standford Research Institute* (6), onde se avalia, para a Europa e para o ano de 1975, um consumo total de  $2\,678 \times 10^6$  MWh.

Com efeito as previsões para o ano de 1960 são:

- para Portugal .....  $3 \times 10^6$  MWh (7)
- para a Europa (OECE)  $506 \times 10^6$  MWh (7) e (6)
- total da Europa .....  $938 \times 10^6$  MWh (6)

Admitindo que as taxas de crescimento são iguais em média para todos os países e em particular que Portugal não terá uma taxa de desenvolvimento inferior a essa taxa média, concluiremos que para 1975 os valores previstos seriam:

- Portugal.....  $8,6 \times 10^6$  MWh
- Europa (OECE) .....  $1440 \times 10^6$  MWh
- total da Europa .....  $2678 \times 10^6$  MWh

Porém, se entrarmos em linha de conta que se adoptou no trabalho de K. MAYER uma taxa de incremento para a Europa correspondente a um aumento de 1,35 num período de 5 anos, quando para Portugal se prevê um aumento de 2 em cada 6 anos, o que corresponde sensivelmente a 1,75 em cada quinquénio, conclui-se efectivamente que é muito provável que em 1975 se tenha atingido  $12 \times 10^6$  MWh.

Como a construção de uma central leva cerca de três anos a executar, e ainda porque convém acrescentar mais dois anos para realizar o respectivo projecto, poder-se-á fixar finalmente em 1970 a data provável em que as grandes centrais térmicas e eventualmente nucleares, deverão ser encaradas seriamente.

Assim, disporia a indústria de, quando muito, 10 a 12 anos para se apetrechar em termos de participar substancialmente na sua construção.

B.1.2. *Qual o ritmo da potência eléctrica a instalar em Portugal no decénio 1975/85* — Na fixação desse ritmo podemos admitir que o incremento de energia anual seria constante e igual ao que foi adoptado entre 1964 e 1975, mas parece mais prudente ter em atenção que a evolução do consumo de energia em função do tempo é melhor descrita por uma curva logística do que por uma exponencial, e que em 1975 já estaremos provavelmente na zona de inflexão da referida logística. Partindo ainda do princípio de que é nessa zona da curva que se encontram hoje os países mais fortemente desenvolvidos e industrializados da Europa, parece aceitável fixar para 1975 uma taxa equivalente à que vigora hoje nesses países, isto é, duplicação do consumo em cada decénio (7).

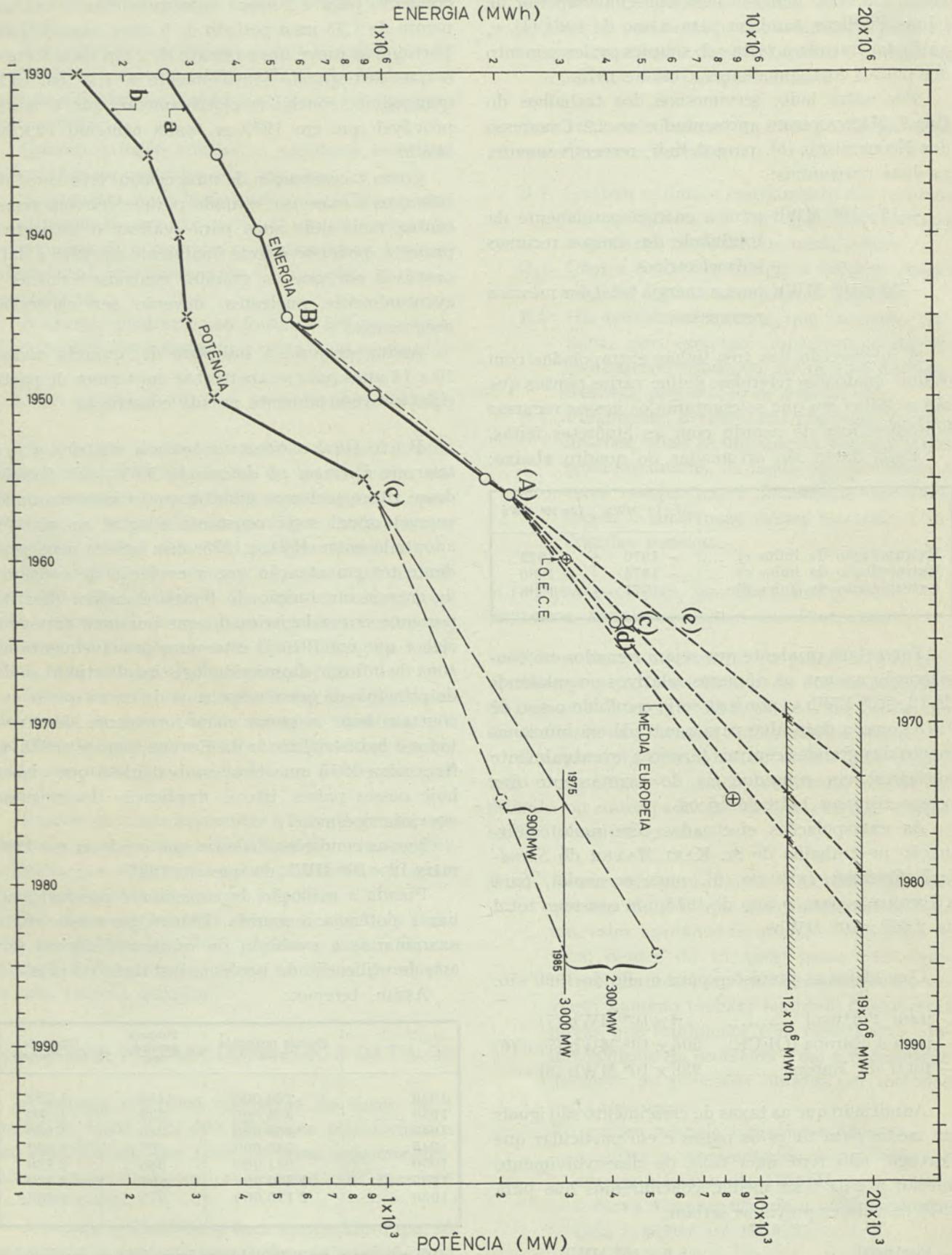
Nessas condições, haveria que produzir em 1985 mais  $12 \times 10^6$  MWh do que em 1975.

Fixada a evolução do consumo, é possível avaliar a potência requerida. Deverá para este efeito examinar-se a evolução do número de horas por ano de utilização da potência instalada no país.

Assim, teremos:

Anos	Energia produzida MWh	Potência instalada MW	Horas de trabalho/ano
1930 .....	260 000	150	1 720
1935 .....	355 000	233	1 560
1940 .....	460 000	280	1 640
1945 .....	545 000	297	1 840
1950 .....	941 000	345	2 730
1955 .....	1 890 000	891	2 120
1956 .....	2 175 000	973	2 260

O número de 2 260 horas/ano é bem modesto e por isso vamos supor que a interligação das várias centrais, a instituição de regimes tarifários que fo-



mente a melhor utilização da ponta, uma judiciosa utilização das capacidades das albufeiras, a supressão de centrais obsoletas no cômputo da ponta instalada, vão permitir elevar essa utilização de modo que se atinjam no decénio 1975/1985, em média, 4 000 horas por ano. Nessas condições, a potência necessária ao fornecimento de mais  $12 \times 10^6$  MWh seria de 3 000 MW.

Com plena consciência de que se está no domínio das extrapolações muito largas, cabe comparar este resultado com o que se obteria gráficamente fixando arbitrariamente em 3 000 MW a potência instalada no país em 1975 ou em 1985 (veja-se gráfico). Ligando o ponto C (potência instalada em 1956) com os dois pontos assim definidos, obtém-se gráficamente, para a potência a instalar no decénio 1975/85, respectivamente, 900 MW e 2 300 MW.

B.1.3. Se, portanto, fixarmos como ponto de partida para as restantes considerações a fazer neste trabalho que a potência a instalar de 1975 a 1985 é de 2 000 MW mais ou menos 1 000 MW de origem não hídrica, julga-se ter definido o problema numa forma suficientemente larga, mas por outro lado bastante para justificar o interesse que à indústria deve merecer um empreendimento desta dimensão. Com efeito, mesmo admitindo o limite inferior da previsão, isto é, 1 000 MW, esta potência corresponde à potência total instalada em Portugal em 1956, o que dá a dimensão e ordem de grandeza do volume de trabalho a realizar.

#### Resumo de B.1.

Os recursos hidroeléctricos em Portugal devem exaurir-se por volta de 1975, e podem avaliar-se em  $2\,000\text{ MW} \pm 1\,000\text{ MW}$  as necessidades da nova capacidade a instalar no decénio 1975/1985.

Dentro deste pressuposto é necessário que o projecto de centrais térmicas (eventualmente nucleares) se inicie em 1970.

Mais adiante, estas primeiras conclusões serão mais precisadas depois de estudados outros aspectos do problema.

