

1ª. REUNIÃO DOS TÉCNICOS PORTUGUESES

DE ENERGIA NUCLEAR

ASPECTOS INDUSTRIAIS DA

ENERGIA NUCLEAR

por:

ANTÓNIO GOUVEA PORTELA

Engenheiro da Companhia União Fabril

L I S B O A

Janeiro de 1958

ASPECTOS INDUSTRIAIS DA ENERGIA NUCLEAR

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 a que o País venha a dispôr das facilidades industriais que o advento de 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, Tritio, 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 sucesso 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 detalhado 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 U235 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:

- 1º.) se os reactores nucleares são adequados a fornecer energia vendável no país quando forem exauridos os recursos hidroelétricos.
- 2º.) 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 hidroelétricos 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 a permitir a estas participar fortemente na montagem e construção desses reactores e indústrias conexas.

B.1. DATA PROVÁVEL DO ESGOTAMENTO DOS RECURSOS HIDROELECTRICOS 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 2º. 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 1945.

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:

- 12×10^6 MWh para a energia permanente da totalidade dos nossos recursos hidroeléctricos.
- 19×10^6 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:

	12×10^6 MWh	19×10^6 MWh
Extrapolação da linha e)	~1970	~1973
" " " c)	~1975	~1980
" " " d)	~1977	~1986

Parece-nos prudente que sejam tomados em consideração apenas os números relativos ao "plafond" de 12×10^6 MWh e por isso seria escolhido o ano de 1975 com 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 Snr. Karl Mayer do Standford Research Institute (6), onde se avalia, para a Europa e para o ano de 1975, um consumo total de 2.678×10^6 MWh.

Com efeito as previsões para o ano de 1960 são:

- para Portugal 3×10^6 MWh (7)
- para a Europa (OECE) 506×10^6 MWh (7) e (6)
- total da Europa 938×10^6 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) 1440×10^6 MWh
- total da Europa 2678×10^6 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 12×10^6 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-à fixar finalmente em 1970 a data provável em que as grandes centrais térmicas e eventualmente nucleares, deverão ser encaradas sèriamente.

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 estamos provavelmente na zona de inflexão da referida logística. Partindo ainda do principio 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 12×10^6 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.

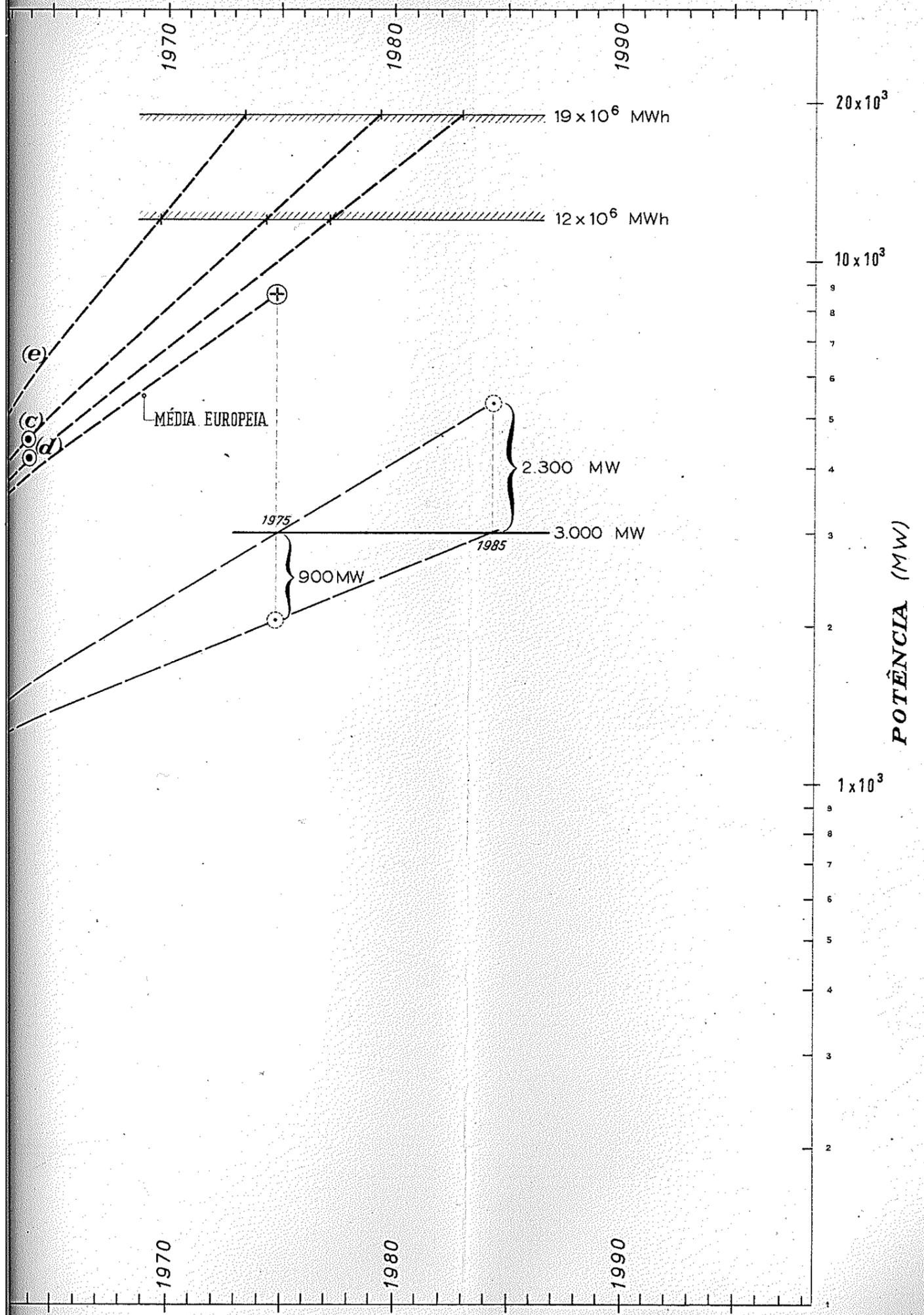
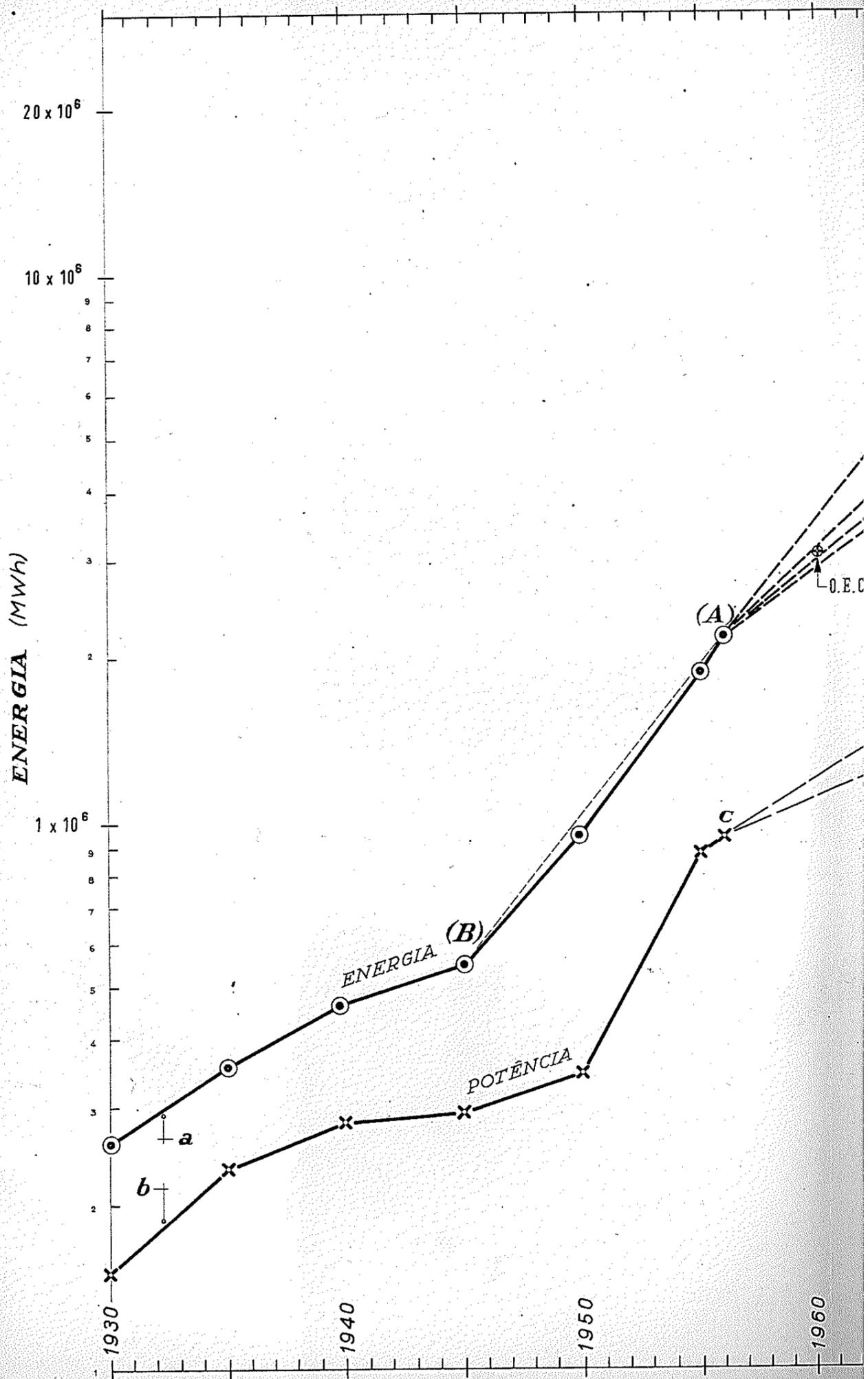
Assim, teremos:

