

ESTUDOS SETORIAIS

ENERGIA - 1477

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO

— ESTUDO N.º 1 —

**BANCO NACIONAL DO
DESENVOLVIMENTO
ECONÔMICO - D. A.
BIBLIOTECA**

**ASPECTOS ECONÔMICOS
DO
APROVEITAMENTO INDUSTRIAL
DA
ENERGIA ATÔMICA**

O. A. DIAS CARNEIRO

**RIO DE JANEIRO
BRASIL
1955**

**ASPECTOS ECONÔMICOS DO APROVEITAMENTO
INDUSTRIAL DA ENERGIA ATÔMICA**

O presente estudo não contém quaisquer informações que tenham sido obtidas de fontes reservadas ou confidenciais.

O. A. DIAS CARNEIRO

Embaixada do Brasil
Londres, em 26 de setembro de 1955.

ÍNDICE

APRESENTAÇÃO	1
---------------------------	----------

PARTE I

Introdução

I — OBJETIVO DO ESTUDO E MÉTODO DE ANÁLISE

Objetivo do estudo	7
Método de análise	7
Conceitos fundamentais de análise	8
Análise técnica dos processos produtivos	9
Análise econômica dos processos industriais	10
Análise da produção termelétrica atômica	12

PARTE II

Técnica e economia da produção termelétrica nuclear

I — TÉCNICA DA PRODUÇÃO TERMELÉTRICA NUCLEAR

Rudimentos de física atômica e nuclear	13
Função analítica de produção da energia nuclear	18
Função técnica de produção da energia termonuclear	25
Reator nuclear: classificação e construção	27

II — ECONOMIA DA PRODUÇÃO TERMELÉTRICA NUCLEAR

Programa de energia elétrica nuclear na Grã-Bretanha	33
Programa de reatores térmicos na Grã-Bretanha	37
Análise de custos da produção termelétrica nuclear	41

Conseqüências econômicas da energia elétrica nuclear	47
A energia elétrica nuclear e a localização de indústrias específicas	51

PARTE III

A termoeletricidade nuclear na economia brasileira

Fatores econômicos no aproveitamento da energia elétrica nuclear	53
Fatores culturais no aproveitamento da energia elétrica nuclear	58
A energia nuclear e o mercado de energia no Brasil	60
Esbôço de programa brasileiro de energia termelétrica nuclear	64

Anexos

Quadro I — Os elementos	69
Quadro II — Tabela periódica dos elementos	72
Quadro III — Isótopos de alguns elementos leves e pesados	73
Quadro IV — Algumas constantes e fatores de conversão	75
Quadro V — Características técnicas de alguns reatores	76
Quadro VI — Consumo de energia no Brasil segundo a natureza	78
Quadro VII — Projeções da procura de energia no Brasil	79
Bibliografia consultada	80

APRESENTAÇÃO

Desde março dêste ano, vem o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico se preocupando com os aspectos econômicos do aproveitamento da energia atômica para geração de eletricidade. De fato, mais de um quinto dos fundos contratados pelo Banco para desenvolvimento econômico referem-se à produção de energia elétrica. Tão grande tem sido, de outro lado, o avanço dos conhecimentos tecnológicos, no setor do aproveitamento da energia nuclear, e tão numerosas as referências ao Brasil, como dos países mais indicados para teatro dêsse aproveitamento, que a administração do Banco julgou prudente informar-se, com antecedência, sobre essa matéria.

Assim decidindo, pensou que a Grã-Bretanha, ativamente empenhada, como está, em programar de aproveitamento de energia nuclear para fins industriais, conforme se deduz da leitura do Livro Branco nº 9.389, de fevereiro de 1955, seria um repositório natural de informações atualizadas sobre as possibilidades da nova indústria.

Em junho próximo passado, pelo ofício P-362/55, o Presidente do Banco pediu permissão ao Ministério das Relações Exteriores para que o economista e diplomata Otávio Augusto Dias Carneiro, servindo em Londres, como Secretário de Embaixada, pudesse, sem prejuízo das funções do seu posto, desempenhar-se do encargo de representar o B. N. D. E. na Inglaterra. A autorização solicitada foi concedida e o Conselho de Administração do B. N. D. E. resolveu que o Dr. Dias Carneiro, ex-chefe, aliás, do Departamento Econômico da entidade, no período 1952/1953, pudesse agir, na Grã-Bretanha, como seu representante, com a incumbência, entre outras, de informar-se e transmitir ao Banco os dados que pudesse obter sobre o aproveitamento da energia atômica para fins pacíficos.

Tal a origem do presente trabalho, cuja publicação o Itamaraty permitiu fôsse feita pelo B. N. D. E., para apresentação ao público interessado no estudo da matéria.

Para explicar o assunto de que foi incumbido, Dias Carneiro propôs-se pesquisar a expressão da função da produção de energia elétrica a partir de reatores e o cálculo da respectiva função de custo, para, a

seguir, aplicar os resultados à economia brasileira, na tentativa de avaliar a importância, para nós, da nova tecnologia.

Entre os dois métodos passíveis de investigação da função de produção, escolheu o analítico, dada a inexistência de tradição experimental na produção de energia elétrica mediante reatores. Dividiu Dias Carneiro o seu trabalho em três partes.

→ Na primeira, lança os conceitos fundamentais sobre a natureza das funções de produção e de custo e, também, sobre o processo industrial visado na geração de energia elétrica consequente à cisão atômica, individualizando-lhe os fatores passivos, como matérias-primas e produtos intermediários, e os fatores ativos, como a energia que se aplica aos fatores passivos, o equipamento, o instrumental e a mão-de-obra especializada. Como método de análise salienta que o único instrumento à disposição do analista é o da programática linear, isto é, a programação das atividades interdependentes de produção e distribuição.

Na segunda parte, procede o Autor à análise técnico-analítica e econômico-programática da produção termelétrica atômica, assim como à análise comparativa de custos de produção de energia elétrica pelos diferentes meios capazes de produzi-la.

Finalmente, a última parte se refere à aplicação ao caso brasileiro do que foi revelado ou esclarecido na segunda parte.

O trabalho contém 9 gráficos, que completam o texto, e muitos quadros úteis.

Compreende-se, desde logo, que a segunda parte é a mais substancial do estudo. Aí trata o Autor, como acima se referiu, da técnica e da economia da produção termelétrica nuclear e expõe como pôde apreciá-las partindo de seus estudos e das informações que colheu. Nessa parte, Dias Carneiro, inicialmente, relembra os rudimentos fundamentais da física nuclear, para poder reproduzir a função de produção da energia nuclear, que assim se escreve:

$$S = a \frac{k^{n+1} - 1}{k - 1}$$

sendo S a energia acumulada em kWh até a enésima geração de neutrons produzidos por cisão e k o fator de acréscimo da população de neutrons ativos de uma geração para a seguinte e a a energia liberada na primeira geração.

No início dessa parte do trabalho constam dois gráficos: um, o de Aston, figurando a energia de ligação dos núcleões com o crescer dos pesos atômicos; outro, esquemático, demonstrando o mecanismo da cisão e reprodução simultâneas. Mostra o Autor como, pelo mecanismo da cisão, cada grama de urânio fissil pode liberar 22.500 kWh de energia térmica, além de um fluxo de neutrons para manter o processo, tanto

sob a forma de explosão nuclear (bomba) como de combustão nuclear (reator).

Da consideração do coeficiente k decorre o conceito de *massa crítica*, fundamental no desenho de reatores. Partindo do modelo analítico de função de produção, Dias Carneiro indaga da forma prática da função, levando em consideração os coeficientes de taxa de cisão rápida, de sobrevivência de neutrons e de utilização térmica prática. Chega, finalmente, à expressão muito simples do tipo:

$$P = \frac{d v n a}{c} \times V$$

que é a fórmula da potência em watts do reator, em função de:

- d densidade média de neutrons por cm^3 de urânio;
- v velocidade média dos neutrons;
- n número de núcleos de urânio 235 existentes em um cm^3 de material fissil;
- a seção de choque em cm^2 ;
- c número de cisões por segundo necessários à produção de um watt de energia elétrica;
- V o volume de urânio 235 na massa fissil em cm^3 .

Nessa altura, relembra o Autor os conceitos de regeneração da matéria fértil. A matéria fértil brasileira por excelência será o tório incluído em nossas monazitas. Ao capturar um neutron lento, um átomo de Th 232 converte-se em um átomo de Th 233, substância esta radioativa, cuja vida média é de 23 minutos. A cinza dessa reação radioativa é o elemento protoactínio 233, que subsiste por 27 dias, para transmutar-se, afinal, em U 233, elemento estável e fissil, sob o bombardeio de neutrons térmicos. A esse U 233 está reservado, em nosso país, papel análogo ao que já desempenha o Plutônio 239 na Grã-Bretanha e nos Estados Unidos da América.

A seguir, o Autor explica ligeiramente a classificação de reatores, conforme a sua destinação, a velocidade dos neutrons utilizados na cisão e a posição relativa da carga fissil e da substância moderadora. Quase todos os reatores ora em uso são térmicos. Ainda são secretos os dados relacionados com reatores rápidos, que dispensam moderador, o que representa uma grande economia de peso e de volume, permitindo a construção de unidades compactas e quicá portáteis.

Como acima se declara, os reatores industriais conhecidos são do tipo térmico, heterogêneo e regenerador, o que quer dizer que a reação é provocada por neutrons lentos (menos de 1,5 km por segundo), as

cargas de urânio ou de plutônio são isoladas do moderador em cartuchos metálicos e, ao mesmo tempo que são reatores de potência, são fábricas de plutônio. Esses reatores não passam de meras fornalhas, nas quais ocorrem os seguintes fenômenos:

- a) cisão dos átomos da carga fissil;
- b) repulsão explosiva das cinzas de cisão;
- c) anulação pelos choques da energia cinética das partículas cindidas e surgimento de energia calorífica nos pontos de parada dessas partículas.

Os fatores ativos do processo industrial referem-se aqui à transformação da energia suprida pela fonte, ao controle do regime de produção, à remoção das cinzas de cisão e à proteção da mão-de-obra especializada que opera o reator. Ainda se classificam, entre os fatores ativos, o moderador, o refletor, as barras de controle, o radiador do sistema e a blindagem biológica.

Os fatores passivos do mesmo processo referem-se à matéria fissil: urânio natural, urânio 235, urânio 233 e plutônio 239.

Examinando o programa de aproveitamento de energia elétrica da Grã-Bretanha, não julga provável o Autor, em face das informações colhidas, que a produção termelétrica nuclear conduza a preços do kilowatt-hora mais reduzidos que os referentes à energia originária de outras fontes. Isso, entretanto, não desqualifica a energia atômica como fonte de eletricidade, porque merecem consideração especial:

- a) a disponibilidade nacional de substâncias físseis;
- b) os custos comparativos de importação de substâncias energéticas;
- c) a geografia energética do país considerado.

A Grã-Bretanha, obrigada a aumentar a capacidade instalada, lançou-se a um programa intenso de aproveitamento de energia atômica. Os primeiros reatores de potência da Grã-Bretanha serão do tipo térmico, heterogêneo, moderados a grafita, resfriados a gás carbônico e alimentados com urânio natural. Produzirão, portanto, energia e plutônio. A bateria de reatores a ser instalada em Cumberland entrará em operação a partir de 1960. Quando ficar completa (1965) terá a potência global de 1.800.000 kW.

De acordo com o programa, a Grã-Bretanha disporá, dentro de dez anos, de 12 centrais núcleo-elétricas, servidas por 16 reatores, mediante o investimento global de 260 milhões de libras, equivalentes a 50 bilhões de cruzeiros. Dêsse modo, a Grã-Bretanha acrescerá suas disponibilidades de energia de uma capacidade geradora pouco inferior à atualmente instalada em território brasileiro.

Presume-se que a vida ativa do sistema de Cumberland durará entre 10 e 20 anos. O dispêndio com a aquisição da matéria fissil no prazo de vida ativa do sistema será da ordem de 40 milhões de libras, que equivalem a 8 bilhões de cruzeiros, isto é, 15 % do investimento. Com o tempo, poder-se-á contar com o plutônio de regeneração e, possivelmente, com o preço cadente desse combustível, que acabará refletindo-se no custo do kWh.

O Autor, com os dados disponíveis, procura dar-nos noção concreta do orçamento de construção e operação de uma central de 125.000 kW. Uma central dessa capacidade exigirá uma carga fissil de 5.600 quilos de urânio enriquecido a 5 %, ao custo de 5 milhões de libras, ou 1 bilhão de cruzeiros, à razão, portanto, de 180 mil cruzeiros o quilo. Levando em conta a subsequente produção de plutônio, presume-se que a despesa anual com a carga fissil para operar essa grande central subirá a 80 mil libras, equivalente a 16 milhões de cruzeiros. A central, como investimento, requererá a imobilização de 15,6 milhões de libras em reatores, turbinas, geradores e usinas químicas e metalúrgicas auxiliares. Já os custos variáveis subirão a 430.000 libras por ano e os custos fixos (juros, depreciação e seguros) a 1.138.000 libras. Daí o preço unitário do kWh de 0,86 do dinheiro, ou Cr\$ 0,70.

Ao deixar entrever a possibilidade da construção futura de reatores de fusão, disparados por meio de aceleradores de partículas que alvejarão uma cabeça metálica de deutério e lítio, observa judiciosamente que a futura economia da energia atômica ainda não se submete a previsão e que é bem possível já estarem teoricamente obsoletos os reatores de urânio por instalar, em face da novíssima tecnologia, que ora mal se divisa. De qualquer modo, é pouco provável que a energia atômica venha a substituir completamente as fontes atuais de eletricidade, hidráulicas ou térmicas, sendo possível que a substituição de fontes de energia seja apenas parcial e gradual.

Preparado o leitor para os fundamentos da nova técnica de geração, eis como o Autor entrevê o desenvolvimento da termoeletricidade nuclear no Brasil, desenvolvimento esse que aqui deparará obstáculos de duas ordens: econômicos e culturais.

Os obstáculos econômicos são de três ordens. Como agem de modo geral, não deixarão de se fazer sentir sobre a nova tecnologia da forma seguinte:

1. dificuldades no tornar máximo o efeito multiplicador, sobre a economia, do deslocamento da mão-de-obra rural para a cidade, indispensável ao processo de industrialização;
2. dificuldade de manter-se vazão adequada de capital estrangeiro para participar do financiamento da industrialização;
3. necessidade de manter-se uma taxa de aumento do produto nacional superior à taxa de crescimento demográfico e mais a taxa de depreciação e de depleção do estoque bruto de capital existente no país.

Entre os obstáculos culturais cumpre mencionar:

1. a inércia mental dos habitantes dos países subdesenvolvidos para admissão de técnicas novas;
2. as concepções tarifárias vigentes no Brasil no setor da indústria elétrica;
3. a atitude assumida em relação à técnica e ao capital estrangeiros no setor da produção de energia de modo geral, em particular eletricidade e petróleo.

Conclui, em resumo, o Autor: "Vencidas as dificuldades técnicas, a termoeletricidade nuclear encontraria no quadro social e econômico brasileiro obstáculos que poderão atrasar, ou mesmo impossibilitar, essa adaptação no decurso dos próximos 20 anos".

Segundo o Autor, a termoeletricidade nuclear desempenhará, por muitos anos, um papel supletivo do potencial hidrelétrico. As primeiras unidades seriam instaladas na vizinhança do mercado, onde se encontra esgotado o potencial hidrelétrico local, como no caso de São Paulo, Rio de Janeiro e centros metalúrgicos. Como programa imediato de aproveitamento recomenda:

- a) formação de engenheiros nucleares;
- b) construção de um reator rápido de 10.000 kW, resfriado a água leve sob pressão;
- c) estudo, pela concessionária, do plano de expansão de Piratininga pela termoeletricidade nuclear.

Parece ao autor desta apresentação que o relatório Dias Carneiro, que foi muito bem pensado e melhor escrito, pode exercer uma grande influência nas decisões da administração superior do país no que se refere ao aproveitamento da energia atômica para fins de geração de eletricidade, assim como esclarecer nossos meios técnicos e econômicos e elites culturais sobre a conjuntura da termoeletricidade atômica e as suas perspectivas de crescimento.

Daí a preocupação que teve de entremonstrar aos leitores a substância do relatório, certo de que se aplicarão ao seu estudo todos aqueles que na matéria se iniciem, para a compreensão dos mistérios encerrados nos núcleos dos átomos e que imensa repercussão poderão ter em nossas vidas e no desenvolvimento do Brasil.

O B. N. D. E. agradece ao engenheiro nuclear Prof. Hervásio de Carvalho os serviços prestados ao proceder à leitura cuidadosa da Parte II deste Estudo. Várias modificações no texto original decorrem dessa leitura. Alterações mais profundas, sugeridas pelo Prof. Hervásio, não foram aproveitadas por dependerem de discussão com o Dr. Dias Carneiro, então na Inglaterra.

GLYCON DE PAIVA
Presidente do B. N. D. E.

PARTE I

INTRODUÇÃO

I — Objetivo do estudo e método de análise

OBJETIVO DO ESTUDO. O presente estudo visa ao duplo objetivo de pesquisar especificamente as funções de produção que possam ser inferidas da técnica de construção das usinas termelétricas nucleares, bem como calcular as formas das suas funções de custo de operação. A título de conclusão, tentar-se-á aplicar essas funções de custo de operação às circunstâncias peculiares à economia brasileira.

MÉTODO DE ANÁLISE. Há dois métodos de investigação das funções de produção de processos industriais e das funções de custo da sua operação. O primeiro, empírico, baseia-se na observação estatística da produção e do custo de operação de indústria já instalada. O segundo método, analítico, procura derivar as funções de produção da pesquisa formal das condições técnicas de instalação de processos industriais específicos, e as funções de custo de operação desses processos, da análise de custo dos fatores de produção nêles empregados.

O aproveitamento da energia atômica impõe aos processos de produção industrial condições técnicas que lhe são peculiares. Da mesma forma, a utilização da energia molecular, por exemplo, liberada em reações químicas de combustíveis líquidos e sólidos, impõe aos processos industriais condições peculiares à sua técnica. Por outro lado, o custo dos fatores de produção, compreendidos no aproveitamento industrial da energia atômica, depende das condições de mercado da matéria-prima, do equipamento e da mão-de-obra especializados que se empregam na produção e utilização da energia atômica.

Se, porém, os processos de produção industrial (em que as fontes da energia são o trabalho humano ou animal, as reações moleculares de combustíveis líquidos ou sólidos, a força hidráulica ou a força de

expansão do vapor proveniente de fontes térmicas) são suficientemente bem conhecidos, em suas condições técnicas ou econômicas, para que dêles se possam deduzir funções de produção e de custo mínimo pelo método empírico, com base na observação estatística de dados numéricos coligidos da operação de inúmeros exemplos concretos desses processos, o mesmo não acontece atualmente com o aproveitamento industrial da energia atômica, cuja história ainda recente não ultrapassou a fase experimental, nem foi ainda totalmente divulgada.

Assim sendo, na derivação das funções de produção e de custo, peculiares às aplicações industriais da energia nuclear, carece-se de dados, porque inacessíveis ou inexistentes, mas indispensáveis ao emprego do método empírico na pesquisa dos aspectos técnicos e econômicos das usinas termelétricas atômicas em instalação nos Estados Unidos da América e na Grã-Bretanha. Tal carência, imediata e irremediavelmente, restringe ao método analítico a alternativa de escolha do sistema de pesquisa adotado no presente estudo.

CONCEITOS FUNDAMENTAIS DE ANÁLISE. A adoção do método analítico, na derivação das funções referidas, exige de início a conceituação precisa das noções econômicas de *função de produção*, *função de custo* e *processo industrial*.

Entende-se por *função de produção* a expressão matemática da relação existente entre as dimensões físicas e as características técnicas dos fatores de produção empregados no processo produtivo e as particularidades quantitativas e qualitativas do produto final resultante desse emprego de fatores de produção, no decurso de determinado período de tempo e em determinadas condições técnicas de fabricação. Entende-se por *função de custo* a expressão matemática da relação existente entre o custo dos fatores de produção empregados em certo processo produtivo, em forma de equipamento e mão-de-obra especializados, e o preço de oferta do produto final resultante desse dispêndio, em determinado período de tempo e em determinadas condições de mercado. Assim, pois, a função de custo é a expressão econômica das condições técnicas expressas pela função de produção. Ambos esses conceitos são suficientemente bem conhecidos em análise econômica para dispensar exemplificação.

A noção de *processo industrial* é bem mais indefinida, em virtude da sua grande variedade e da multiplicidade dos processos produtivos. Abstraindo-se, porém, desses últimos a "produção" de serviços por seres humanos, por não interessar ao presente estudo, pode dizer-se que todo processo produtivo consiste, fundamentalmente, na aplicação física da energia, em qualquer das suas espécies, a recursos naturais, matérias-primas e produtos intermediários, de modo a modificar-lhes a forma ou as suas propriedades físicas, ou deslocá-los no espaço ou no tempo, a fim de aumentar-lhes o valor econômico. São, assim, elementos básicos de qualquer *processo produtivo*: um conjunto de *fatores passivos*, constituído por materiais, não importa qual seja o seu aspecto quantitativo

ou qualitativo, e um conjunto de *fatores ativos*, que consiste em uma fonte de energia e em um sistema de captação e aplicação dessa energia aos materiais com o objetivo de transformá-los em produto acabado.

Os fatores passivos podem ser compreendidos, na análise desse processo, como um grupo uniforme. O mesmo não acontece, porém, com o conjunto de fatores ativos, cuja tripla função supridora, utilizadora e reguladora da energia aplicada ao fluxo de fatores passivos, exige classificação em três subgrupos: a fonte da energia, em qualquer das suas formas, muscular, cinética, térmica, hidráulica, elétrica, química e nuclear, que geralmente consiste em um acervo de força potencial; o equipamento destinado a captar essa energia bem como a transmiti-la e transformá-la, ao longo do percurso desde a sua fonte até o ponto de incidência sobre os materiais, e o conjunto de instrumentos e mão-de-obra especializados em disciplinar, manobrar e fiscalizar a operação e manutenção do equipamento captador, condutor e transformador de energia.

Do ponto de vista tecnológico, a operação concreta dos dois últimos subgrupos, em que se subdividem os fatores ativos, pode ser, por sua vez, analisada em tantas unidades de geração, transmissão, transformação e controle da energia suprida pela fonte quantas sejam convenientes para a adequada instalação e utilização eficiente desses fatores ativos do processo produtivo. Do ponto de vista econômico, entretanto, essas numerosas unidades de equipamento e controle podem ser agrupadas em um conjunto, na medida em que os seus elementos componentes sejam passíveis de modificações tecnológicas, de adição de novos componentes, de reduções no seu número ou de novas combinações entre si, que os adaptem economicamente às variações de custo, preço, quantidade e qualidade do produto final e dos fatores de produção, ativos e passivos, determinadas pelas condições da oferta e da procura nos seus respectivos mercados.