### B.2 QUAIS AS FONTES DE ENERGIA SUSCEPTÍVEIS DE SUBSTITUIR A ENERGIA HIDROELÉCTRICA QUANDO ESTA CHEGAR AO SEU ESGOTAMENTO

No presente capítulo serão estudadas não só as fontes de energia cuja exploração actualmente já se domina, mas ainda aquelas que o podem vir a ser, considerando o desenvolvimento tecnológico que certamente se vai operar de hoje até 1975.

Nestas condições vamos examinar as seguintes formas de energia:

#### B.2.1. Energia solar

B.2.2. Energia produzida a partir da fusão do átomo (reactores termo-nucleares)

B.2.3. Energia produzida pela fissão do átomo (reactores nucleares)

B.2.4. Energia produzida a partir de combustíveis fósseis.

Podíamos acrescentar a esta lista outras fontes de energia, tais como a das marés, dos ventos, etc., que, embora constituam soluções recorrentes nalguns casos particulares, não devem, contudo, representar, em conjunto, parte substancial da energia total.

#### B.2.1. Energia Solar

A principal documentação e fonte de informação a que se recorreu foi (8) *The Journal of Solar Energy Science and Engineering*, publicado por THE ASSOCIATION FOR APPLIED SOLAR ENERGY; (9) *the sun at work*, publicado pela mesma Associação e, finalmente, alguns elementos dispersos coligidos (10) pelo STANFORD RESEARCH INSTITUTE sobre a mesma matéria.

Resumindo o que nessa literatura se contém, parece que a energia solar pode ser utilizada directamente para os seguintes fins:

a) *Produção de altas temperaturas da ordem dos 3 000 a 4 000 graus centígrados*, em quantidades que não devem ultrapassar os 1.000 kW. Este modo de utilizar energia solar tem sobretudo aplicação na metalurgia, ensaios de refractários, emissividade a alta radiação, etc.

As realizações efectivamente executadas ou em vias de acabamento são, por enquanto, apenas 18, nos U. S. A. e países da O. E. C. E.

A temperatura mais alta atingida é  $3.500^{\circ}$  e o fluxo mais elevado foi de  $629\text{ cal/cm}^2/\text{seg}$ .

Embora seja indubitável o interesse científico e industrial desta fonte de energia, o seu interesse como gerador de calor a *média* temperatura, próprio para o fornecimento de calor a ciclos termo-dinâmicos, é praticamente nulo.

b) *Fonte de calor a baixa temperatura, própria para os seguintes fins*: aquecimento e refrigeração de edifícios, aquecimento de água, destilação de água salgada, produção de sal, etc.

Esta fonte de calor pode ter nas regiões desérticas ou em toda a região do globo designada por «solar belt» um interesse muito particular.

As dificuldades de transportar até esses locais a energia ou o combustível necessário para a gerar, mostram o interesse numa solução que não requer o transporte, sob qualquer forma, da energia,

embora envolva sensivelmente o dobro ou o triplo do capital.

É evidente que estas formas de energia se caracterizam por fontes de calor a baixa temperatura impróprias igualmente para o funcionamento de ciclos termo-dinâmicos destinados a produzir energia mecânica.

c) *Fonte de calor a média temperatura* — Foi tentada a energia solar como fonte de calor a um nível adequado ao funcionamento de ciclos termo-dinâmicos. Os resultados atingidos até aqui não foram muito encorajantes e transcrevemos o que sobre esta matéria nos diz o SECRETARIADO DA DEFESA PARA INVESTIGAÇÃO E DESENVOLVIMENTO e actualmente CHANCELLOR OF THE UNIVERSITY OF BUFFALO, publicado no *Journal of Solar Energy and Science Engineering*: «The experiments thus far have all led to quite expensive equipment and the economics is not to be abandoned at this point because a practical, balanced system, using both solar heating in the winter and solar cooling in the summer, might work out with a fair degree of economy. If it broke even for the individual home owner, then it would be a national benefit to use solar heat, since here, again, it would save a great deal of the material in the national fuel bill».

Na verdade a energia solar é fornecida numa forma irregular ao longo do dia e é nula, como é óbvio, durante a noite. Isso implica, ou acertar uma curva de consumo a esta curva irregular, o que na maioria das aplicações não é fácil, ou a investir mais capital em dispositivos capazes de armazenar essa energia, ou ainda diluir esta irregularidade conjugando esta fonte com outras de natureza diferente. Em qualquer caso, o capital empregado nessas instalações é sempre extremamente elevado e utilizado a menos de 30%.

d) *Fonte de energia eléctrica* — Toda uma série de células têm sido hoje desenvolvidas em regime experimental, capazes de converter energia luminosa radiante em energia eléctrica.

Além disso, os pares termoeléctricos são também susceptíveis de produzir energia eléctrica.

Sobretudo as células têm merecido toda a atenção e há grande cópia desses instrumentos capazes de converter energia solar em energia eléctrica com rendimentos relativamente elevados, assim: BELL TELEPHONE LABORATORIES têm uma unidade que alimenta todo um sistema telefónico da pequena cidade Americus. Entretanto a DUPONT DE NEMOURS já fabrica silício para baterias solares a 180 dólares a libra peso, contra 350. Finalmente a HOFFMAN LABORATORIES construiu um convertidor

de energia solar, mas considerado de grandes dimensões, isto é, de 25 watts !!

e) A energia solar tem ainda outras aplicações que podem indirectamente poupar energia, como sejam: fotosíntese artificial, crescimento biológico intensivo, etc.

*Resumindo:* Embora a energia solar venha a ter dentro de alguns anos uma importância considerável, afigura-se-nos que, como fonte de energia eléctrica, não tem ainda uma utilidade que mereça ser tomada em consideração em 1975 na resolução do problema energético português.

### B.2.2. *Energia produzida a partir da fusão do átomo*

A bomba de hidrogénio constituiu a primeira realização humana de produção, em grande escala, de energia a partir da fusão de núcleos atómicos.

Contudo a libertação de energia assim produzida é incontrolável. O problema está, pois, em realizar uma fusão controlada do átomo.

a) Não é fácil realizar uma reacção de fusão em cadeia porque as temperaturas a que é necessário levar os núcleos que nela intervêm são da ordem de 1 a 3 milhões de graus centígrados. Ora se for calculada pela fórmula de Stefans-Boltzman para uma substância de densidade 1 a energia irradiada, chegamos à conclusão que para atingir 2 000 000 de graus centígrados é necessário (11):

— Para uma estrela com um raio de  $10^6$  quilómetros, uma potência específica de 150 cal/gram/seg (11).

— Para um sólido com 10 centímetros de raio, já essa potência específica é de 1 000 milhões de calorias/gram/seg (11).

— Para um corpo com a dimensão de um grão de poeira, isto é,  $\frac{1}{10}$  mm, essa mesma energia é de  $10^{15}$  cal/gram/seg (11).

Portanto a quantidade de calor irradiado é tal que parece difícil manter as substâncias em reacção a essa temperatura, exactamente porque é impraticável fornecer as elevadas potências específicas referidas acima.

b) A outra solução que pode ser encarada seria a realização de micro-explosões não controladas reservando-se o controle apenas para a frequência com que essas micro-explosões teriam lugar.

Tem sido estudada cuidadosamente a provocação de reacções nucleares por descargas eléctricas capazes de conferir altas temperaturas a reduzidas quantidades de gases, embora com uma duração extremamente curta. Em especial todos os esforços se têm concentrado no estudo da contracção de

gases submetidos a descargas eléctricas (Pinch Effect) e, dum modo geral, o estudo de gases ionizados (plasma e plasmóides).

c) Pode ainda encarar-se uma terceira solução que seria produzir uma pequena quantidade de núcleos atómicos animados de velocidades suficientemente altas para que ocorram reacções de fusão por choque com outros núcleos relativamente *fríos* (animados de velocidades reduzidas). O custo do processo de aceleração é de tal modo elevado e o rendimento de reacção tão baixo que a solução parece inviável, no estado actual do conhecimento humano.

d) Há também a dificuldade de conter os reagentes. Não sendo possível imaginar contentores materiais dadas as temperaturas reinantes, a solução que tem sido estudada é baseada no emprego de fortes campos magnéticos para confinar o plasma em determinada região do espaço.

e) Descritas, em traços largos, as dificuldades do empreendimento científico, examinaremos agora a principal fonte de informação desclassificada.

IGOR V. KURCHATOV ao visitar *Harwell* em 26 de Abril de 1956 (12) fez determinadas declarações sobre esta matéria e, em especial, disse:

— Para que a reacção nuclear tenha uma probabilidade de ocorrência significativa é necessária uma energia de choque elevada o que implica igualmente uma temperatura muito elevada.

Porém, mesmo a  $0,2 \times 10^6$  graus centígrados é possível atingir 1 reacção (d.d)/segundo/grama de deutério. Este ponto é importante porque reduz de 1/10 a temperatura de reacção computada inicialmente ao redor de  $13 \times 10^6$  graus centígrados.