	Energia Produzida	Potência Instalada	Horas de trabalho/ano.
	MWh		
1930	260.000	150 MW	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 fomente a melhor utilização da ponta, uma judiciousa utilização das capacidades das albufeiras, a supressão de centrais obsoletas no cômputo da ponta instalada, vão permitir elevar essa utilização de modo a atingir-se no decénio 1975/1985, em média, 4.000 horas por ano. Nessas condições a potência necessária ao fornecimento de mais 12×10^6 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 duma 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 pode avaliar-se em 2.000 MW \pm 1.000 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 SUSCEPTIVEIS DE SUBSTITUIR A ENERGIA
HIDROELECTRICA 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 Standford 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 cen-

tígrados, em quantidades que não devem ultrapassar os 1.000 Kwatts. 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° e o fluxo mais elevado foi de 629 cal/cm²/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 e 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, sobre 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 regimen 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 fábrica silício para baterias solares a 180 dollars 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: fotossíntese 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 da 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 calorías/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/grama/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 microexplosões 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 frios (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 $0,2 \times 10^6$ °C 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 $1,3 \times 10^6$ °C.

- 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 crescente. Quando estacionariza o plasma desintegra-se.

Tem-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 dispendo 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 /cm²/seg) sejam neutrões produzidos por verdadeiras reacções de fusão encadeadas.

- A solução parece consistir em manter descargas eléctricas de alta intensidade e em regimen 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

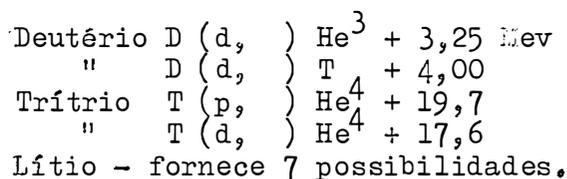
russos não eram resultantes de verdadeiras reacções de fusão (13), (14), e (15). Informou que em Los Alamos se procura estabilizar o efeito da concentração estabelecendo um campo magnético axial e adiantou que além do efeito de concentração se estuda hoje na América outras hipóteses mas que estão ainda classificadas.

Assim, por exemplo, em Livermoor estuda-se um processo diferente mas classificado, em Princetown 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 Zetta conseguiram temperaturas da ordem dos 5×10^6 °C 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):



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 confirmado ao signatário pelo Snr. 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 decênio 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.

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 pelo Sr. K.M. Mayer (21) 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 com preendida 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 938×10^6 MWh, enquanto que a América só estaria interessada em 532 MWh de ener

gia 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 investimento, 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).

QUADRO A

SUMMARY OF NUCLEAR MARKET POTENTIALS
IN THE WORLD POWER INDUSTRY
(SHOWN IN KWHRs * 10⁹ 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	3.06	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

e) Num estudo comparativo entre o reactor P.W.R. e Calder Hall, os Srs. D.P. Haver e A. Puishes (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 aluguer	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	Percentagem do equipamento	
		América	Inglaterra
Grande equipamento	1,33	5	5
Pequeno equipamento	0,83	20	25
Materiais de construção ..	0,91	25	30
Não de obra	0,40	35	25
Gastos gerais	0,50	15	15
		<hr/> 100	<hr/> 100

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

	<u>Americana</u>	<u>Inglesa</u>
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.

E 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 p_ode 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 olejetas 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

1ª. geração de reactores - Construída com os ensinamentos actuais colhidos em protótipos e ensaios em unidade já construídas.

Esta 1ª. 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/,kW, ou seja 8.700\$/kWh e 11.600\$/kWh.

2ª. geração de reactores - Resultado da experiência entre-tanto adquirida e que entrará em funcionamento entre 1965~1967.

Custo de produção:

8 ~ 11 mills/kWh
\$23 ~ \$32/kWh

3ª. 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 efetuar 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 homogêneos. 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 participação 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 regimen 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.

	REACTORES SODIO-GRAFITE		REACTOR HOMOGENEO DE AGUA PESADA		TIPO CALDER-HALL			CENTRAL A CARVÃO CONVENCIONAL	
	Th-U	Th-U E.B.T.	Ref.	Corri gido	Ref.	Corri gido.		Base	Corri gido.
<u>Características técnicas</u>									
Temp. máx. no combustível-°C..	1.040	1.040							
Temp. máx. no fluido arrefe- cedor	538	560	300						
Vapor: (kg/cm2	59,7	98	43					100~120	
(temp.	482	538	~280					550~650	
Burn-up	10.000								
MWD/T									
Potência M.W.	150	180	150					200	
<u>Capital investido</u>									
\$/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\$	
<u>Custo do kWh</u>									
Taxa de amortização	0,15	0,15	0,16	0,15	0,192	0,15	0,15	0,15	
Utilização anual	7.000	7.000h	5.250h	7.000h	6.550h	7.000h	5.250h	7.000	
Encargos de capital	\$18	\$14	\$290	\$205	\$117	\$178	\$239	\$081	\$081
Operação e Conservação	\$029	\$029	\$131	\$131)))	\$020	\$020
Custo do combustível	\$064	\$041	\$055	\$055)))	\$074	\$122
Custo do moderador	-	-	\$029	\$029)))		
Total	\$273	\$210	\$505	\$420	\$197	\$258	\$319	\$175	\$223

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

- Rendimento global térmico 34% ou seja 2.450 cal/kWh net.

