

Possibilidade dum mercado internacional de plutónio

R. SÉRGIO E J. AMADO DA SILVA

Direcção-Geral de Combustíveis e Reactores Nucleares Industriais, Junta de Energia Nuclear

1 — INTRODUÇÃO

Nos últimos anos foi publicado um número considerável de trabalhos contendo avaliações das necessidades de combustíveis nucleares a longo prazo em ligação com os seguintes temas:

- aprovisionamento de combustível a longo prazo e comparação de famílias de reactores [1, 2, 3, 9, 10, 11, 12, 13]
- potencialidades de reactores avançados [4, 6, 9, 12]
- análise custo/benefício de políticas de desenvolvimento de reactores avançados [5, 12]
- optimização de projectos de reactores [10, 12]
- economia da reciclagem de Plutónio em reactores térmicos em relação à acumulação de Plutónio para a introdução de reactores rápidos [6, 8, 10, 13]
- interesse económico da alimentação inicial de reactores rápidos com Urânio enriquecido [6, 8]
- potencialidade de ciclos de combustível para reactores a água pesada com base no Plutónio e de reactores reprodutores com elevada produção de Plutónio [6, 7, 8, 10]
- influência da duração do ciclo de combustível fora do reactor no aprovisionamento a longo prazo [8, 9]
- valor do Plutónio [10, 11, 12, 13]

Os estudos citados dizem respeito a uma região como a Europa Ocidental [1, 2, 3], ou a um país isolado. Em qualquer caso, admite-se implicitamente que a gestão dos «stocks» de Plutónio está a cargo dum único centro de decisão. Regra geral, quer a importação quer a exportação de Plutónio são excluídas. T. Kikuchi [6], considera o efeito da importação dum quantidade determinada de Plutónio numa data precisa.

A uniformidade do tratamento esconde, de facto, pontos de vista opostos. A hipótese dum único centro de decisão para uma região multinacional equivale à existência dum mercado sem distorções. Em consequência, as estimativas das necessidades a longo prazo de combustíveis nucleares para uma região podem ser subestimadas. Por outro lado, não ponderar os benefícios dum mercado internacional de Plutónio, pode deformar as políticas de investigação e desenvolvimento, com efeitos adversos não só para as nações mais activamente ligadas a tais projectos mas também, dum maneira particular, para aquelas que utilizarão as novas tecnologias.

Este trabalho tem como único objectivo mostrar com alguns exemplos que há fundamento para acreditar no desenvolvimento de incentivos económicos para o estabelecimento dum mercado activo de Plutónio. Esta limitação do âmbito do trabalho justifica as hipóteses simplificativas a que adiante se faz referência.

2 — ESCOLHA DOS EXEMPLOS

A potência instalada numa região multinacional resulta das contribuições de países ou zonas sujeitas a órgãos de decisão mais ou menos centralizados. Condições naturais, como a ocorrência de fontes de energia alternativas, e níveis de consumo per capita diferentes determinam a coexistência de sistemas integrados caracterizados por taxas de crescimento da potência nuclear que podem, em certos

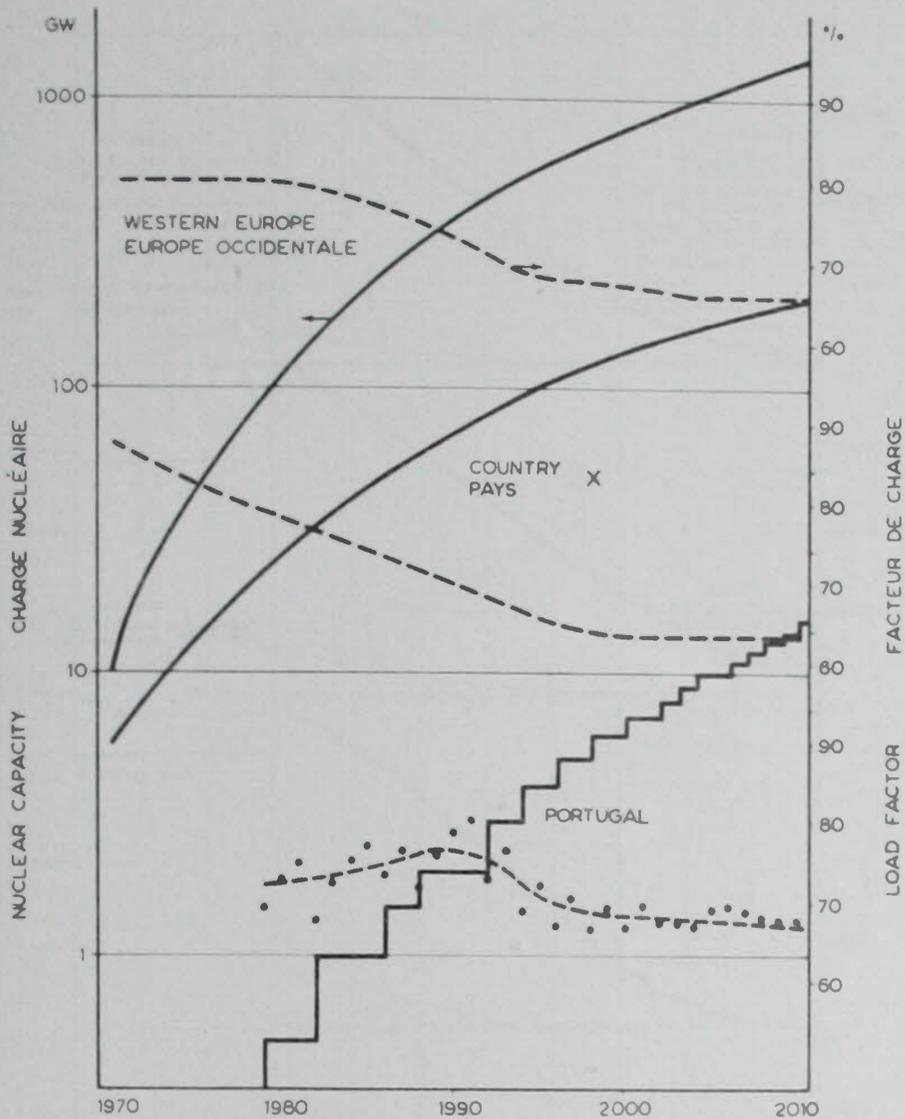


Fig. 1 — Potência instalada e utilização

casos, ser inferiores ao inverso do tempo de duplicação dos reactores rápidos reprodutores e, noutros casos, podem, num futuro previsível, permanecer acima daquele nível.