Entende-se, pois, em análise econômica, por *processo industrial* a série de fases de geração, captação, transformação, transmissão e regularização por que passa a energia, desde a sua fonte de suprimento até a sua aplicação ao fluxo de materiais, ao percorrer determinado conjunto de equipamento e mão-de-obra, cujas características técnicas permitirão a adaptação econômica do processo produtivo às condições de custo e preço ditadas, respectivamente, pelos mercados dos fatores de produção que influem no processo e da produção final daí resultante.

ANÁLISE TÉCNICA DOS PROCESSOS PRODUTIVOS. Os processos produtivos se baseiam em três relações fundamentais de causalidade tecnológica. A primeira correlata as dimensões mínimas da energia utilizada, bem como as propriedades físicas dos fatores passivos empregados no processo, às características quantitativas e qualitativas da produção resultante. A segunda relação estabelece que essas dimensões mínimas da energia utilizada na transformação dos fatores passivos em produto acabado constituem função das propriedades técnicas dos fatores ativos. Note-se, todavia, que a energia utilizada é igual à energia inicialmente

suprida menos a perda no percurso entre a sua fonte e seu ponto de aplicação na corrente de materiais. Finalmente, a terceira relação indica que as quantidades dos fatores ativos e passivos empregados no processo dependem das suas propriedades técnicas, bem como das características quantitativas e qualitativas do produto final.

Essas três relações fundamentais de causalidade tecnológica, em que se subdividiu, neste estudo, a noção clássica de função de produção, só são passíveis de representação em expressões matemáticas de forma determinada, quando as propriedades físicas e técnicas dos fatores de produção, ativos e passivos, bem como as características quantitativas e qualitativas do produto final, sejam redutíveis a grandezas numéricas que as correlacionem de maneira definida, no processo produtivo específico. Em geral, porém, tais relações só admitem identificação dentro de uma escala de processos possíveis, limitada analiticamente pelas condições teóricas da transformação almejada e da aplicação da energia requerida para sua realização concreta. Nestes casos, não resta outra alternativa para o método de escolha técnica dos processos mais adequados senão o da experimentação empírica de cada um dos analiticamente considerados possíveis.

ANÁLISE ECONÔMICA DOS PROCESSOS INDUSTRIAIS. Assim como, entre os processos produtivos analiticamente possíveis, apenas alguns são considerados pela pesquisa experimental como tecnicamente realizáveis, da mesma forma, entre esses últimos, apenas alguns apresentam condições econômicas para sua aplicação industrial. Seleccionados os processos tecnicamente realizáveis e dadas, para cada um deles, as quantidades e qualidades do produto final e dos fatores de produção requeridos, bem como o preço unitário daquele e o custo unitário desses últimos, determinados pela oferta e procura nos respectivos mercados, classificam-se os processos analiticamente possíveis e tecnicamente realizáveis em econômicos, marginais e antieconômicos, conforme o custo unitário da produção seja menor, igual ou maior que o preço unitário do produto final. Seleccionados, assim, os economicamente viáveis, escolhe-se, finalmente, entre esses, o processo ou conjunto de processos produtivos que realize o máximo de receita líquida por unidade de produto, isto é, o máximo de excesso da receita bruta unitária sobre o custo total unitário da produção, para o caso de empresas privadas, ou o mínimo de subvenção governamental, para o caso de empresas de utilidade pública, onde critérios de bem-estar coletivo são levados em consideração.

Na pesquisa da solução ótima para o plano de produção dispõe-se de dois métodos: o da análise marginal clássica e o da análise de atividades interdependentes.

Se o preço unitário da produção final e o custo unitário dos fatores empregados forem dados por seus respectivos mercados e se a intenção do empreendedor é tornar máxima a receita líquida por unidade de produção, a teoria da empresa produtora, na análise marginal clássica, estabelece três condições de equilíbrio e três condições de estabilidade desse

equilíbrio, que se devem verificar no plano ótimo de produção da empresa. As três condições de equilíbrio são as seguintes: a relação entre os preços de cada dois produtos quaisquer deve ser igual à taxa de substituição técnica de um pelo outro; a relação entre os custos do emprêgo de cada dois fatores quaisquer deve ser igual à taxa de substituição marginal de um pelo outro; a relação entre o custo de qualquer fator e o preço de qualquer dos produtos resultantes de seu emprêgo deve ser igual à taxa de transformação marginal desse fator nesse produto. As três condições de estabilidade são: a taxa de substituição técnica entre produtos deve ser crescente; a taxa de substituição marginal entre fatores deve ser decrescente; e a taxa de transformação marginal de fator em produto deve ser decrescente.

A análise marginal da produção, acima resumida, só pode ser aplicada quando a escolha técnica entre processos produtivos possa ser efetuada, na realidade, por variações infinitesimais de quantidade e qualidade de fatores e produtos. Em alguns processos produtivos, como na agricultura, por exemplo, tais variações são possíveis, sem maiores alterações no método de produção. Na maior parte das atividades industriais, entretanto, tais variações não podem ser efetuadas por gradações infinitesimais, resultando que a escolha técnica do processo produtivo mais econômico não se efetua em escala de experimentações sucessivas, reversíveis e insensivelmente diferentes umas das outras. Nesses processos industriais, principalmente nos dotados de avançada tecnologia, os fatores de produção não se substituem mutuamente de maneira gradativa, mas se conglomeram em vários processos descontínuos, não raro alternativamente exclusivos. Da mesma forma, os produtos não são tecnicamente substituíveis entre si, em virtude da estrutura rígida dos fatores ativos que os elaboram. Finalmente, a transformação de fatores passivos em produtos finais se dá em vários níveis de produção, cuja escolha está ao arbítrio do empreendedor que delibera sobre o grau de utilização da capacidade produtiva dos materiais, do equipamento e da mão-de-obra que emprega. Assim, a impossibilidade física de substituir, por gradações infinitesimais, fatores e produtos, bem como a facilidade do empreendedor em decidir sobre o nível de utilização da capacidade produtiva ao seu dispor, impedem que se aplique à maior parte dos processos industriais modernos a análise marginal clássica, na determinação do processo ou conjunto de processos industriais que realize o máximo de receita líquida por unidade de produto.

Denomina-se programação de atividades interdependentes de produção e distribuição (*linear programming*) o método de análise adequado à pesquisa econômica de processos industriais, cuja estrutura de produção não se adapta à análise marginal. Define-se esse novo método de análise econômica como a construção de uma tabela de atividades por meio das quais uma economia, uma organização industrial ou qualquer outro complexo de ações econômicas se movam de um estágio para outro, ou de uma situação inicial para um objetivo específico final. Os elementos fundamentais do método programático são, portanto, os se-

guintes: um *objetivo predeterminado* do complexo de atividades econômicas interdependentes, não importa seja êle a realização do máximo de receita líquida por unidade de produto, do mínimo de subvenção governamental, do máximo de utilização da capacidade produtiva ou de certa quantidade e qualidade da produção final; uma *situação inicial* composta de meios de que dispõe o agente para a realização do objetivo predeterminado e que consistem em fatores ou recursos produtivos sobre cujas características quantitativas e qualitativas êle pode exercer sua faculdade de seleção e controle, bem como de um conjunto de *condições* éticas, políticas, legais, econômicas e técnicas situadas fora de seu arbitrio de escolha; e, finalmente, uma *técnica*, que consiste em um número limitado de combinações dos meios ou recursos de que dispõe o agente no preenchimento do objetivo visado, dentro das condições que lhe são impostas e através de uma cadeia de estágios intermediários, que se estende da situação inicial ao objetivo predeterminado da ação. Uma vez definidos, tão precisamente quanto possível, o objetivo, a situação inicial e as várias técnicas disponíveis, nos vários processos economicamente viáveis, seleciona-se o plano ótimo da ação econômica pelo processo ou conjunto de processos industriais que realize mais plenamente o objetivo visado com o mínimo de dispêndio dos recursos disponíveis para essa realização.

ANÁLISE DA PRODUÇÃO TERMELÉTRICA ATÔMICA. No presente estudo tenta-se aplicar o segundo dos dois métodos de análise econômica, acima esboçados, à empresa, privada ou governamental, produtora de energia elétrica por processos atômicos, a fim de se poder comparar a economia da produção da eletricidade por processos tradicionais, com o objetivo de pesquisar a posição de ambos os processos no âmbito da economia brasileira.

Divide-se, portanto, o presente estudo, em três partes: Parte I, introdutória, que aqui se conclui; Parte II, onde se procede à análise técnico-analítica e econômico-programática da produção termelétrica atômica, bem como a análise comparativa dos custos de produção da energia elétrica pelo aproveitamento da energia atômica e pela captação da força hidráulica ou térmica proveniente de reações químicas de combustíveis líquidos e sólidos; e, finalmente, a Parte III, na qual se resumem as conclusões da Parte II e se procura delinear a posição econômica dos processos termelétricos atômicos relativamente aos processos tradicionais de produção da energia elétrica, na economia brasileira.

PARTE II

TÉCNICA E ECONOMIA DA PRODUÇÃO TERMELÉTRICA NUCLEAR

I — Técnica da produção termelétrica nuclear

RUDIMENTOS DE FÍSICA ATÔMICA E NUCLEAR. O mundo material consiste nas mais variadas combinações de um número relativamente pequeno de substâncias elementares ou *elementos químicos* (O Quadro I, anexo, discrimina os 98 elementos químicos, isolados e analisados até 1954). Essas combinações, quando isoladas, por purificação, das substâncias impuras e heterogêneas que constituem o mundo material, denominam-se *compostos químicos*. Tais compostos se subdividem em *moléculas*, cada uma das quais se decompõe em um ou mais *átomos* do mesmo elemento, ou em uma combinação de átomos de diferentes elementos químicos. As reações químicas se processam por modificação na constituição atômica das moléculas características dos compostos a que pertencem, mas não afetam a estrutura dos átomos componentes dessas moléculas.

Desde a antiguidade clássica até fins do século XVIII, considerou-se o átomo como a única e última, indestrutível, imutável e indivisível unidade da matéria. Entretanto, já em 1808, pesquisando as proporções definidas em que os átomos se combinam para formar as moléculas dos compostos químicos, John Dalton suspeitara que os átomos dos elementos químicos, em vez de serem idênticos, como até então se supunha, distinguíam-se entre si por possuírem pesos atômicos diferentes. Analisando a disposição molecular de certos compostos químicos em estado puro, Dalton inferiu que o átomo do oxigênio é aproximadamente dezesseis vezes mais pesado que o átomo do hidrogênio. Tomando por base arbitrária o peso atômico do oxigênio como igual ao número inteiro 16, calculou ele o peso atômico do hidrogênio e dos restantes 10 elementos químicos então conhecidos. Os pesos atômicos encontrados, inclusive o do hidrogênio, não coincidiam, senão raramente, com qualquer número

inteiro (Como se verifica no Quadro I, anexo, essas ligeiras divergências fracionárias se mantêm para a maior parte dos pesos atômicos dos 98 elementos analisados até 1954, sempre com base no pêsso do átomo de oxigênio igual a 16).

Em meados do século XIX, já 75 elementos químicos haviam sido isolados e identificados por seus pesos atômicos. Dispondo, em linha, êsses elementos pela ordem crescente de seus pesos atômicos, e superpondo, em coluna, os elementos que exibiam características físicas e químicas semelhantes, Dmitri Mendelejev, em 1869, conseguiu sistematizar a chamada *tabela periódica* que, atualizada, se acha reproduzida no Quadro II, anexo. Examinando essa tabela, Mendelejev notou que elementos dotados de características físicas e químicas semelhantes ocorriam em intervalos regulares. Partindo dessa regularidade, Mendelejev numerou, em seqüência, os elementos que conhecia e outros, então desconhecidos, cujas propriedades físicas e químicas predisse antes que fôssem descobertos. A êsses números inteiros, que indicavam a localização dos elementos na tabela periódica de Mendelejev, deu-se, mais tarde, a designação de *números atômicos*. Como se verá adiante neste estudo, a significação de número atômico é mais profunda do que a de simplesmente demarcar, pela série dos números inteiros, os vários lugares ocupados pelos elementos químicos na tabela periódica.

Mesmo antes do término do século XIX, as pesquisas de Dalton e Mendelejev já haviam lançado certas dúvidas sobre a veracidade da teoria do átomo como um todo indivisível. Entretanto, a noção era útil, visto explicar satisfatoriamente as reações químicas, onde apenas importa o arranjo dos átomos nas moléculas e não a estrutura interior dêsses átomos. A referida teoria não explicava, porém, porque os átomos dos vários elementos químicos possuíam capacidade ou *valência* diferente em se unirem a um ou mais átomos de hidrogênio; porque os elementos químicos situados na mesma coluna da tabela periódica exibiam valências iguais; porque, também, com base nessa valência relativa ao átomo do hidrogênio, os átomos mutuamente se aderiam em proporções fixas; e porque a intensidade dessa adesão atômica na molécula diferenciava os compostos químicos em estáveis e instáveis.

Em 1895, J. J. Thomson admitiu uma explicação eletromagnética para o fenômeno da valência. Em um tubo de vidro, no interior do qual produziu o vácuo e em cujas extremidades introduziu duas placas, unidas externamente a uma fonte de corrente elétrica, Thomson notou que o fluxo elétrico emergia de uma das placas, o cátodo, e era absorvida na placa oposta, o ânodo, e que êsse fluxo de *raios catódicos* consistia em partículas carregadas de eletricidade negativa, cuja trajetória retilínea poderia ser desviada por um eletroímã colocado próximo à parede externa do tubo de vidro. Calculado o coeficiente dêsse desvio, Thomson deduziu não só que essas partículas pesavam 1.840 vezes menos que a unidade de matéria contida no átomo do hidrogênio, mas também que tôdas essas partículas eram exatamente iguais, não importando qual fôsse o elemento de que irradiassem.

A essas partículas deu Thomson o nome de *elétrons*, definindo-os como a unidade de carga elétrica negativa. Thomson formulou a hipótese de que tais elétrons proviriam da órbita periférica traçada por certos elétrons mais próximos da superfície do átomo ao gravitarem em torno de um núcleo central. A valência atômica seria a expressão quantitativa do número de elétrons cuja órbita mais distasse do seu respectivo núcleo. Elementos monovalentes ou polivalentes possuiriam em seus átomos um ou mais elétrons a gravitar na órbita mais afastada da influência do núcleo, por isto prontos a se unirem, em pares, a elétrons idênticamente situados em outros átomos de igual ou diferente valência. Thomson mostrou, ainda, que os átomos, em estado normal, são eletricamente neutros, visto que a carga negativa total de seus elétrons é exatamente compensada pela carga positiva do seu núcleo. Átomos nesse estado passam a eletricamente positivos ou negativos mal o equilíbrio da sua carga se perturbe com a adição ou subtração de uma ou mais unidades de carga elétrica negativa ou elétrons. Assim desequilibrados, os átomos se *ionizam*, adquirindo tantos *ions* positivos ou negativos quantos forem os elétrons respectivamente perdidos ou adquiridos na transação.

Nesse mesmo ano de 1895, Wilhelm Roentgen, na Alemanha, estudando os fenômenos observados por Thomson, notou certa irradiação em torno do ânodo receptor dos elétrons, aparentemente causada pelo impacto destes sobre a placa anódica. Essa irradiação transpunha facilmente as paredes de vidro do tubo empregado na experiência, o que fez Roentgen supor não se tratar de partículas, mas de ondulações luminosas de frequência ultracurta, por isto dotadas de extraordinário poder de penetração em corpos opacos. Desconhecendo a natureza e a origem dessa irradiação, Roentgen denominou-a *raio X*. Essa descoberta coincidiu com as pesquisas de Henri Becquerel, Pierre e Marie Curie, em França, sobre as propriedades das *substâncias radioativas*, o urânio e o rádio. Essas substâncias se caracterizavam por tal instabilidade atômica que se desintegravam espontaneamente.

Poucos anos mais tarde, mas ainda no século XIX, Ernest Rutherford, na Inglaterra, prossequindo as experiências de Roentgen, Becquerel e dos Curie, conseguiu classificar as irradiações das substâncias radioativas, de acordo com seu comportamento eletromagnético, em três espécies, que denominou *raios alfa*, *beta* e *gama*. Pesquisando essas irradiações independentemente, Rutherford verificou que os *raios alfa* consistiam em partículas dotadas de uma carga elétrica de dois ions positivos e quatro vezes mais pesada do que o átomo do hidrogênio; que os *raios beta*, de partículas muitíssimo mais leves, que se moviam com cerca de 1/10 da velocidade da luz, e que, dotadas de uma unidade de carga elétrica negativa, não se distinguíam dos elétrons; e, finalmente, que os *raios gama* não eram constituídos de partículas mas de ondulações luminosas ultracurtas e exatamente idênticas às dos raios X. Refletindo sobre a origem dos raios alfa, Rutherford corretamente presumiu tratar-se de partículas provenientes, não do espaço atômico circunuclear reservado aos elétrons mas do próprio núcleo central do átomo. Com

efeito, mais tarde, verificou-se experimentalmente que as partículas constituintes dos raios alfa eram átomos de hélio, cujo número atômico é 2 e o peso atômico 4, e que, privados, por ionização, dos dois únicos elétrons que possuem, se reduzem ao próprio núcleo carregado de dois ions positivos.

A classificação das irradiações radioativas de acôrdo com suas propriedades eletromagnéticas permitiu a Rutherford elaborar a descrição da estrutura atômica esboçada por Thomson e formular as seguintes hipóteses extremamente significativas: o diâmetro da órbita periférica do elétron mais distante do seu respectivo núcleo é cerca de 10.000 vêzes maior que o diâmetro desse núcleo; como os elétrons pesam infinitamente pouco, a quase totalidade da massa atômica se concentra nesse núcleo, de forma que o peso atômico é praticamente igual ao peso nuclear; o número de elétrons que os átomos contêm é igual ao número atômico que localiza esses átomos, por suas propriedades físicas e químicas, na tabela periódica de Mendelejev; se os átomos estáveis são elêtricamente neutros e se os elétrons são unidades de carga negativa, os núcleos de átomos não-ionizados devem conter um número de unidades de carga positiva exatamente igual ao número de elétrons que gravitam no espaço circunuclear.

Procurando verificar essas hipóteses, Rutherford "bombardeou" núcleos de vários elementos químicos, a começar pelo do hidrogênio, com partículas alfa espontâneamente emanadas do rádio, concluindo que a unidade de carga positiva contida em qualquer desses núcleos possuía um peso igual ao do átomo do hidrogênio tomado por unidade de massa atômica. A essa unidade de carga positiva intranuclear, igual, em carga, ao ion positivo e, em peso, à unidade de massa atômica, Rutherford deu o nome de *próton*.

Finalmente, encontrando nos elementos pesquisados, exceto no hidrogênio, excesso de peso atômico sobre o peso total dos prótons, que aumentava proporcionalmente ao primeiro, Rutherford admitiu, a título de hipótese auxiliar, que o núcleo de qualquer elemento químico estável, com exceção do hidrogênio, deveria possuir duas espécies de prótons idênticos em peso mas eletrostaticamente diferentes: prótons carregados positivamente, em quantidade igual ao de elétrons circunucleares e ao número atômico dos elementos pesquisados, e prótons neutralizados por um número igual de *elétrons intranucleares*, em quantidade suficiente para igualar o peso total dos prótons, positivos e neutros, ao peso atômico característico desses elementos estáveis. A exceção do hidrogênio explicava-se pelo fato de que o seu átomo, de peso e número atômicos unitários, consistia em um elétron negativo circunuclear e um próton positivo intranuclear, sem qualquer próton neutralizado no seu núcleo.

De 1910 a 1932, porém, enquanto Niels Bohr e outros cientistas confirmavam experimentalmente as hipóteses de Rutherford sobre o comportamento dos elétrons no espaço circunuclear, outro grupo de investigadores, inclusive o próprio Rutherford, pesquisava a estrutura interna do núcleo e chegava a conclusões que lançavam dúvidas sobre a existência de elétrons intranucleares. Já em 1910, analisando os pesos atômicos

das substâncias radioativas, Frederick Soddy encontrara certos elementos químicos que, dotados de propriedades químicas idênticas e, por isso, localizados sob o mesmo número atômico na tabela periódica, possuíam pesos atômicos diversos. Soddy denominou esses elementos *isótopos*. Pouco depois, em 1913, J. J. Thomson e F. W. Aston conseguiram provar experimentalmente que a maior parte dos elementos químicos, mesmo quando molecularmente puros, é de fato constituída de misturas de vários isótopos, o que satisfatoriamente explicava o enigma dos pesos atômicos fracionários, que tanto intrigara Dalton.

O conceito de isótopo e a verificação da sua existência trouxeram novamente à baila a questão dos elétrons intranucleares. Nos vinte anos seguintes, de 1913 a 1933, vários cientistas tentaram fragmentar os núcleos atômicos de certos elementos químicos, bombardeando-os com partículas alfa emanadas do rádio. Dessas colisões resultavam invariavelmente irradiações que, por serem altamente penetrantes e eletricamente neutras, foram assemelhadas aos raios gama ou raios X. Em 1932, James Chadwick conseguiu demonstrar que essas irradiações não consistiam em ondulações luminosas, como os raios gama ou raios X, mas eram constituídas de partículas, eletricamente neutras, que se deslocavam a cerca de $1/10$ da velocidade da luz, como os elétrons, mas que possuíam, como os prótons, peso igual à unidade de massa atômica. A essas partículas Chadwick denominou *neutrons*, admitindo, ainda, que o excesso de peso atômico sobre o peso total dos prótons positivos seria causado pelo peso total desses neutrons.

A descoberta dos neutrons completou, em linhas gerais, a teoria nuclear da estrutura atômica que prevalece até hoje e que poderá ser resumida da seguinte forma: os átomos, de que se compõe o mundo material, consistem em um núcleo central denso, carregado de eletricidade positiva e circundado por órbitas elipsoidais de elétrons, com eletricidade negativa; o núcleo é constituído de prótons, positivamente carregados, e de neutrons, desprovidos de carga elétrica; os prótons e os neutrons possuem, cada um deles, peso igual ao da unidade de massa atômica ($1,7/10^{24}$ da grama) e cada elétron é 1.840 vezes mais leve que qualquer próton ou neutron; em um átomo, o número de elétrons, o número de prótons e o número atômico, que determina as propriedades químicas do átomo, são exatamente iguais; de acordo com a hipótese de Chadwick, a soma dos pesos dos prótons e dos neutrons, no núcleo, seria igual ao peso atômico; as variações no número de neutrons, e, portanto, no seu peso total, afetam o peso da massa atômica, não alterando as suas propriedades químicas, isto é, o seu número atômico; átomos quimicamente idênticos, mas de massas diferentes, denominam-se isótopos, que podem ser estáveis ou radioativos; as variações no número de prótons ou de elétrons afetam o número atômico, e, portanto, as propriedades químicas do átomo, podendo o elemento assim produzido ser estável ou radioativo. (Os Quadros III e IV, anexos, discriminam, respectivamente, os isótopos até hoje conhecidos, isolados e analisados, bem como o valor de algumas das mais importantes constantes físicas).