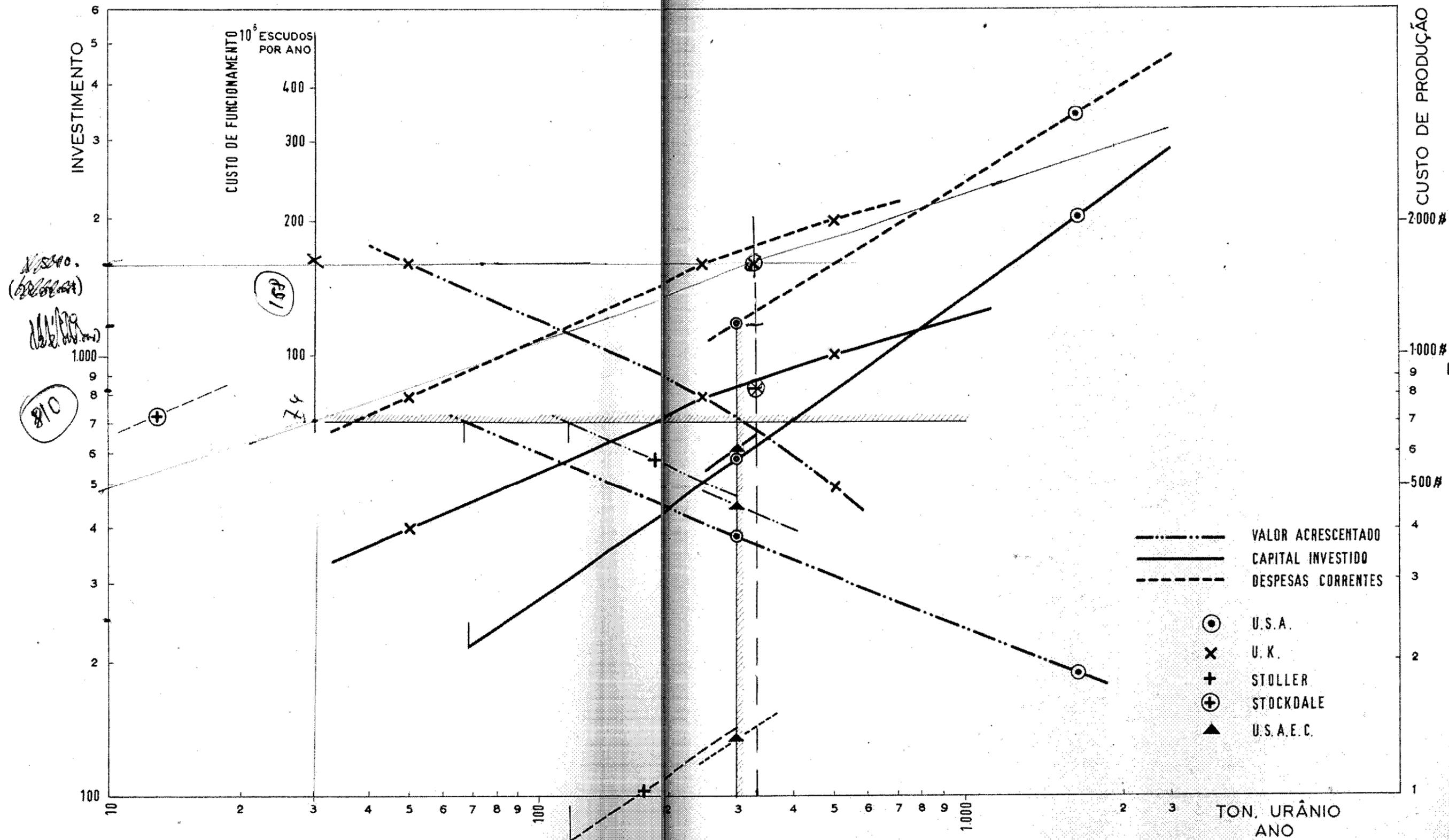
- Três hipóteses de combustível:

- | | |
|---|------|
| A - 30\$/10 ⁶ cal, ou seja 210\$/ton. de carvão de 7.000 cal/kg. | |
| B - 50\$/10 ⁶ cal, ou seja 350\$/ton. | idem |
| C - 70\$/10 ⁶ 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.

COMBUSTÍVEIS NATURAIS OU FRACAMENTE ENRIQUECIDOS



Pode pois afirmar-se que as centrais nucleares em 1975 serão competitivas, numa base puramente económicas, 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 hidroelétricos, 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 atomica:

- 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 urâníferos 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 existir 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 numa forma "desclassificada". Limitamo-nos por isso a linhar 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 plutônio 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 o plutônio produzido é maior do que o 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, 7×10^6 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 supercentrifugas, já abandonada 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 hidroelétricos 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 C.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 a fim 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 homogêneos, 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, decresce com o tamanho da unidade.

São razões desta natureza que levam a instalar junto dos reactores homogêneos a unidade de reprocessamento, uma vez que o transporte do 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 35kgs/dia de Urânio enriquecido proveniente de combustível irradiado, de várias concentrações, segundo W.G. Stockdale (31), apresenta a seguinte estrutura de despesas, tabela nº. 2.

TABELA N^o. 1

CLASSIFICATION OF SEPARATION PROCESSES

Phase I	Phase II	General examples	Specific examples
Solid	Liquid	Precipitation, absorption, ion 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 Nº. 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	<u>2,511,009</u>
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 ..	<u>858,892</u>
Subtotal	3,317,430
Administration and Laboratory Building ..	2,221,848
Fuel Storage Building	908,556
Service Building	693,332
Yard Facilities	<u>940,985</u>
Total Labour and Materials	14,436,918
Construction Overhead and Fee	7,001,956
Engineering, including Fee	<u>3,773,357</u>
Total Construction and Engineering	25,212,231

Se uma instalação fôr concebida para trabalhar um número menos diversificado de combustiveis irradiados, por exemplo aqueles que normalmente são provenientes dos reactores mais correntes, te-
ria um custo de exploração, segundo S.M. Steller (32) de:

TABELA Nº. 3

COST OF CONCEPTUAL PLANT (STOLLER 1965)

Capital Investment

Plant capital costs including contingency	2,662,000
" " " 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 \$1,000,000)	50,000
Start-up costs (supplies \$25,000 personnel \$175,000) ..	<u>200,000</u>
	\$3,723,800

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	<u>215,530*</u>	<u>414,130+</u>
	\$3,639,430	3,838,030

* U²³⁵ \$15/g
+ U²³⁵ \$30/g

Esta unidade pode reprocessar 500 kgs/dia, ou seja, 150/170 tons, por ano, de combustível, recuperando-se 300 grs/dia de Plutônio.

Tem interesse comparar estes elementos com os que foram dados pelo Snr. R. Sartorius e Trouve (33) e que são constantes de tabela seguinte:

TABELA Nº. 4

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

Evaluations de source anglaise

Capacité en tonnes d'uranium par an	Investissement		Coût annuel de fonctionnement		Prix de revient du kg. d'uranium	
	en 10 ⁶ £	en 10 ⁶ \$	en 10 ⁶ £	en 10 ⁶ \$	en 10 ⁶ £	en 10 ⁶ \$
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

Evaluations de source américaine

Capacité en tonnes d'uranium par an	Investissement		Coût annuel de fonctionnement		Prix de revient du kg. d'uranium	
	en 10 ⁶ dol.	en 10 ⁶ \$	en 10 ⁶ dol.	en 10 ⁶ \$	en 10 ⁶ dol.	en 10 ⁶ \$
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 \$ $20,6 \times 10^6$ ($\sim 600 \times 10^6$ \$ portugueses); as despesas anuais com a sua operação são \$ $4,6 \times 10^6$ 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 tons/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 doll. 20 a 25/kg., ou seja, 580\$/kg. a 725\$/kg. de urânio. Veja-se, por exemplo, Nucléonics 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 plutônio 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:

<u>Taux d'irradiation</u> MWJ/T	<u>Valor de U</u> \$	<u>Valor de Pu</u> \$	<u>Total</u> \$
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 plutônio

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 Plutônio 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
" Stoller	~120 ton " "
" inglesa	~300 ton " "

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

Solução americana	220×10^6 \$
" Stoller	190×10^6 \$
" inglesa	850×10^6 \$

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 ($1 \text{ MWD} = 24 \times 1000 \times \text{kWh}$).