A diversidade das condições naturais e dos critérios nacionais pode conduzir à adopção de soluções diferentes no que respeita à escolha de tipos de reactores e à data da introdução de reactores rápidos reprodutores.

Os exemplos escolhidos referem-se a três evoluções típicas da potência nuclear instalada na fig. 1. A primeira corresponde à potência nuclear instalada na Europa Ocidental prevista por um Grupo de Trabalho da Agência Europeia de Energia Nuclear (ENEA) [1, 2, 3]. A segunda evolução típica é uma previsão para o Reino Unido [14]. A terceira, para Portugal, corresponde a uma ponderação preliminar tendo em conta as projecções indicadas na figura.

Em qualquer dos três casos admitiu-se que a energia nuclear é produzida por uma combinação de reactores convertedores (moderados por água pesada alimentada a Urânio natural ou moderados por água natural) e rápidos reprodutores.

As necessidades de Urânio, os «stocks» de Plutónio, e a participação dos reactores convertedores na potência instalada foram determinados ano a ano por intermédio dum programa para computador semelhante aos descritos pela ENEA.

As características dos reactores, adoptadas das referências [1, 2, 3], são apresentadas no quadro I.

O Urânio contido no combustível irradiado em reactores de água natural é reciclado. Por simplificação, admitiu-se que o Plutónio não é reciclado

em reactores térmicos ficando reservado para a alimentação de reactores rápidos reprodutores.

Admitiu-se que todos os reactores são substituídos 25 anos depois do início da exploração e que as utilizações, representadas na figura 1, são as mesmas, em cada ano, para todos os reactores, independentemente da idade.

No exemplo respeitante à Europa Ocidental, os tipos e fracções de reactores integrados até 1975 são os mesmos das referências [1, 2 e 3]. Depois de 1975 são considerados os projectos mais avançados de reactores térmicos.

No caso do Reino Unido, os reactores integrados em 1970 são do tipo já em serviço, arrefecidos a gás e alimentados a Urânio natural. Até 1975 a nova potência instalada é dividida entre os reactores arrefecidos a gás alimentados com Urânio natural e os reactores avançados arrefecidos a gás (AGR). Uma vez que a evolução da potência nuclear instalada foi adoptada apenas como exemplo dum país industrializado, País X, admitiu-se que os reactores integrados para lá de 1975 são do mesmo tipo dos considerados no caso da Europa Ocidental.

Nos dois primeiros exemplos, Europa Ocidental e País X, os reactores rápidos reprodutores são integrados a partir de 1980 a um ritmo limitado pelos «stocks» e taxa de produção de Plutónio.

A comercialização dos reactores reprodutores com maior produção de Plutónio é postulada para 1990.

A participação de reactores rápidos reprodutores nos aumentos de potência instalada é determinada por um balanço de Plutónio. A maximização da fracção de reactores reprodutores através da minimização dos «stocks» de Plutónio é habitualmente adoptada com um objectivo. Contudo, os

