

ATTENTION MICROFICHE USER,

The original document from which this microfiche was made was found to contain some imperfection or imperfections that reduce full comprehension or some of the text despite the good technical quality of the microfiche itself. The imperfections may be:

- missing or illegible pages/figures;
- wrong pagination;
- poor overall printing quality, etc...

We normally refuse to microfiche such a document and request a replacement document (or page) from the national INIS Centre concerned. However, our experience shows that many months pass before such documents are replaced. Sometimes the Centre is not able to supply a better copy or, in some cases, the pages that were supposed to be missing correspond to a wrong pagination only. We feel that it is better to proceed with distributing the microfiche made of these documents than to withhold them till the imperfections are removed. If the removals are subsequently made then replacement microfiche can be issued. In line with this approach then, our specific practice for microfiching documents with imperfections is as follows:

1. A microfiche of an imperfect document will be marked with a special symbol (black circle) on the left of the title. This symbol will appear on all masters and copies of the document (1st fiche and trailer fiches) even if the imperfection is on one fiche of the report only.
2. If imperfection is not too general the reason will be specified on a sheet such as this, in the space below.
3. The microfiche will be considered as temporary, but sold at the normal price. Replacements, if they can be issued, will be available for purchase at the regular price.
4. A new document will be requested from the supplying Centre.
5. If the Centre can supply the necessary pages/document a new master fiche will be made to permit production of any replacement microfiche that may be required.

The original document from which this microfiche has been prepared has these imperfections:

missing pages/figures numbered: ---3---
 wrong pagination
 poor overall printing quality
 combinations of the above
 other

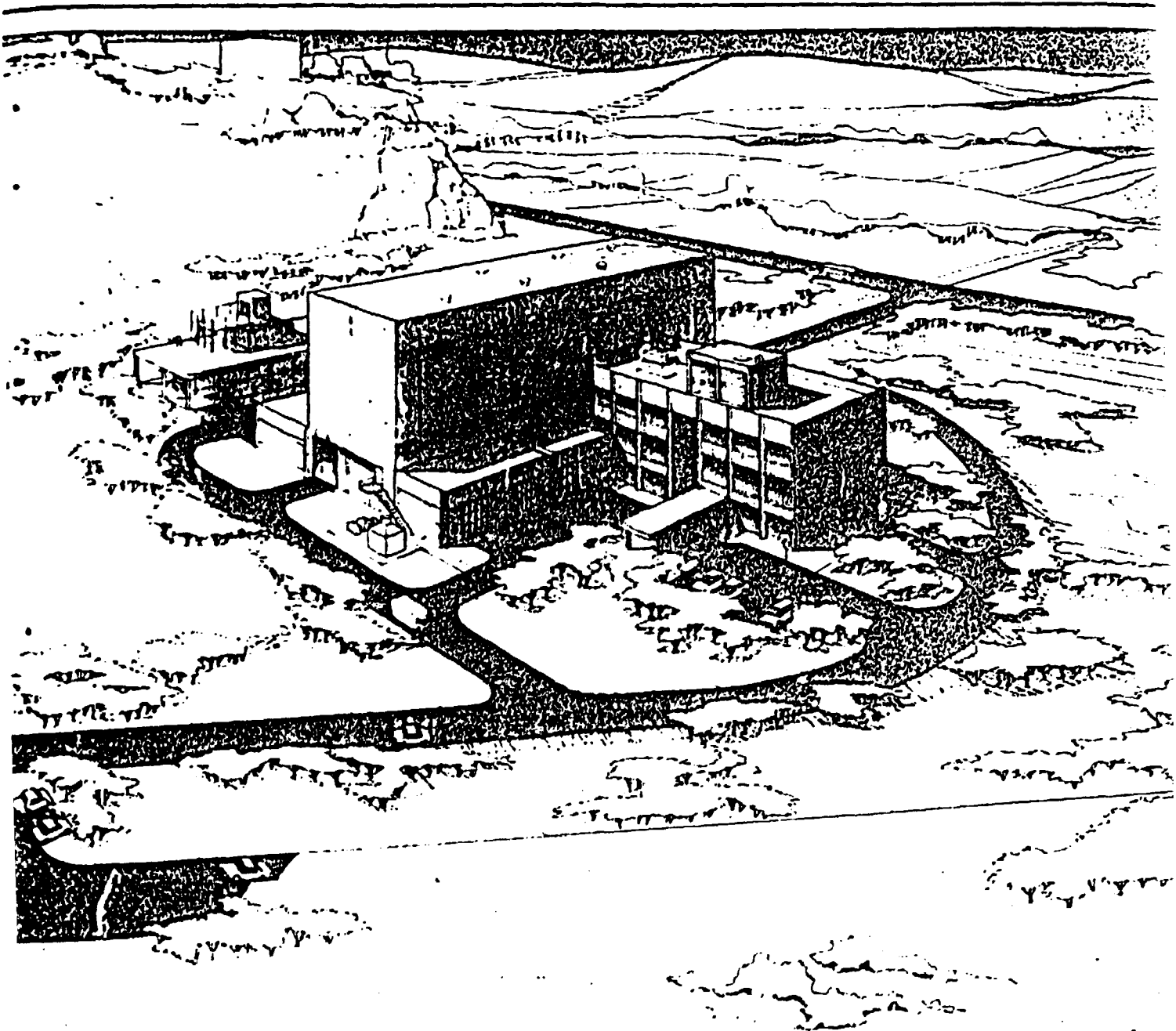
INIS Clearinghouse
IAEA
P.O. Box 100
A-1400, Vienna-AUSTRIA

BR8920375
INIS-BR--1490

REATORES RÁPIDOS: O FUTURO DA ENERGIA
NUCLEAR

43342

352



COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR
GALPÃO TECNOLÓGICO DE SÓDIO

LEN/CNEN

PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

REATORES RÁPIDOS. O FUTURO DA ENERGIA NUCLEAR

Prof. H. G. de Carvalho
agosto/1988

681-453114
C 201/20

4/11

NUCLEBRAS - EMPRESAS NUCLEARES BRASILEIRAS S.A.

REACTORES RAPIDOS. O FUTURO DA ENERGIA NUCLEAR

Prof. H. G. de Carvalho
agosto/1988

INDICE

I.	INTRODUÇÃO	
II.	CUSTO DE CAPITAL DO LMFBR.....	1
III.	COLABORAÇÃO EUROPEIA SOBRE OS LMFBR	2
IV.	PROGRAMA DOS EUA SOBRE LMFBR.....	3
V.	O PROGRAMA DO JAPÃO SOBRE LMFBR.....	5
	CENARIO PREVISTO PARA O APERFEIÇAMENTO DOS FBRs NO JAPÃO.....	6
VI.	CICLO DO COMBUSTIVEL DOS FBRs.....	7
	REDUÇÃO DE CUSTOS NO CICLO DO COMBUSTIVEL.....	10
VIII.	PROGRAMA BRASILEIRO DE REATORES RAPIDOS.....	10
	CONCLUSÕES.....	13
	BIBLIOGRAFIA.....	14

FIGURAS

POTENCIA MUNDIAL INSTALADA	FIG. 1
CENARIO PREVISTO PARA O APERFEIÇAMENTO DO FBR NA EUROPA.....	FIG. 2
INTERGOVERNMENTAL AGREEMENT.....	FIG. 3
CENARIO DA COMERCIALIZAÇÃO DOS REATORES *BREEDERS RAPIDOS NO JAPÃO - CRONOGRAMA PREVISTO PARA OS PRIMEIROS REATORES DE DEMONSTRAÇÃO (DFBR).....	FIG. 4
CENARIO PREVISTO PELO JAPC PARA O APERFEIÇAMENTO DO FBR NO JAPÃO.....	FIG. 5
ESFORÇO COORDENADO E INTEGRAL DO JAPÃO PARA DISPOR DE FBRs DEPOIS DE 2030.....	FIG. 6
CICLO DO COMBUSTIVEL DOS FBRs.....	FIG. 7

CUSTO ANUAL DO COMBUSTIVEL PARA UMA
USINA DE 1000 MWe FIG. 8

USINAS COMERCIAIS DE REPROCESSAMENTO
EM 1988.....TABELA I

HIPÓTESES PARA AVALIAÇÃO DO CICLO
DO COMBUSTIVEL DOS FBR EM COMPARAÇÃO
COM OS LWR.....TABELA II

REACTORES RAPIDOS. O FUTURO DA ENERGIA NUCLEAR

Prof. H. G. de Carvalho

I. INTRODUÇÃO

As previsões para produção mundial de energia elétrica indicam que, até o ano 2.100, haverá, no mínimo, uma potência instalada de 7.000 GWe e que a energia nuclear contribuirá com 3.500 GWe.

Como as reservas prováveis de urânio no mundo não excedem a 20 milhões de toneladas, e como os atuais reatores térmicos (LWR) só utilizam uma fração muito pequena (0,6%) do urânio minerado, será necessário aperfeiçoar muito estes reatores de modo a melhorar a eficiência da queima do urânio minerado, objetivando prolongar o uso da energia nuclear por um longo período; ou, ainda, aperfeiçoar, dentro de 30 anos, um tipo de reator capaz de utilizar 60% do urânio minerado, tornando possível usar a energia nuclear por séculos, eventualmente por milênios. Estes reatores são os reatores rápidos- FBR que tem a propriedade de fabricar plutônio a partir de U238 em quantidade suficiente para se auto alimentarem.