FUNÇÃO ANALÍTICA DE PRODUÇÃO DA ENERGIA NUCLEAR. O modelo nuclear acima descrito, embora logicamente razoável, esteticamente satisfatório e aparentemente sólido, apresentava falhas inquietantes. A teoria não explicava por que, sendo os prótons carregados de eletricidade positiva, não se repeliam mutuamente; em que consistia a diferença fundamental entre substâncias estáveis e radioativas; e por que razão a soma dos pesos dos prótons e neutrons era sempre maior, exceto no caso do hidrogênio, do que o peso atômico do átomo que os continha.

Rutherford e Chadwick, respectivamente, haviam estabelecido que o peso de qualquer próton era igual ao de qualquer neutron e igual à unidade de massa atômica, e que o peso da massa de qualquer elétron era insignificante, relativamente ao peso da massa do próton e do neutron. Entretanto, em repetidas pesagens eletromagnéticas, verificou-se que, na base do peso atômico do oxigênio igual a 16, a massa de qualquer próton pesava 1.00758, a de qualquer neutron 1.00898 (*) e a de qualquer clêtron 0.00055. Assim, por exemplo, o gás hélio, que possui em seu átomo 2 prótons, 2 neutrons e 2 elétrons, deveria pesar 4.03412 em sua massa total atômica, e não 4.00280, como se verificava experimentalmente, havendo, portanto, uma diferença inexplicável de 0.03132 entre o peso atômico empiricamente computado e o peso teórico da massa atômica total. Assim como o hélio, observou-se que todos os demais elementos químicos, com exceção do hidrogênio, apresentavam a mesma característica paradoxal quando se lhes tomava o peso atômico, teórico e empírico, em relação à base arbitrária de 16 unidades para o átomo do oxigênio; o peso atômico efetivo revelava-se invariavelmente menor que a soma dos pesos de suas partículas componentes. A exceção do hidrogênio explicava-se pelo fato de que o seu átomo contém apenas um elétron e um próton, cuja soma de pesos coincide exatamente com o seu peso atômico 1.00813.

Tanto esse problema quanto o das diferenças qualitativas entre elementos químicos radioativos e estáveis, bem como a da conjunção nuclear de partículas do mesmo sinal de carga, já haviam sido teoricamente solucionados por Albert Einstein, em 1905, em conexão com a sua teoria especial da relatividade. Einstein propusera a hipótese de que massa e

(*) Em realidade a massa do neutron não é medida diretamente. Computa-se da expressão:

$$\text{massa do neutron} = m h_1^2 - m h_1^1 + \Delta m \text{ (energia de ligação);}$$

isto é,

$$\text{massa de neutron} = \text{massa do deutério} - \text{massa do hidrogênio} + \\ + \text{energia de ligação.}$$

No caso específico, a massa do deutério é 2.014741, a massa do hidrogênio 1.008145 e a energia de ligação 0.002382. Efetuando-se os cálculos, encontra-se 1.008978 para massa do neutron. (H. C.)

energia são as duas faces da matéria de que se compõe o universo. A relação entre a massa e a energia seria determinada pela seguinte equação

$$E = mc^2 \quad (1)$$

onde E significa a energia em ergs; m a massa em gramas e c a velocidade da luz em centímetros por segundo. Sendo c aproximadamente igual a 30 bilhões, c^2 equivale a $9,10^{20}$ cm/seg. Tomando-se m igual a um, a equação (1) torna-se:

$$E = 9,10^{20} \text{ ergs} = 9,10^{13} \text{ joules} = 2,5 \cdot 10^7 \text{ quilowatts-hora} = 25.000.000 \text{ kWh},$$

ou seja, a energia elétrica necessária para iluminar 2.500.000 lâmpadas de 100 watts, 10 horas por dia, durante 10 dias.

Tal é a energia produzida pela conversão completa da massa de uma grama de qualquer elemento químico em energia. Sabendo-se que a unidade de massa atômica é igual, aproximadamente, a $1,7/10^{24}$ da grama, a conversão de uma unidade de massa atômica produz uma quantidade de energia:

$$E = (1,7/10^{24}) \cdot (9,10^{20}) \text{ ergs} = 15,3/10^4 \text{ ergs} = 9,31/10^8 \text{ elétron-volts} = 931 \text{ milhões de elétron-volts (*)} = 4,21/10^{11} \text{ kWh}.$$

No caso da formação de um átomo do hélio, acima exemplificado, há uma *perda de condensação* (packing loss) ou uma conversão de 0,03132 da unidade de massa atômica na energia produzida pelo agrupamento de 2 prótons, 2 neutrons e 2 elétrons. Como o peso total dessas partículas é igual a 4,03412 unidades de massa atômica, o coeficiente percentual da perda de matéria por unidade de massa, isto é, o *fator de condensação* (packing factor) do hélio é igual a $0,03132/4,03412 = 0,00776$, aproximadamente 0,8 de 1 por cento da unidade de massa atômica. A energia de ligação (*binding energy*) é a energia de formação do núcleo. Essa energia, responsável pela afinidade existente entre os prótons e neutrons, é cedida ao exterior no processo de formação nuclear. No caso do hélio, por exemplo, a energia de ligação é igual a 28,2 MeV. Pode ser facilmente calculada, lembrando-se que a energia perdida na formação do núcleo de hélio, a partir de 2 prótons e 2 neu-

(*) O elétron-volt é a unidade empregada para medir a energia adquirida pelas partículas em reações atômicas. Um elétron-volt é a energia cinética que uma partícula monocarregada adquire quando acelerada por uma diferença de potencial de um volt. Designa-se um elétron-volt por 1eV; um milhar de elétron-volts por 1KeV; um milhão de elétron-volts por 1McV. Note-se que $1\text{eV} = 1,6/10^{12} \text{ ergs} = 0,44/10^{25} \text{ kWh}$.

trons, como previsto pela equação de Einstein, corresponde, também, a certa perda de massa:

(dois prótons + dois nêutrons) — hélio, ou:

$$2 \times 1.008145 + 2 \times 1.008978 - 4.003879 = \\ = 0,030367 \text{ u.m.a} = 28,2 \text{ MeV}$$

A produção de uma grama de hélio daria lugar à produção de uma energia equivalente a 0,0076 da grama massa.

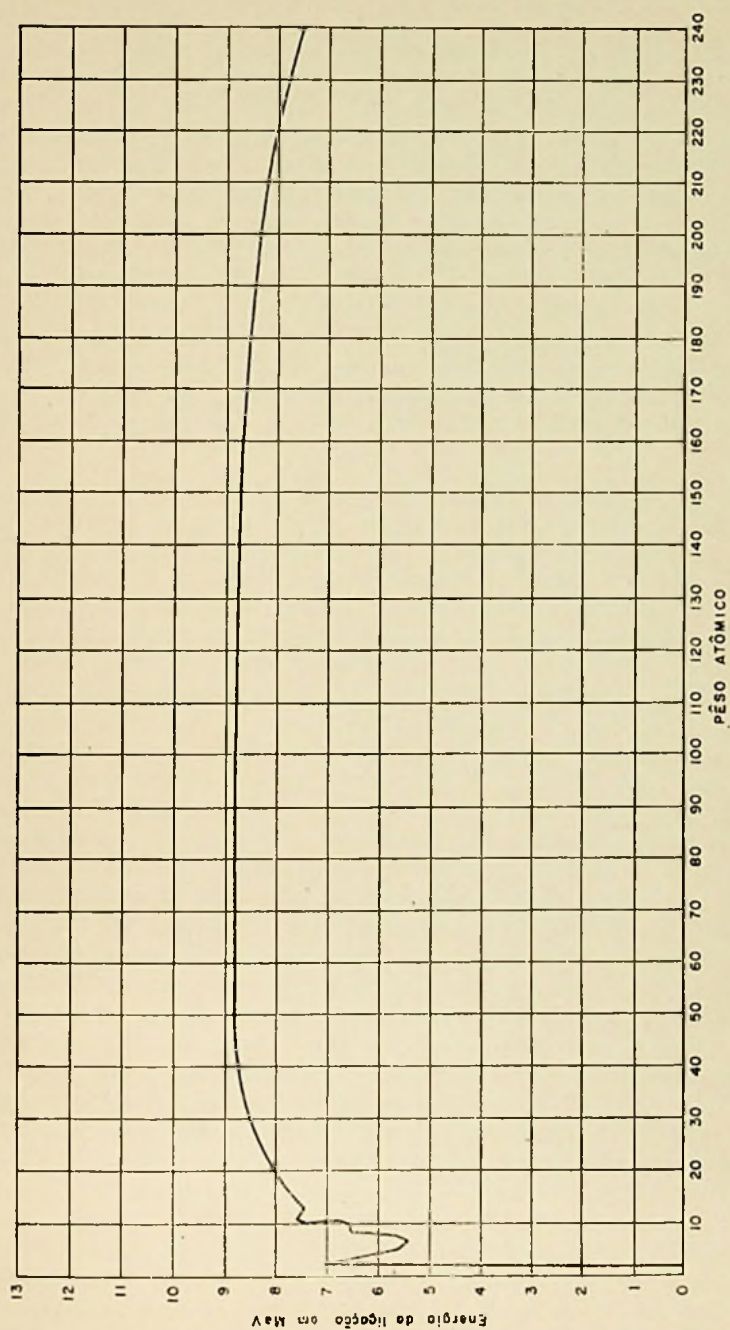
Na massa atômica de uma grama de hélio, essa energia é igual a $0,00776 \times 2,5 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 194.000 \text{ kWh}$, ou seja, a energia elétrica necessária para iluminar 194.000 lâmpadas de 100 watts, durante 10 horas.

Para se produzir essa mesma quantidade de energia, por meio da combustão do carbônio, ter-se-iam de empregar 87 toneladas métricas de carvão mineral.

O conceito de energia de ligação, formulado e medido por F. W. Aston, em 1933, permitiu classificar os elementos químicos e seus isótopos de acordo com a estabilidade dos átomos que os compõem: quanto maior seja a energia de ligação liberada na integração do átomo de um elemento químico, tanto mais estável é a estrutura atômica resultante dessa integração, visto que tanto maior será a energia a ser aplicada para desintegrá-lo. O Gráfico anexo registra a curva ajustada aos pontos determinados pelo encontro das ordenadas das energias de ligação dos vários elementos químicos, expressas em MeV, com as abscissas dos pesos atômicos desses elementos químicos, expressos em unidades de massa atômica. Examinando-se esse gráfico, nota-se que a energia de ligação aumenta, em média, com elevada taxa de crescimento, a partir do hidrogênio, cuja energia de ligação é nula, o número atômico igual à unidade e o peso atômico 1,00813; que percorre grandezas ligeiramente decrescentes, entre o selênio, cuja energia de ligação é 8,6 MeV, o número atômico 34 e o peso atômico 79, e o lantânio, cuja energia de ligação é 8,4 MeV, o número atômico 57 e o peso atômico 139; e, finalmente, que decresce em progressão mais acentuada até o isótopo do urânio de peso atômico 238, número atômico 92 e energia de ligação 7,6, terminando no califórnio, que é um elemento transurânico artificial, de peso atômico 246, número atômico 98 e energia de ligação 7,5 MeV.

A forma dessa curva indica que os elementos atômicamente leves e pesados possuem energias de ligação menores que as dos elementos de peso atômico médio, o que significa que, na transmutação de isótopos de peso médio em outros de igual peso, a energia liberada pela integração do átomo resultante é praticamente igual à energia empregada na desintegração do átomo inicial, o que elimina esses isótopos como combustíveis economicamente viáveis na produção industrial da energia nuclear; e que, na transmutação de isótopos leves em outros menos leves ou de isótopos pesados em menos pesados, a energia liberada pela integração

ENERGIA DE LIGAÇÃO DAS PARTICULAS DOS NÚCLEOS EM MeV



do átomo resultante é maior do que a energia empregada na desintegração do átomo inicial.

A produção líquida de energia pela transmutação de isótopos leves em menos leves ocorre na produção da energia solar e estelar, e se processa, artificialmente, na explosão das chamadas "bombas de hidrogênio", não tendo sido até hoje empregada para fins industriais. A produção de energia pela transmutação de isótopos pesados em menos pesados ocorre espontaneamente nas substâncias radioativas, e, desde 1939, artificialmente, na cisão ou fragmentação nuclear que causa a explosão da "bomba atômica", bem como a produção de isótopos para vários fins e de energia termelétrica, que é o objetivo do presente estudo.

Denomina-se cisão nuclear (*nuclear fission*) a reação que ocorre quando uma partícula atômica (neutron), absorvida pelo núcleo de um elemento de elevado peso atômico, produz a divisão do seu núcleo em dois fragmentos não iguais, devido à diferença de suas massas atômicas, com produção de energia sob a forma calorífica e a liberação de alguns neutrons.

Mesmo antes da descoberta dos neutrons por Chadwick, já se havia tentado pesquisar a estrutura intranuclear de vários átomos, alvejando seus núcleos atômicos com partículas alfa e prótons empregados como projetis. Foi somente em 1939, porém, que Enrico Fermi, na Itália, conseguiu fragmentar núcleos de urânio, tório e protoactínio por meio de neutrons, que, por serem desprovidos de carga, não eram repelidos pelos alvos nucleares positivos, como as partículas alfa e os prótons, que são, como se sabe, também carregados de eletricidade positiva. Ao passo, entretanto, que os núcleos do tório e do protoactínio só se fragmentavam quando atingidos por neutrons projetados a alta velocidade, os núcleos de urânio podiam ser facilmente penetrados e partidos por neutrons arremessados a baixa velocidade. Somente em 6 de janeiro de 1939, Hahn e Strassmann caracterizaram o fenômeno da cisão, que, desde 1934, Fermi e colaboradores vinham realizando sem se aperceber, julgando tratar-se unicamente da produção de elementos transurânicos.

Ainda em 1939, Otto Hahn, na Alemanha, e Lise Meitner, na Suécia, analisando a natureza desses fragmentos da cisão nuclear do urânio de peso atômico 235, bem como do plutônio de peso atômico 239, conseguiram determinar que os mesmos consistiam, inicialmente, em substâncias radioativas que, em tempo mais ou menos rápido, de acordo com suas vidas médias, degeneravam em isótopos estáveis de elementos de peso atômico mediano e energia de ligação elevada, compreendidos entre o selênio e o lantânio, na tabela periódica. Verificaram ainda que, dos dois ou três neutrons produzidos, após terem sua velocidade reduzida por matérias leves pouco absorventes (substância moderadora) como a parafina e a grafita, um deles poderia colidir com outro núcleo de urânio de peso atômico 235, repetindo o processo de cisão, com produção de fragmentos estáveis, de dois ou três neutrons e de considerável quantidade de energia. Estabelece-se, dessa maneira, a reação em cadeia, que, se controlada, poderá produzir um fluxo constante ou crescente de

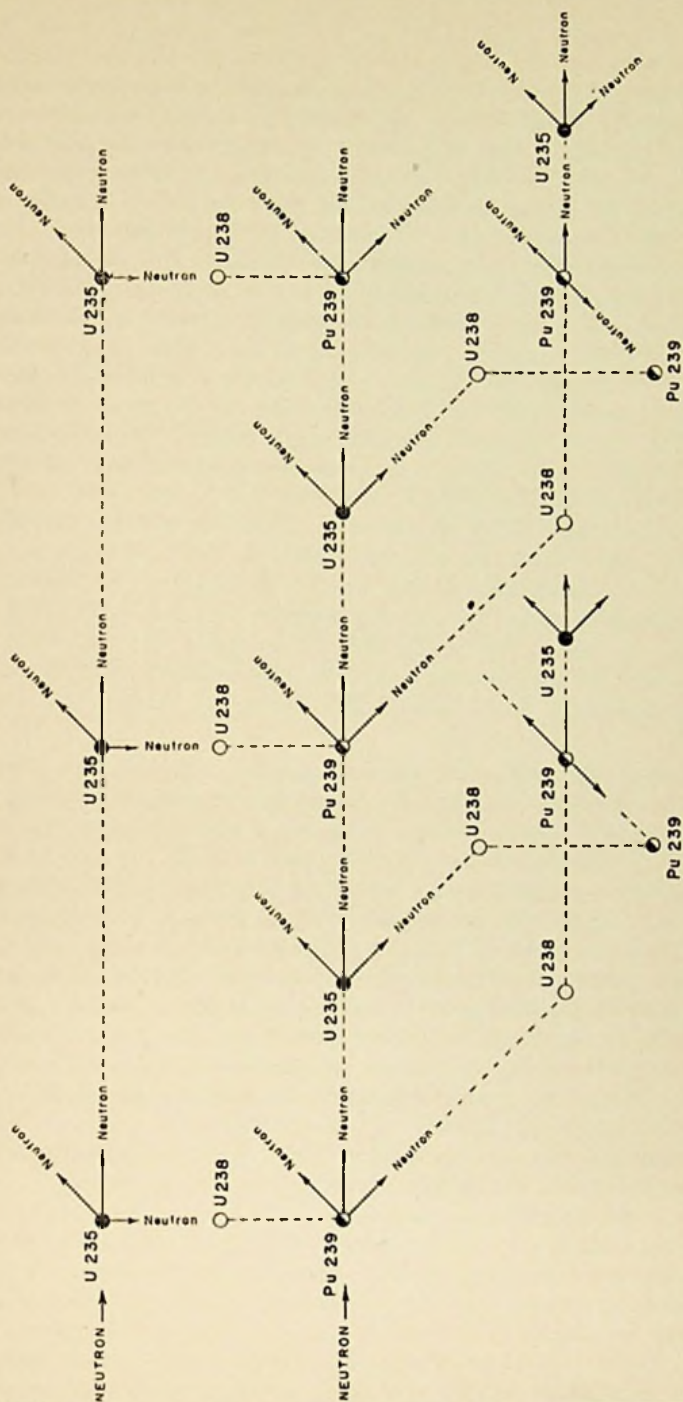
energia térmica. O segundo neutron com a velocidade reduzida pelo moderador, ao colidir com o núcleo de uma substância não-fissil, como o isótopo de urânio de peso atômico 238, era por este absorvido, transformando-o em substância radioativa, como o urânio de peso atômico 239, o qual, por sua vez, transformado em netúnio de mesmo peso atômico, se tornava em plutônio. Este, cujo núcleo é fissil, fragmentava-se ao ser atingido por outro neutron, dando substâncias estáveis, com emissão de energia térmica e de dois ou três neutrons adicionais. Finalmente, o terceiro neutron é habitualmente perdido por absorção em núcleo de substância não-fissil ou em outros processos que não contribuem, seja para a reação em cadeia, seja para a produção de substâncias fisséis.

Estava, assim, descoberto o princípio que possibilitou a fabricação da bomba atômica, bem como a produção industrial de energia termelétrica nuclear. Na bomba atômica, a fragmentação nuclear, não sendo controlada, concentra várias fases da reação em fração muito pequena do segundo, resultando em explosão milhões de vezes mais poderosa que a produzida pela mais potente das reações químicas. Na produção industrial de energia termelétrica nuclear, a fragmentação nuclear se processa em uma taxa desejada, que gradualmente se desenvolve sobre a massa do combustível fissil. Mas, tanto na bomba atômica, onde a reação se verifica na câmara de explosão, quanto na usina termelétrica nuclear, onde a reação sob forma controlada se processa na fornalha de cisão ou reator, a massa de combustível fissil deve ser disponível em um *montante crítico*, que assegure a suficiência de neutrons em relação aos neutrons perdidos.

Antes, porém, de passar à descrição dos vários tipos de reator, bem como dos combustíveis fisséis nêles empregados, será conveniente deduzir-se a função analítica típica da produção da energia nuclear, por meio de um exemplo numérico. Suponha-se que, por processo térmico, se obtenha, em estado livre, um neutron cuja velocidade seja moderada a cerca de 1.500 metros por segundo. Esse neutron, cujo peso em unidade de massa atômica seria 1,00898, colidiria com o núcleo de um isótopo de urânio cujo peso atômico fôsse 235,1156. Sob o impacto, o núcleo inicial absorveria o neutron, transformando-se no isótopo do urânio de peso atômico igual a $235,1156 + 1,00898 = 236,12458$. Sendo instável, esse isótopo imediatamente se partiria em dois núcleos, que se repeliriam a alta velocidade, produzindo energia cinética e liberando três novos neutrons (em média 2,46).

Os dois fragmentos em que se divide o núcleo do isótopo do urânio de peso atômico 236,12458 são constituídos, respectivamente, do núcleo de um isótopo do cripton, cujo peso atômico é igual a 81,938, e do núcleo do isótopo do bário, cujo peso atômico é igual a 135,9488. Esses dois fragmentos são, entretanto, atômicamente instáveis, visto conterem excesso de neutrons. Há, aí, 30 diferentes modos de cisão. Com efeito, o núcleo do qual esses fragmentos se originam, que é o do isótopo instável do urânio de peso atômico 236,12458 e cujo número atômico é 92, contém 92 prótons e 144 neutrons. Descontando-se deste número de

Reação em cadeia e reprodutiva



neutrons os 3 neutrons que se liberam, restam 141 a se dividirem desigualmente pelo núcleo do isótopo do cripton de peso atômico aproximadamente igual a 82 e número atômico 36, bem como pelo núcleo do isótopo do bário de peso atômico aproximadamente igual a 136 e número atômico 56. Quando estáveis, o núcleo do cripton contém 36 prótons e 46 neutrons e o núcleo do bário 56 prótons e 80 neutrons. Há, portanto, um excesso de 15 neutrons distribuídos assimetricamente pelos núcleos do cripton e do bário, o que os torna radioativos, desagregando-os em elementos estáveis. O bário, através do lantânio e do cério, transforma-se em prasiódímio, que é um isótopo de peso atômico 140,9514. O cripton, através do rubídio, do estrôncio e do ítrio, transforma-se em um isótopo estável do zircônio, de peso atômico 91,93134. Fazendo o balanço dos pesos iniciais e finais dessa primeira fase da reação nuclear, verifica-se que há uma perda de massa igual a $(235,116 + 1,00898) - (140,9514 + 91,93134 + 3 \cdot 1,00893) = 0,2154$ da unidade de massa atômica. Houve, conseqüentemente, a perda de 0,2154 da unidade de massa atômica em 236,12458 unidades inicialmente disponíveis, isto é, 0,0009 de perda por unidade de massa atômica desagregada, o que redundará na produção líquida de energia, proveniente da integração resultante, de $0,0009 \cdot 2,5 \cdot 10^7 \text{ kWh} = 22.500 \text{ kWh}$ por grama de urânio 235 inicial, na primeira geração de neutrons, e tantas vezes 22.500 kWh quantas sejam as gramas de urânio 235 cindidas nas gerações subsequentes.