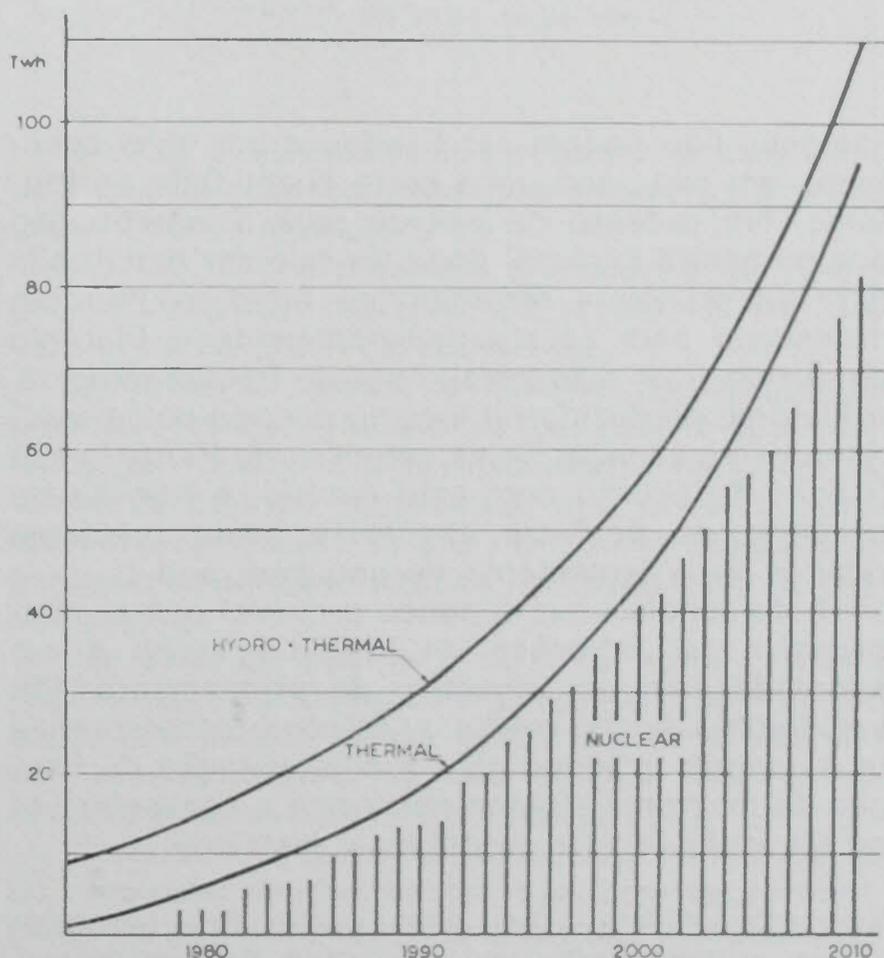


Fig. 2 — Previsão da produção de energia eléctrica em Portugal

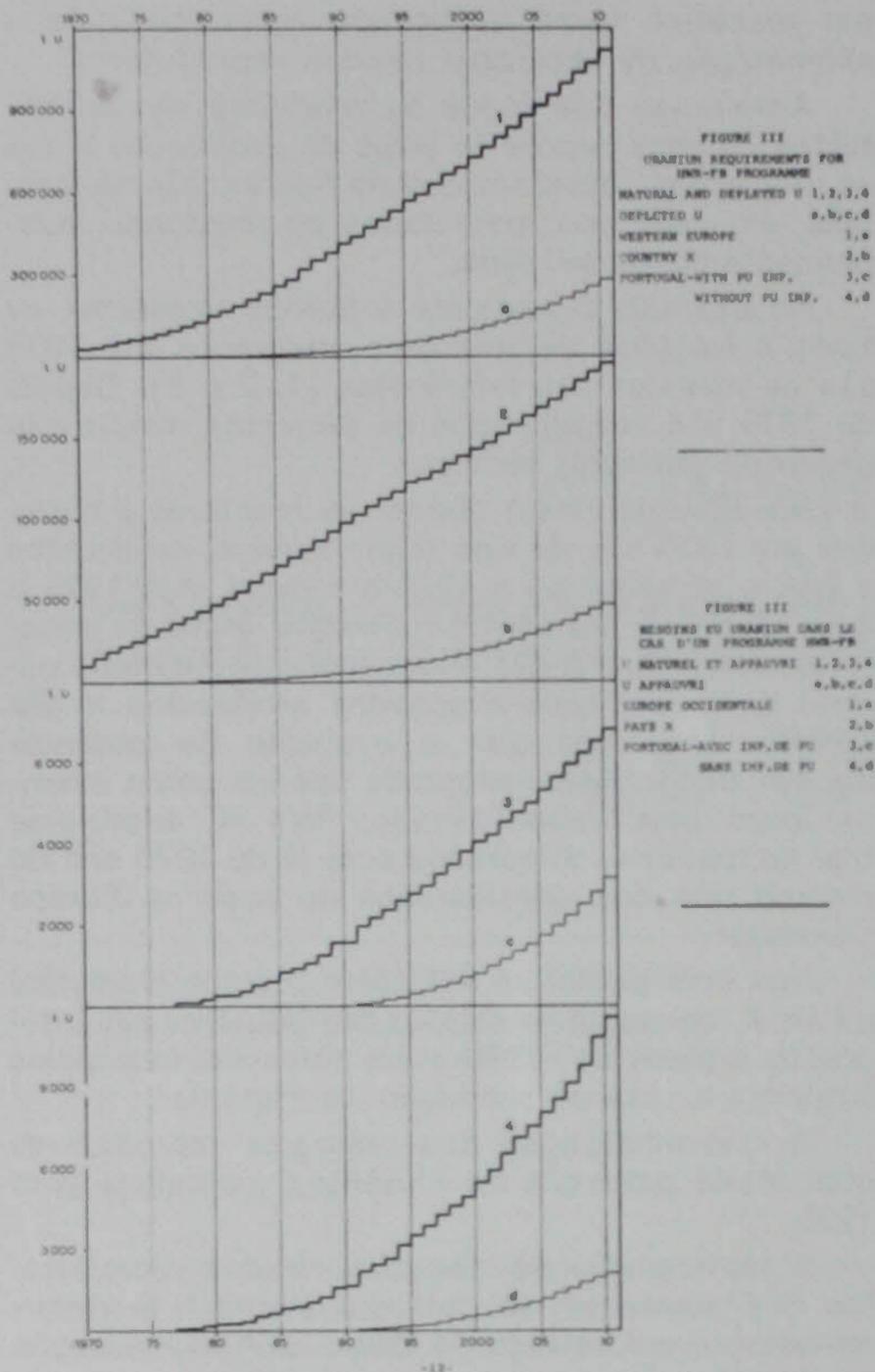


Fig. 3 — Urânio necessário para um programa HWR-FB
 U natural e empobrecido 1, 2, 3, 4
 U empobrecido a, b, c, d
 Europa Ocidental 1, a
 País X 2, b
 Portugal — com import. de Pu 3, c
 — sem import. de Pu 4, d