O prazo crítico para o uso maciço dos reatores rápidos, poderá eventualmente ser adiado se certos reatores térmicos forem aperfeiçoados (HCPWR). Estes, em princípio, podem queimar seis vezes melhor o urânio (3%) minerado. Todavia, os FBR bem antes do ano 2050 terão de ser introduzidos, e a partir do ano 2070 serão a forma dominante de produção de energia nucleoeleétrica (FIG. 1).

Neste trabalho, descrevem-se os principais problemas que deverão ser resolvidos para o FBR atingir a economicidade necessária à sua implantação. Os obstáculos constituem um formidável desafio que obriga europeus e japoneses a mobilizarem recursos e exercerem uma cooperação sem precedente, aos quais os EUA trazem também sua contribuição.

II. CUSTO DE CAPITAL DOS LMFBR

Pode-se decompor o custo de capital por KWe instalado de uma usina nuclear em duas parcelas: a primeira corresponde ao custo do Sistema Nuclear Gerador de Vapor (o reator) NSSS, que para os PWR

franceses representa 23% do custo da usina nuclear, e, a segunda parcela, ao custo da turbina, do gerador e demais instalações e sistemas auxiliares, isto é, BUP ("Balance of Plant").

O custo do KWe instalado dos LMFBR da presente tecnologia é cerca de 250% maior que os dos PWR (ver FIG. 2). O custo de capital do primeiro reator rápido de porte comercial construído na França, operando desde 1986 - o Superphenix 1 - é 250% mais caro do que as usinas atuais PWR francesas. O NSSS deste LMFBR é 57% do custo total da usina. Isto permite comparar o custo dos NSSS dos dois tipos de reatores e observar que o do LMFBR é 620% mais caro. Reduzir este custo até igualá-lo ao dos PWR franceses é um formidável desafio que terá de ser resolvido dentro de uma geração.

O grande problema do LMFBR é portanto esta redução do custo de capital sem comprometer a segurança e demais características de um reator de alta qualidade. Infelizmente, a única maneira de averiguar a economicidade e o desempenho tecnológico de novos aperfeiçoamentos é construindo reatores de demonstração (DFBR) de grande porte e operando-os por tempo suficientemente longo para descobrir pontos falhos e corrigí-los. Isto exige tempo e muito recurso humano, técnico e capital. Na verdade, não há mais país (por mais rico que seja) capaz de, isoladamente, realizar esta façanha. Em conseqüência existe, no momento, neste campo da tecnologia, gigantesca colaboração internacional.

III. COLABORAÇÃO EUROPÉIA SOBRE OS LMFBR

A Bélgica, França, República Federal da Alemanha, Itália e a Grã-Bretanha desenvolvem colaboração irrestrita de troca de resultados na pesquisa e desenvolvimento. A colaboração caminha para um programa harmônico unificado. O orçamento nos últimos 3 anos foi de 1,4 bilhões de dólares (20% é despendido em segurança nuclear). No momento, os trabalhos se concentram no projeto do (EFR) Reator Rápido Europeu. Os objetivos das organizações de pesquisa e desenvolvimento são pesquisa, projeto, construção e licenciamento. A Holanda também participa. Um comitê diretivo apoiado por subcomitês planeja a atividade de 11 grupos de trabalho, responsáveis pela definição e organização do programa. A Figura 3 descreve a a estrutura da organização.

Os recursos humanos da colaboração européia são da ordem de 5.000 profissionais, dentro de amplo espectro de especialidades, e, a competência deriva da experiência neste campo da energia nuclear, que os europeus praticam há cerca de 30 anos, onde hoje são indiscutivelmente os líderes mundiais.

As companhias elétricas européias que formam o Grupo EFRUG (European Fast Reactor Utilities Group) reuniram-se em 8/12/87, em

gurança e desempenho do combustível H.H. Hennies (S.S.-5) CIFBS 87.

Os americanos anunciam que conseguirão drástica redução de custos tanto na construção do reator como no reprocessamento do combustível.

Outro contratempo sofrido pelo programa americano foi o fechamento da usina de reprocessamento de Barnwell. A Allied General Nuclear Services, estimulada pelo Governo dos EUA, a AGNS, em 1971, iniciou a construção da usina de Barnwell e, em 1974, requereu licença à NRC para sua operação. Contudo, em abril de 1977, o Presidente Carter anunciou que, em decorrência da sua preocupação com a proliferação internacional de armas nucleares, os EUA estavam adiando indefinidamente o reprocessamento para fins civis e reciclagem de plutônio. De 1977 a 1983, entretanto, a AGNS recebeu do DOE verbas para pesquisas, desenvolvimento e manutenção da usina. Em 1981, o Presidente Reagan levantou a proibição para reprocessamento comercial, porém, em virtude do ocorrido, nenhuma companhia de eletricidade sentiu-se encorajada em reprocessar combustível queimado. De acordo com os proprietários a AGNS gastou 200 milhões de dólares além de verbas governamentais (dólares de 1971). Face ao ocorrido a AGNS processou o Governo dos EUA solicitando indenização de 500 milhões de dólares e o processo está em julgamento na Suprema Corte. A AGNS mencionou em juízo que desde 1957 o governo procurou "encorajar vigorosamente" a iniciativa privada, e, particularmente, a AGNS a embarcar no programa civil de reprocessamento.

O novo programa de pesquisa e desenvolvimento do DOE dispõe de um orçamento de 200 milhões de dólares por ano; a metade desta quantia é gasta na operação de duas instalações (o EBR-II e o FFTF). O programa, no período de 7 anos (1986/1992) despenderá 1,4 bilhões de dólares. Após este período espera-se que o Congresso dos EUA, em decorrência de bons resultados nos trabalhos de pesquisa e da reativação do uso da energia nuclear, baseada nos LWR avançados, face a uma melhor aceitação pública, aprove a instalação de um protótipo. Este será o primeiro módulo de uma série essencialmente idêntica de reatores com potência de 140 MWe (PRISM da GE) ou de 350 MWe (SAFR da RI). A escolha entre as alternativas será feita este ano, e a decisão de construção por volta de 1995. O orçamento para a construção, em 5 anos (1998/2003), deste módulo-protótipo é de 1,375 bilhões de dólares.

Está em curso de discussão um novo acordo de cooperação Europa/EUA sobre FBR cujos objetivos são:

- os EUA desejam ter acesso à experiência de operação das usinas Européias protótipos e de demonstração;

- os Europeus desejam ter acesso aos resultados obtidos pelo EUA sobre combustíveis metálicos;
- cada um dos dois lados busca acesso ao trabalho da outra parte visando encontrar a soluções alternativas para componentes, métodos de cálculo, tecnologia do sódio, segurança, etc.

V. O PROGRAMA DO JAPÃO SOBRE LMFBR

Em um país como o Japão, muito pobre em recursos naturais para produção de energia elétrica, o FBR é considerado como a sua principal fonte de energia elétrica no próximo século. Conforme a Fig. 1, a contribuição dos LWRs será decrescente a partir do ano 2050, quando será necessário dispor de FBRs economicamente satisfatórios.

Há 22 anos se faz um grande esforço nacional liderado pelo PNC - Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation objetivando o desenvolvimento tanto de um reator experimental FBR - "JOYO", que vem operando muito bem há cerca de 12 anos, como a construção de um protótipo de FBR "MONJU", que deverá entrar em operação em 1992.

Em junho de 1987, foi decidido iniciar um grande Programa de Pesquisa e Desenvolvimento objetivando dispor de uma tecnologia que permita a construção de um reator de demonstração, o DFBR, que deverá ser considerado como "Projeto Nacional" em um esforço conjunto de todos os setores tanto do Governo como da iniciativa privada inclusive das companhias de eletricidade que devem desempenhar grande papel no projeto de construção e na operação do FBR de demonstração que, doravante, será denominado DFBR1.

Além das entidades nacionais, há uma intensa cooperação e colaboração internacional, como por exemplo, no que diz respeito ao combustível nuclear; o PNC tem acordos de cooperação com a U.K.AEA (Grã-Bretanha), U.S.DOE (EUA), CEA (França), KFK/Interatom (RFA), SCK/CEN (Bélgica), ECN/TNO (Holanda), ENEA (Itália) e Ministério da Indústria Nuclear da China.

O objetivo é construir um reator comercial FBR capaz de competir com os LWRs em economia, segurança e confiabilidade. Com este propósito, é que DFBR1 está sendo desenvolvido.

A organização para o desenvolvimento do projeto inclui a Comissão de Energia Nuclear (Comitê de Planejamento para o Desenvolvimento do FBR). O comitê foi instituído em maio de 1986 para rever o programa a longo prazo do desenvolvimento do FBR

no que diz respeito a pesquisa e desenvolvimento, bem como especificações básicas em colaboração com as companhias produtoras de eletricidade. A Federação das companhias produtoras de eletricidade - FEPC, organizada por 9 companhias, formou um corpo de assessoramento que é responsável pelo planejamento estratégico. Foi decidido que a Japan Atomic Power Company (JAPC), deveria, em nome dessas companhias, responder pelas atividades de pesquisa, desenvolvimento, projeto, construção e operação do DFBR1.