O número de neutrons perdidos depende do volume da massa de urânio 235 puro empregado no processo. Suponha-se que essa massa se apresente sob forma esférica e que cada núcleo cindido produza dois ou três neutrons. Cada um dos dois ou três neutrons produzidos pode escapar pela superfície da esfera e perder-se no ambiente ou reproduzir novas cisões em outros núcleos contidos na massa esférica. A probabilidade de perda de neutrons depende, portanto, da área da esfera, ao passo que a probabilidade de novas cisões depende da sua massa, isto é, do seu volume. Como o volume da esfera é proporcional ao cubo do seu raio, enquanto que a sua área é proporcional ao quadrado desse raio, é possível, aumentando-se o volume da esfera, atingir-se certa massa crítica, para a qual cada neutron arremessado contra um núcleo e por este absorvido venha a ser repostado por um neutron adicional liberado pela cisão que resultar da reação. Se a massa da esfera do urânio 235 for menor que a massa crítica, a área dessa esfera será excessiva relativamente ao seu volume. A fuga de neutrons por essa superfície fará com que a reação em cadeia seja convergente, o que acarretará a eventual extinção do processo desintegrativo. Se a massa da esfera ultrapassar a massa crítica, crescerá, em progressão geométrica, o número de neutrons contidos na massa de urânio 235, isto é, a reação em cadeia será divergente, conduzindo à eventual explosão da massa físsil, após número reduzido de gerações de neutrons e em período de tempo de alguns centésimos de segundo.

O *fator de multiplicação* de neutrons, isto é, a relação entre o número de neutrons que ocorrem na massa fissil em cada geração e o existente na geração imediatamente anterior, depende, portanto, em primeiro lugar, do volume da massa fissil, bem como da sua qualidade e grau de pureza. Supondo-se que:

- a) o moderador empregado seja suficientemente denso para retardar os neutrons emitidos até a velocidade ideal de cisão do núcleo fissil, mas suficientemente permeável para não os absorver; e que
- b) o isótopo de urânio 235, empregado na reação, seja absolutamente puro,

o fator de multiplicação seria igual à unidade e a reação em cadeia seria estacionária, se a massa fissil se contivesse no volume crítico; ou seria maior que a unidade e a reação em cadeia progressiva, se a massa fôsse supercrítica; ou seria menor que a unidade e a reação em cadeia regressiva, se a massa fôsse contida em volume subcrítico.

No exemplo numérico acima mencionado, supondo-se que a reação se processe por meio de moderador ideal, em massa fissil de urânio 235 absolutamente puro e com a liberação de três neutrons por núcleo atingido, o volume do combustível seria supercrítico, visto que, neste caso, o fator de multiplicação seria $k=2$: para cada neutron absorvido em uma geração qualquer, três neutrons são liberados na geração imediatamente posterior, dos quais um se evade pela superfície da massa fissil e dois apenas são fecundos, no sentido de que contribuirão para a geração seguinte. Assim, na primeira geração, por grama de urânio 235 puro, serão produzidos 22.500 kWh de energia; na segunda, 45.000 kWh; na terceira, 90.000 kWh, e assim por diante, na seguinte progressão geométrica, $22.500 + 22.500(2) + 22.500(2^2) + 22.500(2^3) + \dots + 22.500(2^n)$, cujo número de termos ou gerações é igual a $n+1$. Supondo-se que cada período reprodutivo se dê em um milésimo de segundo, bastaria, portanto, um centésimo de segundo para produzir $22.500(2^{10} - 1)$ kWh = 46.012.500 kWh, em reação não controlada, com a desintegração total de 2.046 gramas, ou pouco mais de dois quilos, de urânio 235 puro.

A expressão da função analítica de produção da energia nuclear seria, pois, a seguinte:

$$S = a + ak + ak^2 \dots + ak^n = a \frac{k^{n+1} - 1}{k - 1} \quad (2)$$

onde S é a energia total, medida em quilowatts-hora e produzida no decurso de $n-1$ gerações de neutrons pela massa fissil:

$$M = 1 + k + k^2 + \dots + k^n = \frac{k^{n+1} - 1}{k - 1} \quad (3)$$

medida em gramas, sendo k o fator de multiplicação e $a = p \cdot 2,5 \cdot 10^7$ kWh, a energia líquida produzida pela perda p de matéria por unidade de massa atômica para cada combustível fissil. Se $k = 1$, $S = a(n+1)$, $M = n+1$, a reação em cadeia é estacionária; se k é maior que 1, S e M tendem para o infinito na medida em que n tenda para o infinito, e a reação em cadeia é *divergente*; se k é menor que 1, S tende para o limite $a/(1-k)$ e M para $1/(1-k)$, na medida em que n cresça ilimitadamente, e a reação em cadeia é *convergente*. No primeiro caso, a massa fissil M é *crítica*; no segundo, *supercrítica* e no terceiro, *subcrítica*.

FUNÇÃO TÉCNICA DE PRODUÇÃO DA ENERGIA TERMONUCLEAR. As equações (2) e (3) exprimem apenas um modelo simplificado de reação em cadeia que, por ser baseado em premissas hipotéticas, não pretende ser mais que uma primeira aproximação da descrição do que de fato se passa em um sistema de reação composto de urânio e moderador.

Primeiramente, a experiência indica que, ao atingir a massa fissil certo volume, aproximadamente igual ao dobro da massa crítica, o número de neutrons que se evadem por sua superfície é parcela pequena do número de neutrons liberados em cada geração. Essas perdas residuais podem ainda ser reduzidas ao mínimo, se o conjunto de combustível e moderador for circundado de um refletor, que rebata para a massa fissil os neutrons que busquem escapar pela superfície do sistema reator. Em segundo lugar, o urânio natural contém 99,3 por cento de urânio 238 e apenas 0,7 de 1 por cento de urânio 235. Ambos esses isótopos de urânio são cindíveis por neutrons rápidos, mas somente o isótopo de peso atômico 235 o é por neutrons lentos. Na prática, usa-se "enriquecer" ou concentrar o urânio utilizado como combustível com cerca de 5 por cento de urânio 235, que assim se mistura com 95 por cento de urânio 238. Nas reações onde se emprega essa mistura, o urânio 235 cinde-se ao impacto de neutrons lentos, ao passo que o urânio 238 os absorve, transformando-se em plutônio 239, isolável das cinzas da cisão do urânio 235, e fissil ao impacto de neutrons lentos, podendo ser usado, em outro sistema reator, à guisa de recuperador do urânio 235 consumido no primeiro sistema de reação nuclear. Em terceiro lugar, as substâncias moderadoras empregadas de permeio com o combustível fissil, tais como a grafita ou a "água pesada", não possuem o grau ótimo de permeabilidade e densidade que lhes atribui o modelo simplificado de reação em cadeia acima descrito.

Os neutrons retardados prolongam o período de cada geração, dando tempo a que se introduzam no sistema certas substâncias absorvedoras do excesso de neutrons e reduzindo, assim, o fator de multiplicação à unidade e a reação em cadeia à propagação estável. No sistema de reação composto de urânio "enriquecido" e moderador de grafita, esse controle é exercido por meio de barras de aço-boro ou de açocádmio (control rods), automaticamente introduzidas no conjunto ou

dêle retiradas, sempre que o fator de multiplicação se torne, respectivamente, maior ou menor que a unidade.

Em um sistema reator assim formado de urânio, moderador e barras de controle, que mantenham o fator de multiplicação igual à unidade, a *função técnica da produção de força termelétrica* é dada pela fórmula seguinte:

$$P = FV/C \quad (4)$$

onde P significa a potência em watts;

F , o número de núcleos de urânio 235 cindidos por segundo em um centímetro cúbico de urânio;

V , o volume desse urânio, expresso em centímetros cúbicos; e

C , o número de cisões por segundo necessárias para produzir um watt de força termelétrica.

F depende da densidade média de neutrons por centímetro cúbico de urânio (d), e da velocidade média desses neutrons em centímetros por segundo (v), isto é, do produto dv , que é o fluxo médio de neutrons em centímetros cúbicos por segundo, bem como, ainda, do número de núcleos de urânio 235 existentes em um centímetro cúbico de urânio (n) e da área (a) desses alvos nucleares (seção de choque) expressa em centímetros quadrados. Substituindo-se esses símbolos em (4), obtém-se:

$$P = \frac{d v n a}{C} \times V \quad (5)$$

onde C , número de cisões por segundo necessárias para a produção de um watt de energia elétrica, é igual a $3,1 \cdot 10^{10}$, visto que um neutron lento possui energia cinética igual a 0,03 do elétron-volt e ao cindir um núcleo de urânio 235 libera 200 milhões de elétron-volts = $3,2/10^4$ ergs = $3,2/10^{11}$ joules (watt por segundo).

Assim, considere-se, por exemplo, um sistema de reação composto de urânio "enriquecido" até 5 % de urânio 235, de um moderador de grafita e de barras de controle de aço-cádmio, onde o fator de multiplicação seja igual à unidade. Nesse sistema, o fluxo médio de neutrons $dv = 10^{13}$ cm³/seg.; $n = 0,00237 \cdot 10^{24}$ por cm³; $a = 549/10^{24}$ cm²; $V = 100$ quilos de barras dispostas simetricamente na massa do moderador; considerando-se que há 18,7 gramas de urânio "enriquecido" em cada centímetro cúbico dessa substância, $V = 5350$ cm³. Substituindo-se estes valores em (5), obtém-se a energia termelétrica total do sistema: $P = (10^{13} \cdot 0,00237 \cdot 549 \cdot 5350) / (3,1 \cdot 10^{10}) = 2,3 \cdot 10^6$ watts = 2300 quilowatts.

Note-se, mais uma vez, que, durante o processo de produção desses 2.300 quilowatts, é obtida certa quantidade de plutônio 239 pela absorção de neutrons rápidos por núcleos de urânio 238.

Denomina-se *fator de conversão* a relação entre o número de núcleos de plutônio 239 produzido em qualquer geração e o número de núcleos de

urânio 235 cindidos no decurso da mesma geração. Quando o fator de conversão é igual à unidade, o sistema de reação composto de urânio "enriquecido" reproduz, sob forma de plutônio, o urânio 235 consumido no processo de combustão nuclear e a reação é denominada, neste caso, *reação reprodutiva* (breeding reaction). Na prática, nos sistemas de reação com urânio "enriquecido", cujo objetivo primordial é produzir energia elétrica, esse fator de conversão é bem menor que a unidade, visto que todo aumento da taxa de absorção por núcleos de urânio 238 redonda em diminuição de neutrons destinados aos núcleos de urânio 235. O que vem sendo praticado nos Estados Unidos da América e na Grã-Bretanha, no tocante à produção de energia elétrica por meio da energia nuclear, é a subdivisão do processo em duas fases: a *primária* e a *secundária*. Na fase primária, o urânio é empregado em sua concentração natural, com 99,3 por cento de urânio 238 e de 0,7 % de urânio 235. O urânio 238 é transformado em plutônio 239 e a energia produzida pela desintegração nuclear do urânio 235 é aproveitada para produção de energia elétrica. Na segunda fase, onde o objetivo primordial é produzir energia elétrica, emprega-se o plutônio 239 obtido na primeira fase, juntamente com o moderador e as barras de controle.

Além do urânio 238, outra fonte de matéria fissil é o tório 232, substância relativamente abundante na natureza sob a forma de monazita. O tório 232, pela captura de um neutron lento, converte-se em tório 233, que é radioativo e cuja vida média é 23 minutos, transcorridos os quais o produto se transforma em protoactínio 233, que é também radioativo por um período de cerca de 27 dias, findos os quais se transforma em urânio 233, cuja vida média é 163.000 anos, sendo por isto considerado estável para efeitos práticos. O urânio 233 pode, assim, ser produzido artificialmente, e, sendo fissil por neutrons lentos, constitui combustível capaz de sustentar reação em cadeia e ser, por isso, empregado como fonte de energia termelétrica nuclear, em bases econômicas de produção. As suas possibilidades nesse campo não foram ainda bem exploradas, devido principalmente ao fato de que o minério de urânio é mais acessível, no momento atual, aos países que investigam essa nova forma de produção de energia elétrica, como os Estados Unidos da América e a Grã-Bretanha.

REATOR NUCLEAR: CLASSIFICAÇÃO E CONSTRUÇÃO. Denomina-se *reator nuclear* (nuclear reactor, fission chain reactor, "atomic pile") o conjunto de materiais físseis e não-físseis destinado a iniciar e manter em regime estacionário e predeterminado certo tipo de reação nuclear em cadeia, com o objetivo de permitir pesquisas (reator de pesquisa), de produzir energia térmica a ser transformada em elétrica (reator de potência), de fabricar artificialmente substâncias físseis a partir de outras não-físseis (reator de produção) ou de combinar estes dois últimos objetivos (reator de potência e produção).

Assim, preliminarmente, os reatores se distinguem entre si pelos objetivos de sua operação. Os *reatores experimentais* (reatores de pes-

quisa, reatores pilôto) são empregados em estabelecimentos de pesquisa ou constituem protótipos para reatores a serem instalados para fins comerciais. Os reatores reprodutivos (reatores de produção, regeneradores) são utilizados para a produção de plutônio 239 ou urânio 233, originados do urânio 238 ou do tório 232. Na produção da energia termelétrica nuclear, tais reatores são denominados primários (primary reactors), de vez que produzem o combustível fissil artificial a ser empregado naquela produção. Os reatores para produção de energia elétrica trabalham com plutônio 239, urânio 233 ou com urânio "enriquecido". Esses são reatores secundários. Outros há, primários, que combinam o objetivo de produção de energia elétrica com o da produção de plutônio 239.

Os reatores podem ainda ser classificados: a) de acordo com o tipo de neutrons que empregam, b) com a natureza do material fissil que consomem, e c) com a disposição do combustível no moderador.

Os reatores se distinguem, conforme o tipo de neutrons que empregam, em *reatores térmicos, rápidos e intermediários*. Os reatores térmicos dependem de neutrons lentos para realizarem o processo de cisão na reação nuclear em cadeia. A maioria dos reatores até hoje construídos é do tipo térmico, porque a sua operação é menos arriscada e o urânio pode ser nêles empregado na sua concentração natural. Os reatores térmicos são, em geral, reprodutivos, visto que, ao gerarem energia, pela cisão do urânio 235, também produzem plutônio 239 pela absorção de neutrons em núcleos de urânio 238. Os reatores rápidos são os que operam com neutrons de alta velocidade, não necessitando por isso de moderador, o que os torna muito menos volumosos e leves do que os reatores térmicos. A sua operação está, entretanto, sujeita a certos riscos, além de ser mais dispendiosa, de vez que os combustíveis nêles empregados são o plutônio 239, produzido artificialmente nos reatores térmicos, ou o urânio "enriquecido" de relativamente alta percentagem de urânio 235, cuja produção é tecnicamente difícil e economicamente custosa. Embora sujeitos a essas desvantagens, os reatores rápidos possuem a qualidade de reduzir ao mínimo as perdas de neutrons por absorção não-fissil, além de serem de tamanho relativamente pequeno, o que os torna promissores como fonte de energia termelétrica no futuro. Os reatores intermediários são os que empregam neutrons de velocidade intermediária entre a da luz e a de 2.200 metros por segundo. A construção desses reatores é ainda "assunto classificado" ou secreto, seja nos Estados Unidos da América, seja na Grã-Bretanha.

Os reatores se subdividem, ainda, de acordo com o combustível que consomem, em *reatores de urânio, "enriquecido"* ou no seu estado natural de abundância isotópica, e *reatores de plutônio*, que empregam como combustível fissil o plutônio 239. A classe dos reatores de urânio compreende os que empregam o urânio 233 produzido pela cisão nuclear do tório 232. A vantagem do emprego do urânio na sua concentração natural é o custo reduzido do combustível nuclear, vantagem essa em parte

anulada pela maior quantidade de combustível a ser purificado e mantido em estoques acessíveis, bem como pelo maior tamanho do reator, em virtude da elevada quantidade de moderador que requer para manter a reação em cadeia em regime estacionário. O "enriquecimento" do urânio, bem como a produção artificial de plutônio 239 e urânio 233, constituem processos dispendiosos que obviamente aumentam o custo do combustível.

Finalmente, conforme a disposição do combustível no moderador, os reatores nucleares são classificados em *heterogêneos* e *homogêneos*. Nos reatores heterogêneos, o combustível nuclear, reduzido a barras, é disposto em invólucros cilíndricos de alumínio, colocados em canais de carga dentro da massa do moderador de grafita. Nos reatores homogêneos, o combustível entra em contato direto com o moderador, que pode ser, por exemplo, a própria água ordinária, como no caso do "water boiler". O sistema homogêneo fluido, que emprega o urânio "enriquecido" ou um dos elementos fisséis artificiais, como o plutônio 239 ou o urânio 233, possui certas vantagens de operação sobre os reatores heterogêneos, tais como a de reduzir ao mínimo as perdas térmicas em superfícies sólidas ou as evasões de neutrons pelos canais de carga e de ventilação do sistema reator. Além disso, são mais simples, nos reatores homogêneos, o processamento químico dos fragmentos da cisão bem como a estrutura material do reator.

Os reatores térmicos, heterogêneos, reprodutivos ou não, de urânio ou plutônio, constituem o tipo mais evoluído e experimentado, seja nos Estados Unidos da América e no Canadá, seja na Europa, como fonte de energia na produção de força termelétrica nuclear. Fundamentalmente, são esses reatores uma nova espécie de fornalha, em que a reação química de combustíveis líquidos e sólidos é substituída pela reação da cisão nuclear de certos elementos de elevado peso atômico. Carregados de eletricidade positiva, os estilhaços do núcleo atingido por um neutron lento projetam-se violentamente em direções opostas, animados de alta velocidade. Os fragmentos da cisão possuem cargas positivas muito grandes. Ao deslocarem-se entre núcleos e elétrons interagem, ionizando e ativando moléculas e átomos rapidamente, abandonando energia nesses processos e transformando-se a energia cinética que os animava em energia calorífica. Em uma usina termelétrica nuclear, a função do reator é triplíce: transformar em térmica a energia cinética dos fragmentos da cisão nuclear; manter a temperatura da reação entre limites preestabelecidos, pelo controle do fator de multiplicação da reação em cadeia, e, finalmente, transmitir o calor assim produzido ao grupo tradicional das estações termelétricas, composto de caldeira, turbina, gerador e linhas de transmissão para o mercado de consumo.

Empregando-se a terminologia definida na Parte I do presente estudo, pode dizer-se que os reatores nucleares são constituídos de fatores passivos e ativos, sendo que estes últimos se subdividem em fatores ativos de transformação da energia suprida pela fonte, de con-

trôle do regime da produção, de remoção dos fragmentos e produtos da cisão, e de proteção da mão-de-obra operadora do reator.

O material fissil, que constitui o fator passivo de produção da energia termelétrica nuclear, subdivide-se em dois grupos distintos: o das substâncias naturais, como o urânio em sua concentração isotópica normal e o urânio "enriquecido" do seu isótopo de peso atômico 235, e o das substâncias artificiais, como o plutônio 239, originado do urânio 238, e o urânio 233, resultante da transmutação do tório 232 ao ser atingido por um neutron lento. Essas substâncias físeis, subdivididas em barras, são dispostas em invólucros cilíndricos de alumínio, constituindo a *carga* a ser distribuída na massa do moderador, nos reatores térmicos. Nos reatores rápidos, onde não há moderador, a massa fissil constitui o próprio cerne do reator.

Os fatores ativos subdividem-se em moderador, refletor, barras de controle, aparelho resfriador do sistema, blindagem biológica e dispositivos acessórios, destinados a remover, isolar, armazenar e neutralizar os produtos e os rejeitos da cisão.

O *moderador*, nos reatores térmicos heterogêneos, consiste em certo volume de grafita, de forma cúbica, paralelepípedica, cilíndrica ou esférica, e, nos reatores térmicos homogêneos, em um receptáculo ou tanque, destinado a conter a mistura de moderador e combustível. Os moderadores de grafita são perfurados, horizontal e transversalmente e a várias alturas, por canaletes retílineos, paralelos, de seção quadrada ou circular, nos quais são introduzidos, por uma extremidade, os invólucros de carga fissil, os quais, uma vez completada a cisão nuclear, são expedidos, na extremidade de descarga dos canaletes, pelo impulso da carga ainda virgem. Esses canaletes de carga são mais amplos que o volume dos cartuchos que por eles transitam, permitindo, desse modo, a passagem da acração, ou do gás de refrigeração, necessária à manutenção do reator em temperatura determinada. Transversalmente a esses canaletes de carga e perfurados entre eles na massa do moderador, existem outros canaletes por onde correm as *barras de controle*, manufaturadas de aço-boro ou de aço-cádmio, e destinadas a absorver os neutrons em excesso, a manter o fator de multiplicação k igual à unidade ou a extinguir o reator, em caso de emergência. Essas barras penetram no moderador horizontal e verticalmente, sendo em ambos os casos paralelas entre si. As barras horizontais são denominadas *barras de controle automático* (automatic control rods), visto que penetram e se retiram do moderador pela ação de um mecanismo automático ligado a câmaras de ionização, que indicam a quantidade de neutrons ativos existente a cada instante no reator. As barras verticais são denominadas *barras de segurança*, porque permanecem normalmente fora da massa do moderador, onde penetram, por ação da gravidade, caso falhe o controle automático e seja necessário extinguir a reação nuclear resultante. O moderador é circundado por um *refletor*, cuja função é rebater para dentro do reator parte dos neutrons que buscam escapar pela sua superfície. Finalmente, envolvendo o refletor, se dispõe uma parede ou blindagem rádio-biológica de aço e cimento.

que absorve as irradiações emanadas da cisão e os neutrons que consigam transpor o refletor, protegendo dessa forma a mão-de-obra operadora do sistema.