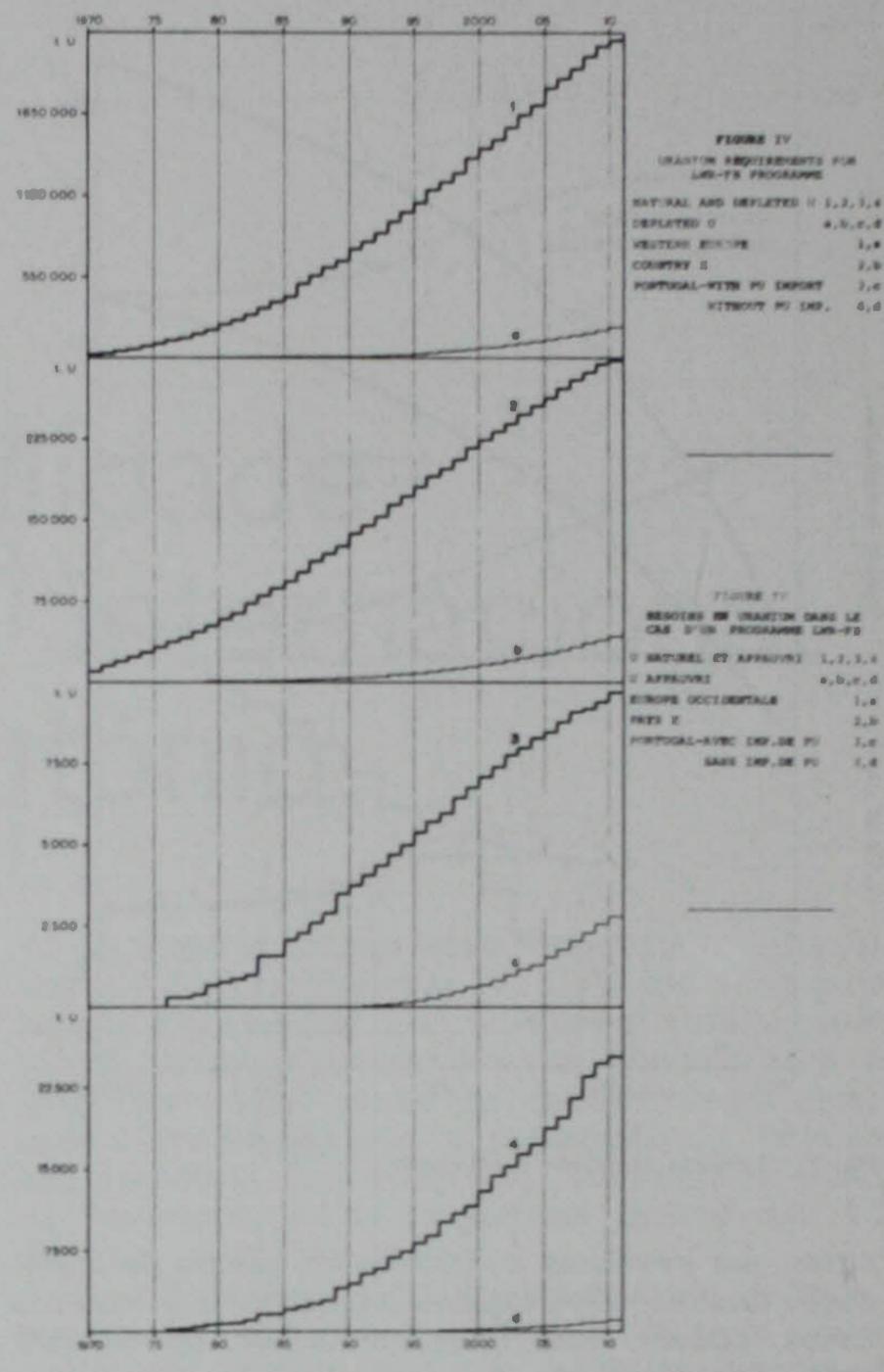


Fig. 4 — Urânio necessário para um programa LWR-FB
 U natural e empobrecido 1, 2, 3, 4
 U empobrecido a, b, c, d
 Europa Ocidental 1, a
 País X 2, b
 Portugal — com import. de Pu 3, c
 — sem import. de Pu 4, d

«stocks» não podem ser fixados a um nível constante: em cada ano, uma certa quantidade de Plutónio, em excesso da exigida para a constituição dos primeiros núcleos, pode ter que ser mobilizada para as primeiras recargas; de facto, o Plutónio necessário para as recargas, antes de o Plutónio produzido ficar disponível, excede, frequentemente, o Plutónio produzido no mesmo período pelos reactores já em serviço. Se os «stocks» de Plutónio são fixados de acordo com este critério, a fracção do aumento de potência absorvida pelos reactores rápidos varia largamente de ano para ano.

É de concluir que é pouco provável que a minimização dos «stocks» de Plutónio venha a ser adoptada com um objectivo de planeamento. Em vez de um balanço estrito de Plutónio adoptaram-se os seguintes critérios para a determinação da fracção de reactores rápidos por forma a conseguir um crescimento regular da potência instalada:

Primeiro critério — Só uma parte dos «stocks» acumulados até um ano antes do arranque é destinada aos reactores a instalar de novo; esta

parte representa $1/n$ do total, sendo n o número de anos até à data em que a integração de reactores rápidos já não é limitada pela disponibilidade de Plutónio — penetração total dos reactores rápidos. A fracção de reactores rápidos é limitada por um balanço das necessidades e produção total de Plutónio desde a entrada em serviço até ao início da recuperação de Plutónio do material fértil irradiado.

Segundo critério — A potência dos reactores rápidos instalados no ano j é tal que, sendo constantes os acréscimos de potência até ao ano em que este bloco de centrais se torna autosuficiente, os «stocks» de Plutónio no ano $j-1$ seriam restabelecidos no ano $j+m-1$. Esta condição possibilita o início de um novo programa pelo menos da mesma ordem de grandeza.

No caso de Portugal não é provável que a dimensão do sistema interligado justifique, antes de 1990, a integração de unidades da ordem dos 1000