— A presença de fortes correntes magnéticas provoca uma contracção do plasma, elevando-se a temperatura a valores já da ordem de grandeza necessária às reacções de fusão (Pinch effect). Porém esta contracção só se verifica enquanto a corrente eléctrica é *crecente*. Quando estacionariza o plasma desintegra-se.

Têm-se conseguido duas contracções sucessivas por descarga, mas não tinham sido observadas mais do que 3. Estes factos já eram conhecidos.

Admite-se, por via do cálculo que dispondo de correntes da ordem de grandeza de  $10^6$  amperes, já seria possível produzir uma apreciável quantidade de reacções de fusão por grama e por segundo.

— Os ensaios têm sido efectuados com correntes de  $0,3 \times 10^6$  Amp e alguns neutrões têm sido gerados.

Os cientistas ocidentais põem em dúvida que os neutrões observados (aliás com fluxos da ordem de  $10^6/\text{cm}^2/\text{seg}$ ) sejam neutrões produzidos por verdadeiras reacções de fusão encadeadas.

— A solução parece consistir em manter descargas eléctricas de alta intensidade e em regime oscilatório, uma vez que a contracção só se verifica nos períodos de crescimento de corrente.

f) Um ano depois das declarações de KURCHATOV, o físico americano A. S. BISHOP vem declarar que os neutrões produzidos nos ensaios russos não eram resultantes de verdadeiras reacções de fusão (13), (14), e (15). Informou que em *Los Alamos* se procura estabilizar o efeito da contracção estabelecendo um campo magnético axial e adiantou que, além do efeito de concentração, se estudam hoje na América outras hipóteses mas que estão ainda classificadas.

Assim, por exemplo, em *Livermoor* estuda-se um processo diferente mas classificado, em *Princeton* experimenta-se o *Stellator*, no *NAVAL RESEARCH LABORATORY* estuda-se o processo de ondas de choque, e há trabalhos em curso no M. I. T., na *UNIVERSIDADE DE NOVA YORK* e em *Oakridge*. Finalmente vaticina que em 1967 se fará a demonstração experimental de que é possível controlar a fusão.

g) Em Outubro de 1957 os cientistas ingleses anunciam que na aparelhagem crismada de Zeta conseguiram temperaturas da ordem dos  $5 \times 10^6$  graus centígrados durante alguns milésimos de segundo e que se verificaram verdadeiras reacções termonucleares e consideram que foi o forte campo magnético induzido no espaço toroidal onde se realiza a fusão que foi o causador do sucesso.

*Em resumo:*

- 1) Há vários processos em curso de estudo.
- 2) Há 12 reacções de fusão que merecem interesse (16):

Deutério D (d, )	He <sup>3</sup> + 3,35 Mev
Deutério D (d, )	T + 4,00
Tritio T (p, )	He <sup>4</sup> + 19,7
Tritio T (d, )	He <sup>4</sup> + 17,6
Lítio — fornece	7 possibilidades

3) A energia libertada por estas reacções é enorme mas comparada com a de fissão (195 Mev por núcleo de Urânio 235) já a diferença não é tão

formidável, porque há que ter em atenção que participam na fusão do deutério apenas 4 nucleões do que resulta cerca de 0,8 Mev por nucleão e na fissão  $235 + 1 = 236$  nucleões, ou seja também de 0,8 Mev por nucleão.

4) A quantidade de deutério disponível no mundo é enorme (basta atentar a imensidade dos oceanos) em relação à do urânio.

5) A fusão controlada está ainda no domínio da investigação científica e só para 1967 (14) se espera provar por via experimental a sua exequibilidade, aliás confirmada ao signatário pelo Sr. BISHOP em Outubro do corrente ano.

Nestas condições podemos concluir:

A reacção de fusão controlada tem o maior interesse científico e as mais largas implicações de ordem prática, e em 1967 espera poder provar-se a sua exequibilidade duma forma experimental.

Pode assim dizer-se que a fusão controlada estará em 1967 num estágio de desenvolvimento correspondente ao dos reactores nucleares em Dezembro de 1942.

Ora *Calder Hall* só foi possível em 1956, isto é, 14 anos depois. Computando também em 14 anos a industrialização da fusão, só para 1980 seria possível contar com reactores de fusão desenvolvidos ao ponto de constituírem uma solução prática.

Entretanto o desenvolvimento dos reactores nucleares deve atingir um tal nível de eficiência que muito os distanciará da solução fusão nuclear.

Podemos, pois, considerar que a reacção de fusão, como solução para o problema português que se situa em 1975, está fora do domínio das soluções tecnológicas suficientemente evoluídas e daí susceptíveis de realização no decénio 1975/85.

#### B.2.3. — B.2.4. Escolha entre Centrais Nucleares e Centrais queimando Combustíveis Fósseis

a) Foi mostrado nos capítulos precedentes que nem energia solar nem energia resultante da fusão nuclear podiam constituir no decénio de 1975/85, soluções para o problema português.

Não se contando com outros mananciais de energia apreciáveis, o problema reduz-se à escolha entre a fissão nuclear e os combustíveis fósseis.

#### QUADRO A

##### Summary of nuclear market potentials in the world power industry

(Shown in kWhrs  $\times 10^9$  for 1970 by continents)

Cost of Nuclear Power Mills/kWhr	North America	Central America	South America	West Indies	Europe	Africa	Asia	Oceania	Total
1	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2	9.64	—	—	—	8.51	—	—	—	18.15
3	36.72	—	—	—	32.40	0.34	0.41	0.12	69.99
4	36.52	—	0.71	0.12	32.35	0.66	1.41	0.95	72.72
5	60.20	—	2.94	0.64	54.46	0.66	2.57	2.04	123.51
6	68.09	0.08	5.41	1.39	62.92	3.29	6.12	3.18	150.48
7	81.27	0.34	9.77	2.25	80.82	8.52	10.45	4.83	198.25
8	104.78	0.31	11.09	1.68	112.13	6.60	9.07	8.57	254.23
9	51.15	0.15	6.47	0.68	101.06	5.77	9.67	7.02	181.97
10	40.81	0.17	5.92	0.38	128.72	1.79	10.43	6.71	195.93
11	17.46	0.07	4.42	0.11	101.73	3.61	21.17	3.46	152.03
12	14.38	0.09	3.99	0.07	100.64	2.66	26.73	3.62	152.18
13	2.08	0.13	2.42	0.17	61.05	2.72	21.52	1.37	91.46
14	2.70	0.12	2.03	0.18	44.44	3.35	15.18	1.41	69.41
15	1.71	0.01	1.82	0.07	19.13	5.08	9.03	0.83	37.68
16	2.79	0.13	1.98	0.13	13.80	3.84	6.51	1.25	30.43
17	1.68	0.18	1.46	0.20	8.30	2.56	2.37	0.56	17.31
18	0.26	0.10	0.91	0.11	5.55	2.32	3.94	0.20	12.51
19	0.64	—	1.13	0.03	3.50	2.18	2.21	0.48	10.17
20	0.01	—	1.12	—	3.21	1.06	1.94	0.09	7.43
21	—	—	0.35	—	3.63	1.33	0.78	0.07	6.16
22	—	—	0.91	—	0.88	0.74	0.54	0.07	3.14
23	—	—	0.29	—	1.58	1.22	0.74	0.08	3.91
24	—	—	0.63	—	0.76	0.43	0.02	0.04	1.88
25	—	—	0.14	—	1.03	0.06	0.01	—	1.24
26	—	—	0.07	—	0.10	0.14	0.01	—	0.32
27	—	—	0.05	—	0.10	0.02	—	—	0.17
28	—	—	0.05	—	0.10	0.01	—	—	0.16
29	—	—	—	—	0.10	0.01	—	—	0.10
30	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Totals	532.89	1.88	66.08	8.21	983.00	61.96	161.96	46.95	1862.92

A matéria tem sido largamente tratada na bibliografia desde a conferência de Genève até hoje, e a dificuldade está mais no esclarecimento e na escolha de entre massa tão volumosa de informação, da que é pertinente e interessa ao caso português.

Em primeiro lugar é necessário fixarmo-nos no nível de preços que se pretende atingir porque, no mercado da energia, cada país tem um certo nível para o qual há comprador e, por isso, não são generalizáveis as conclusões tiradas por exemplo para a América ou para a Inglaterra.

b) Num estudo feito por K. M. MAYER (17) e apresentado no curso belga sobre Energia Atómica, chega-se à conclusão que, dum modo geral, é a Europa que mais estará interessada em pagar energia compreendida entre Esc. \$20 e \$30/kWh.

Essa conclusão resulta de a América, o segundo principal interessado, dispôr de quantidades apreciáveis de carvão a baixo preço.

Assim foi previsto para 1970 que a Europa consumiria  $938 \times 10^6$  MWh, enquanto a América só estaria interessada em 532 MWh de energia nuclear.