Os reatores em geral, mas especialmente os destinados a suprir energia térmica ao grupo constituído de caldeira, turbina e gerador, na produção da energia termelétrica, apresentam vários problemas de engenharia nuclear, alguns já resolvidos e outros ainda em vias de solução. O primeiro desses problemas diz respeito à abolição da caldeira no circuito entre o reator e a turbina. Grande economia de operação seria obtida pela supressão desse elemento, com a ligação direta do reator à turbina. A radioatividade dos gases que circulam no reator, resfriando-o e transportando para a caldeira a energia calorífica proveniente da reação nuclear, tem impedido até agora a solução prática do problema. O segundo problema se relaciona com a coordenação entre o tempo de percurso das barras de carga no reator, o grau de "enriquecimento" do urânio 235 empregado na mistura combustível e a taxa de acúmulo dos rejeitos da cisão absorvedores de neutrons ativados. Qualquer modificação na combinação ótima desses elementos acarretará o "envenenamento" prematuro da massa fissil em virtude do acúmulo de rejeitos ou a utilização incompleta de seu teor de urânio 235. A radioatividade dos combustíveis e dos produtos de cisão sugerem outros problemas relativos ao material de construção do reator. As condições de operação de um reator nuclear exigem o emprego de materiais dotados de baixo teor de absorção de neutrons, de elevada resistência a altas temperaturas, de estabilidade atômica quando sujeitos a irradiações radioativas, de elevada condutibilidade térmica e de grande resistência à corrosão, o que elimina a maior parte dos metais comumente usados na construção de geradores a vapor ou de motores a combustão interna ou a explosão. O zircônio, o molibdênio, o berilo e o titânio, que mais se aproximam destas especificações, são metalúrgicamente pouco explorados, principalmente nos volumes exigidos em reator nuclear. O problema da separação dos produtos de cisão originários do reator, como o plutônio 239, e os rejeitos, só parece passível de soluções complexas e dispendiosas, que exigem vários tipos de equipamentos, volumosos e manejados por controle remoto, que encarecem extraordinariamente o capital fixo das usinas termelétricas nucleares. Outros problemas, de caráter termodinâmico, apresentam-se quanto à transmissão à caldeira da energia térmica produzida pela cisão nuclear na zona ativa do reator. A energia cinética produzida pela fragmentação nuclear corresponde a cerca de 600 bilhões de graus centígrados, e para que essa energia seja aproveitada com máxima eficiência é necessário reduzi-la a cerca de 600° C. Trata-se, portanto, de se encontrar um meio de transferir em nível constante, à serpentina da caldeira, a energia calorífica, pela vaporização. O vapor, por sua vez, será injetado na turbina para mover o gerador a determinada velocidade de rotação. O meio refrigerador e transmissor deve, portanto, possuir, além de boas propriedades termodinâmicas, a de não corroer as paredes internas dos canais de ventilação do reator e de não ser absorvedor de

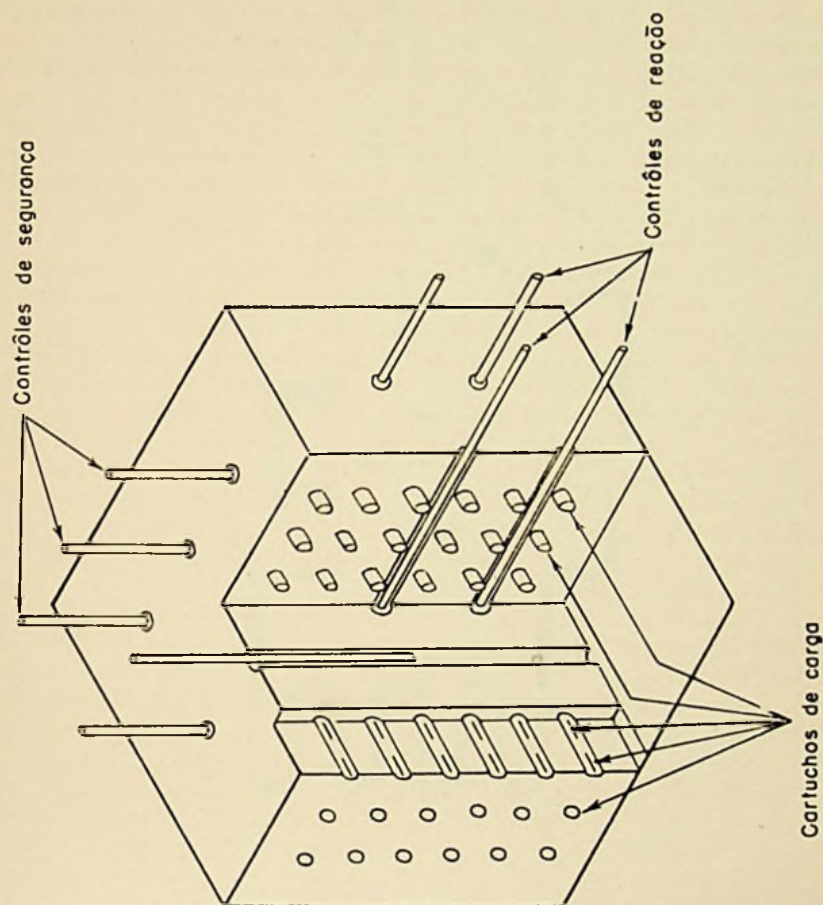
neutrons. Esse problema é tanto mais grave quanto menor fôr o volume do reator, sendo esta a razão por que os reatores rápidos ainda não foram aplicados à geração da energia termelétrica para fins comerciais. Nos reatores térmicos heterogêneos, o meio empregado tem sido o hélio, a água destilada, o ar purificado ou alguns metais líquidos, circulando em alta velocidade por ventoinha supercompressora. Um outro problema, de certa forma ligado a este, refere-se à contaminação radioativa do meio empregado para a dupla finalidade de resfriar o reator e transmitir calor à caldeira, o que exige, de um lado, refôrço de tôdas as paredes internas do grupo térmico, e, de outro, a extensão à caldeira da blindagem biológica protetora dos operadores do reator.

A par desses problemas, ainda em grande parte sem solução conhecida no presente momento, outros há que já foram satisfatoriamente resolvidos, tais como, por exemplo, os que se referem à proteção da mão-de-obra operadora, bem como ao saneamento do ar e dos cursos d'água contaminados nas vizinhanças das usinas termelétricas nucleares. Nesse particular, a usina em instalação em Calder Hall, na Inglaterra, parece modelar. Por outro lado, as recentes investigações sobre a operação de reatores térmicos homogêneos, efetuadas na Suécia e nos Estados Unidos da América, revelam ter sido aparentemente resolvido o problema crítico da recuperação de urânio 235 consumido, através de igual produção de plutônio 239 (plutonium credit), com a elevação do fator de conversão à unidade.

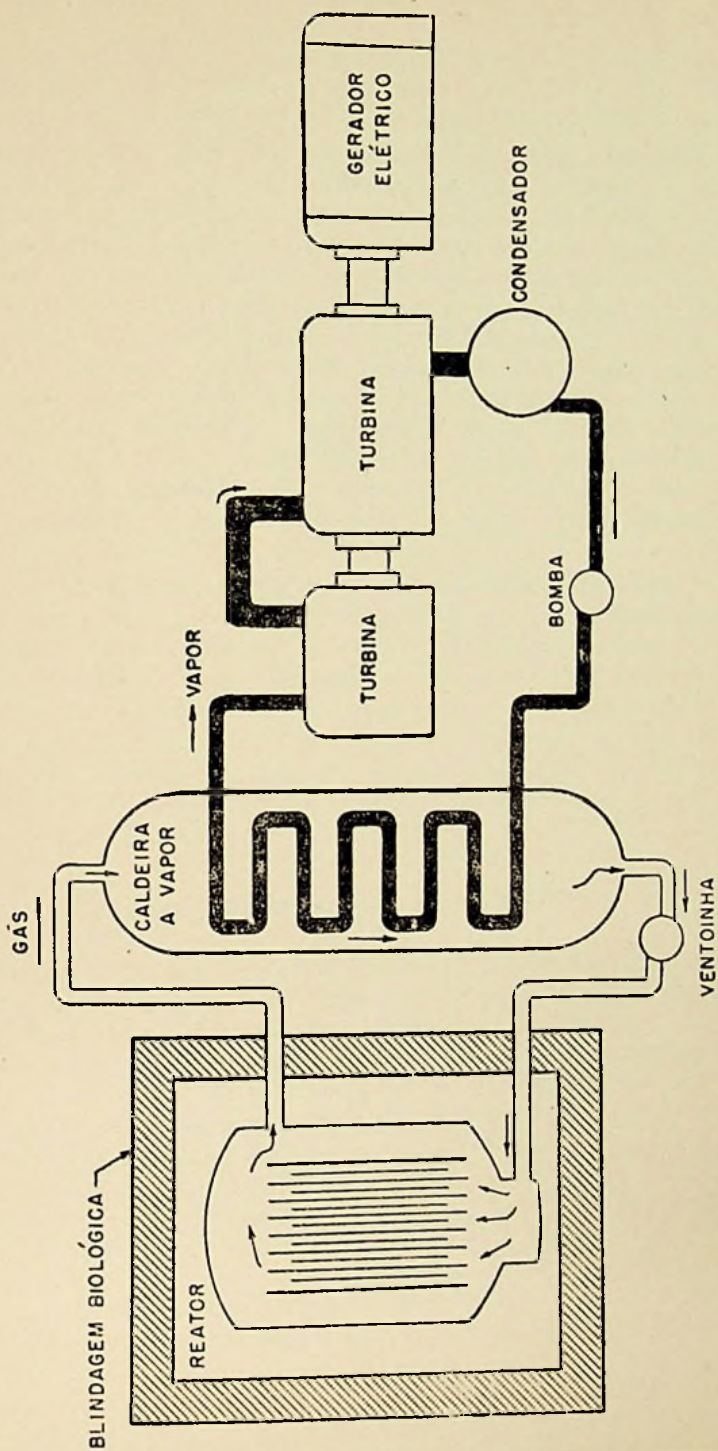
Resumindo, pode dizer-se que a construção de qualquer reator compreende três problemas de caráter teórico e experimental: a) o cálculo das dimensões do reator e das condições quantitativas da manutenção do fator de multiplicação em nível igual à unidade; b) o estudo pormenorizado das condições físicas dos materiais de construção conducente ao aproveitamento mais eficiente do calor gerado pelo reator; e c) a pesquisa das condições para a manutenção da reação em cadeia por toda a vida do reator, bem como das possibilidades de regeneração do material fissil consumido no decurso do processo.

O fator de multiplicação é função das propriedades nucleares do material fissil e fértil a ser empregado no reator, tais como a densidade média de neutrons por centímetro cúbico de combustível, a velocidade média desses neutrons, o número de núcleos do elemento fissil por unidade de volume da massa fissil e fértil e as seções de choque em centímetros quadrados. A magnitude desses dados nucleares depende das energias efetivas dos neutrons, o que, por sua vez, se subordina às características técnicas do reator, tais como a quantidade de moderador, a espécie de combustível fissil e o tipo de resfriador e transmissor térmico a ser nêle empregado. A necessidade de se manter o fator de multiplicação em nível igual à unidade, para a propagação estacionária da reação em cadeia, configura especificamente os projetos teóricos dos reatores que combinem em proporções ótimas o urânio natural ou "enriquecido" usado como combustível, o volume do moderador e o número de neutrons ativos existente na massa fissil e fértil em qualquer momento da reação.

ESQUEMA DE REATOR TÉRMICO



ESQUEMA DE USINA ELÉTRICA TERMONUCLEAR



Esses projetos teóricos são básicos para a construção posterior de reatores experimentais subcríticos, nos quais se colhem os dados técnicos indispensáveis à construção de protótipos, que são já reatores críticos.

O aproveitamento eficiente do calor gerado pelo reator envolve a descoberta de um meio, líquido ou gasoso, que, em circuito fechado entre o reator e a caldeira, mantenha o primeiro a uma temperatura constante e predeterminada, e transfira à caldeira o máximo de energia térmica, absorvendo o mínimo de neutrons no percurso circulatório. Além disso, esse meio ideal não deve padecer modificações estruturais ou químicas pela combustão fissil, nem corroer o material do reator, a massa combustível e seu invólucro, não devendo ser também de operação arriscada. Esse problema é sério no concernente aos reatores rápidos, cujo pequeno volume se contém, também, em superfície pequena: o meio resfriador e transmissor térmico deverá, assim, aproveitar a maior quantidade de calor na menor área de irradiação. Por outro lado é vital que o sistema circulatório funcione sem possibilidade de bloqueio, o que acarretaria a perda do reator.

Finalmente, a manutenção da reação em cadeia em nível estacionário por toda a vida do reator, que deve ser a mais dilatada possível, a fim de reduzir-se ao mínimo a taxa de depreciação do aparelho, compreende problemas técnicos, tais como o da estabilidade estrutural dos revestimentos das barras de carga e das barras de controle, bem como de toda a superfície exposta a irradiações radioativas, e o da retirada automática dos rejeitos da cisão do interior do reator, exatamente no instante em que iniciem o "envenenamento" do sistema reator, de modo a permitir a utilidade máxima da carga fissil.

II — Economia da produção termelétrica nuclear

PROGRAMA DE ENERGIA ELÉTRICA NUCLEAR NA GRÃ-BRETANHA. De modo geral e preliminar, pode dizer-se que não parece provável, em futuro próximo, que a produção termelétrica nuclear conduza a preços por quilowatt-hora mais reduzidos do que os da produção hidráulica ou térmica da eletricidade por processos usuais: os custos da distribuição da energia elétrica representam, em qualquer desses processos, nucleares ou tradicionais, substancial fração do custo total da produção ao consumidor e o custo do capital por quilowatt é mais elevado nas usinas termelétricas nucleares do que nas hidrelétricas ou termelétricas usuais. Este ponto de vista, geral e preliminar, não impede, porém, que se admita a instalação imediata ou em futuro próximo de estações termelétricas nucleares no caso específico de certas economias nacionais. Nestes casos particulares, outros aspectos econômicos do problema devem ser levados em consideração.

Entre esses aspectos peculiares sobressaem os seguintes: a) existência na economia nacional específica de materiais físseis e férteis, tais como o urânio natural e o tório, bem como das possibilidades de "enri-

quecimento" do urânio natural em seu teor de urânio 235, da produção de plutônio 239 a partir do urânio 238 e de urânio 233 derivado do tório 232; b) custos comparativos, em termos de balanço de pagamentos, a curto, médio e longo prazos, da importação de material fissil constituído de urânio elevadamente "enriquecido" seja de urânio 235 ou de urânio 233 ou de plutônio 239, bem como de material fértil como o urânio 238 e o tório 232, relativamente à importação de combustíveis químicos, líquidos e sólidos, para aplicação à geração de força elétrica para fins de consumo doméstico, industrial e de transporte ferroviário eletrificado; c) disponibilidade regional de potencial hidrelétrico e existência, no território nacional, de jazidas de carvão e petróleo que, seja por motivo de localização geográfica e da quantidade e qualidade do potencial disponível, seja por motivos econômicos de aproveitamento dessas fontes, tornem desde já econômica a produção da energia termelétrica nuclear.

Na Grã-Bretanha, por exemplo, onde a eficiência térmica das usinas a carvão vem aumentando desde 1935, tendo atingido a média de 23,6 por cento em 1954 e mesmo a 30 por cento nas usinas mais modernas, o total de combustível necessário a essas estações, em 1965, ascenderá a cerca de 65 milhões de toneladas e, em 1975, a 100 milhões de toneladas de carvão de pedra. Mesmo que parte desse combustível sólido seja substituído por petróleo produzido na área monetária do esterlino, verificar-se-á, nos próximos vinte anos, na ausência de um aproveitamento eficaz da energia nuclear, o aumento de 250 por cento no consumo atual de carvão, o que, sem dúvida, acarretará gravame substancial no balanço de pagamentos do Reino Unido, visto que as fontes internas se acham em regime de violento aumento de custo de extração, por motivos de caráter político e sociológico.

Verificando, pela ponderação destas considerações, que é desde já econômica a instalação de reatores como fonte de energia térmica na produção da eletricidade, subdivide-se o problema em se atingirem, por este meio, dois objetivos: a) aumentar a produtividade desses reatores em termos de calor por tonelada de urânio natural ou "enriquecido" e fazer ultrapassar da unidade o fator de conversão do urânio 238 em plutônio 239 e do tório 232 em urânio 233; e b) reduzir o custo do capital por quilowatt instalado, seja pela redução das dimensões do reator, pela simplificação do equipamento acessório, pelo barateamento de seus materiais de construção e diminuição da sua taxa anual de depreciação, seja pela redução dos custos de provisão e preparo da sua carga fissil e fértil.

O problema, assim subdividido, desdobra o programa de construção de reatores nucleares em três fases distintas: na primeira fase, instalam-se reatores experimentais à base de considerações teóricas de física nuclear; na segunda fase, à base dos dados técnicos obtidos no decurso da operação desses reatores experimentais, instalam-se reatores protótipos; e, finalmente, na terceira fase, à base do comportamento técnico desses reatores protótipos e das considerações de caráter econômico derivadas de sua operação, instalam-se os reatores comercializáveis.

Tal é a orientação que vem sendo observada em países que, em certo momento da sua história política, decidiram converter gradualmente para fins pacíficos os seus programas de energia nuclear, a princípio e primordialmente orientados para fins bélicos. Tanto nos Estados Unidos da América como na Grã-Bretanha já existem, instaladas e em pleno funcionamento, fábricas para a produção de plutônio 239 a partir do urânio natural extraído do minério de urânio, proveniente de fontes internas e externas, bem como fábricas produtoras de urânio "enriquecido" de seu conteúdo isotópico de peso atômico 235. Gráficos anexos, referentes, respectivamente, aos programas de energia atômica dos Estados Unidos da América e da Grã-Bretanha, mostram, em fluxogramas, o processamento do minério de urânio, desde o seu ponto de provisão no interior do país ou no exterior, até a sua aplicação, como material físsil, em estabelecimentos civis e militares.

Como se verifica pelo confronto desses dois gráficos, os programas são praticamente idênticos nos Estados Unidos da América e na Grã-Bretanha, quanto à sua estrutura geral, diferindo apenas quanto à escala, maior nos Estados Unidos. Apenas agora e no tocante à conversão desses programas aos objetivos pacíficos de aplicação industrial da energia nuclear para a produção de força termelétrica em larga escala, parecem divergir esses dois países quanto ao método pelo qual deve ser conduzida a conversão. Motivos econômicos fazem com que o governo dos Estados Unidos da América já tenha entregue a empresas privadas a produção comercial de reatores, cujo tipo aparenta ser o que irá encontrar maior procura no mercado internacional, isto é, reatores rápidos e reprodutivos. Outros motivos econômicos conduziram o governo britânico a manter o monopólio da construção de reatores, subcontratando com empresas privadas a fabricação de peças e acessórios, bem como a dirigir suas vistas, primeiramente, para a construção de reatores térmicos, a serem instalados neste país com o fim primordial de suplementarem a produção futura da energia termelétrica pela combustão do carvão de pedra e de petróleo.

Na Grã-Bretanha, a pesquisa teórica e experimental da aplicação da energia nuclear para a produção industrial de força elétrica constitui parte importante do programa de trabalho do Estabelecimento de Pesquisas Atômicas instalado em Harwell, no Berkshire. Nesse estabelecimento, a pesquisa teórica já foi completada com a indicação de três tipos de reatores tecnicamente viáveis: térmico, intermediário e rápido, assim classificados de acordo com a energia dos neutrons que utilizam na reação em cadeia. Como todos os dados de construção de reatores intermediários são ainda considerados secretos, nada se poderá adiantar de verdadeiramente informativo no presente estudo.

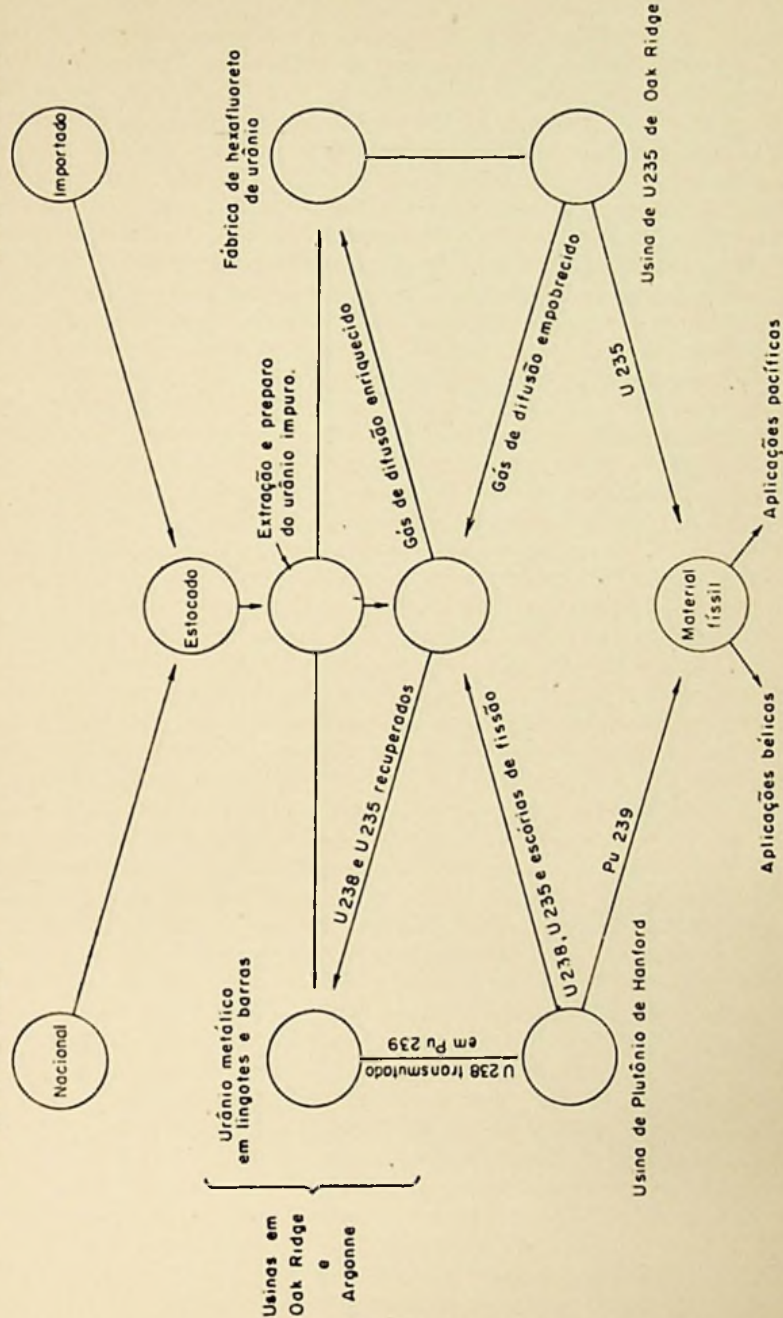
Os reatores térmicos, aprovados teoricamente em Harwell, empregam, como combustível, o urânio natural, o urânio "enriquecido", o plutônio 239 e o urânio 233; como moderador, a grafita, a "água pesada" e a água pura ou "água leve", tendo sido afastada a possibilidade do emprego do berilo; e, como meio resfriador e transferidor da energia calo-

rifica à caldeira, o ar puro, o hélio, o anidrido carbônico ou gás carbônico, certos metais líquidos, como o mercúrio, ou liqüefeitos, como o sódio, o potássio e também a "água pesada" e a "água leve", ou mesmo a própria mistura combustível. Os reatores térmicos, heterogêneos, moderados a grafita, subdividem-se em dois subtipos: os resfriados a gás ou a líquido. Os resfriados a gás empregam o gás carbônico como meio resfriador e transferidor térmico, sob pressão, e o urânio natural ou ligeiramente "enriquecido", como combustível, e se destinam a produzir força elétrica e plutônio 239. A sua produtividade térmica (heat rating) é baixa, cerca de 20 por cento, com tendência a elevação por desenvolvimento técnico na construção do reator, e o seu fator de conversão é menor que a unidade, não se tratando, portanto, de reator reprodutivo. Existem em Harwell, desde 1947 e 1949, respectivamente, dois reatores experimentais desse tipo, conhecidos por GLEEP (Grafite Low Energy Experimental Pile) e BEPO (British Experimental Pile Zero), cujas características técnicas se acham mencionadas no Quadro V, anexo. O protótipo desses reatores se acha em processo de instalação em Calder Hall, no Cumberland. A comercialização desse tipo de reator terá início em 1957 e a sua operação efetiva, como unidade geradora na rede elétrica da Grã-Bretanha, se verificará em 1961. Além desse tipo de reator térmico, heterogêneo, moderado a grafita e resfriado a gás, o Estabelecimento de Pesquisas de Harwell vem estudando a possibilidade de instalação de reatores térmicos, heterogêneos, moderados a grafita, mas resfriados a líquido, visto que a sua produtividade térmica aparenta ser bem mais elevada do que a dos resfriados a gás carbônico. Dois meios líquidos foram até agora pesquisados em Harwell, para emprêgo como resfriador e transmissor de calor à caldeira: a "água pesada" e a liga fundida de sódio e potássio liqüefeitos. Verificou-se que a "água pesada" é o meio conveniente aos reatores térmicos, heterogêneos, moderados a grafita, quando sejam primários, isto é, consumam urânio natural ou ligeiramente "enriquecido" na produção conjunta de energia elétrica e plutônio 239 a um fator de conversão menor que a unidade. Dois reatores experimentais desse gênero já se acham em construção em Harwell, o E443 e o DIMPLE (Deuterium-moderated pile, low energy), mas só se projeta a construção do protótipo em 1963 e a sua comercialização em 1965. Verificou-se, também, que o sódio liqüefeito só pode ser empregado em reatores térmicos, heterogêneos, moderados a grafita, secundários, isto é, que consumam urânio fortemente concentrado, seja por mais elevado "enriquecimento" do seu teor de urânio 235, seja pelo emprêgo de plutônio 239 produzido no reator primário. Tais reatores produziriam força elétrica em grande escala, bem como certa quantidade de plutônio 239 para o enriquecimento do combustível em outros reatores secundários, para iniciar a cadeia de reação em um sistema baseado no tório 232, para alimentar reatores rápidos ou para ser reintroduzido, como material fissil, no próprio reator que o produziu. Nesses reatores, o fator de conversão, embora mais elevado do que o dos reatores resfriados a gás ou a "água pesada", ainda é inferior à unidade, não resultando,