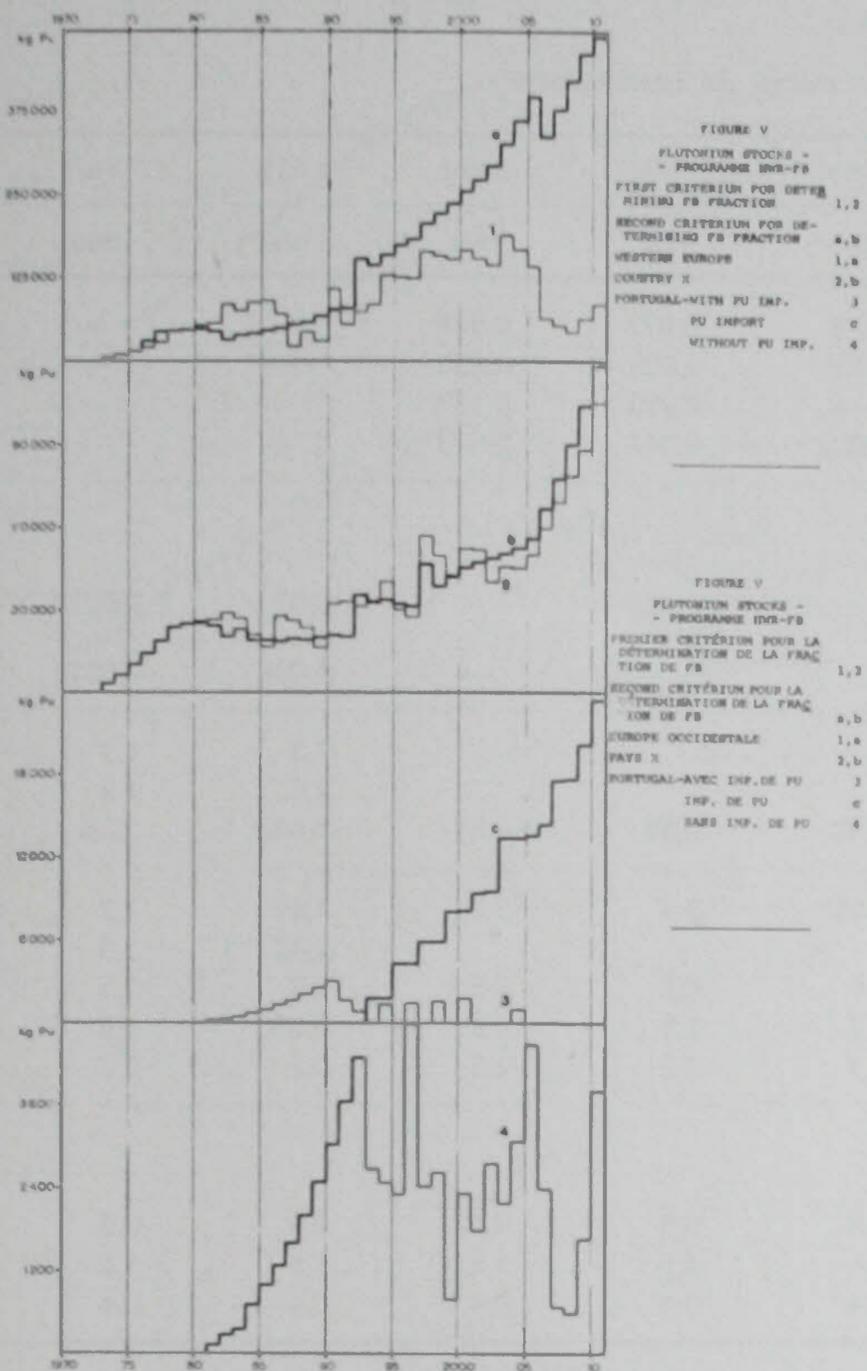


Fig. 5 — «Stocks» de Plutónio — programa HWR-FB
 Primeiro critério de determinação da fracção de FB 1,2
 Segundo critério de determinação da fracção de FB a,b
 Europa Ocidental 1,a
 País X 2,b
 Portugal — com import. de Pu 3
 — import. de Pu c
 — sem import. de Pu 4

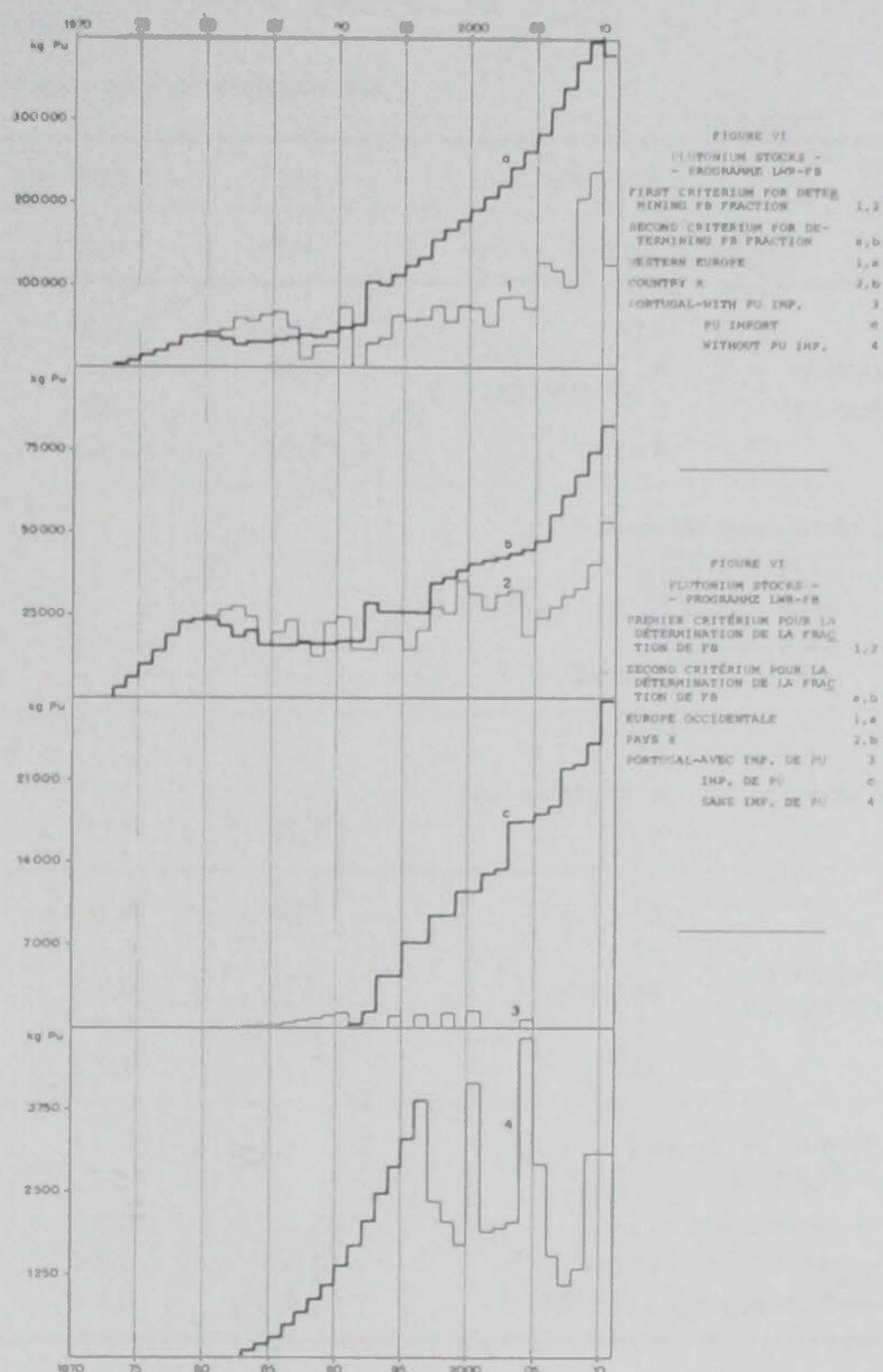


Fig. 6 — «Stocks» de Plutónio — programa LWR-FB
 Primeiro critério de determinação da fracção de FB 1, 2
 Segundo critério de determinação da fracção de FB a,b
 Europa Ocidental 1,a
 País X 2,b
 Portugal — com import. de Pu 3
 — import. de Pu c
 — sem import. de Pu 4

MWe consideradas nos projectos de reactores rápidos. Nestas condições não se admite a integração de reactores rápidos antes daquela data, apenas se considerando os reactores reprodutores com maior taxa de produção de Plutónio.