As diferentes organizações interessadas no projeto, isto é, PNC, JAERI, CRIEPI e a JAPC constituíram um comitê diretor, que inclui a participação das seguintes entidades como Grupo Assessor: um representante do Ministério de Comércio Internacional e da Indústria (MIT), um da Agência de Ciência e Tecnologia (STA), três das Universidades e dois do FEPC constituem um Grupo Assessor.

CENARIO PREVISTO PARA O APERFEIÇOAMENTO DOS FBRs NO JAPÃO

Após importante reunião dos presidentes da FEPCO, em 1986, foi exarada uma declaração cujo teor é o seguinte:

"Mesmo quando a necessidade dos FBRs é encarada debaixo das circunstâncias atuais (muito favoráveis) de disponibilidade mundial de recursos uraníferos - no balanço energético - é imperioso prosseguir com o aperfeiçoamento dos FBRs economicamente aceitáveis, seguindo um programa muito racionalizado, a longo prazo".

Será de valia demonstrar gradualmente (step by step) novas tecnologias comerciáveis e competitivas através da construção de dois ou três DFBRs no Japão. O primeiro destes deverá estar em fase de operação logo no início do próximo século. Os subsequentes DFBRs deverão ser construídos nas décadas vindouras. Será necessário repetir o esforço de pesquisa e desenvolvimento para planejar, projetar e construir uma usina que seja comercial. Baseado nestas considerações acredita-se ser viável um cronograma que situa a comercialização dos FBRs a partir do ano 2030. (Figs. 4 e 5).

A potência do primeiro DFBR seria entre 800 e 1000 MWe, levando-se em consideração que o porte dos futuros FBRs comerciais será maior. O porte específico do FBR comercial será selecionado quando forem finalmente conciliadas todas as especificações da usina.

Uma outra estimativa indica que a comercialização dos FBRs por volta de 2030 permitirá manter a demanda cumulativa de urânio do Japão abaixo do limiar de 1.500.000 toneladas correspondente a 10% do total recuperável de 14 a 15 milhões de toneladas tidas como disponíveis nos países de economia de mercado. Esta parcela é considerada como aceitável pelo Japão.

Estas previsões estão representadas nas figuras 4 e 5 onde se observa a seqüência de construção dos três DFBRs.

O esforço coordenado de todos os meios disponíveis no Japão e no exterior estão representados na Fig. 6, que tem como título - Esforço coordenado e integral do Japão para dispor de FBRs depois de 2030.

VI. CICLO DO COMBUSTÍVEL DOS FBRs

Um requisito mandatório para o ciclo do combustível dos FBR é o seu "fechamento", isto é, incluir no ciclo o reprocessamento para recuperação do urânio e plutônio (e a separação específica e subsequente segregação dos produtos de fissão por vitrificação). Quando a radioatividade atingir nível adequado, será feita a disposição final em repositório geológico.

É necessário portanto dispor de instalações para a fabricação do combustível - e da usina de reprocessamento, juntamente com meios de transporte, salvaguardas, medidas de segurança, providências para minimizar o impacto ecológico-ambiental, tratamento de rejeitos e meios para disposição de rejeitos (ver Fig. 7).

O "fechamento" do ciclo do combustível para LMFBRs, especialmente o reprocessamento contudo ainda não existe em escala comercial, até hoje só foram reprocessados 30 toneladas de combustível em caráter experimental. O ciclo do combustível constitui ainda hoje um desafio ao desenvolvimento e à utilização dos FBRs (Technical Reports Series No. 246, pg. 527, IAEA, 1985).

O material físsil (uma vez iniciada a operação do reator) produzido durante um certo período de funcionamento, pela queima e reprocessamento deste mesmo combustível, é utilizado para posterior recarga do reator. As diferentes etapas do processo requerem que o plutônio gerado permaneça por dois anos fora do reator. Uma vez que a reciclagem é a "razão de ser" do LMFBR conclui-se pois que é mandatória a existência de ciclo fechado e obviamente da usina de reprocessamento.

- O inventário de plutônio físsil necessário para dar a partida em um LMFBR de 1 GWe é pouco mais de 4.000 kg., O

plutônio para a carga inicial normalmente provém do combustível queimado nos a água leve. Nos países de economia de mercado, há hoje uma descarga anual de 8.000 toneladas de combustível queimado que, se reprocessado, daria origem a pouco mais de 7.700 toneladas de urânio ligeiramente enriquecido e 45 toneladas de plutônio físsil (bem como 230 toneladas de produtos de fissão). Como se pode observar, de todo combustível queimado seria possível instalar 10 GWe de novos FBRs por ano, usando a totalidade do plutônio produzido nos 300 GWe de reatores existentes no mundo.

No caso brasileiro, se tivéssemos as usinas ANGRA I, II e III em plena operação, a descarga de combustível anual seria de 80 toneladas; portanto, ao fim de 10 anos teríamos acumulado plutônio suficiente para a carga inicial de um LMFBR de 1.000 MWe (na hipótese em que todo o combustível queimado fosse reprocessado). Portanto, é mandatória a existência de um grande número de reatores térmicos LWR para servirem de "Ama de Leite" para um programa de FBR.

Como já foi dito, o ciclo do combustível dos LWR é motivo de intenso processo de aperfeiçoamento visando a obter taxas mais altas de queima, com redução do consumo de urânio pela aplicação de novos métodos de gerência do combustível, melhorando o método de operação das usinas, economizando urânio mediante a reciclagem do urânio e do plutônio procedentes do reprocessamento. A reciclagem do plutônio, já em uso experimental em alguns países, reduz o consumo de urânio em 50%. Estudos em curso mostram que, com pequenas modificações, a taxa de conversão do LWR pode atingir 0,9, o que permitirá aumentar a utilização do urânio em 300 ou 400%. Espera-se que na próxima década estes aperfeiçoamentos já estejam em pleno uso, desde que este novo tipo de PWR disponha do mesmo grau de segurança que os PWRs aperfeiçoados.

A experiência humana em reprocessamento de combustível queimado é de mais de quarenta anos e começou nos EUA para fins militares. O plutônio 239 é um explosivo nuclear de alta qualidade, e, para produzi-lo, as potências nucleares não invidaram esforços. As pesquisas levaram a um método conhecido por "Purex", utilizado universalmente. As primeiras usinas foram as de Hanford e Savannah River nos EUA, Sellafield na Inglaterra e Marcule na França. Com o funcionamento de um número cada vez maior de usinas nucleares, foram construídas outras usinas de reprocessamento, tais como Sellafield II na Inglaterra e La Hague na França (ver Tabela I). Nos EUA, somente o reprocessamento militar é utilizado. O Governo Carter interrompeu o reprocessamento civil, alegando que constitui um perigoso instrumento de proliferação nuclear. O subsequente governo Reagan levantou a proibição, mas a proibição anterior produziu um efeito desencorajador, e, como já foi dito anteriormente, a usina de Burnwell foi fechada pelo Governo Carter, e não há nos EUA, no momento, nenhuma atividade voltada para o reprocessamento civil-comercial.

REDUÇÃO DE CUSTOS NO CICLO DO COMBUSTÍVEL

Atualmente, o custo do ciclo do combustível para uma usina do tipo LMFBR é muito maior do que o do ciclo combustível de uma usina tipo LWR da mesma potência nominal. Para tornar o FBR comercialmente viável, não basta reduzir o custo de capital: é também necessário reduzir o custo do ciclo do combustível, por isso, um esforço muito grande está sendo feito para minimizar estes custos, mediante o desenvolvimento de processos convenientes e econômicos para fabricação e reprocessamento de combustível bem como através de um incremento substancial na taxa de queima dos elementos combustíveis (Ver Fig.8).

Para calcular as curvas da figura, tomaram-se dados reais do LWR e valores hipotéticos para o FBR, conforme Tabela II.

O trabalho de pesquisa e desenvolvimento de combustível a base do óxido misto de urânio e plutônio faz prever que a taxa de queima poderá exceder a 200 MWd/kg (recentemente no reator FFR -UKAEA, DOUNREY/UK- esta taxa foi atingida), de modo a reduzir consideravelmente o custo do combustível, e, certamente, quando os breeders entrarem em uso maciço, depois do ano 2020, o custo do ciclo do combustível será comparável ao dos LWR-avançados.

Na figura 8 está indicada a taxa de queima do combustível do Superphenix 1 e a provável taxa de queima do Superphenix 2 ou o EFBR. Entretanto, o custo real do combustível para o Superphenix 1 é bem mais alto do que o indicado na referida figura e tabela II.

VII. PROGRAMA BRASILEIRO DE REATORES RÁPIDOS

Convencidos da futura importância dos reatores rápidos (FBR), a Comissão Nacional de Energia Nuclear - CNEN decidiu, em 1963, iniciar um programa de reatores rápidos.

O programa incluiu estudos nas áreas da engenharia, ciclo do combustível, física de reatores e tecnologia de sódio/transferência de calor. Foram realizados 2 projetos: a engenharia de um reator térmico-rápido e a construção de um circuito a sódio. Em 1972, o IEN (nesta época sob a responsabilidade da CBTN) completou um Circuito a Sódio CTS-1 de 100 kW adequado ao estudo de transferência de calor e tecnologia do sódio. Este circuito a sódio foi projetado e montado por firma nacional mediante consultoria e fiscalização do IEN. No início de sua operação contou com a cooperação da Alemanha.