O quadro A junto, extraído dessa comunicação, dá uma ideia de qual o mercado europeu em 1970, para cada um dos preços da energia nuclear gerada e é manifesto que a Europa pode pagar mais caro a energia, ou dito de outra forma, há mais clientela para a energia cara do que, por exemplo, na América.

c) Posto isto, tem interesse examinar os resultados do trabalho de J. A. LANE publicado em Agosto de 1956 na revista *Nucleonics* sob o título «Where Reactor Development Stands Today» (18).

Na figura 1 desse trabalho são comparados os custos de investimentos, em \$/kW, de unidades do tipo Diesel, centrais a carvão, e as realizações actuais em centrais nucleares e pode verificar-se que as soluções americanas P. W. R. (Pressure Water Reactor) e H. R. (Homogeneous Reactor) têm custos de fabricação que se comparam favoravelmente com as centrais queimando carvão.

Mais adiante comparando os preços de kWh em função da potência da central, verifica-se que os dois tipos de reactores acima referidos fornecem preços absolutamente idênticos e da ordem dos 7-8 mills/kWh (\$21-\$24/kWh) aos das grandes centrais térmicas modernas.

d) Quando *Calder Hall* (19) foi apresentado oficialmente aos cientistas e engenheiros interessados em energia nuclear, foram explicados não só os resultados económicos atingidos como ainda as possibilidades futuras e foi indicado em particular que para um B.O. (burn out) de 5.000 MWD/ton já era possível atingir um preço de 0,58 d/kWh, ou seja de \$19/kWh (19).

e) Num estudo comparativo entre o reactor P.W.R. e *Calder Hall*, os srs. D. P. BARROS e A. PUISSES (20) apresentam em Junho de 1957 no *Nucleonics* uma tabela comparando as duas soluções e chegam às seguintes conclusões:

mills kWh	Construídos nos U. S. A.		Construídos em Inglaterra	
	Calder	P. W. R.	Calder	P. W. R.
Capital investido .....	14,4	9,4	4,9	3,2
Custo de combustível (descontando o Plutónio)	0,0	1,5	0,0	1,5
Reprocessamento e alu-guer .....	2,0	7,7	2,1	7,7
Total parcial .....	2,0	9,2	2,1	9,2
Despesas de laboração ..	1,5	1,0	1,0	0,7
Total geral .....	17,9	19,6	8,0	13,1
Escudos/kWh .....	\$53	\$56	\$23	\$38

Este quadro é extremamente elucidativo porque chama a atenção para a influência que tem, nos resultados de estudos económicos, a fixação de elementos, tais como: custo das instalações, tempo de amortização, preço do plutónio, custo do reprocessamento, etc.

Assim quanto ao custo relativo entre a fabricação inglesa e a americana, temos:

Relação do custo inglês e americano	Porcentagem do equipamento	
	América	Inglaterra
Grande equipamento .....	1,33	5
Pequeno equipamento.....	0,83	20
Materiais de construção ..	0,91	25
Mão-de-obra .....	0,40	35
Gastos gerais .....	0,50	15
		100
		100

Para apreciar da influência que têm os encargos de capital, convém comparar as taxas de amortização inglesas e americanas:

	Americana	Inglesa
Reactores .....	0,15	0,09
Turbo-Alternadores.....	0,15	0,08
Outros encargos fixos .....	0,12	0,08
Encargos do combustível armazenado .....	0,04	0,05

Este estudo comparativo permite ainda concluir que tanto o preço do reactor americano como do reactor inglês, tal como foram realizados, respectivamente, em *Shipping Port* e *Calder Hall*, ainda não constituem soluções capazes de concorrer com os combustíveis fósseis.

f) Em 29 de Dezembro de 1956 arrancou em ARGONE NATIONAL LABORATORY um reactor experimental E.B.W.R. (Experimental Boiling Water Reactor) (21) com uma potência de 5 MW. O preço atingido foi de 52 mills/kWh, ou seja, 1\$50/kWh.

É evidente que se trata de uma unidade experimental e, portanto, não deve ser considerada como uma verdadeira central térmica.

Contudo constitui uma das últimas realizações americanas e o preço atingido está longe de ser aceitável.

g) Os exemplos referidos serviram para ilustrar que não pode ser efectuado um estudo comparativo a não ser na base de *previsões*.

Com efeito, as poucas realizações à escala industrial hoje levadas a cabo constituem já soluções obsoletas mesmo em face dos conhecimentos actuais porque durante os 2 e 3 anos que levou a sua construção novas ideias foram experimentadas e novos conhecimentos adquiridos.

h) Num estudo apresentado por W. K. DAVIES et al. (22) à NATIONAL INDUSTRIAL RESEARCH BOARD INC. (trabalho n.º 83) antevê 3 «gerações» sucessivas de reactores nucleares, e indica os custos do kWh previstos:

*Actualmente (1956/57) — custos de produção:*

20 - 50 mills/kWh

\$58 - 1\$45/kWh

1.<sup>a</sup> geração de reactores — Construída com os ensinamentos actuais colhidos em protótipos e ensaios em unidade já construídas.

Esta 1.<sup>a</sup> geração entrará em funcionamento entre 1960-1964. Custo da produção:

10 - 15 mills/kWh

\$29 - \$43/kWh

Com um custo de instalações compreendidas entre \$300-\$400/kWh, ou seja 8.700\$/kWh e 11.600\$/kWh.

2.<sup>a</sup> geração de reactores — Resultado da experiência entretanto adquirida e que entrará em funcionamento entre 1965-1967.

Custo de produção:

8 - 11 mills/kWh

\$23 - \$32/kWh

3.<sup>a</sup> geração de reactores — A partir de 1967, já terá preços de funcionamento entre:

6 - 9 mills/kWh

\$18 - \$26/kWh

Consideram os autores que, a partir dessa data, a central nuclear é praticamente competitiva em toda a América com a central queimando carvões fósseis, a não ser junto de algumas regiões particularmente favorecidas com carvões baratos.

São raciocínios desta natureza que levam os mesmos autores a considerar que a energia nuclear na América, que representa em 1967 apenas 7% da capacidade adicional a instalar nesse ano, passará a representar em 1977 cerca de 60% da capacidade adicional instalada nesse ano, o que prova o convencimento dos autores nos progressos a efectuar na construção das centrais nucleares.

i) Um dos trabalhos mais compreensivos sobre o «trend» da evolução do preço do kWh de origem nuclear é o de CHANCEY STAN (23) (*Nucleonics* - Setembro 1957), onde se resume o problema desta forma.

Há toda uma série de problemas metalúrgicos, de corrosão, etc., a resolver, mas admitindo que venham a ter solução nos próximos 10 anos, o preço do kWh deve baixar substancialmente actuando em 3 factores:

- taxa de conversão
- rendimento térmico
- taxa de irradiação (B.O.)

O quadro seguinte resume a situação.

Taxa de conversão .....	—	0,6	0,9	
Rendimento térmico .....	35%	25%	35%	
Taxa de irradiação MMD/ton ...	—	3 000	10 000	
Encargos fixos	30,2%	76,8%	63,9%	É possível que para além de 1967 se possam fazer mais economias nos encargos fixos
Encargos correntes.....	69,8%	117,3%	35,3%	As economias nesta rubrica já não influenciam grandemente os resultados
Erro .....	—	± 20%	± 20%	Incerteza dos resultados indicados
Total .....	100%	194,1%	99,2%	A partir de 1967 o Reactor Nuclear deve ser mais económico do que a central clássica nas condições vigentes nos U. S. A.
	Central a carvão	Centrais nucleares (1957)	Central nuclear (1967)	Observações

Convém fazer notar que os objectivos indicados para 1967 já são hoje razoavelmente conhecidos:

- Para atingir 10 000 MWD/ton há duas possibilidades: combustível cerâmico e combustíveis líquidos, duas soluções já experimentadas à escala piloto.
- Para atingir uma taxa de conversão de 0,9 teremos as seguintes possibilidades: reactores rápidos, combustíveis fundidos, reactores homogéneos. Além destes, também se aproximam do nível 0,9 os reactores do tipo *Calder Hall*, sódio-grafite fundidos, todos bem conhecidos e alguns realizados em escala industrial.
- O alto rendimento está ligado a alta temperatura do fluido arrefecedor e há, neste caso, várias soluções que permitem obter essas temperaturas, nomeadamente: metais liquefeitos, «fast breeder», sódio grafite, sais liquefeitos, combustíveis cerâmicos arrefecidos a gás.

Do exposto se vê que o alvo 1967 parece inteiramente praticável e daí ser previsível que, mesmo na América, país de grandes recursos de carvão a baixo preço, a partir de 1967 a partici-

pação dos reactores nucleares se faça em grande escala.

j) Para finalizar este ponto procedeu-se à compilação num mapa dos vários tipos de reactores cuja construção já foi ordenada e, portanto, dentro de 2 a 3 anos entrarão em funcionamento.