Admitindo um sistema fechado, a escolha do reactor a integrar depende da disponibilidade de Plutónio até ao início da recuperação deste elemento nos materiais férteis irradiados. No outro extremo admitiu-se como hipótese alternativa a existência de uma fonte ilimitada de aprovisionamento, sendo reprodutores rápidos todos os reactores postos em serviço depois de 1990.

3 — RESULTADOS

As necessidades de Urânio natural e empobrecido correspondentes a programas HWR-FB e LWR-FB estão representadas respectivamente nas fig. 3 e 4. Os resultados referem-se ao primeiro critério de determinação da fracção de reactores rápidos.

Nas fig. 5 e 6 mostra-se a evolução dos «stocks» de Plutónio. São considerados ambos os critérios anteriormente referidos.

As fig. 7 e 8 mostram a evolução da potência instalada dos reactores convertedores no caso de programas HWR-FB e LWR-FB.

Os «stocks» médios de Plutónio por unidade de potência instalada, o ano de penetração total dos reactores rápidos e a fracção destes reactores no termo do período considerado nos cálculos, apresentados no quadro II, são de alguma utilidade ao ponderar as perspectivas dum mercado internacional de Plutónio.

No caso da Europa e do País X, não haverá penetração total de reactores rápidos antes do ano 2000. Isto parece indicar que a troca de Plutónio por valores monetários não atingirá uma escala apreciável antes dos fins do século [11].

Contudo, desde os primeiros anos da integração de reactores rápidos haverá quantidades substanciais não utilizadas destinadas aos primeiros núcleos e recargas iniciais de reactores a instalar mais tarde. Como se indica no quadro II, e nas fig. 5 e 6, os

QUADRO I

Características dos reactores e ciclos de combustível

Tipo de reactor		MGR	AGR	HWR	LWR1	LWR2	FB1	FB2
Data da entrada em serviço		1970	1970	1976	1970	1976	1980	1990
Urânio Natural	k1	0,90	0,72	0,13	0,677	0,558	—	—
	k	0,90	1,04	0,13	0,805	0,655	—	—
	c t/MW (e)	—	0,183	—	0,218	0,157	—	—
	kx	0,225	0,125	0,022	0,044	0,023	—	—
<i>Urânio empobrecido*</i>								
— núcleo e zona fértil axial		k, k1	kg/MW (e)				0,03	0,0235
— zona fértil radial		k, k1					0,035	0,033
Plutónio	k1						2,3	1,7
	k						2,5	1,9
	c	1,75	1,11	0,48	0,98	0,87	3,01	2,36
Intervalos de tempo	b	2,96	5,2	1,18	3,4	3,2	1,67	1,2
	b1						2,92	3,0
	no ano	0,7	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
	n1	1,1	1,6	1,2	1,8	1,8	0,25	0,5
	n2	1,1	1,1	1,1	1,3	1,3	0,5	0,3
<i>Perdas de Urânio e Plutónio</i>								
— fabricação		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
— reprocessamento %		1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
— desintegração Pu 241		0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4

MGR	Reactor Magnox	no
AGR	Reactor avançado arrefecido a gás	
HWR	Reactor de água pesada	n1
LWR	Reactor de água natural	
FB1	Reactor rápido reproduzidor (óxido)	n2
FB2	Reactor rápido reproduzidor (carboneto)	
k1	Inventário inicial	
k	Inventário para uma carga de substituição	
c**	Produção de plutónio	
kx	Inventário de transição	
b***	Tempo de permanência no reactor a plena carga	
b1****	Tempo de permanência no reactor a plena carga	

Intervalo de tempo entre a recepção do combustível e a entrada em serviço
 Intervalo de tempo entre a saída da mina ou do reprocessamento e a entrada em reactor
 Intervalo de tempo entre a saída do reactor e a saída do reprocessamento

* Urânio empobrecido com uma composição isotópica igual à do Urânio à saída da instalação de enriquecimento (0,25 %).
 ** Pu-239 equivalente, sendo os factores de ponderação 1 para Pu-239; 0,2 para Pu-240; 1,7 para Pu-241; e 0,2 para Pu-242.
 *** Núcleo e zona fértil axial
 **** Zona fértil radial.

«stocks» específicos constituídos para este efeito podem ser reduzidos se a coordenação da gestão do Plutónio se estender a uma região como a Europa Ocidental. A redução pode ser observada, não só em relação a um país pequeno mas também, ao comparar os «stocks» específicos da região com os de um país industrializado, País X, apesar de, neste caso, a menor taxa de crescimento da potência não exigir a mobilização de «stocks» de Plutónio por unidade de potência tão grandes como no caso dum país mais pequeno crescendo a taxas mais elevadas.

A participação dos reactores rápidos na potência nuclear a instalar em Portugal até 2010, de acordo com a estimativa apresentada, depende fortemente das hipóteses de importação ou autosufi-

ciência em Plutónio. Admitindo uma diferença de custos de $0,5 \times 10^{-3}$ dólares/kWh [10] a favor dos reactores rápidos, o valor actual da redução dos custos totais seria de $8,10^6$ e $12,10^6$ dólares para programas HWR-FB e LWR-FB com importação de Plutónio. Contudo, a hipótese de uma fonte externa de Plutónio ilimitada é difícil de sustentar.

Ainda assim, a realização de uma penetração de reactores rápidos correspondente ao nível estimado para a Europa Ocidental, através da integração num mercado de maior dimensão, traduzir-se-ia por economias de cerca de 50 % dos valores apontados, com uma redução de custos actualizados de 0,02 a $0,03 \times 10^{-3}$ dólares/kWh no período 1970-2010.