Durante a fase em que o IEN esteve sob a responsabilidade da CBTN, estudos do reator técnico-rápido prosseguiram sob uma colaboração franco/brasileira, originando o projeto detalhado do Reator COBRA, para estudos de física de reatores. Infelizmente a construção não foi iniciada pela negativa americana em fornecer o urânio enriquecido aos franceses para este propósito. O combustível do COBRA seria de fabricação francesa e de origem americana. A França não obteve concordância do governo americano.

Estes projetos propiciaram à equipe do IEN obter o primeiro treinamento "on the job" em tecnologia de sódio, física e engenharia de reatores rápidos. Concomitantemente, mediante bolsas de estudos e outros acordos de cooperação, houve treinamento no exterior. Na década de 70 foi feito no IEN um planejamento, a médio e longo prazo, para o desenvolvimento da tecnologia de reatores rápidos no país. Nesta época cogitou-se da idéia do projeto e construção de um pequeno reator rápido experimental com potência térmica da ordem de 20/50 MW. Ficou também clara a necessidade de se acompanhar o desenvolvimento dos FBRs nos EEUU, Europa, Japão e demais países para que assim fossemos mantidos atualizados.

O Brasil não precisa em futuro próximo de reatores rápidos de potência. Como já foi dito, a importância desse reator se dará nos meados do próximo século. A industrialização dos PWR no país, bem como o desenvolvimento do ciclo do combustível, principalmente o reprocessamento, deve preceder de pelo menos 15 anos a introdução dos reatores rápidos.

Como se pode observar, os problemas relativos à economicidade desses reatores vão requerer pelo menos de 30 a 40 anos; portanto, o Brasil disporá de tempo bastante grande para decidir o que mais lhe convier neste tipo de tecnologia.

Face às gigantescas dificuldades econômicas que o país enfrenta e à situação do próprio desenvolvimento dos FBRs não vemos como podemos, no momento, embarcar em um programa estritamente autônomo para reatores FBR de potência. Não obstante dentro desse contexto, a CNEN, em 1981, resolveu intensificar suas atividades no campo dos reatores rápidos, principalmente em tecnologia do sódio, em função da experiência já adquirida pelo IEN.

Por circunstâncias muito favoráveis e em decorrência do antigo acordo de cooperação com a Itália, foi possível a transferência de conhecimentos de forma economicamente conveniente.

Vale lembrar que a Itália teve substancial participação no projeto e construção do reator SUPER-PHENIX.

Assim sendo, em junho de 1981, a CNEN assinou outro acordo de cooperação com o órgão governamental italiano ENEA

(Comitato Nazionale per la Ricerca e per lo Sviluppo dell' Energia Nucleare e della Energia Alternativa), para treinamento de pessoal em diversas áreas da física e engenharia dos FBRs e de consultoria de projetos, com as despesas pagas pelo governo italiano. Em complementação a este acordo, foi firmado um contrato com a ANSALDO/NIRA (Itália) para projeto e fornecimento de 3 modernos circuitos a sódio e respectivos sistemas auxiliares.

Quanto ao treinamento, vários engenheiros, pesquisadores e técnicos foram treinados no IEN por meio de cursos e importantes estágios "on the job training" na Itália.

Os novos circuitos de sódio serão específicos para o desenvolvimento de componentes, engenharia de reatores, transferência de tecnologia do uso de circuitos a sódio que poderão eventualmente também ser empregados, em áreas outras, tais como energia solar e fusão.

O grupo de engenheiros e pesquisadores do IEN conta com cerca de 60 pessoas treinados na área de FBR e que tem procurado, por meio de estudos, estágios no exterior e acompanhamento do desenvolvimento dos FBR nos países avançados, encontrar e dar respostas à CNEN para escolher o melhor caminho futuro.

Vale ainda ressaltar que, recentemente, os governos do Brasil e da Argentina assinaram acordos de cooperação na área nuclear, incluindo também a área de reatores rápidos. Está prevista a realização de projeto conjunto de reator rápido experimental, entrando o Brasil com a infraestrutura dos circuitos a sódio e a engenharia do reator, e cabendo a Argentina à construção de uma unidade crítica com combustível fabricado naquele país. Em breve serão estabelecidas metas para que, em ações conjuntas, os dois países possam levar à frente um único programa de trabalho, podendo inclusive ter a associação de outros países.

CONCLUSÕES

1. Mesmo que os reatores de água leve de alta conversão - HCPWR - venham a ser aperfeiçoados e amplamente empregados as reservas mundiais de urânio conhecidas, não são suficientes para atender a demanda energética até o fim do próximo século.

2. Para um melhor aproveitamento do urânio minerado, a humanidade terá de desenvolver reatores rápidos econômicos e seguros, de modo a garantir por milênios o suprimento de energia nuclear.

3. Os programas de aperfeiçoamento dos FBR na Europa, Japão, EUA e de mais países prevêm a construção de pelo menos 10 reatores de demonstração, envolvendo no processo bem mais que 10.000 profissionais por cerca de 30 a 40 anos.

4. Os recursos necessários para atender estes programas excedem de muito 30 bilhões de dólares.

5. O custo, bem como as dificuldades tecnológicas, levaram os países interessados nos FBR a se associarem, sendo inviável para países em desenvolvimento a solução deste problema de forma autônoma. A participação de países em desenvolvimento em programas internacionais requer, entre outros requisitos um grau de competência técnica tão elevado que torne interessante aos países líderes a cooperação e associação destes.

6. Por isso, países interessados na aplicação futura do FBR, como contingência natural do próximo século, precisam cultivar alto grau de competência neste assunto.

No século XX, o principal combustível nuclear é o urânio natural. No século XXI, o principal combustível será o plutônio proveniente do urânio 238, cuja abundância é de 99,2%. Não haverá plutônio sem reprocessamento e sem o uso de mistura plutônio-urânio. Portanto, o cenário para os FBRs prevê um grande parque de LWRs, a reciclagem do plutônio sob forma de óxido misto, reprocessamento e a implementação gradual dos FBRs proporcionalmente ao inventário disponível de plutônio.

U.S. Energy Research Council, 1972
The Uranium

BIBLIOGRAFIA

I. INTRODUÇÃO

Fast Breeder Reactor - The Second Wave of Nuclear Power - R.D. Vaughan, M. Köehler, J.Leduc - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87.

Ensuring the Future of Nuclear Power; our Window of Opportunity - J.W. Vaughan, Jr - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87.

Advanced Light Water Reactors - Preface; On High Conversion Ratio Light Water Reactors - Milton C. Edwmd - Nuclear Technology - vol. 80 - Jan./1988.

Outlook on Breeders - Special report to the readers of nucleonics Week - April 28, 1988.

Development Trends for Future French Pressurized Water Reactors - B.Barré, G. Gambier, C. Golinelli - Nuclear Technology - vol. 80 - Jan/1988.

II. CUSTO DE CAPITAL DOS LMFBR (FBR)

Power Generation Cost of the SNR 2 in Comparison to German LWR - A.W.Eitz, W. Worff, R. Riethmüller - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87

The Further Cost Reduction Plan for LMFBR - K. Hida, Y. Mimura, I. Minatsuki, K. Fujimori, K. Hirota - ANS/ENS International Conference on Fast Breed Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87

Design Trends in the Optimization of Commercial Fast Breeder Reactors in the U.K. - D. Broadley, J.A.G. Holmes, G. Seed IAEA, Conference on Fast Breeder Reactors: Experience on Trends - Lyon, France - July 22/85.

Improvements to be made to Fast Breeder Reactors to Enhance their Competitvity - M. Sauvage, J.Bouchard - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA- Sept. 14/87.

Achieving low Capital Cost with CFR - J.A.G. Holmes - NEI - June/87.

COLABORAÇÃO EUROPEIA SOBRE OS LMFBR

The European Breeder Programme - G. Cicogniani, A.M. Broomfield, R. Lallement, W. Marth - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87

Safety Research Consideration for LMFBR in Europe - W. Marth, G.B. Cowking, G. Heusener, P. Penet, M. Pezzilli - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87.

Considerations Concerning the Future of FBRs in Europe - R.Carle, D.A. Davis, A.W. Eitz, F. Velona - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87

First Draft of EFB Design Scheduled for September (1988) - Nucleonics Week - March 17,1988.

IV. PROGRAMA DOS EUA SOBRE LMFBR

Fast Breeder Reactor for Energy Security - W.M. Yacobi - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA Sept. 14/87

DOE Should Preserve Breeder Option for US - Delbert Bunch - talk to Nucleonics Week, April 28/1988.

Design of PRISM, An Inherently Safe, Economic, and Testable Liquid Metal Fast Breeder Reactor Plant - R.C. Bergwand, F.E. Tuppets, L.N. Salerno, P.R. Pluta, G.W. May, R. Nilson - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - USA Sept 14/87

The Sodium Advanced Fast Reactor (SAFAR) - R.D. Odenhamp, E. Guenter, S.Golan - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87.

Status of National Efforts: The United States - Outlook on Breeders - Nucleonics Week - April 28, 1988.

The Development of the Liquid Metal Reactor (LMR) in USA: Significance for Europe - Comunicação particular

V.O PROGRAMA DO JAPÃO SOBRE LMFBR

Perspective on LMFBR Development in Japan - T. Itakura, S. Sawai - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87.

MHI-WH Compact 1000 Mwe Pool - Type FBR for Demonstration - T.Meshii, K. Hida, K. Nahamura, M. Fakuda, M. Hayano, R. Viyuk, J. Mangus, J. Livingston, J. Sharbouch - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87

Present Status of FBR Development in Japan - S.Sawai, Y. Iwakoshi - ANS/ENS International Conference on Fast Breeders Systems - Pasco, Wash. - USA - Sept. 14/87.