Produção de material fissil nos Estados Unidos da América

MINÉRIO DE URÂNIO

MINÉRIO DE URÂNIO



portanto, em uma produção de plutônio 239 ou de urânio 233 igual à quantidade de material fissil queimada no decurso do processo. Pesquisou-se, ainda, em Harwell, a possibilidade técnica de reatores térmicos, heterogêneos, que empreguem a "água pesada" ou a "água leve" como moderador, resfriador e transferidor. À parte, porém, desse tipo de reator térmico, heterogêneo, o referido laboratório instalou um reator experimental, homogêneo, denominado ZEPHYR, no qual o material fissil é dissolvido na "água pesada" moderadora, resfriadora e transferidora, e onde, aparentemente, o fator de conversão se tornará ligeiramente superior à unidade, havendo, portanto, uma recuperação do excesso do combustível fissil não consumido na reação em cadeia. O protótipo desse reator térmico, homogêneo, deverá ser construído na Grã-Bretanha aproximadamente em 1965. Finalmente, os reatores rápidos, aprovados teoricamente em Harwell, empregam como combustível o urânio fortemente "enriquecido", o plutônio 239 e o urânio 235 puro. A sua construção é descrita como consistindo em uma câmara de combustão (core) de material fissil, envolta por uma "casca" (shell) de material fértil: o plutônio 239 envolto em urânio 238 e o urânio 233 envolto em tório 232. Supõe-se que, nesses reatores rápidos, o fator de conversão se torne bem superior à unidade, o que significa que os mesmos serão fortemente reprodutivos. Em vias de instalação se acha um reator desse tipo em Dounreay, na Escócia, tendo sido a instalação do seu protótipo marcada para 1965 e a sua comercialização em larga escala para 1970.

PROGRAMA DE REATORES TÉRMICOS NA GRÃ-BRETANHA. De acordo com o programa de reatores, estabelecido para os próximos vinte anos, acima delineado, o reator a ser comercializado, na Grã-Bretanha, até 1957, é o de tipo térmico, heterogêneo, moderado a grafita, resfriado a gás carbônico, alimentado a urânio natural, primário, isto é, produtor conjunto de energia elétrica em larga escala, por conexão com um sistema constituído de caldeira, turbina e gerador, e de certa quantidade de plutônio 239 como recuperação parcial do urânio consumido no processo de produção termelétrica nuclear. Esse gênero de reator é conhecido neste país pela designação de tipo CALDER HALL, em virtude do local onde foi instalado o seu protótipo. O programa provisório, estabelecido pelo governo britânico, para a instalação comercial de reatores desse tipo é o seguinte: a) início da construção, em meados de 1957, de duas estações, cada uma com dois reatores, cuja operação terá início entre 1960 e 1961; os exames do terreno já se iniciaram, para a primeira destas instalações, entre os rios Crouch e Blackwater, no Essex, a curta distância da subestação termelétrica de Rayleigh, e para a instalação da segunda, no vale do Severn, perto de Avonmouth; b) início da construção, 18 meses mais tarde, entre 1958 e 1959, de mais duas estações, do mesmo tipo CALDER HALL e com o mesmo número de reatores, cada uma, cuja operação comercial se iniciará em 1963; essas estações, a serem instaladas na segunda fase, terão produtividade térmica mais

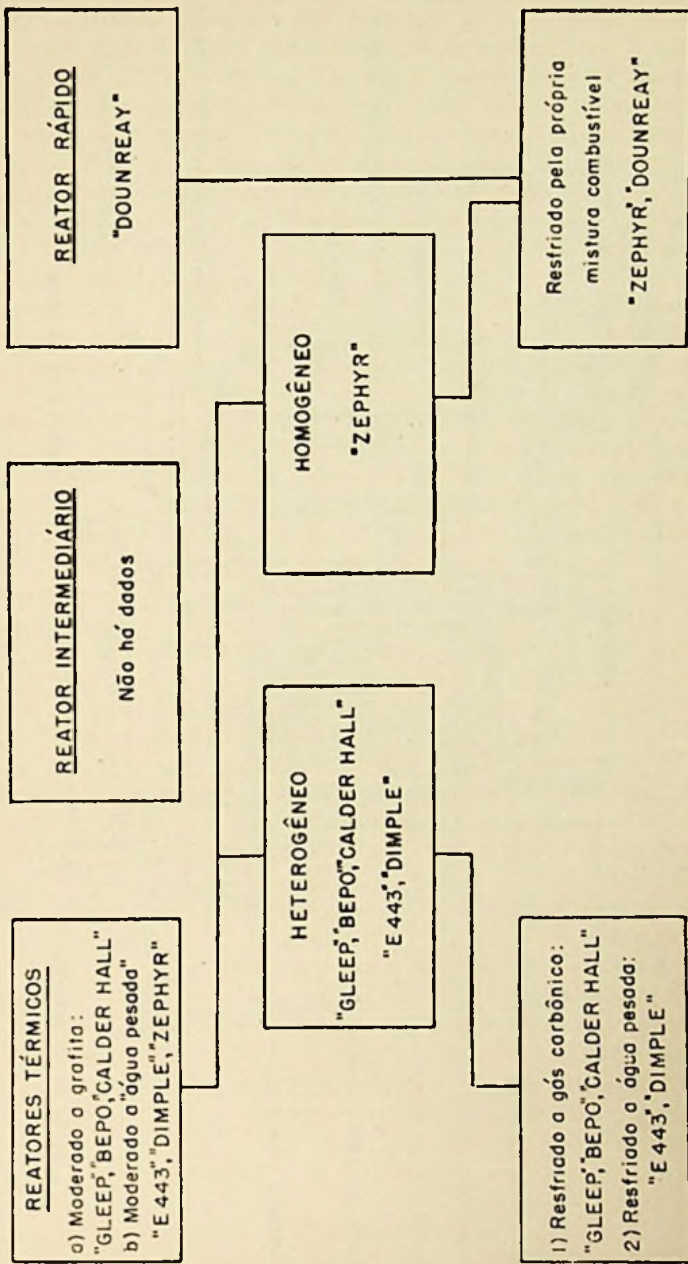
elevada do que as da primeira fase; c) início da construção das estações da terceira fase, programada da seguinte forma: 1) quatro estações, cuja construção será começada em 1960, e 2) mais quatro estações, 18 meses mais tarde, isto é, entre 1961 e 1962; essas oito estações da terceira fase começarão a operar comercialmente entre 1963 e 1965; cada uma dessas estações conterá um reator apenas, cuja produtividade térmica espera-se que seja mais elevada do que a dos anteriores; possivelmente, as estações projetadas para 1960 continuarão sendo do tipo CALDER HALL, mas as que serão iniciadas entre 1961 e 1962 utilizarão reatores resfriados a líquido.

As quatro estações da primeira e da segunda fases, com dois reatores cada uma, terão, conjuntamente, a produção de 400.000 a 800.000 kW, e as oito estações da terceira fase, com um reator cada uma, produzirão 1.000.000 kW. De modo que o programa decenal da construção de reatores térmicos compreende um aumento de capacidade entre 1.400.000 e 1.800.000 kW. Essas estações termelétricas nucleares serão empregadas, na rede distribuidora (grid) britânica, como estações de base (base-load stations), visto que, dessa forma, será elevado o fator de carga, isto é, a relação entre a carga média e as pontas (peak load), a provavelmente 80 por cento. O plutônio 239 produzido conjuntamente nessas estações será aproveitado para o "enriquecimento" das cargas dos reatores resfriados a líquido, compreendidos na parte final da terceira fase do programa. Note-se que as primeiras dessas estações comerciais se valerão das instalações de processamento do minério de urânio proveniente da Austrália e do Congo Belga, existentes em Springfields, para fins primordialmente bélicos. Entretanto, à medida que novas estações forem sendo construídas, será necessário expandir-se a escala dessa fábrica, bem como a de todo o processamento químico difusor dos rejeitos da cisão e do material fissil não consumido e fértil produzido por todo o sistema de reatores térmicos, com exceção provavelmente das instalações para o ligeiro "enriquecimento" do urânio de Capenhurst.

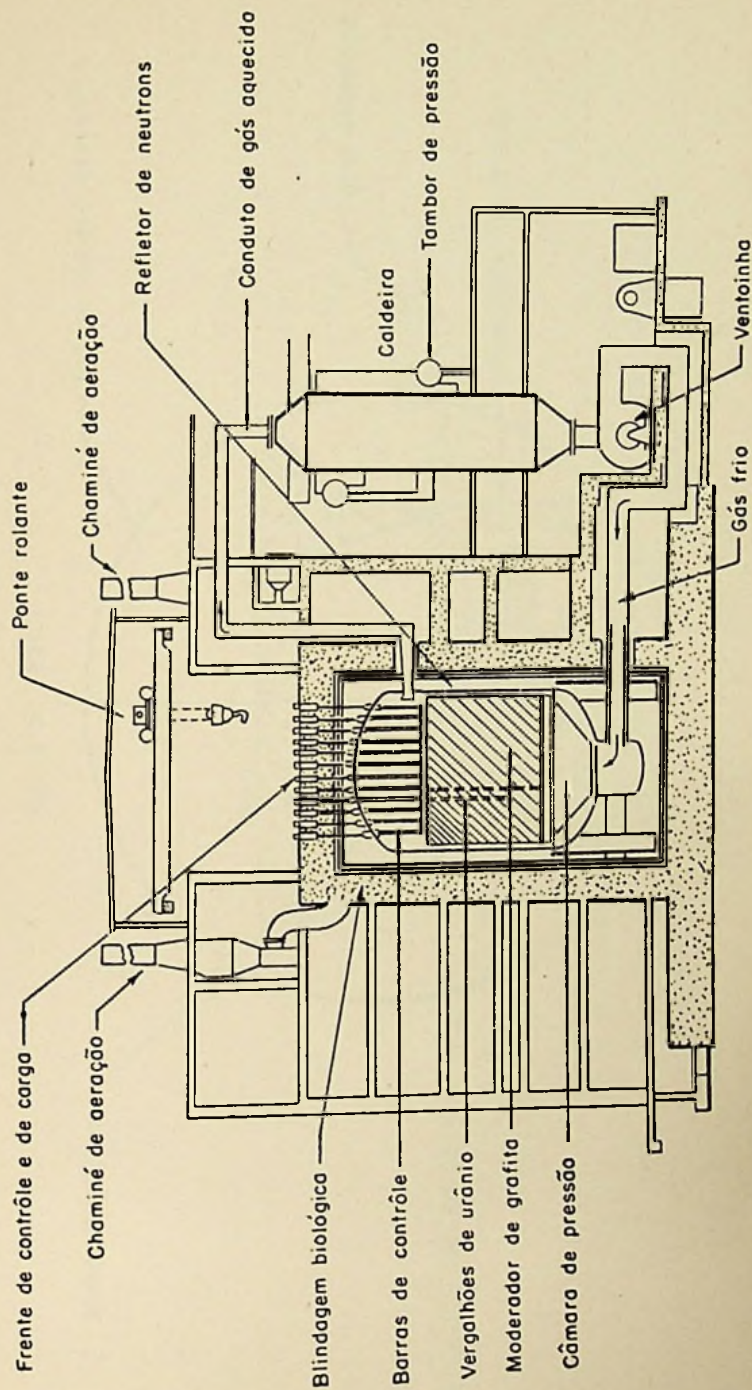
Com base nos dados divulgados na publicação oficial do governo britânico intitulada *A Programme of Nuclear Power* (Cmd. White Paper n. 9389, Londres, fevereiro de 1955) é possível estimar-se o custo da produção de eletricidade nos dois tipos de reatores térmicos, resfriados a gás carbônico e a líquido, a serem comercializados na Grã-Bretanha, entre 1957 e 1965. Tal estimativa estaria, entretanto, sujeita a larga margem de erro em virtude do desconhecimento do desempenho efetivo desses reatores sob altas temperaturas e elevada produtividade térmica, bem como da falta de elementos sobre a oferta e procura, e da sua resultante, o preço do material fissil e fértil empregado nesses reatores ou por eles produzido.

Tomando por base o custo fixo da instalação das estações do tipo CALDER HALL, o custo da construção e instalação das quatro estações, cada uma com dois reatores, compreendidas na primeira e na segunda fases do programa de comercialização da energia elétrica nuclear, está

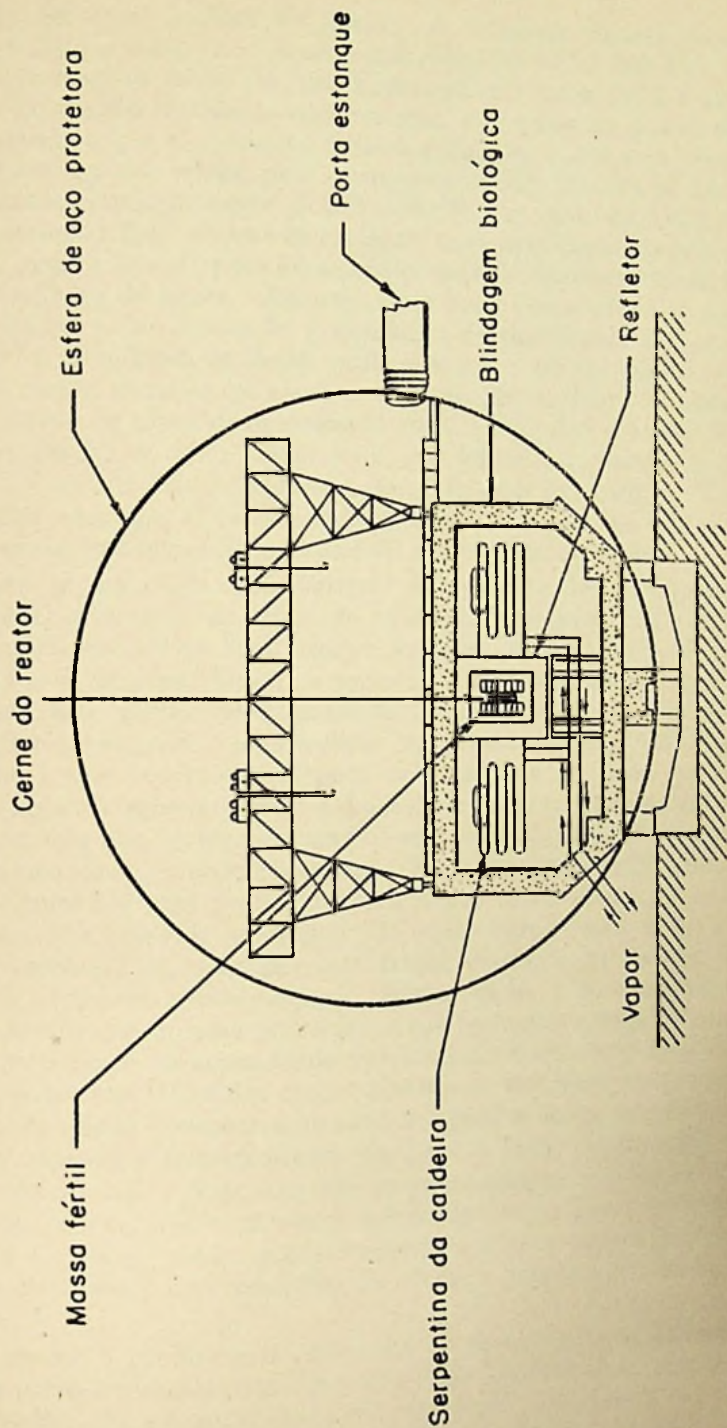
PROGRAMA DE REATORES DE HARWELL (Inglaterra)



SEÇÃO TRANSVERSAL DO REATOR TIPO "CALDER HALL"



SEÇÃO TRANSVERSAL DO REATOR RÁPIDO DE "DOUNREAY"



orçado entre 60 a 70 milhões de libras. A produção dessas quatro estações é estimada, como já se disse, entre 400.000 e 800.000 kW, de onde se deduz o custo médio do quilowatt instalado entre £150 e £87. Na terceira fase serão instaladas oito estações, das quais as quatro primeiras resfriadas a gás e as quatro últimas a líquido, e que consistirão, cada uma delas, em um reator, pelo custo total de 125 milhões de libras e que produzirão, conjuntamente, 1.000.000 kW, ao custo de £125 por quilowatt instalado. Esse sistema de estações, a ser construído no período de dez anos, exigirá uma despesa em estabelecimentos auxiliares orçada em cerca de 30 milhões de libras. Adicionadas a estes custos ainda as despesas acarretadas pela construção e instalação de protótipos, que orçariam entre 30 a 40 milhões de libras, verifica-se que o custo total do programa de reatores térmicos se eleva a mais de 260 milhões de libras, para um aumento de capacidade estimado entre 1.400.000 e 1.800.000 kW, do que resulta o custo médio total, por kilowatt instalado, entre £185 e £143, uma vez descontados os custos variáveis das cargas. Tais reatores teriam uma vida ativa calculada entre 10 e 20 anos, ou seja uma taxa de depreciação compreendida entre 10 e 5 por cento por ano.

Considere-se, agora, o custo variável de operação dessas estações, no tocante exclusivamente ao custo de aquisição e preparo das cargas iniciais de urânio natural ou ligeiramente "enriquecido". O governo britânico estima essa despesa, durante o período de dez anos, em 40 milhões de libras, que serão gastas, principalmente, na alimentação dos oito reatores das quatro estações compreendidas na primeira e segunda fases do programa, o que equivale à despesa de 5 milhões de libras para a carga inicial unitária, renovável de 3 a 5 anos, mas com tendência cadente de custo à medida que se forem criando "economias de escala" devidas ao próprio desenvolvimento do programa. Por outro lado, certa quantidade de plutônio 239 será produzida juntamente com a força elétrica. Esse plutônio, que equivale ao urânio 235 como carga fissil, pode ser extraído das escórias da cisão por uma fração do custo da difusão do urânio 235 a partir do urânio natural. Assim sendo, é de presumir-se que, à medida que o programa prossiga na sua realização, certa disponibilidade de plutônio se vá acumulando (*plutonium credit*), para emprêgo como "enriquecimento" fissil das cargas posteriores nos reatores térmicos ou de cargas de elevada concentração isotópica fissil a serem empregadas nos reatores rápidos e intermediários, ou para o início do sistema de reação baseado no tório. Esse conjunto de circunstâncias e o seu desenvolvimento no tempo farão com que o combustível, cujo preço no início do programa é elevado, desça gradativamente a custos mais reduzidos, na dependência apenas das condições de oferta e procura no mercado internacional.

Assim sendo, o problema no momento se circunscreve à determinação de um preço arbitrário para o plutônio a ser produzido nos reatores térmicos situados nas primeiras fases do programa. Se esse preço for estabelecido em nível relativamente alto, o custo líquido da produção da

eletricidade nesses reatores será reduzido, mas, em compensação, o preço da eletricidade produzida pelos reatores secundários, construídos nas fases posteriores do programa, será mais ou menos crescente em função da sua produtividade térmica. Certos limites, entretanto, podem ser desde já calculados, para determinar os valores máximo e mínimo do preço do plutônio 239 produzido nas fases iniciais do programa: o limite máximo será 140 vezes mais elevado do que o preço do urânio natural, de vez que o plutônio poderá ser, na pior das hipóteses, empregado para substituir o teor de 0,7 de 1 por cento de urânio 235 existente no urânio natural, e o limite mínimo será determinado pelo custo de difusão do urânio 235 a partir do urânio natural. O valor médio entre esses dois limites situaria o preço do plutônio 239 puro a US\$ 20.000.00 ou £7.143 por quilo, preço esse que seria cadente, no seu valor médio, em longo prazo. Se essas premissas se verificarem, o custo da produção termelétrica nuclear equiparar-se-á ao custo de produção da eletricidade em usinas termelétricas a carvão, na Grã-Bretanha, isto é, cerca de 0,66 do penny por quilowatt-hora, ou seja cerca de US\$ 0,0077, ou, ainda, 7,7 milésimos (mills) do dólar americano por kWh, *mas apenas na hipótese de que os demais custos fixos e variáveis se tornem equiparados nas usinas nucleares e usuais*. Claro está que, se a produção do plutônio não for levada em consideração, o preço do quilowatt-hora, produzido em igualdade das demais condições nas estações termelétricas nucleares, não poderá competir com o produzido nas usinas termelétricas tradicionais, a carvão ou a óleo diesel.