O combustível depois de sofrer um determinado número de fissões tem de ser substituído pelas razões já referidas. Avalia-se o estado de desgasto (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 fôr 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 kgs de U^{235} , e 500 kgs 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 $\frac{100.000}{330} \approx 300$ MW e será esta a potência total instalada em reactores nucleares que utilizados a 330 dias por ano e com um B.C 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 tons/ano de combustível irradiado a tratar implica, 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 de investimento na unidade de reprocessamento, teremos:

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

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

O número americano (220×10^6) 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 280×10^6 \$ e 360×10^6 \$, 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 fixarmo-nos no ponto de 180 ton/ano de capacidade, a que corresponde 100×10^6 \$.

A solução inglesa implica uma unidade de 300 tons. 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 fôr 1.000 MW. O custo será então de 10.000.000 contos, mesmo funcionando a 90% de utilização, e haverá que reprocessar 300 tons. urânio/ano.

	<u>Custo do reprocessamento</u>	<u>Investimento da unidade de reprocessam.</u>	<u>Relação dos custos</u>	<u>%</u>
Solução americana	380\$/kg.	580×10^6	5,8%	5,5%
Solução Stoller	480\$/kg.	140×10^6	1,4%	1,3%
Solução inglesa	700\$/kg.	840×10^6	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 combustível 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 tal como eles são introduzidos nos respectivos reactores.

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

- Oxido 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 crômio, zinco, molibdênio, 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 carbono 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 dispôr 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, Plutônio, 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 3 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-magnésio termia). 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 sob o ponto de vista tecnológico mas sob o 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 sumária que revela a intervenção da indústria particular no fabrico de combustíveis nucleares. Assim, por exemplo:

- AEF Atomics (Canadá) Ltd. - recebeu em Setembro de 1956 o 1º. contrato para a fabricação 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 10×10^6 doll., ou seja 300.000 centos (3) e (36).
- A firma Degusa na Alemanha é encarregada em 1956 de fazer os elementos para o reactor alemão, os quais são entregues em larço 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 industria se desenvolva e seja viável quando estiverem instalados em Portugal 1.000 MW de reactores nucleares.

Chama-se contudo a atenção que a exposição feita ~~na~~ na constitui a prova da viabilidade das referidas indústrias, mas parece recomendável que se inicie oportunamente um estudo detalhado neste campo tecnológico.

V - Fabricações especiais

Sob este título foram catalogadas:

- V.1.) Toda uma série de indústrias que se desenvolveram por força do advento da energia nuclear;
- V.2.) Certas indústrias clássicas que tiveram de sofrer alterações mais ou menos profundas para se adaptarem às exigências da era atômica.

====

V.1. - Indústrias novas

O número de indústrias novas que directa ou indirectamente proliferam impulsionadas pela energia nuclear é assaz elevado. Vamos porém concentrar-nos apenas em algumas, as mais representativas, e que serão tratadas muito ligeiramente e pro-memória.

a. Moderadores

- a.1. Água pesada
- a.2. Grafite (pureza nuclear)
- 2.3. Berílio

b. Metais líquidos

Sódio, potássio, bismuto e suas ligas.

c. Contentores

Zircónio.

a.1. Água pesada

Este importante moderador de neutrões é estudado em outro trabalho (41) apresentado a este Congresso e por

isso dispensamos de o examinar aqui. Apenas diremos que é difícil à escala do mercado português montar uma indústria que compita em preços com a água pesada oferecida pelos Americanos ou produzida em certas grandes unidades.

Esta indústria pode vir ainda a ter uma certa importância e por isso não é, de modo algum, de pôr de parte o seu estudo e exame, recordando ainda que o Deutério é um dos combustíveis empregados na fusão nuclear.

a.2. Grafite

Um dos moderadores mais empregados é a grafite. Convém comparar as suas características com a dos moderadores concorrentes (42):

	Taxa de Moderação (1)	Energia de amortecimento por cm (2)
Grafite	202	0,0625
Berílio	145	0,16
Oxido de Berílio	183	0,11
Água	62	1,36
Água pesada	5.000	0,18

- (1) Relação da energia de amortecimento por cm de percurso e o coeficiente de absorção total.
- (2) Energia perdida por um neutrão por cm de percurso no moderador.

Deste quadro se conclui que, efectivamente, a água pesada é, de longe, o melhor moderador, sob o ponto de vista da taxa de moderação, mas ainda, que a grafite é o melhor dos restantes.

Os problemas fundamentais da preparação da grafite para usos nucleares são:

1 - Obtenção de uma matéria prima de base de pureza inicial elevada.

2 - Dominar as seguintes técnicas:

- Calcinação de grafite a 1300°C
- Moagem e separação
- Formação de pasta de alcatrão
- Moldação ou extrusão da pasta
- Redestilação do alcatrão (750°C)
- Impregnação com alcatrão para aumentar a densidade
- Grafitização e purificação final.

Os objectivos a atingir são:

- Conferir à grafite elevada densidade.
- Uma elevada pureza sobretudo no que respeita a elementos com elevada "secção eficaz", como seja: boro, vanádio, titânio, ferro, cálcio e terras raras.
- Elevadas características de resistência mecânica apreciadas pelo módulo de elasticidade, dobragem e esmagamento.
- Baixo coeficiente de expansão térmica.
- Boa condutibilidade térmica.
- Emissividade de calor.

Além destas propriedades, há outras de menor importância, como sejam as características eléctricas.

A grafite tem nas aplicações aos reactores algumas características químicas que são inconvenientes:

- Oxidação a alta temperatura (o que obriga a protegê-la em invólucros fechados).
- Tendência a formar carbonetos com um grande número de metais, nomeadamente: molibdênio, vanádio, silício, crômio, níquel, titânio, zircônio, boro, etc.

A grafite tem ainda propriedades estruturais (*), (43) e (44), que debaixo da acção de um fluxo de neutrões acumula energia e tensões que é necessário eliminar, o que se atinge por uma elevação de temperatura anormal na grafite. Parece que este processo oferece alguns riscos, conforme se pôde observar no recente acidente ocorrido na central de Windscale.

Mas, nem por isso, deixa a grafite de ser um moderador de 1ª. plana e recomendável o seu estudo.

a.3. Berílio (45)

Usa-se como moderador sob a forma de óxido de berílio.

Encontra-se o óxido de berílio na natureza ligado aos óxidos de alumínio e silício em percentagens da ordem dos 11~13%.

A fabricação de óxido de berílio puro (99.95%) já se fazia antes da última guerra, e há actualmente uma série de processos que nos limitaremos a enumerar:

(*) Wiegner effect.

Produção de óxido impuro

- Ataque alcalino, seguido de dissolução em ácido. Os processos possíveis são: Degussa, Joy Windecker, St. Gobain, McKee.
- Fusão preliminar seguida de ataque ácido - Processo Sawyer-Kjellgren.
- Ataque por meio de fluoretos ácidos e alta temperatura. Processos Copaux-Kawecki e Ellig, Hosenfeld e Fischer.
- Ataque por cloro. Processo: Sheer-Kroman.