Construction of Prototype FBR "MONJU" - T. Takahashi, O. Yamaguchi; ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87.

Evolution of Cost Effective Design Features of LMFBR in Japan - H. Nakagawa, H. Dhabayashi, S. Hattori - ANS/ENS - International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco, Wash. USA - Sept. 14/87.

VI. CICLO DO COMBUSTIVEL DOS FBR/VII REDUÇÃO DE CUSTOS NO CICLO DO COMBUSTIVEL

Status of Liquid Metal Cooled Fast Breeder Reactors - Technical Report Series no. 246 - IAEA - 1985 - Chaptel VIII - "The Fuel Cycle of Fast Breeder Reactors".

The Fast Breeder Reactor Fuel Cycle (Keynote) - H.H. Hennies - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco Wash. USA - Sept. 14/87.

The Fast Breeder Fuel Cycle in Europe - Present Status and Prospects - J. Megy, R.H. Allardice, K. Ebert, J.M. Morelle, P.Venditti - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco - Wash. USA - Sept. 14/87

Progress on FBR Fuel Cycle Developments in the U.S. - F.L. Culler - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems - Pasco - Wash. USA - Sept. 14/87

Fast Breeder Reactor Fuel Reprocessing R and D. Technological Development for a Comercial Plant - M.M.J.Colas, D. Saudray, J.A. Coste, JA Roux, A. Jouan - ANS/ENS International Conference on Fast Breeder Systems Pasco - Wash. USA - Sept. 14/87

Le D'emarrage de Superphenix et la Filiere De Reacteurs a Neutrons Rapides - 2a. partie (Cycle du Combustible) - RGN - no. 3 - MAI-JUIN/1987.

VIII. PROGRAMA BRASILEIRO DE REATORES RAPIDOS

Criação de grupo de trabalho para estudar a viabilidade de um programa de Reatores Rapidos para a CNEN - Resolução Interna IEN - 24/69 de 30 de junho de 1969.

"Loop" a Sódio em Alta Temperatura (CTS-1) do Instituto de Engenharia Nuclear (Estado do projeto) - trabalho apresentado no II Simpósio Brasileiro de Transferência de Calor e Mecânica de Flúidos em B.H. - Prof. G. Ailton - julho 71 (nota: entrou em funcionamento em 21.12.72)

Projeto Reatores Rápidos CNEN - Situação em novembro de 1971 - Relatório do Instituto de Engenharia Nuclear (Estado do projeto) trabalho apresentado no II Simposio Brasileiro de Transferência de Calor e Mecânica de Fluidos em B.H. - Prof. G. Bilton julho 71 (nota: entrou em funcionamento em 21/12/72).

Projeto Reatores Rápidos da CNEN - Situação em novembro de 1971 - Relatório do Instituto de Engenharia Nuclear (IEN).

Review of Fast Reactor Program Plan Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) Final Report - April/1971 - Battelle Pacific Northwest Lab. - J.M. Batch.

Acordo de Cooperação para o Projeto de Experiência Crítica "COBRA" (Reator COBRA), assinado entre a Companhia Brasileira de Tecnologia Nuclear (CBTN) e o Commissariat à L'Energie Atomique - Jan/74.

Inúmeras notas e comunicações técnicas, teses, artigos e revistas sobre trabalhos relativos ao Programa de Reatores Rápidos da CNEN em desenvolvimento no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) - Cidade Universitária - Ilha do Fundão - Rio de Janeiro. Datam desde 1969.

Programa de Execução do Acordo de Cooperação entre o Governo da República Italiana e a República Federativa do Brasil no campo dos Usos Pacíficos da Energia Nuclear. Brasília, 29 de julho de 1981.

Contrato para o fornecimento de circuitos (040, 050, 060) e equipamentos (010, 020, 030) para tecnologia do sódio - firmado entre a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) e a Nucleare Italiana Reattori Avanzati (NIRA) - Brasília, 29 de julho de 1981.

6 volumes referentes aos cursos dados no IEN em 1982 por professores italianos, dentro do acordo da Cooperação no campo dos Reatores Rápidos entre os Governos do Brasil e da Itália.

Proposta Programa de Reatores Rápidos - IEN/CNEN- JAN/81

Declaração conjunta Brasil-Argentina sobre Política Nuclear- Protocolo 17 - item 6: "Estudos de viabilidade"

técnica do desenvolvimento conjunto a longo prazo, de um reator rápido de demonstração (experimental) - Boletim Informativo CNEN no. 87 - Ano I - 29.12.86