Esta estimativa considera a tendência cadente do preço do plutônio como uma realidade futura e se baseia na presunção de que todo o plutônio 239 produzido nas usinas termelétricas nucleares seja empregado para fins pacíficos e não para fins militares, o que abstrai uma possível subvenção governamental para sua produção, com diminuição proporcional dos custos da energia elétrica. Note-se, ainda e mais uma vez, que a estimativa calculada pelo governo britânico não só indica a probabilidade de forte subsídio à produção de plutônio, como também leva em conta a interdependência de custos de produção entre as várias unidades, principais e ancilares, do sistema de produção termelétrica nuclear a instalar-se neste país. Esses custos serão reduzidos, evidentemente, pelo aproveitamento comum de certas facilidades a que tenham acesso todas as unidades do sistema. Assim, por exemplo, o uso conjunto dos mesmos centros de preparo químico e metalúrgico do material fissil e fértil acarretará reduções de custo, se essas reduções eventualmente não forem anuladas pelo aumento do custo de transporte do material radioativo na rede de distribuição entre unidades produtoras e consumidoras. Por outro lado, o aproveitamento conjunto de centros de pesquisa, bem como as "economias externas de operação" ocasionadas pela relativa inelasticidade do investimento capital por quilowatt em termos do volume do reator, produzirão indubitavelmente reduções de custo de produção de

eletricidade, que não serão anuladas por outra variável econômica do sistema total.

ANÁLISE DE CUSTOS DA PRODUÇÃO TERMELÉTRICA NUCLEAR. A título ilustrativo e para que se possa iniciar a análise dos custos de produção da energia termelétrica nuclear independentemente de qualquer estrutura específica de custos a ser atingida futuramente, considere-se a estrutura provável das estações compreendidas na parte final da terceira fase do programa de reatores estabelecido pelo governo britânico.

Suponha-se, por exemplo, que a estação típica, produtora de força elétrica nuclear e reprodutora do material fissil consumido, em bases comerciais, cujos custos de instalação e operação se pretende calcular, seja constituída, apenas, de um reator secundário, moderado a grafita, cujo meio de resfriamento e transmissão de calor seja o sódio líquido, circulado sob pressão. Suponha-se, ainda, que o reator seja alimentado a urânio "enriquecido" à taxa de concentração de 5 por cento do isótopo fissil, seja ele o urânio 235 separado pelo processo normal de difusão, seja o plutônio 239 produzido nesse mesmo reator secundário ou em qualquer das estações primárias, cuja instalação é prevista na primeira e segunda fases do programa de reatores acima descrito. Suponha-se, também, que essa estação termelétrica nuclear típica possua uma carga instalada de 125.000 kW, bem como um fator de carga de 80 por cento e uma eficiência térmica de 50 por cento, e que, assim, a sua produção anual de energia elétrica seja $24.365.080,5.125.10^3 = 438$ milhões de quilowatts-hora.

Aplicando-se a fórmula (5), obtém-se um volume total da carga fissil e fértil de urânio "enriquecido" na concentração indicada igual a 5.574 quilos, dos quais 5 por cento, ou aproximadamente 279 quilos, correspondem à carga inicial de urânio 235. Suponha-se que essa carga inicial total, fissil e fértil, de 5.574 quilos seja totalmente renovada de 4 em 4 anos, e que, nesse reator, o fator de conversão seja igual à unidade, isto é, que ao fim de cada quadriênio tenha sido produzida uma quantidade de plutônio 239 igual à quantidade de urânio 235 consumida durante o período, e, finalmente, que a vida ativa do reator seja de 10 anos à taxa de depreciação de 10 por cento por ano. Com base nesses dados hipotéticos, mas razoáveis, e tomando-se o preço da tonelada métrica de urânio "enriquecido" a 5 por cento de concentração como sendo de 890 mil libras, verifica-se que a carga inicial dêsse reator típico, que é de cerca de 5,6 toneladas de urânio "enriquecido", orçará em cerca de 5 milhões de libras. Na hipótese de que essa carga inicial se renove continuamente no seu teor fissil durante os dez anos de vida ativa do reator e que o preço do quilo de plutônio 239 se mantenha ao nível de 7 mil libras, o custo médio líquido anual do combustível nessa estação será $(5.10^5) - (7.10^3.239/4)$, ou, aproximadamente, 80 mil libras.

Com esses dados básicos, já se poderá calcular o custo hipotético de instalação e operação dessa estação típica.

O custo do capital investido

	£
no reator	7.500.000
no equipamento químico e metalúrgico	3.125.000
na caldeira e turbina	1.250.000
no gerador e "switchgear"	3.750.000

montaria, no total, a £15.625.000, do que resultaria um custo do capital por quilowatt instalado de £125 ou US\$ 350. Os custos médios anuais de operação se subdividem comumente em variáveis e fixos.

Os custos variáveis médios anuais

	£
do combustível	80.000
da mão-de-obra especializada	150.000
da manutenção e conservação	150.000
de materiais diversos	50.000

ascenderiam ao total de £430.000, e os custos *fixos médios anuais*

	£
de juros compostos a 3 % a.a.	340.000
de fundo de depreciação a 3 % a.a.:	
a) do reator e caldeira a 10 % a.a.	500.000
b) do equipamento ancilar a 6 % a.a. ..	116.000
c) da turbina e gerador a 4 % a.a.	92.000
de seguro social e taxas diversas	90.000

somariam £1.138.000. Os custos totais anuais de operação seriam, portanto,

custos variáveis	430.000
custos fixos	1.138.000

de £1.568.000, e os custos totais de operação por kWh ascenderiam a 0,00359 da libra esterlina, ou seja, 0,86 do penny, o que é igual a cêrca de US\$ 0,01 ou 10 milésimos do dolar, isto é, 10 mills.

O custo, por quilowatt-hora, da eletricidade gerada, atualmente, na Grã-Bretanha, por uma usina moderna, termelétrica, a carvão, que funcione com um fator de carga de 80 por cento e uma eficiência térmica de 30 por cento, é de cêrca de 0,66 do penny por kWh. Com efeito, após o recente aumento de 15 por cento no preço do carvão, o custo desse combustível elevou-se de 0,38 do penny por kWh a 0,44, o que, adicionado ao total unitário dos custos de operação, inclusive juros e depreciação, que as autoridades britânicas estimam em 0,22 do penny por kWh, perfaz o preço unitário acima mencionado. Da comparação dos dois custos, isto é, de 0,86 e 0,66 do penny por kWh, para as estações termelétricas nucleares e a carvão, respectivamente, verifica-se que, mesmo para as estações compreendidas na terceira fase do programa de reatores estabelecido pelo governo britânico, a produção termelétrica nuclear não poderá competir com a termelétrica a carvão em centrais modernas,

a menos que o governo britânico subsidie aquela produção pela aquisição do plutônio 239 a preço bem mais elevado do que o de 1 mil libras por quilo, tomado como base na estimativa acima levantada. Não resta dúvida que é essa a intenção do governo inglês em face do que consta de vários trechos da publicação acima citada, *A Programme of Nuclear Power*, quando se refere ao custo antecipado do quilowatt-hora a ser produzido nas estações termelétricas nucleares comerciais, previstas no referido programa, e ao fato de ter a *Atomic Energy Authority* concordado em pagar à *Central Electricity Authority* "several thousands of pounds" por libra-peso do plutônio 239 a ser produzido pelas estações termelétricas nucleares projetadas. Evidentemente, tal decisão é uma consequência do custo crescente do carvão produzido no país, bem como pelo gravame sobre o balanço de pagamentos da Grã-Bretanha decorrente da importação de carvão da área do dólar, óbices esses aliados, por outro lado, a um potencial hidrelétrico praticamente nulo e a uma procura de eletricidade que cresce em elevada taxa anual.

Abstraindo-se, porém, da análise aqui tentada, essas condições peculiares à economia britânica, que tornam imprescindível o aludido subsídio, poder-se-á especular sobre a possibilidade e os meios de redução a serem obtidas no preço do quilowatt instalado, relativamente à capacidade das futuras centrais elétricas nucleares que funcionem com um só reator térmico, moderado a grafita e resfriado a gás ou a líquido. Para tanto, suponha-se que o preço do plutônio 239, que consta ser de cerca de US\$ 20 por grama ou US\$ 20.000 por quilo, nos Estados Unidos da América, decresça, no mercado internacional, no decurso dos próximos vinte anos, por efeito dos estoques dêsse produto acumulado naquele país e pelo relaxamento da tensão política internacional, o que poderá levar o governo norte-americano a oferecer plutônio 239 a países que dêle necessitem, por uma fração de seus custos reais de produção. Suponha-se, ainda, que certas "economias externas de operação" sejam técnica e economicamente viáveis no que concerne ao custo dos equipamentos e das instalações ancilares, químicas e metalúrgicas. Quanto ao custo do reator, acima estimado em 7,5 milhões de libras para a capacidade de 125.000 kW, poderá êsse ser reduzido, seja pela adoção de reatores térmicos moderados a "água pesada", seja pelo desenvolvimento tecnológico e consequente comercialização de reatores rápidos.

O gráfico anexo apresenta diagramaticamente os vários investimentos de capital, por quilowatt instalado, no reator e no equipamento químico e metalúrgico, adicionais ao custo do investimento dos demais bens na caldeira, turbina, gerador, "switchgear", etc. Na origem do eixo horizontal, os custos do investimento coincidem com o custo por quilowatt-hora, a ser obtido, ao longo da escala de 125.000 a 500.000 kW de capacidade instalada, seja nas estações elétricas nucleares, seja nas termelétricas tradicionais. As curvas que correlacionam os dois eixos verticais em relação ao eixo horizontal descrevem as reduções prováveis, para o mesmo fator de carga de 80 por cento, a serem obtidas nas estações termelétricas nucleares em que, de acordo com a capacidade insta-

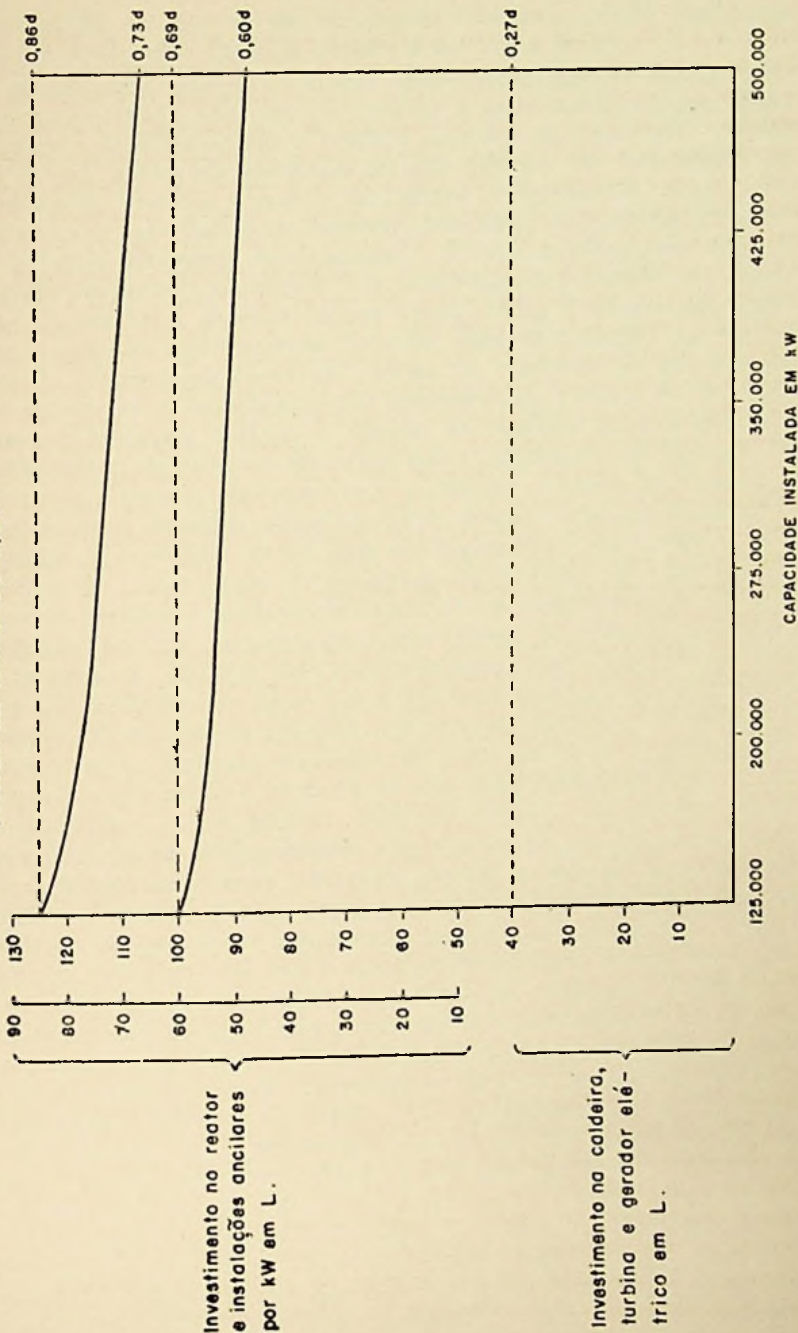
lada, a produtividade térmica aumente acima de 50 por cento, o fator de conversão de urânio 238 em plutônio 239 se eleve acima da unidade, o custo do reator e do equipamento ancilar decresça, o volume do reator diminua assim como a taxa de depreciação e a operação e manutenção do mesmo sejam simplificadas. Dêsse modo, o mesmo estágio tecnológico que, em uma estação de 125.000 kW de capacidade, produza energia a 0,86 do penny ou 10 mills (US\$ 0,01) por kW, produzirá, em uma estação de 500.000 kW, energia elétrica a 0,73 do penny ou 8,5 mills (US\$ 0,0085). Por outro lado, o estágio tecnológico, que traga a produção da energia elétrica a 0,6 do penny ou 7 mills (US\$ 0,007), ao nível de capacidade de 500.000 kW, terá de produzir eletricidade a 0,69 do penny ou 8 mills (US\$ 0,008) ao nível de 125.000 kW. Na ausência de subsídio governamental é necessário haver uma redução de £25 por quilowatt instalado, ao nível de 125.000 kW, para que a produção da energia termelétrica nuclear possa competir com a energia termelétrica a carvão. Note-se que, caso haja subsídio na compra de plutônio 239, tal subvenção à produção da força elétrica nuclear terá de ser igual a £25 por quilowatt instalado, ao nível tecnológico relativo à capacidade de 125.000 kW, ou seja, £3.125.000, e que implica em aumento do preço do quilo de plutônio 239 de cerca de 7 mil para 52 mil libras.

As reduções já são tecnicamente possíveis, desde que, por exemplo, a grafita venha a ser substituída, em futuro próximo, pela "água pesada", que será, então, empregada como moderador, resfriador, refletor e transmissor de energia calorífica, em reator térmico, dotado de fator de conversão maior que a unidade e alimentado a urânio fortemente "enriquecido". A simplicidade de construção e operação dêsse tipo de reator compensaria, em reduções substanciais do capital invertido, o custo relativamente elevado da "água pesada", que é atualmente importada, na Grã-Bretanha, da firma norueguesa Norsk-Hydro, ao preço aproximado de £98 por galão ou £22 por litro.

Como se mencionou acima, um reator dêsse tipo, o E443, já se acha em funcionamento em Harwell. As suas características técnicas são as seguintes: combustível — urânio "enriquecido"; fluxo de neutrons — 10^{14} centímetros cúbicos por segundo; construção — semelhante ao de Argonne, nos Estados Unidos da América; "água pesada" — empregada como moderador, resfriador e refletor, havendo, porém, um extra-refletor de grafita; barras de controle — de seção retangular. O reator é abrigado em um galpão cilíndrico de 21 metros de altura e de diâmetro, de teto abobadado. Além do E443, existe em Harwell o DIMPLE, que é semelhante ao ZEEP de Chalk River, no Canadá. As suas características técnicas são as seguintes: o reator consiste em um tanque de alumínio, circundado por um refletor de grafita, no qual são suspensos os invólucros de carga composta de urânio "enriquecido", bem como as barras de controle e segurança; a sua energia é praticamente nula (zero energy reactor) a cerca de 5 watts; não possui aparelho de resfriamento

Capacidade das centrais termonucleares e custo do kWh em dinheiros

(FATOR DE CARGA DE 0,8)



c é circundado do mínimo de blindagem biológica, sendo facilmente adaptável a moderador de água destilada ou "água leve".

A grande economia da produção termelétrica nuclear parece, portanto, estar reservada aos reatores rápidos e intermediários, que sejam reprodutivos a taxa maior que a unidade de fator de conversão. Nesse tipo de reator, a elevada eficiência térmica provém da inexistência de moderador e do pequeno tamanho da câmara de combustão, que se calcula em cerca de meio metro de diâmetro, bem como do emprêgo de combustíveis fisséis altamente concentrados. A sua desvantagem é a de que o problema do resfriamento e o da transferência à caldeira de elevadíssimas temperaturas geradas na sua massa crítica e dentro de superfície de irradiação relativamente pequena limitam a opção quanto ao material do reator, bem como do sistema de condução de calor e do metal a ser usado na manufatura dos invólucros de carga. As soluções tecnicamente possíveis indicam a adoção de reatores homogêneos, ou, alternativamente, de sistemas de carga que independam do emprêgo de invólucros de alumínio, mas que usem o zircônio, o berilo ou outro material refratário a elevadas temperaturas de reação ou pouco absorvedor de neutrons, o qual seria, então, aplicado diretamente em demãos sobre a superfície da massa fissil. O problema da captação do calor gerado nos reatores rápidos é fundamental, visto que a temperatura da câmara de combustão tende a aumentar em razão inversa do volume do reator. O resfriamento a gás tem sido experimentado, com algum êxito, nos reatores intermediários, ao passo que a liga líquêfeita de sódio e potássio, sob pressão, já vem sendo aplicada nos reatores rápidos. O meio resfriador, gasoso ou líquido, circularia por meio de bomba eletromagnética, cujo funcionamento é baseado na alta condutibilidade elétrica dos metais líquêfeitos. Tais bombas, segundo consta, não contêm partes móveis e poderão ser eventualmente empregadas no circuito entre a caldeira e o condensador, com vantagens técnicas e redução de custos de fabricação. Acontece, porém, que esses metais líquêfeitos são facilmente oxidáveis ao contato do ar que penetre no sistema circulatório. Experiências têm sido efetuadas com o emprêgo de mercúrio, sendo desconhecidos os resultados. Outros problemas sérios na construção de reatores rápidos são, ainda, os seguintes: a corrosão dos invólucros de carga pelo meio resfriador e transmissor térmico; o do material adequado à fabricação da câmara de pressão (pressure vessel) do sistema circulatório; o da separação automática do urânio 233 e do plutônio 239 das escórias da cisão, bem como o da recuperação do urânio 235 não consumido no decurso da passagem da carga fissil e fértil pelo reator; e, finalmente, o da neutralização radioativa dos rejeitos de cisão e o da manutenção da reação em cadeia durante a vida do reator, devido ao acúmulo de escórias absorvedoras de neutrons. Todos esses problemas técnicos, ainda não solucionados, contribuem para que não seja possível estimar-se, no presente momento, mesmo com larga margem de erro, o custo provável desses reatores rápidos e intermediários.

Justamente com o objetivo de pesquisar essas condições econômicas da produção da energia elétrica nuclear em reatores rápidos, o governo britânico iniciou a instalação em Dounreay, na Escócia, de um protótipo construído à semelhança do reator experimental ZEPHYR, em operação em Harwell. As especificações desse reator rápido, ao que consta, são as seguintes: as cargas de plutônio 239, para a produção da energia elétrica, são seladas, em invólucros metálicos, juntamente com a carga de urânio natural destinada à reprodução do material fissil; a câmara de combustão é de forma cilíndrica, de 15 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura; a potência é apenas de 5 watts, não necessitando, por isso, de sistema resfriador ou de blindagem biológica; as barras de controle são substituídas por um refletor de urânio natural, que envolve o reator como uma capa e é destacável, em segmentos, para dar passagem livre aos neutrons que se evadam por sua superfície e cujo número é regulado pela quantidade de neutrons ativos, a cada instante, necessária à manutenção da reação em nível estacionário; as barras de segurança são substituídas por um aparelho de pressão que, em caso de emergência, faz desprender a superfície inferior do reator cilíndrico, liberando da massa fissil o número de neutrons necessário à extinção instantânea do reator. Não existe, porém, informação sobre o custo desse reator rápido, caso seu tipo seja futuramente comercializado.

Notícias provenientes dos Estados Unidos da América dão como possível a construção de um reator baseado em princípio completamente oposto ao que vem sendo objeto do presente estudo, isto é, com fundamentos na fusão de núcleos, em vez da sua cisão, fusão essa já obtida na chamada "bomba de hidrogênio". A reação de cisão em cadeia denominar-se-ia, nesse caso, *fusão controlada* (controlled fusion). Essa fusão nuclear controlada já teria sido conseguida na União Soviética pelo físico M. O. Meshchiryakov e estaria sendo ativamente pesquisada na Grã-Bretanha e nos Estados Unidos da América, em grande segredo. Sabe-se que, na "bomba de hidrogênio", certos núcleos de elementos leves, como o hidrogênio e o lítio, se fundem em núcleos de hélio sob a ação do intenso calor gerado pela cisão do urânio 235. Nas usinas *termonucleares*, em que eventualmente se empregue esse processo, o detonador seria substituído por um *aparelho de arranque* (starter) de operação retardada e baseado na incidência de um feixe de elétrons, produzido por um *acelerador linear* (linear accelerator), sobre um alvo nuclear de milésimo de milímetro quadrado, constituído de uma liga isotópica de lítio e deutério. A fusão, uma vez iniciada, perpetuar-se-ia em cadeia estacionária ou seria mantida nesse nível por uma série de estímulos contínuos ou intermitentes. O controle da reação seria conseguido por um processo tal que interrompesse a fusão nuclear periodicamente em um volume infinitesimal de massa fungível. Presume-se que as vantagens do processo em relação ao baseado na cisão nuclear seriam as seguintes: os combustíveis, hidrogênio e lítio, são muitíssimo menos dispendiosos do que o urânio natural ou "enriquecido" ou o plutônio 239; não haveria

escórias da cisão e, portanto, não seria necessário qualquer equipamento de segurança no seu manuseio; a blindagem biológica seria mínima, o que possibilitaria o emprêgo desse reator em veículos de pequeno porte. Menciona-se esse tipo de reator, a esta altura do presente estudo, tão somente para evidenciar que não pode ainda ser feita qualquer previsão sobre o futuro econômico da energia atômica. De tal forma é rápida a evolução tecnológica neste campo que é bem possível já estarem teoricamente obsoletos os reatores de urânio ainda não instalados.