Todos os valores indicados no quadro foram convertidos ao regime de 7 000 h/ano de marcha e 0,15 de taxa de amortização.

Foram comparados os seguintes projectos:

*S.R.E. — Sodium Reactor Experiment* — Trata-se de um reactor arrefecido a sódio e moderado a grafite usando combustível enriquecido.

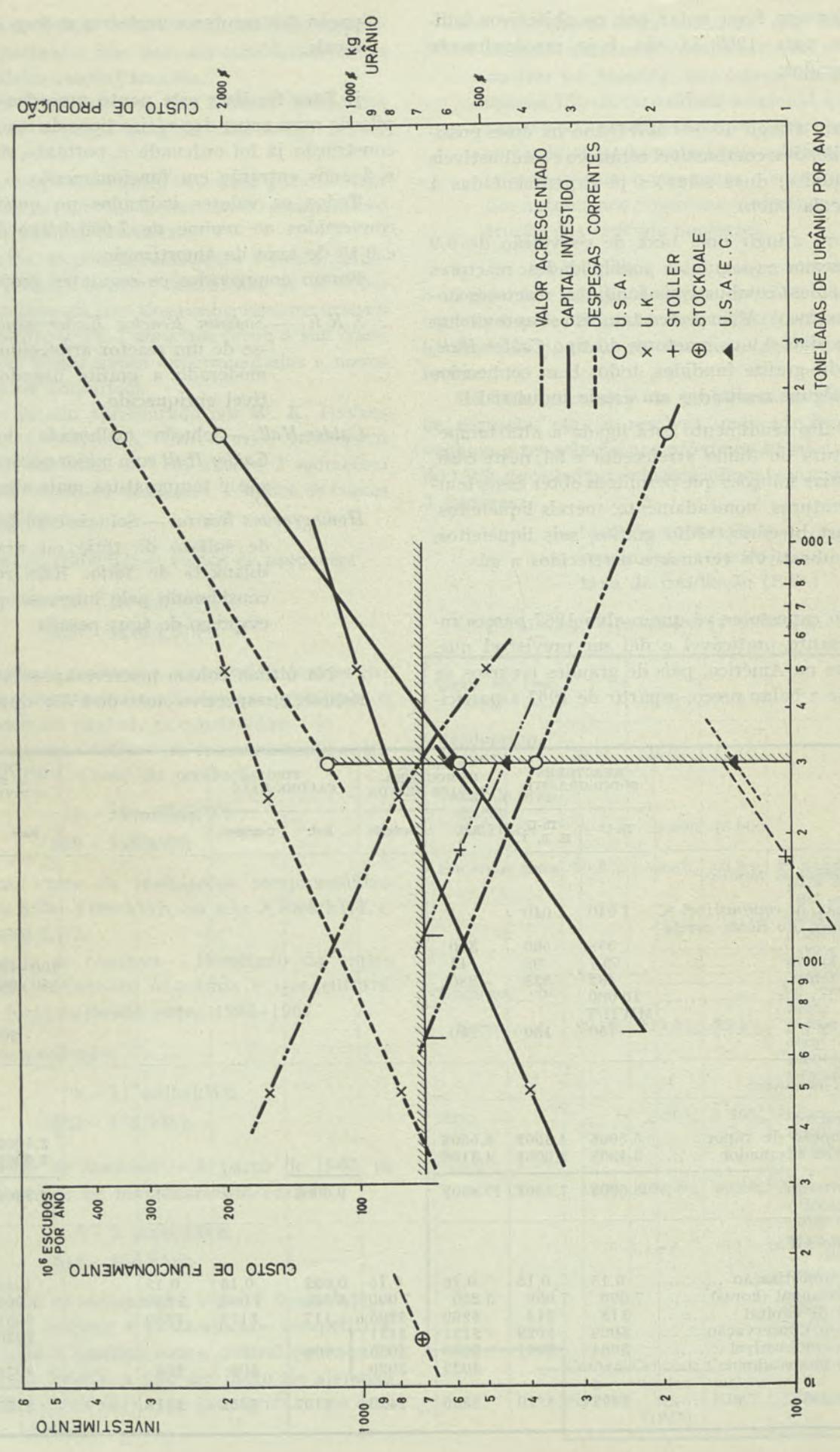
*Calder-Hall* — Solução melhorada do sistema *Calder Hall* com maior potência e pressão e temperatura mais altas.

*Homogeneous Reactor* — Solução com água pesada de sulfato de tório ou urânio, com «blanket» de tório. Este reactor foi considerado pelo interesse que tem o emprego de água pesada.

Na última coluna inscreveram-se as características, e respectivo custo do kWh, duma central

	REACTORES SÓDIO-GRAFITE		REACTOR HOMOGÉNEO DE ÁGUA PESADA		TIPO CALDER-HALL		CENTRAL A CARVÃO CONVENCIONAL	
	Th-U	Th-U E. B. T.	Ref.	Corrigido	Ref.	Corrigido	Base	Corrigido
<i>Características técnicas:</i>								
Temp. máx. no combustível-°C	1 040	1 040						
Temp. máx. no fluido arrefecedor	538	560	300					
Vapor:   kg/cm <sup>2</sup> .....	59.7	98	43				100-120	
temp. ....	482	538	~ 280				550-650	
Burn-up .....	10 000							
Potência MW .....	MWD/T 150	180	150				200	
<i>Capital investido:</i>								
\$/kW Reactor								
Geração de vapor .....	5.500\$	4.350\$	6.550\$				2.100\$	
\$/kW turbo-alternador .....	3.190\$	2.900\$	4.310\$				2.200\$	
	8.690\$	7.250\$	10.860\$		9.600\$		4.300\$	
<i>Custo do kWh:</i>								
Taxa de amortização .....	0,15	0,15	0,16	0,15	0,092	0,15	0,15	0,15
Utilização anual (horas) .....	7 000	7 000	5 250	7 000	6 550	7 000	5 250	7 000
Encargos de capital .....	\$18	\$14	\$290	\$205	117	\$178	\$239	\$081
Operação e Conservação .....	\$029	\$029	\$131	\$131	} \$08			\$020
Custo do combustível .....	\$064	\$041	\$055	\$055				
Custo do moderador .....	—	—	\$029	\$029		\$08	\$08	\$074
Total .....	\$273	\$210	\$505	\$420	\$197	\$258	\$319	\$175
								\$223

Combustíveis naturais ou fracamente enriquecidos



térmica a carvão, para o que foram admitidas as seguintes hipóteses:

— Rendimento global térmico 34% ou seja 2 450 cal/kWh net.

— Três hipóteses de combustível:

A — 30\$/10<sup>6</sup> cal, ou seja 210\$/ton de carvão de 7 000 cal/kg.

B — 50\$/10<sup>6</sup> cal, ou seja 350\$/ton idem

C — 70\$/10<sup>6</sup> cal, ou seja 490\$/ton idem

Em resumo da controvérsia entre centrais clássicas e nucleares, pode dizer-se que a técnica de hoje permite esperar que a energia eléctrica proveniente de reactores nucleares concorra favoravelmente com a de centrais a carvão dentro dos próximos 6 a 10 anos, desde que o preço de carvão de 7 000 cal seja cotado a 350\$/ton posto na central térmica.

Conhecidos os exíguos recursos de Portugal metropolitano em carvão, aliás já parcialmente destinado às centrais térmicas instaladas no País, pode afirmar-se que o carvão a queimar nas grandes centrais a construir em 1975 teria de ser, com certeza, de origem estrangeira, e não é fácil adquirir hoje carvão C. I. F. Lisboa ao preço de 350\$/ton.

Pode, pois, afirmar-se que as centrais nucleares em 1975 serão competitivas, numa base puramente económica, com uma central de combustíveis fósseis.

Pode ainda prever-se que, se entre 1965-1970 for necessário decidir pela construção de uma central térmica, já possa ser justificável a adopção de um reactor nuclear.

A segunda conclusão reduz o período de 12 anos, previsto para equipamento e preparação da indústria construtora portuguesa, a uns escassos 7 anos, o que mostra a proximidade do advento dos reactores de potência em Portugal.

#### *Resumo de B.2.*

Ao termo e esgotamento dos recursos hidroeléctricos, fixado para 1975, das formas de energia que podem ser encaradas hoje (fusão, fissão, solar, combustíveis fósseis), só a fissão do átomo parece ter interesse, porque:

- A fusão nuclear não deve ter atingido um estágio de desenvolvimento tecnológico que justifique a sua adopção.
- A energia solar também, como no caso anterior, não deve ter atingido o estágio de desenvolvimento tecnológico necessário, o que é agravado com o problema de irregularidade de produção de energia solar.
- Os combustíveis fósseis nacionais não constituem reservas suficientes para sobre eles se

basear a nossa futura produção de energia e os combustíveis importados atingem preços que não devem concorrer com a energia nuclear, na época compreendida entre 1970-1975.