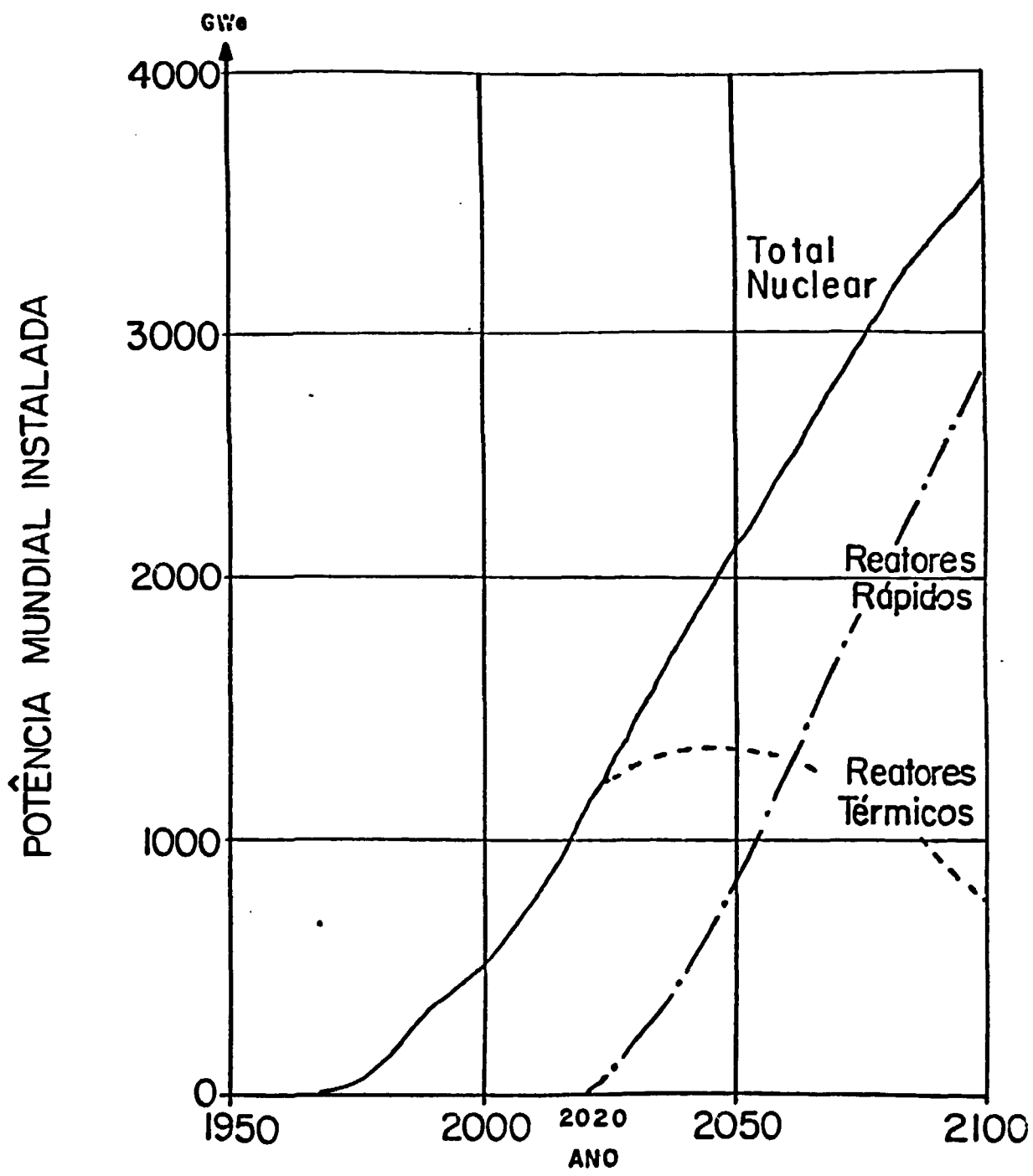


FIG. 1

CENÁRIO PREVISTO PARA O APERFEIÇOAMENTO DO FBR NA EUROPA

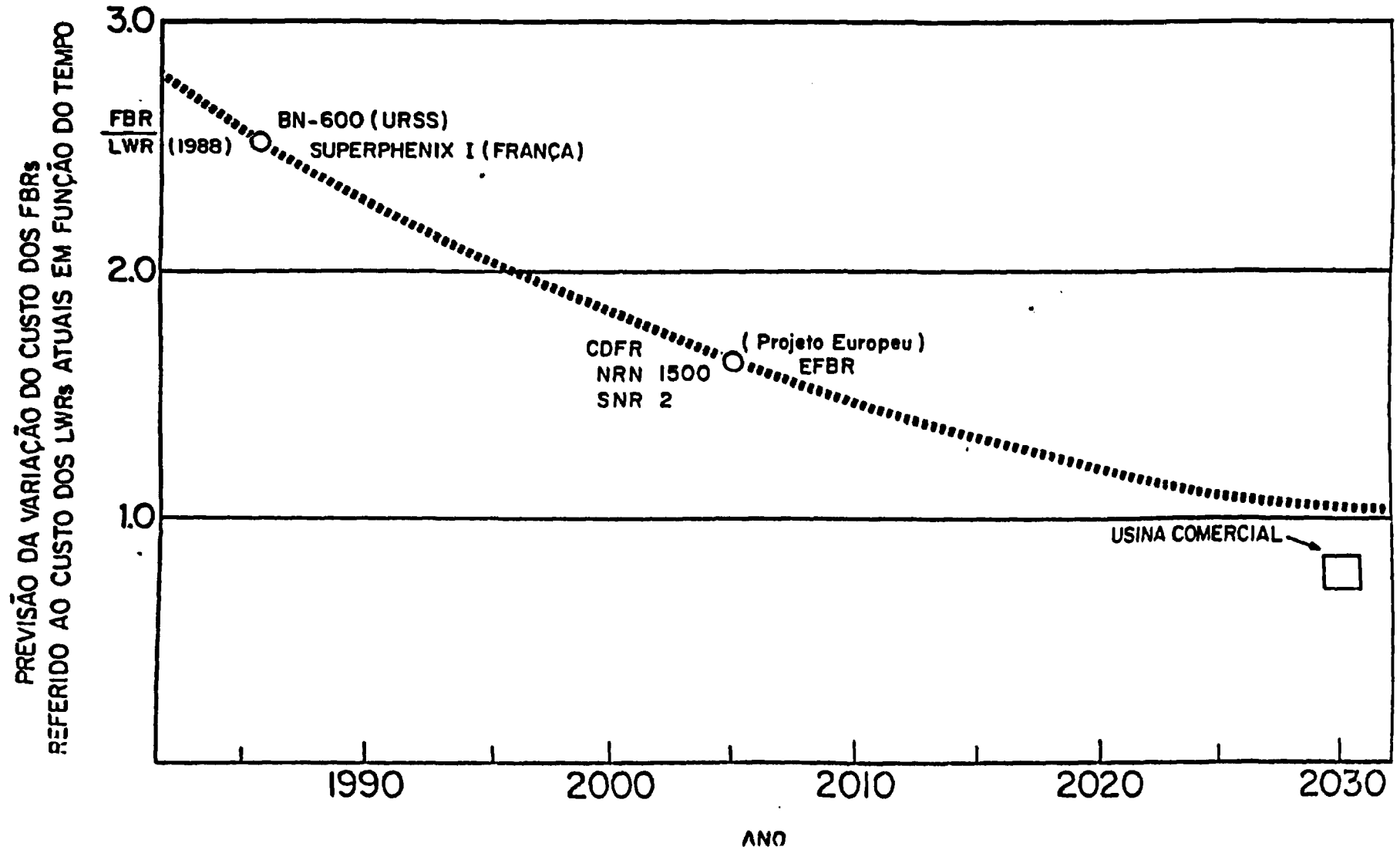


FIG. 2

INTERGOVERNMENTAL AGREEMENT
 (Signed Jan 1984)
Reactor Memorandum of Understanding
 (Signed March 1984)

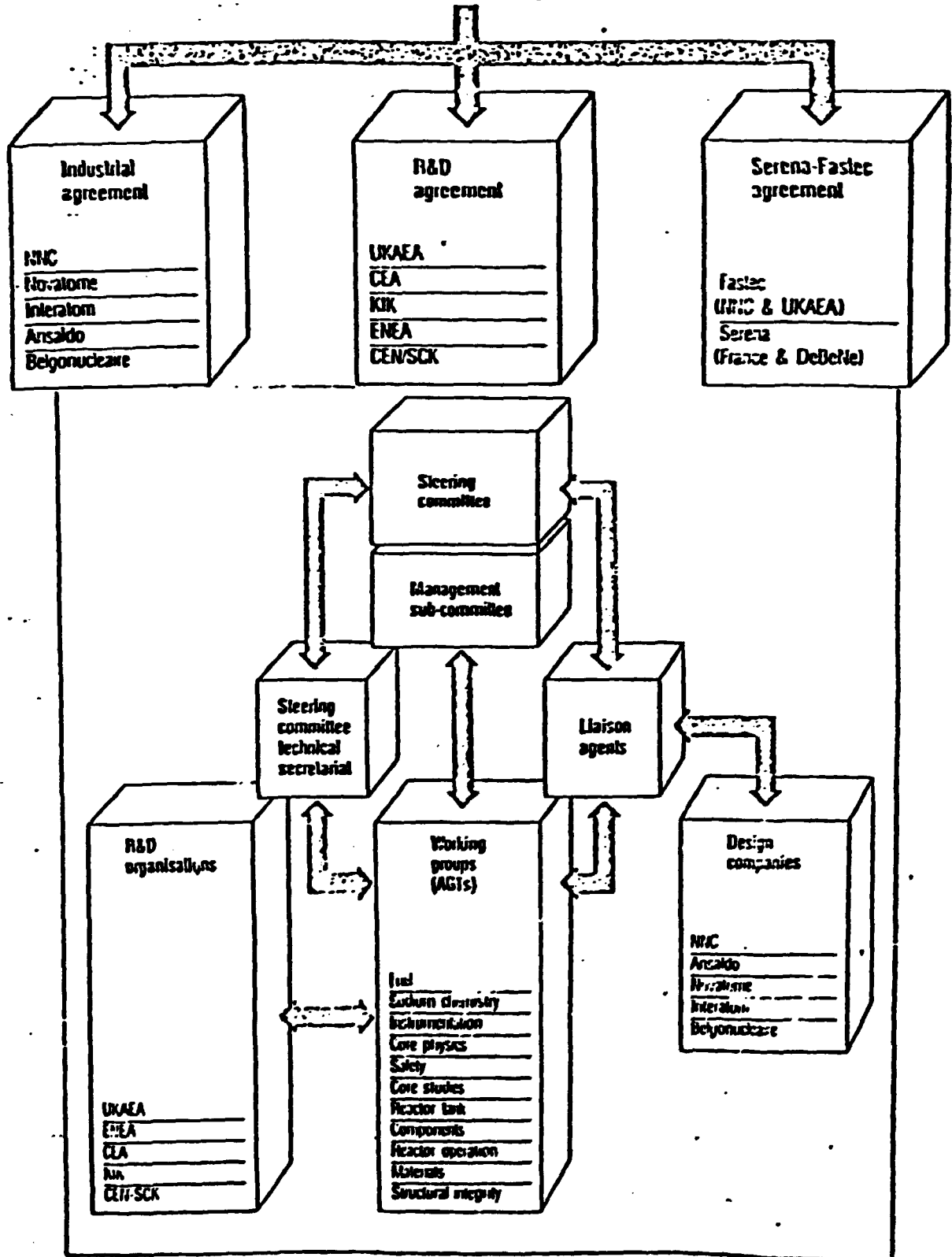
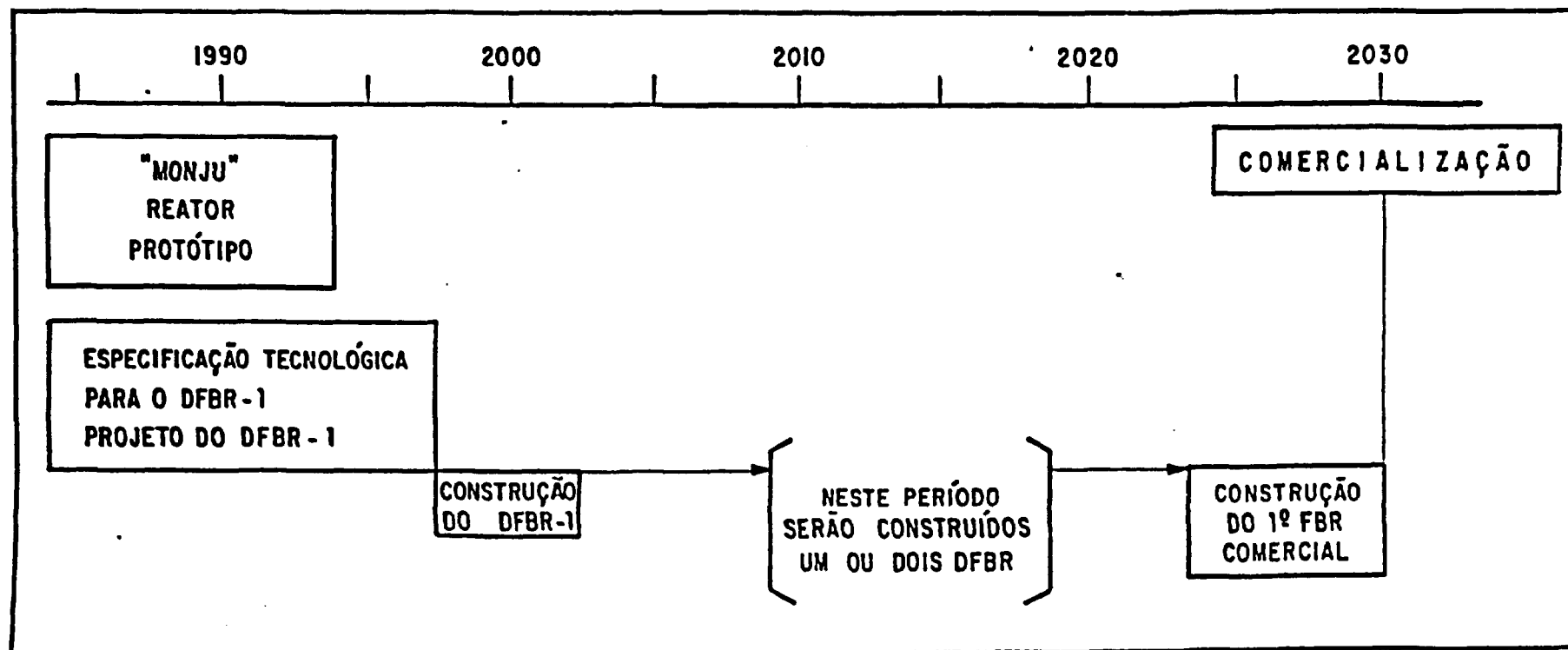