Refinação do óxido ou hidróxido impuro

- Destilação do cloreto de berílio.
- Sublimação ou extração pelo clorofórmio do acetato básico de berílio.
- Cristalização dos sais de berílio.

Nenhuma das técnicas descritas se afasta em demasia dos métodos clássicos de química e não são necessárias técnicas nucleares no tratamento deste moderador.

Parece razoável que sejam examinadas as possibilidades mineiras de berílio em Portugal (metropolitano ou ultramarino) e estudada a sua industrialização.

b. Metais líquidos (46)

Os reactores nucleares geram o calor a temperaturas cujo limite superior é definido, não pela reacção nuclear, mas sim pelos materiais de que são construídos.

Na procura de fluidos arrefecedores capazes de operar a altas temperaturas, foram examinadas muitas soluções novas, entre as quais os metais de baixo ponto de fusão e de elevado ponto de ebulição. Estão neste caso nomeadamente: sódio, potássio, bismuto e suas ligas.

O problema da sua fabricação não oferece hoje dificuldades e interessa mais o estudo do seu manuseamento em quantidades da ordem das toneladas com uma elevada afinidade química (sódio e potássio).

Esta característica química implica um estudo detalhado da compatibilidade dos vários sistemas em contacto com o metal.

Convém examinar as principais características físicas, químicas e nucleares a fim de justificar o interesse que podem ter estes metais como fluido arrefecedor de reactores. (47)

	Cross-Section para neutrões térmicos	Ponto (°C)		Gradiente térmico no filme (1)	Observ.
		Fusão	de Ebulição		
Água	0.0208	0	100	70°C (2)	{ adivida pelo Oxigénio.
Chumbo	0,0059				
Mercúrio	15,3	-38,9	357	30°C	
Sódio	0,012	97,8	883		
Potássio	0,012	63,7	760		
<u>Ligas:</u>					
Sódio/Potás.		-12	765	54°C	
Chumbo/Bism.		125	1.670		

- (1) Fluxo de calor igual a 200 watts/cm²
- (2) Água sob pressão a 140 kgs/cm² abs.

Deste quadro se pode concluir:

- o mercúrio não pode ser utilizado devido ao elevado poder de absorção de neutrões o que impede a sua inclusão no núcleo do reactor.

Além disso tem uma temperatura de ebulição muito baixa.

- Chumbo e chumbo bismuto - Sobretudo a liga chumbo bismuto tem merecido alguma atenção e se a experiência mostrar que o seu comportamento em reactores é bom, haverá que estudar a produção, em escala industrial, do bismuto.

- Sódio, sódio-potássio, potássio - A sua fabricação apresenta algumas dificuldades, assim como o seu manuseamento. A afinidade para o oxigénio obriga a efectuar o seu transporte em atmosfera inerte.

Há ainda problemas de purificação destes metais quando já incluídos no circuito do reactor.

c. Zircónio (48)

Apenas uma nota para nos referirmos aos materiais estruturais.

Os reactores mecânicos necessitam de materiais estruturais quer para conter o combustível, quer o moderador, e ainda materiais de suporte.

A maioria destes materiais está no interior da pilha e sofre não só a influência de altas temperaturas, pressões, mais

ainda elevados fluxos de calor e radiações intensivas.

A metalurgia e fabricação de materiais estruturais tem sido a preocupação dominante e pode dizer-se que o rendimento dos reactores vai de par com os avanços feitos neste campo.

Normalmente os metais usados são o alumínio, o magnésio e respectivas ligas e ainda o aço cromo-níquel com ou sem outros aditivos.

Consideramos porém estes metais como clássicos e, por isso, não os incluiremos na alínea a) Indústrias novas.

Além dos metais referidos há ainda o zircónio que mostra possuir características convenientes.

Este metal, mais abundante que o níquel, o cobre e o chumbo, vem quase sempre acompanhado do seu homólogo hafnio; Porém, este último não pode ser usado em reactores pela elevada secção eficaz em relação aos neutrões térmicos.

O zircónio encontra-se em geral nas praias, da Costa Ocidental Africana, Madagascar, etc.

O zircónio dúctil, de elevada pureza, foi produzido em 1940 por von Zeppelin, mas em 1945 o método foi substituído por outro estudado pelo Bureau of Mines.

O método implica uma redução magnésio ou cálcio térmica em vácuo ou atmosfera controlada. Há também métodos electrolíticos e de sublimação de fluoretos.

As propriedades do zircónio como metal protector são apreciáveis: (49)

- Ponto de fusão: ~1850°C (elevado)
- Condutibilidade térmica: 0,040 cal/cm S °C que se compara com o cobre.
- Massa específica: 6 gr/cm³ - o zircônio é um metal relativamente pesado.
- Dureza: Brinell 125~145.
- Resistência à tracção: 35,1 kg/mm².
- Módulo de Young: $9,4 \times 10^3$ kg/mm².

Propriedades químicas (corrosão)

O zircônio resiste perfeitamente:

- às soluções de sais (geralmente cloretos)
- à água do mar
- a todos os ácidos orgânicos menos o dicloroacético e o tricloroacético, mas é atacado ligeiramente pelo ácido oxálico.
- resiste ainda ao ácido sulfúrico diluído e ácido fosfórico, ácido clorídrico, ácido nítrico.

O zircônio é pois um metal de grande futuro e constitui com o titânio e o tântalo três metais que estão merecendo a maior atenção como materiais estruturais, sobretudo sob a forma de ligas.

V.2. Indústrias clássicas que sofreram alterações com o advento dos reactores.

Pode afirmar-se que a construção de reactores interferiu com a grande maioria das indústrias; a dificuldade está apenas em classificar essas indústrias e discernir entre as várias causas

de alteração, quais as que pertencem aos reactores e quais as que são consequência de outros progressos verificados concomitantemente noutras actividades.

Por este facto, em vez de ser preparada uma lista exhaustiva das indústrias atingidas com o advento dos reactores, vamo-nos limitar a referir alguns dos casos mais salientes e ilustrativos.

- Metalurgia

A actividade metalúrgica foi das mais influenciadas por três razões fundamentais:

- 1ª) Necessidade de produzir materiais com características de finidas não só pelas propriedades mecânicas e químicas, mas ainda por propriedades nucleares. Assim, requer-se dos materiais que não contenham, por exemplo, senão quantidades ínfimas de elementos cujos núcleos constituam grandes absorvedores de neutrões, ou então exactamente o inverso, incluir num aço cromo-níquel a maior quantidade de boro possível, a fim de fabricar barras de regulação eficientes.
- 2ª) Necessidade de afinar técnicas para o fabrico de metais pouco conhecidos; zircónio, titânio, etc.
- 3ª) Necessidade de trabalhar materiais radioactivos e portanto fazendo uso de instrumentos que possam ser comandados a distância.

As três razões apontadas introduziram modificações profundas na metalurgia e constituem hoje novas especialidades. Com efeito, trabalhar à distância, sob vácuo, fundir por zonas, etc., cons

tituem técnicas que é mister adquirir se a indústria portuguesa pretende participar no programa de reactores.

- Química

Esta indústria dada a sua prodigiosa extensão é das mais afectadas pela energia nuclear.

Os principais motivos são:

1 - Pureza Nuclear: esta expressão que se inclui em muitas normas de fabrico representa um esforço que merece ser devidamente assinalado.

Só a fabricação de transistores para a indústria electrónica se compara com as exigências requeridas para atingir a pureza nuclear.