Em resumo, pode dizer-se que só a energia nuclear serve as condições necessárias por:

- Constituir uma solução tecnologicamente evoluída para aplicação industrial.
- Permitir a produção de energia a preços competitivos.

Poderá acontecer, mesmo antes de 1970, ser necessário construir reactores nucleares, porque já nessa data a solução combustível fóssil deve ser menos interessante que a de um reactor em Portugal.

#### B.3. INDÚSTRIAS CONEXAS AO DESENVOLVIMENTO DOS REACTORES NUCLEARES

Tratado o problema dos reactores nucleares, deve agora examinar-se a situação de um certo número de indústrias que estão intimamente ligadas com aquelas que podem ser encaradas como específicas da exploração da energia atómica:

- I — tratamento de minérios de urânio e de tório.
- II — concentração isotópica.
- III — reprocessamento de combustíveis irradiados.
- IV — fabricação de combustíveis nucleares.
- V — fabricações especiais.

#### I — TRATAMENTO DE MINÉRIOS DE URÂNIO E TÓRIO

Reconhecida em Portugal a existência de minérios uraníferos em quantidades apreciáveis, parece de toda a conveniência o seu tratamento. Assim o entende também a Junta de Energia Nuclear onde, neste momento, se estudam os vários métodos de tratamento e a sua respectiva industrialização.

A viabilidade desta indústria é independente, até certo ponto, de existirem ou não reactores em Portugal, porque o preço do urânio que vier a ser produzido terá de ser sensivelmente o preço internacional e, deste modo, a indústria justifica-se «per se». Nesta ordem de ideias foi considerada a viabilidade da indústria de tratamento de minério de urânio como independente do advento do reactor em Portugal e, portanto, fora do âmbito do presente trabalho.

## II — CONCENTRAÇÃO ISOTÓPICA

Desta operação pouco ou nada há publicado além do andamento geral do processo. Estudos económicos ainda não foram publicados duma forma «desclassificada». Limitamo-nos, por isso, a alinhar alguns factos salientes recolhidos na literatura que podem servir, no entanto, para se fazer uma ideia aproximada desta operação industrial:

- Só há cascatas de difusão na América, United Kingdom e Rússia.
- Os Americanos aconselham a que não se instalem mais unidades de difusão porque as que existem na América e nas outras duas nações chegam para as necessidades mundiais.
- Os preços de urânio concentrado têm vindo a descer nas sucessivas tabelas publicadas pela AEC Americana, o que vai tornando a indústria cada vez menos rendável, qualquer que seja o seu custo de fabricação.
- O custo de uma unidade de difusão é enorme mas não há valores industriais publicados.
- O urânio concentrado não é uma necessidade para fazer funcionar os reactores; haja em vista o reactor de urânio natural.
- O plutónio pode vir a substituir o urânio 235.

Por se tratar de um elemento quimicamente distinto do urânio, comporta-se muito mais facilmente, e, portanto, com um menor preço de custo, na operação de separação.

- O interesse dos reactores «breeder» passa, desta forma, a ser de importância capital, uma vez que a quantidade de plutónio produzido é maior do que a de urânio 235 consumido.
- O Dr. GOLDSMITH, da COMMISSION D'ENERGIE ATOMIQUE DE FRANCE, na exposição apresentada no Curso de Energia Nuclear havido em Paris em Maio de 1957, fez, a respeito da concentração isotópica, os seguintes comentários:

O custo de uma unidade para 1000 toneladas por ano custaria  $10^{11}$  francos franceses, ou seja,  $7 \times 10^8$  contos. Consumir-se-iam 200 000 kWh/ton para produzir urânio com 20% de concentração.

O referido cientista acrescentou que um reactor de urânio natural para 4 000 Mwd de «burn out», gasta apenas 25% do urânio 235 disponível no urânio natural. Uma unidade de difusão com um rendimento de 50%, conjugada com um reactor operando com 50% de B. O.

(reactor trabalhando com urânio enriquecido), aproveita igualmente só 25% do urânio 235 existente inicialmente no urânio natural.

- Os «três sábios» encarregados pela Euratom de estudar este problema concluíram que não se recomendava a montagem de uma unidade de concentração isotópica.
- Porém os mesmos «três sábios», mais tarde, vêm declarar que, se tivessem tido a oportunidade de examinar os recursos hidroeléctricos africanos, teriam eventualmente emitido a opinião de realizar essa unidade em África.
- Na Alemanha o Prof. BECKER (28) de Marburg anunciou ter descoberto um processo diferente para realizar a separação isotópica em condições mais económicas: o processo da «Trennduese».
- O Prof. CROTH da Universidade de Bona, retomando o processo das supercentrífugas, já abandonado pelos Americanos, diz ter conseguido a concentração isotópica a um preço de 1/5 a 1/10 do das instalações de difusão. Valores referidos a uma unidade de 5 tons/ano de urânio (29).

De elementos tão vagos e dispersos pouco se pode concluir com segurança. Porém, o resumo que se faz mais adiante parece estar em harmonia com os factos que vieram a público sobre esta matéria:

- a) A indústria requer quantidades enormes de energia a baixo preço.
- b) As descobertas alemãs devem estar ainda muito longe de uma industrialização e mesmo que se atinjam economias da ordem de 1/5 a 1/10 nem por isso deixam de ser instalações caras e de elevada despesa de operação.
- c) É possível que na África portuguesa se encontrem aproveitamentos hidroeléctricos que produzam quantidades apreciáveis de energia a preço compatível com a referida indústria.
- d) Uma unidade de difusão na Europa só se justificaria em «pool» internacional dentro de organizações do tipo da O. E. C. E., Euratom, etc.
- e) Em resumo, Portugal Metropolitano não pode aspirar a possuir uma unidade de concentração isotópica a não ser que surja um processo ou método novo que revolucione a indústria, o que parece pouco provável.

III — REPROCESSAMENTO DE COMBUSTÍVEIS NUCLEARES IRRADIADOS

Com o advento dos reactores, passou a produzir-se quantidades importantes de combustível nuclear e outros materiais fortemente irradiados por terem permanecido dentro do reactor por tempo apreciável. É necessário reprocessá-los afim de se atingir todos ou alguns dos objectivos indicados abaixo:

- 1) Recuperar o Plutónio produzido a partir da conversão do Urânio 238 ou o Urânio 233 (o Protactínio 233) provenientes do Tório.
- 2) Recuperar o Urânio 235 ainda remanescente no combustível irradiado.
- 3) Eliminar os produtos de fissão que absorvem quantidades apreciáveis de neutrões no reactor, podendo ainda esses produtos ser ou não recuperados como elementos radioactivos.

A unidade de reprocessamento ou constitui parte integrante do reactor, como sucede com os reactores homogéneos, ou é separada, recebendo combustível irradiado de vários reactores que estejam debaixo da sua influência.

A instalação de uma unidade de reprocessamento é um problema de natureza económica onde é necessário ponderar, por um lado, as despesas de transporte entre o reactor e a unidade de reprocessamento e, por outro, o custo do reprocessamento que, em primeira aproximação, cresce com o tamanho da unidade.

São razões desta natureza que levam a instalar junto dos reactores homogéneos a unidade de reprocessamento, uma vez que o transporte de combustível seria mais ou menos impraticável.

No custo de reprocessamento influem principalmente os encargos de capital, dado que o capital é cinco vezes o custo de operação, mas depende também da diversidade de combustível a tratar, do grau de pureza final requerido e do rendimento da recuperação.

Como se mostra mais adiante, é difícil fornecer resposta generalizada para um problema de tão grande complexidade; porém, algumas conclusões gerais podem ser extraídas dos reduzidos elementos à nossa disposição.

Os métodos de reprocessamento actualmente com interesse podem classificar-se segundo as fases (primária e secundária) de tratamento em (30).

De todos estes processos o mais usado é o de extracção por solventes, devendo ainda considerar-se como soluções de interesse as seguintes: fosfato de bismuto, hexafluoreto e, por último, a pirometalurgia.

Não foi possível obter elementos da estrutura do custo do reprocessamento sobre os restantes processos, muitos dos quais estão ainda numa fase mais ou menos experimental. Por isso a questão vai ser tratada sobretudo para o processo de extracção por solventes:

*Processos de solventes* — Uma unidade capaz de tratar 35 kg/dia de Urânio enriquecido proveniente de combustível irradiado, de várias concentrações, segundo W. G. STOCKDALE (31), apresenta a seguinte estrutura de despesas, tabela n.º 2.