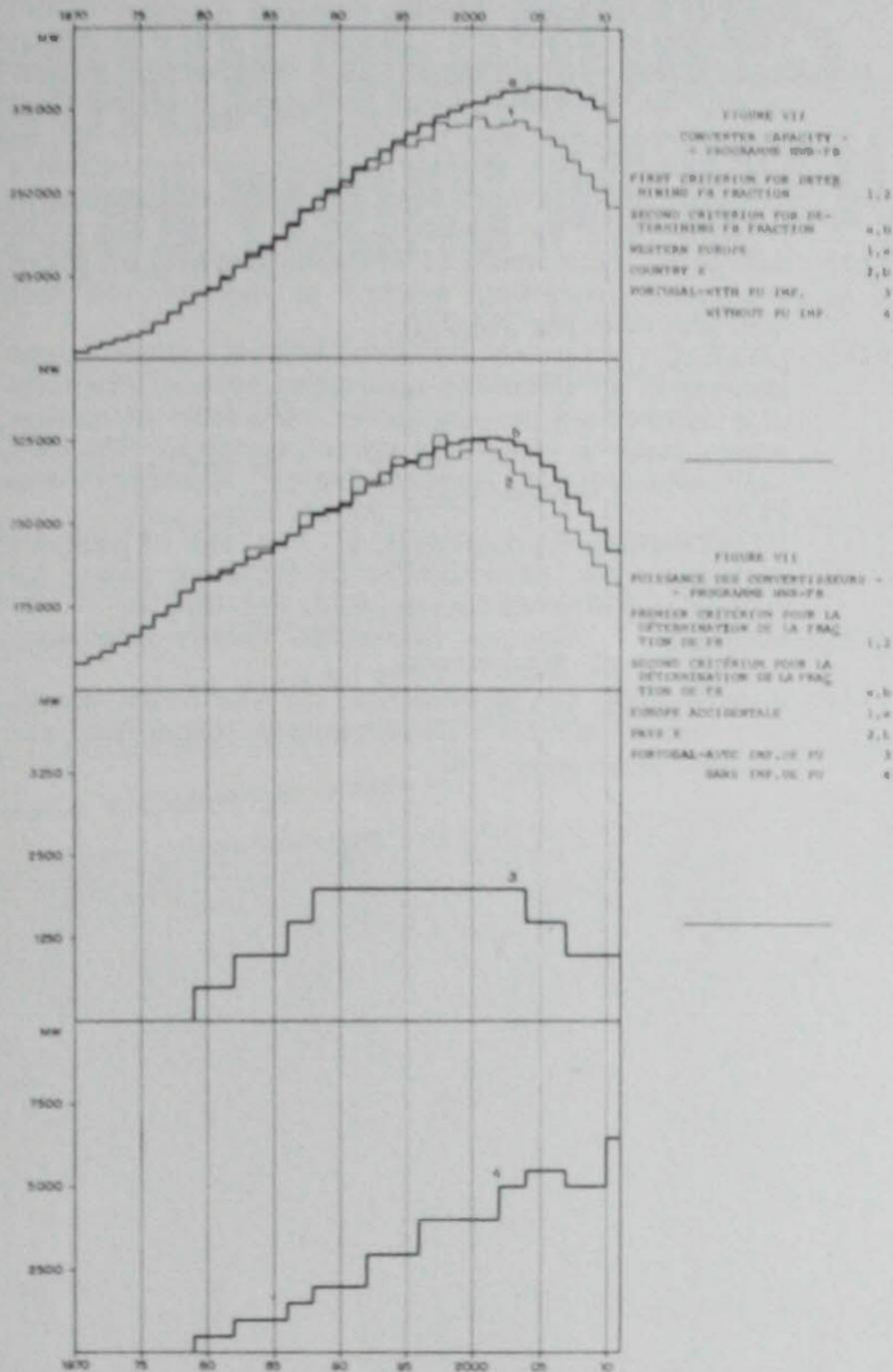


Fig. 7 — Potência dos convertidores — programa HWR-FB
 Primeiro critério de determinação da fracção de FB 1,2
 Segundo critério de determinação da fracção de FB a,b
 Europa Ocidental 1,a
 País X 2,b
 Portugal — com import. de Pu 3
 — sem import. de Pu 4