2 - Trabalhar com elementos raros e pesados, apresentando-se sob várias valências e em % extremamente reduzidas, do que resultou a necessidade de emprego à escala industrial de novas técnicas (solventes, permutação iónica, electroforese, etc.).

3 - Processar substâncias radioactivas, implicando trabalho a distância com operador protegido.

Problema semelhante ao já referido para a metalurgia.

4 - Desenvolvimento dos métodos de análise com emprego de processos baseados em propriedades físicas.

- Electrónica

Esta indústria foi desenvolvida nas duas últimas décadas pela acção das seguintes motivações:

- Comunicações (rádio, televisão, radar, etc.)
- Comandos de reactores
- Automação

Não seria fácil conceber a marcha de um reactor sem o "sistema nervoso" por onde circular "sinais" provenientes de múltiplos pontos sensíveis, sinais que depois de interpretados logicamente, servem não só para registar a marcha do reactor, como para efectuar a sua regulação automaticamente e ainda pará-lo em caso de acidente.

Quando a divergência do reactor se torna alarmante é necessário, numa fracção de segundo, interromper a marcha do reactor e não há reflexos humanos que disponham de um "time-lag" suficientemente reduzido para o efectuar.

A indústria electrónica, por intermédio do calculador (digital ou análogo) prestou à energia nuclear um decisivo auxílio.

Sem os calculadores do tipo Ramac, IBM 704, etc. não seria possível calcular a geometria do reactor, nem simular os fenómenos transientes, fundamentais no estudo da sua estabilidade de marcha.

Infelizmente a indústria electrónica em Portugal está muito pouco desenvolvida e é mister que esta situação seja modificada se realmente for desejável que participe no programa de reactores nucleares em perspectiva.

- Metallo- mecânica

As centrais nucleares necessitam de importante participação desta indústria que toma vários aspectos:

- 1 - A fabricação (geralmente no local), de depósitos em aço que têm de resistir a altas temperaturas e pressões. Estes depósitos feitos em chapa muito espessa (100~120 mm), têm de ser soldados, radiografados, recozidos e trabalhados no próprio local.

Além disso a precisão de construção é extremamente elevada. É imperioso que se adquira em Portugal a técnica aqui referida.

2 - A fabricação mecânica de precisão de materiais além do aço, bronze, ferro fundido, etc.

Também a fabricação de peças geomètricamente complexas com ajustamentos e limitações nas três dimensões.

3 - Fabricação de máquinas e seus elementos

Nesta rubrica se incluem válvulas, bombas, etc., que deem satisfação às exigências nucleares.

4 - A restante actividade é relativamente clássica: estruturas metálicas, pontes rolantes, caldeiraria ligeira e **grossa**, etc.

- Construção civil

Praticamente só a fabricação de betões densos pode eventualmente constituir matéria nova neste campo.

Na realidade nada num reactor representa técnica mais difícil do que a exigida na construção de uma grande barragem, conduta forçada, etc., obras já repetidamente realizadas em Portugal.

Resumo do Ponto V.

Para que o país participe no fabrico de reactores nucleares têm de ser desenvolvidas as indústrias química, metalúrgica, mecânica, electrónica, etc., referidas na alínea V 2.

Mesmo que não seja economicamente viável a fabricação especializada de zircónio, berílio ou qualquer outra das indicadas em V.l. dada a exiguidade do mercado nacional, nem por isso deixa de ter o maior interesse que se desenvolvam as indústrias clássicas de forma a que participem activamente na construção ou fornecimento de materiais dos futuros reactores.

Quanto às indústrias novas (V.l.), têm de ser examinadas à luz da concorrência internacional.

Hoje certos elementos raros têm muita procura e dominar certas técnicas tem um valor económico muito apreciável.

C - A ENERGIA NUCLEAR COMO AGENTE DE REACÇÕES QUÍMICAS

Os reactores podem ser utilizados directa ou indirectamente como promotores de reacções químicas e são três as formas como pode ser feito o seu emprego:

- 1) Fonte de materiais radioactivos
- 2) Fonte de neutrões
- 3) Fonte de calor

1. Reactores como fontes de materiais radioactivos

Várias experiências têm provado que as moléculas lineares ou ramificadas de vários plastómeros ou elastómeros podem, sob a influência da radiação de alta energia, sofrer alterações mais ou menos profundas.

O problema tem sido encarado, na literatura, mais como uma fonte de dificuldades que é preciso levar em linha de conta ao usar estes materiais, do que um processo industrial de promover uma reacção química.

A primeira série de artigos, onde abertamente se estuda o problema de industrialização destes efeitos da radiação, serão talvez os de A. Charlesby de Cambridge, England, Robert Harrington, Washington (50).

A segunda referência importante feita a esta matéria foi a de Charles H. Stockman (51) et alter. da firma B.F. Goodrich Co. - Ohio, que estudaram a aplicação da radiação na vulcanização de pneus.

O método apresenta ainda certas dificuldades de industrialização, sobretudo em consequência do custo muito elevado da unidade de radiação, quer obtido por meio de aceleradores de partículas, quer através de rádio-isótopos ou produtos de fissão produzidos em reactores.

1.1 A radiação afecta os polímeros por uma das duas ou as duas razões simultaneamente, abaixo indicados:

- Fractura das cadeias colaterais (cross linking), criação de radicais que por seu turno se recombinam com as moléculas adjacentes ligando-as;

- Fractura da cadeia principal (degradação), fenómeno se melhante mas distinto de despolimerização. Com efeito na degradação resultante de radiação forma-se alguns monómetros que por arranjo posterior criam um novo polímero.

Para qualquer dos dois processos indicados é possível ligar por meio de fórmula empírica o número de Megarads incidentes com o número de ligações químicas quebradas (degradação) ou o módulo de elasticidade (ligações colaterais).

Aqui reside a principal vantagem da radiação - um perfeito controle da reacção química - o número de micro-reacções é função da dose recebida.

A segunda propriedade importante e que tem particular interesse na vulcanização é que o "cross linking" se faz por ligações carbono-carbono e não por intermédio dos radicais de enxofre que constituem ligações mais fracas.

Não há ainda experiência industrial suficiente para provar que os produtos resultantes se comportam melhor, na utilização, do que os clássicos.

1.2. O preço da operação constitui, por enquanto, o principal efeito retardador na industrialização do processo. Com efeito, segundo o trabalho de Manowitz e Richam (52) o custo do kW instalado é de:

Aceleradores de 5 kW	-	900×10^3	\$/kW	instalado		
"		de 50kW	-	300×10^3	\$/kW	"

Nota: 1 kWh pode fornecer uma dose de 1 Megarad a 400 kg de material plástico (é evidente que o número de quilos processados depende do material e da geometria da incidência).

Assim, para uma utilização de 2.000 h/ano e uma amortização de 5 anos, ou seja, um total de 10.000 horas, teremos um custo de kWh de, respectivamente:

(90\$/kWh
(30\$/kWh

e admitindo um rendimento de 60%, cada kWh produzirá 240 Megarads x kg e o encargo por Megarad. kg. será:

\$38 / Megarad.kg } ~ \$30/Megarad.kg.
\$13 / Megarad.kg }

Haverá agora que acrescentar as despesas de operação o que se traduz num custo final de \$50/Megarad.kg, valor indicado no trabalho de Charles Stockman (51).

Estes números foram estudados pelos diversos autores para aceleradores de partículas. Porém, conforme se procura demonstrar no trabalho de Manowitz (52), será esse também o preço do Megarad obtido por produtos de fissão ou rádio-isótopos fabricados artificialmente em reactores.

1.3. O custo de uma reacção química produzida por **radiação** tem a sua expressão mais evidente no cálculo da vulcanização de um pneu (51).