TABELA 1

Classification of separation processes

Phase I	Phase II	General examples	Specific examples
Solid	Liquid	Precipitation, absorption exchange, scavenging, electro-refining	Bismuth phosphate process. Melt refining of uranium
Solid	Gas	Sublimation	De Boer process (Hot wire-iodide)
Liquid	Liquid	Solvent extraction	Mexone and TBP Processes Molten silver extraction
Liquid	Gas	Distillation	Fluoride volatility process

TABELA 2

Capital cost of a Direct-Maintenance

*Processing-plant*

	Material and labour, \$
Process Building with Equipment	
Process equipment .....	678,731
Pipe, valves and fittings .....	1,734,770
Instruments and controls .....	574,988
Electrical (process) .....	93,766
Special equipment .....	761,503
Process building with services .	2,511,009
Subtotal .....	6,354,767
Waste Disposal	
Liquid waste collection and disposal .....	1,614,596
Gaseous waste collection and disposal .....	843,942
Waste disposal building with services: .....	858,892
Subtotal .....	3,317,430
Administration and Laboratory	
Building .....	2,221,848
Fuel Storage Building.....	908,556
Service Building .....	693,332
Yard Facilities .....	940,985
Total Labour and Materials .....	14,436,918
Construction Overhead and Fee	7,001,956
Engineering, including Fee .....	3,773,357
Total Construction and Engineering.....	25,212,231

Se uma instalação for concebida para trabalhar um número menos diversificado de combustíveis irradiados, por exemplo aqueles que normalmente são provenientes dos reactores mais correntes, teria um custo de exploração, segundo S. M. STELLER (32) de:

TABELA 3

Cost of conceptual plant (Stoller 1955)

Capital Investment

Plant capital costs including contingency .....	2.662,000
Plant capital costs including laboratory .....	300,000
Engineering fee for construction of facility (15%).....	399,300
Land .....	82,500
State or local taxes on equipment (3% of \$1.000,000) .	30,000
Spare parts (5% of \$1.000,00)	50,000
Start-up costs (supplies \$25,000 personnel \$175,000)	200,000
	<u>\$3.723,800</u>

Total Operating Costs

Annual direct personnel Operating costs (123 Emp.) ....	654,500	
Supplementary costs at 25% .....	163,600	
Technical assistance ....	300,000	
Annual chemical costs at \$1000/day.....	300,000	
Annual utility costs .....	60,000	
Annual waste costs at \$2,00/gal-\$4500/day .....	1.350,000	
Annual depreciation at 16% .	595,800	
Special materials inventory	215,530 *	414,130 +
	<u>\$3.639,430</u>	<u>3.838,030</u>

\* U<sup>235</sup> \$15/g

+ U<sup>235</sup> \$30/g

Esta unidade pode reprocessar 500 kg/dia, ou seja, 150/170 ton por ano, de combustível, recuperando-se 300 grs/dia de plutónio.

Tem interesse comparar estes elementos com os que foram dados pelo Sr. R. SARTORIUS E TROUVE (33) e que são constantes da tabela seguinte:

TABELA 4

INVESTISSEMENT ET COÛT ANNUEL DE FONCTIONNEMENT D'USINE DE TRAITEMENT D'URANIUM NATUREL OU FAIBLEMENT ENRICHI

Évaluations de source anglaise

Capacité en tonnes d'uranium par an	Investissement		Coût annuel de fonctionnement		Prix de revient du kg d'uranium	
	en 10 <sup>3</sup> £	en 10 <sup>3</sup> \$	en 10 <sup>3</sup> £	en 10 <sup>3</sup> \$	en 10 <sup>3</sup> £	en 10 <sup>3</sup> \$
a) 50	5	400	1	80	20	1.600
b) 250	10	800	2	160	10	800
c) 500	12,5	1.000	2,5	200	6,25	500

Évaluations de source américaine

Capacité en tonnes d'uranium par an	Investissement		Coût annuel de fonctionnement		Prix de revient du kg d'uranium	
	en 10 <sup>3</sup> dol.	en 10 <sup>3</sup> \$	en 10 <sup>3</sup> £	en 10 <sup>3</sup> \$	en 10 <sup>3</sup> £	en 10 <sup>3</sup> \$
d) 300	20	580	4	116	13,3	386
e) 1800	70	2.030	12	348	6,6	192

Por último convém fazer referência aos números apresentados pela AEC a fim de interessar os capitais privados na indústria do reprocessamento — veja-se *Nucleonics*, Outubro 1957.

Uma unidade para reprocessar 1 tonelada de urânio/dia e 300 dias de trabalho por ano, custa \$ 20,6 × 10<sup>6</sup> (~ 600 × 10<sup>6</sup>\$ portugueses); as despesas anuais com a sua operação são \$ 4,6 × 10<sup>6</sup> e o custo total da operação e em cada dia \$ 15,300, donde um custo de \$ 15,3/ton de urânio, valores estes que coincidem com os valores de Stoller extrapolados para 300 ton/ano.

A fim de tentar encontrar uma lei de formação nas estruturas de despesas apresentadas foi feita uma série de gráficos onde se marcaram os pontos de funcionamento de cada uma das fábricas em função da capacidade das mesmas.

Nestes gráficos indicou-se o investimento, a despesa anual de funcionamento e o custo do tratamento e foi escolhida uma escala logarítmica que permite extrapolar com mais facilidade.

Custo do reprocessamento que poderá ser tolerado

O reprocessamento é uma operação cara que hoje está avaliada em cerca de dólares 20 a 25/kg, ou seja, 580\$/kg a 725\$/kg de urânio. Veja-se, por exemplo, *Nucleonics* de Maio 1957.

O reprocessamento de urânio natural ou fracamente enriquecido varia conforme o combustível de 12\$/kg de U a 31\$/kg de U com um valor médio de 20 ~ 25\$/kg.

Esta operação é paga pela venda do urânio e do plutónio contido no combustível irradiado a reprocessar.

Um quadro apresentado por SARTORIUS-TROUVE, dá-nos uma ideia do valor total dum combustível irradiado em função da taxa de radiação:

Taux d'irradiation MWJ/T	Valeur de U \$	Valeur de Pu \$	Total
0	40	0	40
1.000	28	12	40
2.000	20	22	42
4.000	8	40	48
10.000	1	55	56

Estes valores foram calculados para os seguintes preços unitários:

12\$ o grama de plutónio

e um preço de  $U^{235}$  conforme o quadro seguinte:

0,7	0,6	0,5	0,4	0,3
40	28	18	9	2
12				

Neste quadro se mostra que no estado actual dos preços do urânio e plutónio se pode esperar um lucro apreciável em relação ao custo de 20 \$ do reprocessamento.

Se marcarmos no gráfico indicado a horizontal correspondente ao valor arbitrário de \$24/kg (~ 700\$/kg) de urânio, fica *definido o limite superior* desse custo, e a intercepção com as várias curvas de custo de reprocessamento vai definir as capacidades da unidade de reprocessamento.

Os valores obtidos foram:

Solução americana .....	~ 70 ton Urânio/ano
Solução Stoller.....	~ 120 ton Urânio/ano
Solução inglesa .....	~ 300 ton Urânio/ano

Os capitais a investir serão conforme os vários expositores, respectivamente:

Solução americana .....	$220 \times 10^6$ \$
Solução Stoller.....	$100 \times 10^6$ \$
Solução inglesa .....	$850 \times 10^6$ \$

Daqui se conclui que o número de 100 - 150 ton de urânio/ano de reprocessamento é, no estado actual do conhecimento do processo, *aceitável*, porque fornece para essa capacidade um custo de produção de \$ 25/kg e exige um capital não exageradamente elevado.

#### Avaliação da capacidade da fábrica

Como é sabido 1 grama de combustível  $U^{235}$  que seja fissionado fornece 1 MWD de calor (1 MWD =  $24 \times 1000 \times \text{kWh}$ ).

O combustível depois de sofrer um determinado número de fissões tem de ser substituído pelas razões já referidas. Avalia-se o estado de desgaste (taxa de irradiação) do combustível pela % de  $U^{235}$  fissionado em relação ao combustível total inicial ou ainda pelo seu equivalente calorífico e designa-se por «Burn out» ou B.O. (1% de Burn out equivale a) 10 000 MWD/ton métrica.

Quanto menor for o B.O. mais frequente será o reprocessamento químico.

Arbitraremos um valor médio de B.O. = 5 000 MWD/ton para todos os reactores instalados no País, que é um valor elevado no estado actual das realizações práticas.

Para reprocessar 100 ton de combustível irradiado por ano, é necessário que nesse ano se dê um consumo de 0,5% de  $U^{235}$ , ou seja 500 kg de  $U^{235}$ , e 500 kg de  $U^{235}$  queimados vão produzir 500 000 MWD de calor, que correspondem a 100 000 MWD de energia eléctrica, para um rendimento térmico global de 20%.

Foi arbitrado no cálculo das necessidades energéticas do país um coeficiente de utilização de 4 000 h em 8 600 h, ou seja, 47%. Porém é natural que as primeiras centrais nucleares venham a ser chamadas a fazer a base do diagrama e, por isso, é de prever uma utilização muito mais elevada, porém nunca superior a 330 dias/ano, valor que já daria uma utilização de 90%.