FIG 3

CENÁRIO DA COMERCIALIZAÇÃO DOS REATORES "BREEDERS" RÁPIDOS NO JAPÃO CRONOGRAMA PREVISTO PARA OS PRIMEIROS REATORES DE DEMONSTRAÇÃO (DFBR)



Fonte: Perspective on LMFBR Development in JAPAN
T. ITAKURA ("Japan Atomic Power Company")
S. SAWAI ("Power Reactor and Nuclear Fuel Dev. Corp")
Conf. Int. Fast Breeder, (Pasco) Wash. EUA. (1987)
pg. 15.4 - 1

CENÁRIO PREVISTO PELO JAPC PARA O APERFEIÇOAMENTO DO FBR NO JAPÃO

PREVISÃO DA VARIÇÃO DO CUSTO DE CONSTRUÇÃO DOS FBRs
REFERIDO AO CUSTO DO LWRs ATUAIS EM FUNÇÃO DO TEMPO

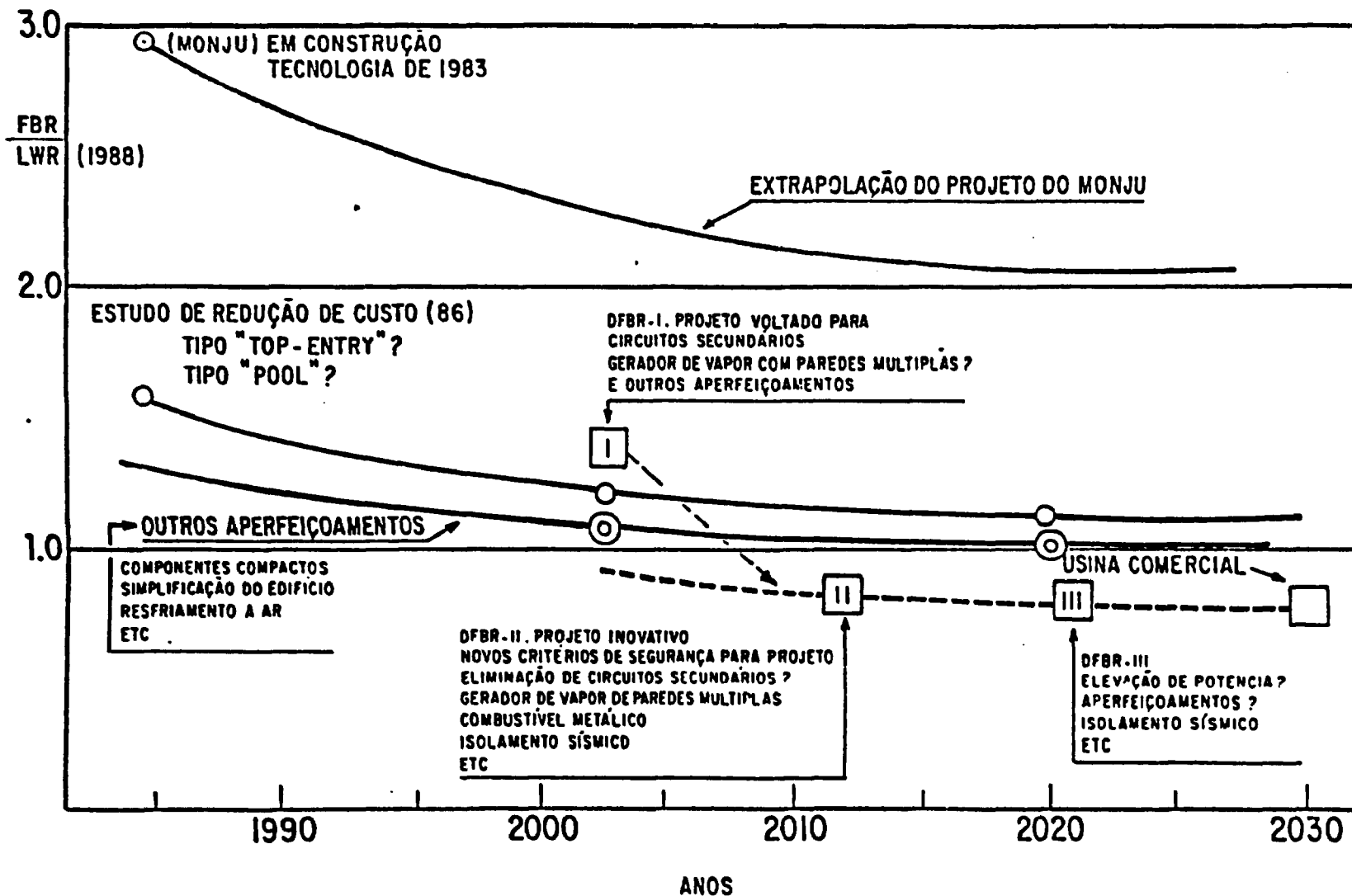


FIG. 5

ESFORÇO COORDENADO E INTEGRAL DO JAPÃO PARA DISPOR DE FBRs DEPOIS DE 2030

PROJETO NACIONAL

No campo do desenvolvimento tecnológico, há casos que envolvem interesses nacionais vitais, e atendendo a causa nacional, frequentemente eles ultrapassam a capacidade de empresas individuais. Tais casos são tratados sob a forma de projetos nacionais e resolvidos pela combinação dos meios disponíveis tanto governamentais como do setor privado. O desenvolvimento dos reatores rápidos FBR e dos reatores térmicos avançados ATR é o primeiro projeto nacional em andamento no campo científico neste país (Japão).

IMPORTÂNCIA DA COOPERAÇÃO TECNOLÓGICA E DA COORDENAÇÃO COM PAÍSES ESTRANGEIROS

O trabalho de desenvolvimento do FBR e ATR é conduzido com nossa própria tecnologia. Entretanto, para progredir satisfatoriamente, mantendo o mais alto padrão, comparável ao das nações líderes, é vital ter acesso aos últimos desenvolvimentos ocorridos no exterior e ajustar a tecnologia nacional a estes progressos. Aspectos de segurança em particular exigem cooperação e coordenação internacional.