Para vulcanizar um pneu de 23 lb. são necessários cerca de 450 Megarads x kg. Se admitirmos que parte da radia-

ção se perde no molde (40% por exemplo), teremos um custo de vulcanização de:

$$\$50/\text{Megarads.kg} \times 450 \times \frac{1}{0,60} = 375\$/\text{pneu}$$

O preço é de tal modo elevado que não é competitivo com os métodos actuais de vulcanização.

1.4. Qual o futuro da indústria?

Interessa na realidade ter em consideração que é possível fazer grandes progressos neste campo. Assim:

- a) É possível que o uso de produtos de fissão permita baixar o preço do Megarad.kg. de \$50 para \$06. Esta redução só por si reduziria o custo de operação, tomado por exemplo de 375\$/pneu para 40\$/pneu.
- b) É possível que a introdução de outro composto (Styrene, por exemplo) reduza a dose necessária a uma pequena fracção (1/40 da inicialmente indicada). Veja-se R.B. Mesrobian. (53)
- c) Uma escolha judiciosa das intensidades de radiação e um conhecimento mais aprofundado dos fundamentos do método são factores que podem intervir favoravelmente.

Como resumo do ponto 1. podemos dizer que a radiação pode ter uma influência benéfica nos materiais e constituir mais um método de provocar reacções químicas controladas, abrindo, desta feita, largos horizontes industriais.

Os produtos de fissão e os isótopos radioactivos produzidos em re-
briçados nos reactores podem vir a desempenhar um papel importa-
te.

2. Fonte de neutrões

O reactor como fonte de neutrões pode servir para escorvar fis-
sões em átomos de urânio 235. A energia libertada pela fissão
ionizará os gases cuja reacção química se pretende promover e,
desta forma, é possível transformar directamente a energia de
fissão em energia química sem passar pela longa e dispendiosa
via de produzir energia eléctrica.

O processo vem descrito pelos Sars. Hartic e Dondes (54) e foi
ensaiado no reactor de Brockhaven.

Dos 195 Mev totais produzidos na fissão de um Mol de U^{235} , se
fôr descontada:

- 11 Mev correspondentes aos neutrinos formados
- 14 " 90% de radiação β e γ que é perdida
- 60 " energia absorvida no urânio e núcleos de fissão.

Restam 110 Mev de energia disponível.

Se designarmos por G o número de Mol formados por 100 ev consi-
midos, teremos um rendimento de reacção de

$$G \times 1,10 \times 10^6 \text{ Mol de NO}_2 / \text{Mol } U^{235}$$

ou seja

$$\sim G \times 50 \text{ ton de NO}_2 / \text{Mol } U^{235}$$

Admitindo que G possa ser igual a 4, teremos finalmente: 200
ton. de NO_2 /Mol de U^{235} .

ou seja: 61 ton. de azoto fixado / Mol. U^{235}

A economia deste processo está inteiramente ligada ao preço do urânio e se admitirmos um preço de 170.000\$/Mol (725\$/grama de Urânio) obter-se-ia um custo do urânio consumido por tonelada de azoto fixado de 2.800\$/ton.

É evidente que, a este valor, há que acrescentar os encargos seguintes:

- a) Funcionamento do reactor
- b) Purificação do NO₂ produzido
- c) Absorção do NO₂ em água para produzir o ácido azótico.
- d) Fabricação do adubos azotados correspondente.

Estas despesas são dificilmente suportadas pelo sub-produto NO₂ fabricado (110 ton. por mol de U²³⁵).

Além de ser economicamente não competitiva esta forma de fixar azoto em confronto com os métodos clássicos, acresce ainda a dificuldade da operação b).

Parece que até agora não foi ainda encontrado um método industrialmente aceitável de separar convenientemente a poeira radiactiva formada, do NO₂ produzido e esta dificuldade tem sido bastante para impedir a industrialização do processo.

Resumo do ponto 2. - O método apresentado deixa entrever futuras possibilidades de fixar o azoto sem o emprego de energia eléctrica nem o consumo de combustível.

Para Portugal, sem recursos de combustíveis fósseis, pode vir a constituir uma solução para o seu problema de adubos.

O método abre ainda perspectivas para a produção de outras reacções químicas endotérmicas como a produção de CO a partir de CO₂.

3. Reactores como fontes de calor

O reactor pode constituir ainda uma fonte de calor a alta temperatura e como tal ~~ser~~ o local onde se processem reacções endotérmicas.

O método implica temperaturas da ordem dos 1.000°C para que as velocidades de reacção sejam apreciáveis e industrializável o método.

Pouco há publicado a respeito desta matéria, mas foi o signatário informado em Pittsburgh por funcionários de Bureau of Mines que este departamento do Estado estava procedendo a estudos de materiais que tornassem possível a construção de um reactor que funcionasse a temperaturas da ordem de 1.000°C.

O problema oferece inúmeras dificuldades porque é necessário produzir uma série de materiais compatíveis entre si e que resistam a temperaturas e fluxos neutrónicos elevados, ao mesmo tempo que a porosidade deverá ser reduzida a um mínimo.

As pesquisas são conduzidas no sentido da fabricação de materiais cerâmicos, desde o combustível aos elementos estruturais.

Resumo do ponto 3. - As possibilidades de fabricar uma zona de reacção nuclear que resista a altas temperaturas poderia desempenhar o ponto de partida para uma nova forma de indústria química. Os materiais condicionam o sucesso; porém, os trabalhos nesse sentido já foram encetados.

••••

Resumo de C.

O reactor pode ser empregado como agente directo ou indirecto de reacção química.

Há várias soluções em curso das quais a mais próxima de realização industrial é a utilização dos produtos de fissão ou de isótopos radiactivos artificiais.

Reacções químicas que envolvam maiores níveis energéticos como a fixação do azoto podem ser realizadas mas a sua industrialização ainda não está próxima.

RESUMO E CONCLUSÕES GERAIS

A energia nuclear é cada vez mais um problema de natureza industrial.

A fase da descoberta científica dos princípios fundamentais já passou.

O período do desenvolvimento tecnológico, que se desenrola a seguir, está no seu auge.

Quando Portugal estiver pronto para entrar na liça, as principais técnicas, métodos operatórios e processos de fabrico, devem estar esclarecidos.

Por fim, vem a fase das grandes realizações industriais onde predominam razões de ordem económica nomeadamente capacidade e meios industriais.

Parece aconselhável que as indústrias portuguesas se preparem para desempenhar o papel que legitimamente é razoável esperar, ou seja:

- Desenvolver as técnicas de fabricação de alguns elementos constitutivos dos reactores, moderadores, materiais estruturais, aparelhagem eléctrica e electrónica;
- Estudar novas técnicas e processos metalúrgicos e químicos característicos da energia atómica;
- Estudar as novas técnicas de trabalho com produtos de alta actividade química ou nuclear.

A circunstância de Portugal possuir minérios de Urânio, só por si, não justifica nem garante que a era atómica seja uma era de prosperidade nacional e para pôr bom em evidência esta afirmação junta-se o quadro da página seguinte:

Embora todos os números apresentados possam ser passivos de críticas e comentários, são suficientes contudo para mostrar que a "prospecção e extracção mineira e concentração do minério de urânio" não chegam a representar 1% do capital total necessário para fazer funcionar um reactor.

Julgamos que estes números vêm confirmar mais uma vez que a energia nuclear só terá um significado económico para Portugal se fôr montado um número apreciável de indústrias participantes e derivadas.