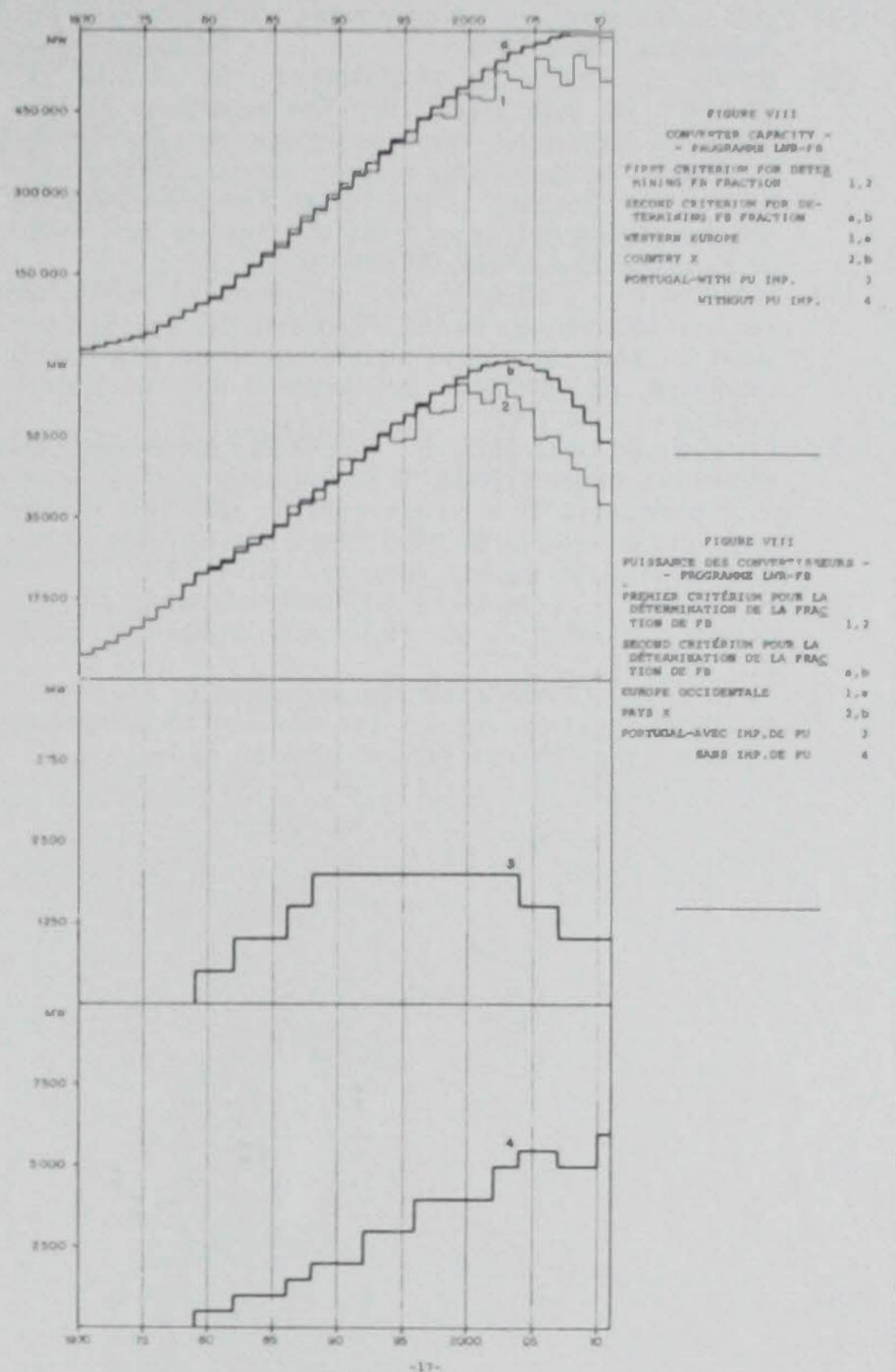


Fig. 8 — Potência dos convertidores — programa LWR-FB
 Primeiro critério de determinação da fracção de FB 1,2
 Segundo critério de determinação da fracção de FB a,b
 Europa Ocidental 1,a
 País X 2,b
 Portugal — com import. de Pu 3
 — sem import. de Pu 4

QUADRO II

Penetração dos reactores rápidos e «stocks» médios de Plutónio por unidade de potência instalada

Região	Critério	Ano de penetração total de FB	Fracção de FB-2010 %	«stocks» médios específicos de Pu kg/MW (e)
Programa HWR-FB				
Europa Ocidental	1.º	2008	83	0,23
País X	1.º	2000	89	0,52
Europa Ocidental	2.º	2010	73	0,29
País X	2.º	2005	85	0,49
Portugal	Imp. Pu		93	
Portugal	Sem imp. Pu		57	0,62
Programa LWR-FB				
Europa Ocidental	1.º	2008	62	0,18
País X	1.º	2005	81	0,41
Europa Ocidental	2.º	2009	56	0,23
País X	2.º	2008	75	0,44
Portugal	Imp. Pu		93	
Portugal	Sem imp. Pu		32	0,42

4 — OBSERVAÇÕES FINAIS

A realização duma gestão de «stocks» mais eficiente aconselha, num futuro não muito distante, a colocação em comum dos «stocks» de Plutónio, pelo menos num âmbito regional. A elaboração de processos eficientes de «salvaguardas» mutuamente aceites é um primeiro passo para a resolução das dificuldades que podem surgir.

A longo prazo, a coexistência de carências e excedentes de Plutónio em diferentes países criará incentivos para um mercado mais convencional.

Na escolha das políticas de investigação e desenvolvimento com implicações a longo prazo estas possibilidades não deviam ser ignoradas, atendendo a que o peso dos países em vias de desenvolvimento será, então, e desejavelmente, cada vez mais sentido.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Report by the European Nuclear Energy Agency Study Group on the Long Term Role of Nuclear Energy in Western Europe: Caractéristiques des Réacteurs de Puissance. Paris 1966.

- [2] *ibid.*: Exemples de programmes de Réacteurs de Puissance. Paris 1968.
- [3] ILIFFE, C., LINDE, S., MARGEN, P., SCURICINI, G., SEARBY, P., WIECHERS, W.: The sensitivity of Uranium and Separative Work requirements to variations in reactor programmes, reactor data and load characteristics. Preprint of the Fourth Foratom Congress on the «Industrial aspects of the nuclear fuel cycle in Europe». Stockholm 1970.
- [4] HAUBERT, P., DEBAY, W.: Influence of HTR's on nuclear fuel requirements. Proceedings of a Symposium on «Advanced and high-temperature gas-cooled reactors», pp. 849-858. International Atomic Energy Agency, Viena 1969.
- [5] FAUDE, D., JANSEN, P., SEETZEN, I.: Models for economic consideration of introducing nuclear energy. Proceedings of a Symposium on «Nuclear energy costs and economic development», pp. 547-565. International Atomic Energy Agency, Viena 1970.
- [6] KIKUCHI, T.: Long-term nuclear fuel cycle and its economics relating to Plutonium utilization. *ibid.*, pp. 365-383.
- [7] TAKEY, M.: Concepts of the econometric model and examination of its results. Proceedings of a Symposium on the «Economics of nuclear fuels», pp.241-260. International Atomic Energy Agency, Viena 1968.
- [8] SCURICINI, G., LAVRENCIC, D., VALANT, P.: Availability of Plutonium—its influence on long-term reactor programs. *ibid.* pp. 65-86.
- [9] NAGASHIMA, K., IZUMI, T.: Uranium requirements for the long-term nuclear power generating program in Japan. *ibid.* pp. 37-53.
- [10] ILIFFE, C.: Economics of Plutonium utilization in an integrated generating system of thermal and fast reactors. *ibid.* pp. 261-272.
- [11] ILIFFE, C.: Assessing the economics of nuclear power stations in an electricity generating system. Preprints of a Symposium on «Economic integration of nuclear power stations in electric power systems», SM-139/32, International Atomic Energy Agency, Viena 1970.
- [12] BAINBRIDGE, G., FARMER, E.: The use of systems analysis in the development of technical policy for nuclear power programmes. *ibid.* SM-139/18.
- [13] MARGEN, P.: Reactor Strategies. *Energy International*, pp. 18-23, March 1970.
- [14] BAINBRIDGE, G., BEVERIDGE, C.: The future operating role of nuclear power stations. *Atom* 155, pp. 248-262, September 1969.