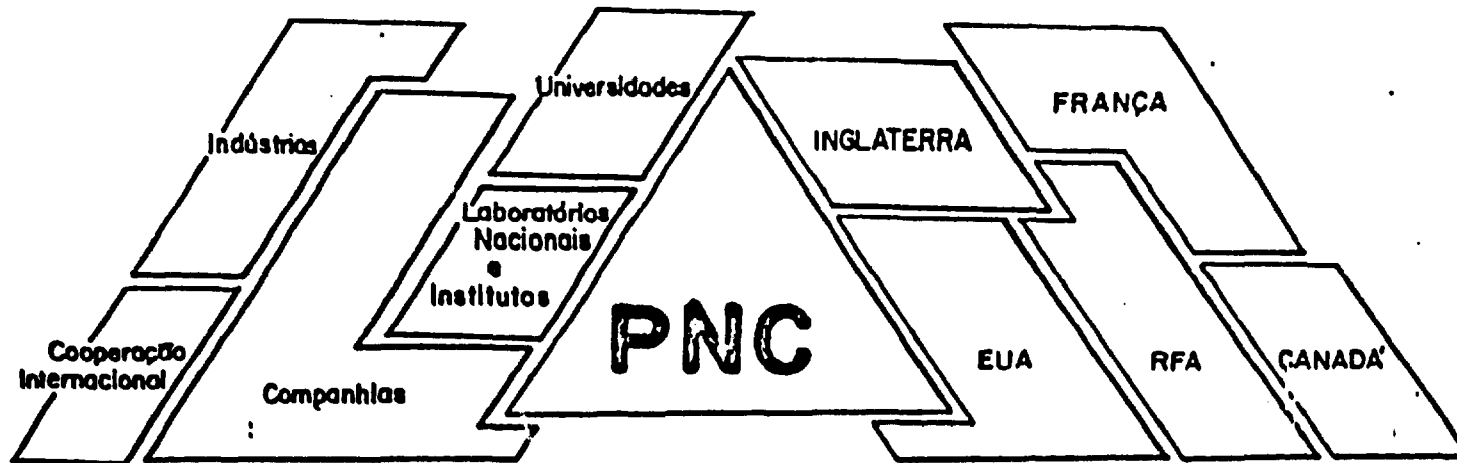


FIG. 6

CICLO DO COMBUSTÍVEL DOS FBRs

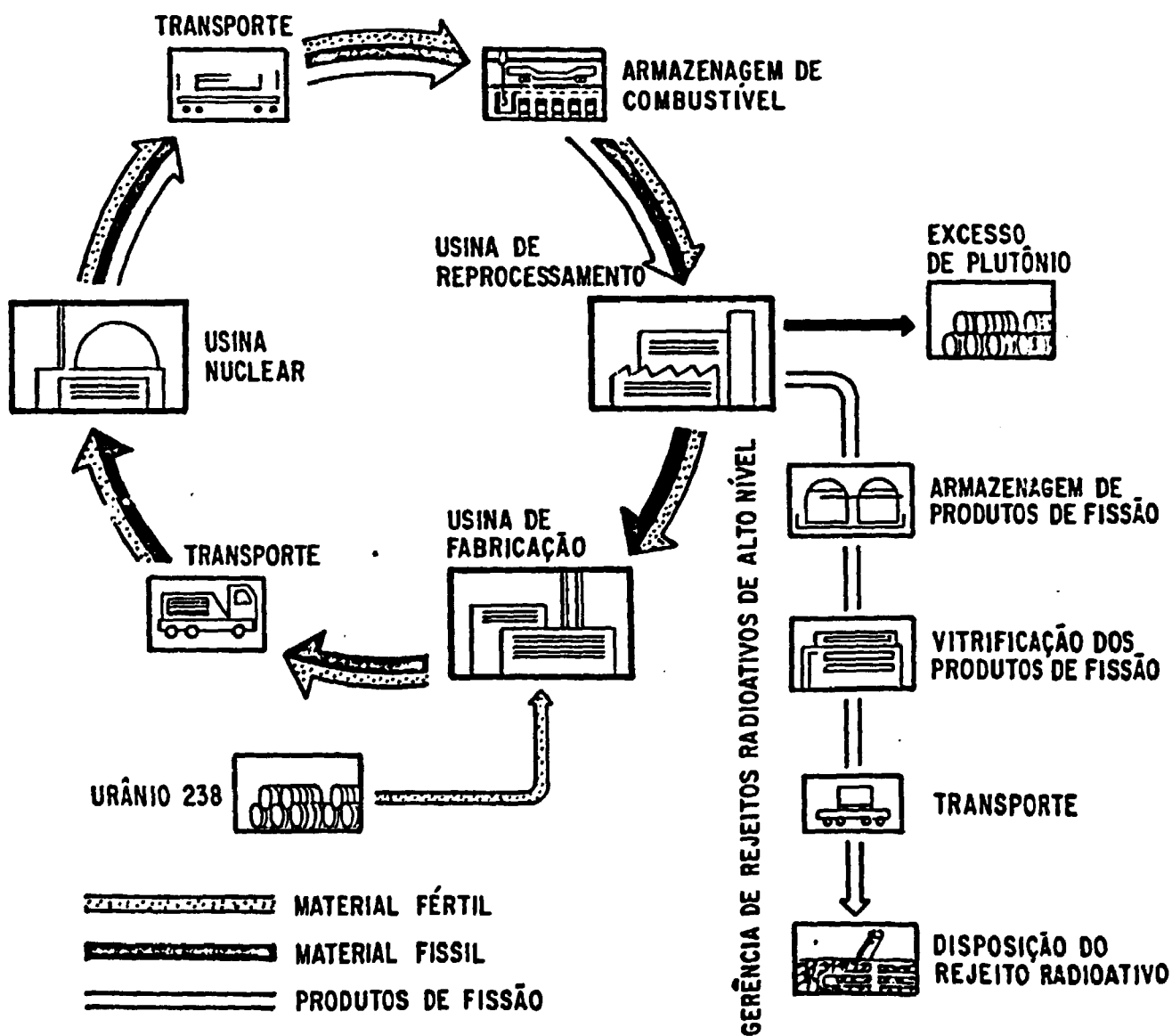


FIG. 7

CUSTO ANUAL DO COMBUSTÍVEL PARA UMA USINA DE 1000 MWe
(em milhões de dólares)

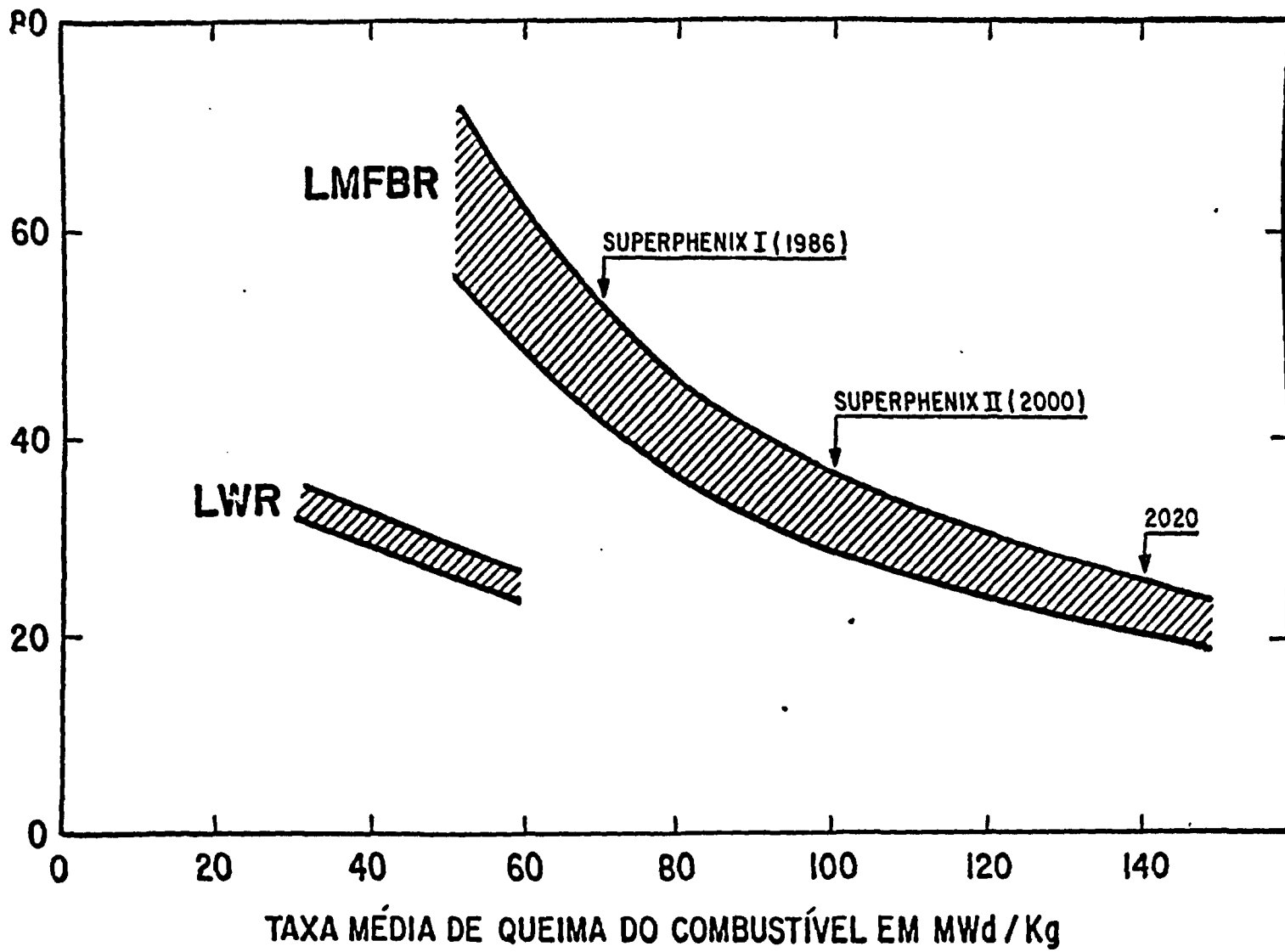


FIG. 8

USINAS COMERCIAIS DE REPROCESSAMENTO EM 1988

USINAS EM FUNCIONAMENTO				USINAS EM CONSTRUÇÃO			
USINAS	Entrada em Operação	Linhas de Reatores		USINAS	Entrada em Operação	Linhas de Reatores	
		Grafite Gas	LWR			Grafite Gas	LWR
Marcoule UP1 La Hague UP2 FRANÇA	1958 1976	700t	 400t	La Hague UP 2-800 La Hague UP3	1982 1989	 800t 800t	
Sellafield GRX-BRETANHA	1952	1.500t		Sellafield Thorp	1992	800t	
Karlsruhe WAK RFA	1971		35t	Wackersdorf W350	1995	350t	
Tokaimura JAPÃO	1977		170t	Rokkashomura	1995		

TABELA 1

HIPOTHESES PARA AVALIAÇÃO DO CICLO DO COMBUSTÍVEL
DOS FBR EM COMPARAÇÃO COM OS LWR

U308	25 \$-1b
Enriquecimento	100 \$-swu
Fabricação	
-LWR	200 \$-kg
-LMBR	3000 \$-kg
Reprocessamento	
-LWR	700 \$-kg
-LMBR	(*) 1500 \$-kg
Gerência de Rejeito Radioativo	1 mill-kwh

* O custo do reprocessamento certamente é bem maior que os 1.500\$/kg sendo, no mínimo, de 3.500\$, por conseguinte a curva é otimista.

TABELA II.