AVALIAÇÃO APROXIMADA DO CAPITAL INVESTIDO EM DIVERSAS INDUS-
TRIAS DESTINADAS A FORNECER COMPONENTES PARA CONSTRUIR UM
REACTOR DO TIPO HETEROGENEICO ALIMENTADO COM URÂNIO FRACAMENTE
ENRIQUECIDO E MODERADO COM ÁGUA PESADA, PRODUZINDO ENERGIA COM
30% DE RENDIMENTO E 70 ~ 80% DE UTILIZAÇÃO

Capital investido (55)	Esc/kW.	Esc/kW	%
Prospecção e extracção minei ra e concentração	30	30	0,2
Purificação e redução	30 ~ 90	(1.830~3.090) média	18,4
Enriquocimento	1.200 ~ 2.400		
Fabricação do combustível:			
Frio	150		
Quente	450	2.460	
Água pesada (fabricação)	900 ~ 1.500	(930~1.560)	9,3
Zircónio (fabricação)	30 ~ 60	média: 1.245	
Construção do reactor	6.300 ~ 7.500	(7.200~9.300)	62,0
Combustível armazenado	600 ~ 1.200	média:	
Respectivo armazém	300 ~ 600	8.250	
Reprocessamento do combustível	900 ~ 1.800	1.350	10,1
Total		13.335	100%

:::::

Para finalizar não podíamos deixar de fazer uma referência ao problema financeiro.

Na verdade, se é difícil promover a adaptação, às necessidades atômicas, das indústrias clássicas, ou criar as novas indústrias que lhe são específicas, muito mais difícil será mobilizar os meios financeiros para realizar tal programa.

A circunstância de se indicar quais as necessidades em kWh em determinado período futuro, não chega para daí se inferir que os meios financeiros estarão disponíveis para a materialização das obras respectivas.

Orá um exame aos meios de informação existentes conduz antes à conclusão de que os programas de fomento serão muito provavelmente diferidos no tempo, em consequência da impossibilidade de desviar para a criação de bens duráveis maior percentagem do rendimento ~~nacional~~ disponível.

Se assim fôr, e a menos que se contraiam empréstimos externos, as realizações no campo da energia atômica serão igualmente relegadas para mais tarde.

Assim não seja, são os nossos votos.

REFERENCIAS

- (1) Estatística das instalações eléctricas em Portugal. Publicação da Direcção-Geral dos Serviços Eléctricos. Ano de 1956. Pag. XXXV.
- (2) Idem, pag. XXXIII.
- (3) Relatório 9.0 - Problemas Técnicos, Económicos e Financeiros da Indústria da Electricidade na Metrópole, dos Eng.ºs. Ferreira Dias, Eduardo Simas, J.A. Simões de Almeida e Paulo de Barros.
- (4) Transcrito do relatório acima.
- (5) Possibilidade de Industrialização e Disponibilidades de Energia por Alberto de Abecassis Manzanares.
- (6) The Economic Setting for the World Nuclear Power Development (Karl Mayer).
- (7) L'Industrie de l'Electricité en Europe. 7ème Enquête - Réalisations et Prévisions. - 154/61 - O.E.C.D.
- (8) The Journal of Solar Energy Science and Engineering - Pub. The Association for Applied Solar Energy.
- (9) The Sun at Work - Idem.
- (10) Stanford Research Institute.
- (11) Thermonuclear Power Reactor - Are they Feasible - by Hans Thiring - Nucleonics Nov. 1955.
- (12) Russian Thermonuclear Experiments - Nucleonics Junho 1956.

- (13) Thermonuclear Research the World Arround - L. Reiffel - Nucleo
nics - Agosto 1957.
- (14) Controlled Fusion by Amasa S. Bishop.
Nucleonics Set. 1957.
- (15) Conferência de A.S. Bishop no curso que teve lugar na Belgica
em Setembro de 1957.
- (16) Thermonuclear Power - The Search for Ideas
Nucleonics Fev. 1956.
- (17) Curso belga sobre Energia Atômica realizado em Setembro de 1957
K.M.Mayer.
- (18) Nucleonics (Agosto 1956)
Where Reactor Development Stands Today.
- (19) Calder Hall Report - Comentários no Nucleonics Dezembro 1956.
- (20) Nucleonics - Junho 1957 - D.P. Herron a A. Puishes.
- (21) Experimental Boiling Water Reactor - Special Report
Nucleonics (Julho 1957).
- (22) National Industrial Research Board Inc.
Trabalho nº. 83 - Ant. W.K. Davies et alt.
- (23) Nucleonics (Setembro 1957) - Chancey Stan.
- (24) S.R.E. - Reactor Sódio-Grafite (Curso de Energia Atômica).
- (25) Nucleonics (Outubro 1957).
- (26) Curso Belga de Energia Nuclear - Outubro de 1957
- (27) Idem.
- (28) Zeitschrift fuer Naturforschung - Nucleonics Junho 1956.
- (29) Nucleonics Junho 1957.

- (30) Survey of Separation Processes for Irradiated Fuels by S. Lawroski and H.H. Hyman.
- (31) Economics of Radiochemical Plants. Nucl. Eng. and Sci. Congress, Cleveland, Ohio, Dec.1955. Preprint No. 135.
- (32) A Conceptual Design and Cost Study for Chemical Processing Irradiated Reactor Fuels. Nuc. Eng. and Sci. Congress. Cleveuand, Ohio (Dec 1955). Preprint No. 148.
- (33) Problème du retraitement des combustibles nucléaires (Atomic Energy Course).
- (34) Nucleonics (Setembro 1956)
- (35) Nucleonics (Novembro 1956)
- (36) Nucleonics (Junho 1956)
- (37) Nucleonics (Agosto 1956)
- (38) Nucleonics (Março 1957)
- (39) Nucleonics (Junho 1956)
- (40) Nucleonics (Setembro 1957)
- (41) Trabalho da U.F.A. da autoria do Engº.Macedo apresentado à J.E.N..
- (42) Production and Properties of Graphite for Reactors - Currie et Alt. Progress in Nuclear Energy - Pergamon Press.
- (43) New Scientist (Nov. 1957)
- (44) Nucleonics (Nov. 1957)
- (45) The production of pure Beryllium Oxide: Hutler et Alter. Progress in Nuclear Energy (Pergamon Press)
- (46) Liquid Metals (vários autores). Idem (45)
- (47) " " " " " "

- (48) Volume 8 e 9 -- Conferência de Genève
- (49) " " " " " "
- (50) Nucleonics (Set. 1956)
- (51) " (Nov. 1957)
- (52) " (Junho 1956)
- (53) R.B. Mesrobian (Symposium on block and graft polymerization
16/2/1957.
- (54) Hartics and Dondes -- Nucleonics Junho 1956.

BIBLIOGRAFIA

- Physik und Technik der Atomreactoren - F. Cap,
Grundlagen der Atomphysik - H.A. Baner
Einführung in die Atomphysik - Finkelubrug
Nuclear Physics -- Green
Atom Physics - Born
Nuclear Reactor Theory - Glasstone and Edlund
Atomic Nucleus and Nuclear Energy Sources - Carnow and Critchfield
Text Book of Physics - R. Kronig
Publicações do CECE -- C (56) 95
-- C (55) 110
-- C (55) 305
-- C (56) 164
-- C (56) 168
-- C (56) 188
The Chase National Bank -- Atomic Energy
Arthur D. Little Inc. - Nuclear Technology
Progress in Nuclear Energy - (Pergamon Press)
Problems in Nuclear Engineering Vol. I & II - (Pergamon Press)
U.S. Atomic Energy Commission - McGraw-Hill
Conférence Internationale sur l'Utilisation de l'Energie Atomique à des Fins Pacifiques (Genève) -- Nations Unies.