Se arbitrarmos uma utilização anual das centrais nucleares de 330 dias, temos  $\frac{100\ 000}{330} = 300$  MW

e será esta a potência total instalada em reactores nucleares que utilizados a 330 dias por ano e com um B. O. médio de 5 000 MWD/ton forneceriam 100 ton de combustível irradiado por ano para ser reprocessado.

#### Comparação do custo do programa de centrais de energia nuclear e o custo das unidades de reprocessamento

100 ton/ano de combustível irradiado a tratar implicam, já vimos, uma potência instalada em reactores de ~ 300 MW eléctricos, funcionando a 90% de utilização.

O custo de uma central nuclear é hoje, conforme os processos e potência, 8.000\$/kW a 12.000\$/kW, seja em média 10.000\$/kW.

Assim, 300 MW custariam 3.000.000 contos. Se compararmos esta verba com o custo do investimento na unidade de reprocessamento, teremos:

	Custo da unidade de reprocessamento	Relação de custos	% do custo total do empreendimento
Solução americana	$220 \times 10^6$ \$	7,3 %	6,8%
Solução Stoller ...	100	3,33%	3,2%
Solução inglesa ...	$850 \times 10^6$ \$	28,2 %	22,0%

Estes números merecem um comentário tendo em vista a enorme discrepância.

O número americano ( $220 \times 10^6$ ) é obtido a partir de uma larga extrapolação para a esquerda e parece prudente situarmo-nos entre 100-150 ton/ano de capacidade, valores que permitem esperar

um custo de exploração menor mas que envolve um capital de  $280 \times 10^6$  \$ e  $360 \times 10^6$  \$, respectivamente.

O número obtido para Stoller é achado por extrapolação relativamente pouco extensa, mas onde o coeficiente angular é arbitrado (igual ao andamento geral das restantes curvas). Convirá fixarmonos no ponto de 180 ton/ano de capacidade a que corresponde  $100 \times 10^6$  \$.

A solução inglesa implica uma unidade de 300 ton de urânio por ano e, embora os valores sejam interpolados e, portanto, de grande confiança, a unidade é grande de mais para reprocessar combustível apenas de uma unidade de 300 MW.

A situação modifica-se totalmente se a potência instalada for 1 000 MW. O custo será então de 10.000.000 contos, mesmo funcionando a 90% de utilização, e haverá que reprocessar 300 ton urânio/ano.

	Custo do reprocessamento	Investimento da unidade de reprocessamento	Relação dos custos	%
Solução americana	380\$/kg	$580 \times 10^6$	5,8%	5,5%
Solução Stoller ...	480\$/kg	$140 \times 10^6$	1,4%	1,3%
Solução inglesa ....	700\$/kg	$840 \times 10^6$	8,4%	7,7%

Os números mostram que para o nível de 1 000 MW de reactores já o investimento numa unidade de reprocessamento, mesmo na solução inglesa, representa apenas 8,4% do investimento total e parece justificável a sua montagem.

O valor de 1 000 MW é também o indicado por W. M. CAMBELL quando justifica a instalação de uma unidade no Canadá para o reprocessamento de combustíveis nucleares (*Nucleonics* — Set. 1956).

Conclusão: para 1 000 MW de capacidade instalada já é viável técnica e economicamente uma unidade de reprocessamento.

#### IV — FABRICAÇÃO DE COMBUSTIVEL NUCLEAR

Podendo aspirar Portugal a possuir uma indústria de tratamento de minério, culminando por uma fábrica de urânio nuclearmente puro, tendo em atenção ainda que para 1 000 MW de potência instalada em reactores já é viável uma unidade de reprocessamento de combustível nuclear irradiado, justifica-se que seja examinada a possibilidade do fabrico de combustível nuclear.

A designação de combustível nuclear será empregada como significando os elementos cindíveis ou férteis tais como são introduzidos nos respectivos reactores.

Um combustível nuclear pode apresentar-se em muitas formas entre as quais mencionamos as seguintes:

- *Óxido de urânio natural* — pode ser empregado sob a forma de «slurry», em pó, comprimido, sinterizado, revestido ou não de alumínio, aço e outros metais.
- *Sulfato de urânio e outros sais de urânio* — usados nos reactores homogêneos.
- *Urânio metálico* — em geral sólido mas também se encara a possibilidade do seu emprego no estado fundido; quando sólido em geral protegido por alumínio, aço e outros metais.
- *Ligas de urânio*, nomeadamente as contendo zinco, molibdénio, nióbio, silício e alumínio, revestidas ou não de alumínio, aço e outras ligas.
- *Metais fundidos*, contendo urânio disperso ou constituindo ligas.
- *Sais fundidos*.
- *Combustível cerâmico* constituindo óxido de urânio ou então carbonato de urânio.
- *Urânio laminado* ou em semente entre placas de alumínio.

Esta lista, que apenas refere as principais formas em que hoje se emprega o urânio natural ou o urânio enriquecido, mostra que é necessário dispor essencialmente de 3 operações fundamentais:

- 1) fabricação de urânio metálico nuclearmente puro.
- 2) fabricação de ligas e compostos de urânio.
- 3) trabalho metalo-mecânico de urânio e suas ligas e compostos (laminagem, operação de corte, briquetagem, prensagem, etc.).

Cabe, desde já, esclarecer que para o Tório, Plutónio, Urânio 233 e Protactínio os problemas e as operações são semelhantes.

#### 1) Fabricação de urânio metálico nuclearmente puro

Sem embargo do interesse crescente pelo óxido de urânio (disperso, sinterizado, etc), que tem a vantagem de possibilitar a elevação da temperatura dos elementos dos reactores muito além da temperatura limite imposta pelo urânio metálico, há que reconhecer que, actualmente, é principalmente sob a forma de urânio metálico ou suas ligas que o combustível nuclear é usado em reactores.

Não reputamos difícil a introdução em Portugal da técnica respectiva, dada a divulgação das informações e dos conhecimentos sobre metalurgia do urânio que se verificou a partir da Conferência de Genève.

Além dos três países que dominam a técnica da energia nuclear, toda uma série de pequenos

países de menor grandeza têm conseguido afinar o processo clássico da obtenção de urânio metálico (preparação do tetracloreto de urânio seguida de uma cálcio-magnesioterapia). O equipamento não parece extremamente dispendioso pela descrição feita na literatura.

### 2) *Fabricação de ligas e compostos de urânio*

Não parece que a fabricação de ligas tenha qualquer dificuldade, exigindo apenas a técnica de fusão sob vácuo em fornos eléctricos de indução. A indústria portuguesa já possui alguns fornos eléctricos de indução com atmosfera mais ou menos confinada e a passagem para o fabrico sob vácuo não parece oferecer dificuldades, pois que inúmeros fabricantes americanos, ingleses e europeus continentais oferecem o material respectivo.

### 3) *Trabalho metalo-mecânico do urânio e suas ligas*

O trabalho mecânico do urânio também não constitui hoje dificuldade de maior do ponto de vista tecnológico mas do ponto de vista económico haverá que examinar se o consumo de combustível nuclear justificará a instalação de unidades para a laminagem não só de urânio como de alumínio e aço, exigida na fabricação dos elementos nucleares.

Debaixo do aspecto técnico as publicações e referências a estas fabricações são abundantíssimas e damos mais adiante uma resenha que revela a intervenção da indústria particular no fabrico de combustíveis nucleares. Assim, porexemplo:

— *AMF Atomics (Canada) Ltd.* — recebeu em Setembro de 1956 o 1.º contrato para a fa-

bricação de combustível nuclear no Canadá (34).

- *Babcock & Wilcox Americana* — ganhou, em fins de 1956, um concurso para o fabrico de elementos combustíveis e decidiu, por isso, aumentar as facilidades que possuía em Lynchburg (32.000 pés quadrados) com um edifício de 52.000 pés quadrados. O valor desse edifício foi seguro em  $10 \times 10^6$  dólares, ou seja 300.000 contos (35) e (36).
- A firma *Degusa* na Alemanha é encarregada em 1956 de fazer os elementos para o reactor alemão, os quais são entregues em Março de 1956 (37) e (38).
- Em Junho de 1956 concorrem na América 23 firmas para fabricar elementos de combustível (39).
- *Stant Manufacturing Coal, Ltd.* anuncia regularmente a fabricação de laminadores (roll mill) para o fabrico de elementos (40).

Estes exemplos, escolhidos entre muitos outros, mostram que a construção de elementos para reactores nucleares, mesmo quando exija operações de laminagem, constitui uma actividade industrial relativamente generalizada.

### *Resumo do ponto IV*

Do que fica dito afigura-se poder concluir que não há qualquer óbice tecnológico para que esta indústria se desenvolva e seja viável quando estiverem instalados em Portugal 1000 MW de reactores nucleares.

Chama-se, contudo, a atenção para o facto de que a exposição feita não constitui a prova da viabilidade das referidas indústrias, mas parece recomendável que se inicie oportunamente um estudo pormenorizado neste campo tecnológico.