CONSEQUÊNCIAS ECONÔMICAS DA ENERGIA ELÉTRICA NUCLEAR. A comercialização da energia elétrica nuclear acarretará, necessariamente, consequências econômicas, quantitativas e qualitativas, cujo aspecto e intensidade de manifestação variarão, certamente, de acordo com o tipo da economia nacional do país onde se aplique essa nova fonte de energia. Relegando para a Parte III do presente estudo a pesquisa dessas consequências no âmbito de uma economia em processo de desenvolvimento, como a brasileira, tenta-se, agora, nesta seção final da Parte II, analisar os resultados prováveis da aplicação da energia termelétrica nuclear sobre o *nível do produto nacional* do país inovador, bem como sobre a *localização da atividade industrial* no país afetado pela inovação.

Na suposição de que os custos de produção da energia termelétrica nuclear se reduzam, por fim, ao nível dos da eletricidade obtida pelos processos usuais e que tal redução não seja ocasionada por subsídio governamental, direto ou indireto, mas que resulte exclusivamente do progresso tecnológico, admite-se que a consequência direta da substituição das fontes de energia elétrica usuais pela termelétrica nuclear seja a liberação de uma parcela dos fatores de produção anteriormente empregados na geração de eletricidade por processos costumeiros, permitindo a sua aplicação a outras atividades, cujo resultado seria, então, um aumento líquido do produto nacional. A aplicação da energia nuclear na produção de energia elétrica daria margem a poupanças, internas e externas, sob forma de recursos naturais, capital e mão-de-obra, existentes no país ou importados, os quais, liberados, pela utilização da energia nuclear, das suas aplicações na produção de eletricidade por processos normais, e empregados em outras atividades produtivas, proporcionariam o incremento da produção nacional decorrente dessa causa. Tal seria, presumivelmente, o efeito direto dessa inovação na produção de eletricidade.

Em termos monetários deflacionados, isto é, em termos reais, a extensão desse efeito, medida pelo volume das poupanças dele provenientes, dependerá do volume de fatores de produção liberados para emprêgo em outras atividades produtivas, o que, por sua vez, depende das "economias" em recursos naturais, capital e trabalho, que a aplicação comercial da energia termelétrica nuclear realize relativamente ao volume total desses fatores de produção, internos e externos, aplicados à produção da eletricidade por processos usuais, térmicos e hidráulicos. Essas economias de fatores de produção só se verificarão, entretanto, caso o custo de produção de energia elétrica por processo nuclear caia a nível inferior

ao do custo da produção da eletricidade pela energia hidráulica ou térmica proveniente de combustíveis químicos, líquidos e sólidos. Assim, por exemplo, caso se verifique essa redução de custos e, conseqüentemente, certa fração da energia elétrica total consumida passe a ser suprida por processo nuclear, daí resultando a liberação de fatores para outros empregos que acarretem aumento líquido do produto nacional, o efeito direto da aplicação comercial da energia nuclear será tanto maior quanto mais baixo desça o custo de produção da energia termelétrica nuclear em relação aos custos da produção da eletricidade por processos usuais, e quanto maior for a margem de substituição das fontes comuns de energia elétrica pela de energia nuclear.

Esse efeito direto da comercialização da energia termelétrica nuclear não parece, infelizmente, substancial. Suponha-se, a título ilustrativo do raciocínio que conduz a esta conclusão, que certa economia nacional realize 100 unidades monetárias, anualmente, em seu produto ou renda nacionais. Admita-se que, sendo essa economia nacional industrializada, 10 por cento por ano da sua renda ou produto sejam provenientes da venda ou da compra de energia elétrica. Suponha-se, ainda, que, em regime do pleno emprego de fatores, a redução do custo da energia elétrica nuclear em relação ao da eletricidade produzida por processos costumeiros seja de 20 por cento e que essa redução, para a mesma produção de energia elétrica total, resulte em 30 por cento de substituição de fontes costumeiras de produção de energia elétrica pela fonte de energia nuclear. Neste exemplo, o aumento líquido do produto nacional, conseqüente à aplicação parcial da energia nuclear como fonte de força elétrica, seria de $0.1 \cdot 0.3 \cdot 0.2 = 0.006$ ou 0.6 de 1 por cento. Note-se que este resultado seria obtido em uma economia já industrializada, com elevada taxa de consumo de energia elétrica, e na hipótese pouco provável, pelo menos em futuro próximo, de uma redução de custo da energia termelétrica nuclear, sem subsídio, abaixo do custo de produção da energia pelos processos usuais.

Muito mais importantes serão, provavelmente, os efeitos indiretos da aplicação da energia nuclear na produção da eletricidade. Tais efeitos indiretos poderão proporcionar aumento do consumo de energia elétrica, em desenvolvimento de técnicas de produção menos dispendiosas estimuladas pela maior disponibilidade de energia a menores custos unitários, ou descoberta de novos processos de produção em que a taxa marginal de substituição da energia elétrica pelo capital, fixo ou circulante, e pela mão-de-obra seja elevada, o que de qualquer forma resultaria em aumento substancial do produto nacional a longo prazo. O exame analítico dessas conseqüências indiretas, que poderia ser efetuado pelo emprego do método programático ("input-output"), não só transcende os limites do presente estudo como seria, até certo ponto, puramente acadêmico, em virtude de não se poder prever precisamente quando e até que ponto os custos da produção termelétrica nuclear poderão vantajosamente competir com os da produção da eletricidade por processos costumeiros.

A pesquisa dos efeitos econômicos da energia elétrica nuclear sobre a localização industrial poderá ser efetuada de modo geral e pelo exame da situação de certas indústrias específicas, como a do vidro, do cimento, do ferro e do aço e do alumínio.

Históricamente, o primeiro fator de concentração da atividade em determinados locais foi a existência, nos mesmos, de alimentos ou da possibilidade de produzi-los, para o sustento da energia muscular, humana e animal. O segundo fator, em ordem cronológica, foi a possibilidade de aproveitamento da energia hidráulica disponível em certas localidades. A descoberta da máquina a vapor e da possibilidade técnica de aplicação da energia térmica produzida pelo carvão e a lenha alargou a área da produção econômica pelo aproveitamento da energia mecânica até os limites de transporte do combustível. A localização ótima da atividade econômica tornou-se, assim, o lugar geométrico dos pontos de contato das menores distâncias aos mercados, às fontes de energia, às facilidades de transporte e ao acesso à mão-de-obra. Nessas condições, a teoria econômica da localização industrial poderá ser facilmente resumida. Supondo-se a inexistência de decisões não racionais ou extra-econômicas na localização de determinada indústria, isto é, admitindo-se que todas as informações pertinentes, técnicas e econômicas, possam ser obtidas e aproveitadas, que não haja decisões por irreflexão, hábito ou inércia, que não haja interferência de forças políticas, motivos éticos ou imperativos sociais, mas que apenas as condições econômicas do projeto sejam levadas em conta, nesse caso os fatores principais da localização de qualquer indústria serão os custos de transporte para o mercado e das fontes de matéria-prima, o custo da mão-de-obra, a disponibilidade de energia mecânica em qualquer das suas formas, as diferenças entre locais em face do pagamento de impostos e taxas, de juros, de aluguéis de recursos naturais, de salários e da mão-de-obra especializada.

A construção de uma central termelétrica nuclear baseada em razões econômicas e não em motivos de prestígio nacional ou outros da mesma natureza extra-econômica está sujeita a esse conjunto de fatores e, como fonte de energia, deve ser considerada ao decidir-se a instalação de indústrias na sua área de influência. Há, portanto, um círculo vicioso nesse problema: é necessário haver mercado para que a usina se instale e o mercado só se cria com essa instalação. Rompido, porém, o círculo vicioso inicial, a construção e a instalação efetivas de uma usina dessa espécie dependem, em primeiro lugar, da disponibilidade de capitais, internos e externos, sob forma de equipamento de elevado valor tecnológico. Em segundo lugar, da possibilidade de obtenção do combustível físsil e de matéria fértil, seja na economia interna ou por via de importação, em troca de exportações, ou cedido a título de quase-donativo por países que se interessem em garantir e expandir um mercado externo, futuro, que absorva a sua capacidade de produção de reatores. Em terceiro lugar, dos materiais de construção necessários, das facilidades de montagem, reparo e conservação desse equipamento nuclear, bem como dos custos de tratamento do material físsil e fértil produzido pela

reação em cadeia. Finalmente, das "economias externas de operação" das estações termelétricas nucleares, que tendam a reduzir o custo do quilowatt-hora produzido por centrais de alta capacidade e servidas por uma série de equipamentos ancilares usados indiscriminadamente por todo o sistema. Em vista do número e da influência diversa desses fatores em quadros econômicos diferentes é muito pouco provável que a energia termelétrica nuclear consiga nivelar os preços da eletricidade em vários países a um padrão uniforme, como erroneamente se costuma supor; que, por outro lado, a energia termelétrica nuclear venha a substituir completamente as fontes costumeiras de eletricidade, hidráulicas ou térmicas, sendo bem mais provável que as substitua, parcial e gradualmente, nos países industrializados e relativamente às fontes de energia ineficientes no que tange ao custo do quilowatt-hora. Além disso, é preciso ter em vista que a produção de energia elétrica é orientada pela procura e, portanto, instalada onde já houver capacidade para absorvê-la, não sendo a existência de recursos naturais, nucleares ou não, suficiente para criá-la. Assim, conseqüentemente, é necessário haver uma decisão governamental, seguida ou não de subsídio, direto ou indireto, para a instalação das primeiras centrais termelétricas nucleares, tanto em países industrializados quanto em economias nacionais subdesenvolvidas.

Claro está que, se, por fim, a energia termelétrica nuclear decrescer a níveis de custo inferiores aos das fontes usuais de produção de energia elétrica, a sua simples instalação será suficiente para atrair para a sua órbita de suprimento a custos reduzidos várias indústrias consumidoras de energia elétrica. Entretanto, mesmo nessa regra geral, será necessário ter-se em vista que uma queda de custos da energia elétrica poderá ressaltar e tornar preponderantes, na escolha da localização, outros fatores anteriormente reprimidos pelo custo elevado da eletricidade, caso em que a aplicação econômica da energia nuclear favoreceria a dispersão industrial em vez da sua concentração. Em geral, a concentração industrial é incentivada pela existência de um conjunto de facilidades de tratamento e de transporte, que não raro se associam a uma escala dilatada de operações de indústrias da mesma espécie ou de espécies diferentes, mas complementares. Por outro lado, outras forças localizadoras permaneceriam atuantes no sentido de desviar para a periferia a concentração industrial, tais como aluguéis mais elevados nos centros de atividade econômica intensa, o esgotamento das fontes locais de matérias-primas e da capacidade consumidora do mercado regional, a elevação dos custos de transporte e, finalmente, o congestionamento do tráfego rodô e ferroviário. Em compensação, não será surpresa se os efeitos históricos da inovação da máquina a vapor sobre a concentração da atividade econômica nas proximidades de centros agrícolas e pecuários se fizerem sentir ainda mais fortemente com o advento da energia nuclear abundante, barata e de alta mobilidade, principalmente se os reatores rápidos e de pequeno porte se desenvolverem tecnologicamente a ponto de se tornarem comercializáveis em futuro não muito distante. A possi-

bilidade de transporte de tal fonte de energia nuclear, poderosa, compacta, que, praticamente, independe da disponibilidade estocada de elevada quantidade de combustível, a regiões rurais de baixa produtividade da mão-de-obra, acarretaria, sem dúvida, o desenvolvimento da região pela melhor utilização da sua força de trabalho seguido do incremento na taxa de produção unitária.

Como se verifica, o número das variáveis a serem levadas em consideração na análise dos efeitos possíveis da energia elétrica nuclear sobre a localização das atividades industriais e agrícolas é tão elevado e suas resultantes tão contraditórias, que qualquer conclusão sobre o assunto não poderá ser senão especulativa e conjetural. De qualquer forma, é razoável supor-se que as eventuais reduções no custo da energia elétrica nuclear não sejam de molde a anular outras forças determinantes da localização das atividades econômicas.

A ENERGIA ELÉTRICA NUCLEAR E A LOCALIZAÇÃO DE INDÚSTRIAS ESPECÍFICAS. Naturalmente, as indústrias cuja localização será mais afetada pelo advento da energia elétrica nuclear são as que mais fortemente se orientam em direção às fontes de energia elétrica, hidráulica ou térmica. Nesse particular, as diferenças de custo, mais do que o seu nível absoluto, são o fator determinante dessa orientação. Considere-se, por exemplo, a indústria do gelo, que serve de qualificação à regra geral. Havendo diferenças nos custos do combustível e da energia elétrica nas várias localidades e sabendo-se que essa indústria é das que mais consomem eletricidade por unidade de produto, a regra geral indicaria que a indústria do gelo se deveria localizar próximo às fontes de energia. Entretanto, tal não se verifica na realidade. Em virtude dos elevados custos de transporte do gelo, a sua fabricação se orienta em direção aos mercados. Nessas condições e na hipótese de que, de futuro, a produção da energia elétrica nuclear seja de custos bastante reduzidos para anular as diferenças que ora se verificam no custo da energia, é de presumir-se que a localização da indústria do gelo não seja afetada pela inovação.

Com base nestas considerações, as atividades industriais, que sejam consumidoras substanciais de energia elétrica, podem ser divididas nos quatro grupos seguintes: a) as que, embora consumidoras de energia elétrica, tendem a localizar-se próximo dos respectivos mercados, como a indústria do gelo e a do pão, ou se orientam para as proximidades das fontes de matéria-prima, como as de preparo preliminar dos minérios de cobre e de ferro; é de crer que a localização dessas indústrias não seria afetada pela comercialização da energia elétrica nuclear; b) as que, sendo altamente consumidoras de energia e estando sujeitas a outros fatores igualmente preponderantes, tendem em parte a obedecer à influência da fonte da energia elétrica, mas na maior parte ainda se orientam em direção aos mercados de consumo ou pela proximidade das fontes de matérias-primas, como a indústria do papel, do cimento e do gás de iluminação: a inovação da energia elétrica nuclear teria certa influência, embora não muito pronunciada, na localização dessas atividades indus-

triais; c) as que, obedientes à atração primordial da localização da fonte de energia elétrica, não deixam de atender, de certo modo, às condições de localização dos mercados e das matérias-primas, como a indústria de cerâmica e de manufaturas de vidro e cristais, bem como, desde meados do século passado, a indústria siderúrgica e de aços especiais; e, finalmente, d) as que se orientam exclusivamente em direção à fonte de energia elétrica, como as indústrias manufatureiras de produtos do carbono, como a do papel carbono, o "negro de fumo", etc., além da do alumínio e outras, baseadas em processos eletrolíticos. Com relação a estes dois últimos grupos de indústrias, mas principalmente às do quarto grupo, é razoável supor-se que a inovação comercial da energia nuclear como fonte de eletricidade exerça sobre a localização dessas atividades uma influência tanto mais preponderante quanto mais os custos da produção termelétrica nuclear possam competir com os da produção da eletricidade por processos costumeiros e quanto mais a sua aglomeração regional tenda a esgotar o potencial hidrelétrico local. Por outro lado, não resta dúvida que, independentemente dos futuros custos da produção termelétrica nuclear, o esgotamento do potencial hidrelétrico e dos recursos externos para a compra de combustíveis serão fatores preponderantes na localização de indústrias eletrogenéticas junto às usinas termelétricas nucleares. Note-se, ainda, a mobilidade de localização dessas estações relativamente às usinas hidrelétricas, o que permite sejam as mesmas instaladas nas proximidades dos mercados consumidores ou na vizinhança das fontes de matéria-prima, redundando, conforme o caso, em economias nas despesas de transporte, quer do produto acabado quer das matérias-primas.

Infelizmente, não é possível empreender-se aqui, sem prolongar além do razoável os limites do presente estudo, a pesquisa pormenorizada da localização de certas indústrias, como a do vidro plano, a do cimento, a do alumínio e a siderúrgica, sob o impacto do advento da energia termelétrica nuclear. Para os que se interessam por esse aspecto da aplicação comercial da energia termelétrica nuclear já existem, publicados, vários estudos, entre os quais sobressai a pesquisa elaborada por Walter Isard e Vincent Whitney, intitulada *Atomic Power, An Economic and Social Analysis* (The Blakiston Company, Country Life Press, Garden City, New York, 1952).

PARTE III

A TERMELETRICIDADE NUCLEAR NA ECONOMIA BRASILEIRA

FATÔRES ECONÔMICOS NO APROVEITAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA NUCLEAR. A fim de se poder analisar sistematicamente alguns dos possíveis efeitos da aplicação da termelétricidade nuclear na economia brasileira, devem ser admitidas como válidas as seguintes premissas: o desenvolvimento econômico brasileiro baseia-se na industrialização das atividades urbanas e na mecanização das atividades rurais; a disponibilidade de energia, em geral, e da energia elétrica, em particular, é condição necessária para a industrialização; e, a energia termelétrica nuclear, em virtude do progresso tecnológico na construção de reatores, tornar-se-á, de futuro, universalmente disponível a baixos custos.

Sabe-se que a economia brasileira se caracteriza pelo fato de ser primordialmente rural, uma vez que mais da metade da sua população ativa se dedica a atividades agrícolas, pastoris, florestais, mineiras e piscatórias. Sabe-se, ainda, que a produtividade *per capita* da população ativa rural é baixa em relação à da população ativa urbana, a qual, por sua vez, é reduzida em confronto com a dos países já industrializados ou em rápido progresso de industrialização. Há, portanto, tecnicamente falando, subemprego na zona rural, o que indica relativo superpovoamento nessa zona, não necessariamente determinado por excesso absoluto da população ativa rural sobre os recursos naturais existentes nessa região, mas apenas indicativo de que essa população ativa rural, embora escassa em termos absolutos expressos em habitantes por quilômetro quadrado, é excessiva para que se atinjam nessa zona padrões de vida ótimos ao nível do desenvolvimento tecnológico lá existente. Em outras palavras, a renda nacional é subdividida na sua maior porção para aquilhoar a área de atividades onde é menor a população ativa.

Os efeitos indiretos da introdução da termelétricidade nuclear na economia nacional assim caracterizada induziria agentes econômicos, par-

ticulares e governamentais, a iniciarem vários processos industriais produtivos que, dada a mobilidade da mão-de-obra rural para a zona urbana, não deixariam de atrair para a sua órbita certa fração dessa mão-de-obra rural. Em consequência, portanto, dessa mudança de ocupação de uma fração da população ativa total, haverá uma redução da produção rural. Essa redução será tanto maior ou tanto menor conforme a produtividade marginal da mão-de-obra rural fôr relativamente grande ou relativamente pequena, isto é, consoante o nível de subemprego rural fôr insignificante ou substancial.

Se essa redução fôr pequena, ela só se fará sentir em curto prazo, visto ser razoável supor-se: a) que a produtividade da mão-de-obra rural, atraída para a zona urbana, se torne eventualmente bastante superior à que possuía quando empregada em atividades rurais; e b) que parte desse aumento de produção eventualmente se dedique à mecanização das atividades rurais, da qual resultará o aumento de produção da zona rural, que a fará elevar-se ao nível anterior ou, mesmo, possivelmente ultrapassá-lo. Se isso acontecer, uma população ativa rural mais reduzida ou menos subempregada possuirá produtividade tão alta ou mais alta do que a da população ativa inicial. Assim, o produto da mão-de-obra deslocada para a zona urbana constituirá, em prazo relativamente curto, aumento líquido do produto nacional.

Se, por outro lado, a redução da produção rural fôr grande, o prolongamento dos seus efeitos será tanto maior quanto menor fôr o valor dos recursos naturais não utilizados existentes na zona rural. Se êsse valor fôr de grande monta, a população ativa que permanecer na zona rural poderá diluir seu subemprego na exploração desses recursos, e, nesse caso, a redução da produção rural, embora vultosa, não tenderia a prolongar-se por dilatado período de tempo. Se, porém, o valor desses recursos naturais inexplorados fôr pequeno, a população ativa que permanecer na zona rural ocupar-se-á na produção de um padrão-de-vida de subsistência, que será o melhor resultado a esperar-se de sua baixa produtividade *per capita*.

Neste último caso, os efeitos econômicos da redução da produção rural tenderão a prolongar-se por largo período de tempo sobre os níveis de equilíbrio da economia interna e externa do país, e serão tanto mais graves quanto maior fôr o atraso na introdução da mecanização das atividades rurais, bem como quanto mais elevadas forem, então, as taxas de inflação e de desenvolvimento econômico real, e quanto menor e mais instável fôr o afluxo líquido de capitais estrangeiros destinados ao financiamento do desenvolvimento econômico.

A redução substancial da produção rural se refletirá na economia interna em alta de preços dos gêneros alimentícios conseqüente à escassez desses gêneros, com repercussões sobre os salários urbanos e agravamento da pressão inflacionária já existente. Na economia externa, tal redução se traduzirá por uma crise do balanço de pagamentos manifestada, de um lado, pela queda do volume das exportações de produtos primários originários da zona rural, a qual, no nível então prevalecente

da relação de trocas, se traduzirá em redução mais ou menos pronunciada da capacidade de importar; e, de outro lado, pelo recrudescimento da propensão a importar bens de consumo genérico e restrito, assim como bens capitais.

Esse recrudescimento da propensão a importar exercerá pressão tanto maior sobre o câmbio quanto mais elevada for a taxa anual da inflação interna a incentivar a importação de bens de consumo restrito, e, bem assim, quanto mais aguda for a necessidade interna de bens de consumo genérico e quanto mais elevado for o nível em que deverá ser mantido o desenvolvimento econômico do país para que a produção nacional líquida e real *per capita* aumente, sem a cooperação do capital estrangeiro. Conforme a intensidade desses efeitos sobre o nível de equilíbrio da economia interna e externa, a introdução da termeletricidade nuclear no Brasil será benéfica ou prejudicial.

A fim de prosseguir-se na análise sistemática aqui tentada, suponha-se que a inovação da termeletricidade nuclear na economia brasileira redunde em benefício, seja porque a crise interna e externa resultante da redução da produção rural não foi grave nem prolongada; seja porque a introdução da termeletricidade nuclear redundou em economia de divisas e assim nivelou a propensão a importar com a capacidade de importar reduzida pela queda da renda das exportações; seja porque foram em tempo tomadas medidas fiscais, monetárias, cambiais, tarifárias, de restrições quantitativas à importação e de programação financeira de investimentos promotores do desenvolvimento econômico, que, conjuntamente, suavizaram a crise; seja porque a mecanização das atividades rurais foi pronta e vigorosamente empreendida; ou seja, finalmente, porque o capital estrangeiro, particular e governamental, se tornou disponível para o financiamento dessa mudança de ocupação de uma fração da população ativa total do Brasil, conseguindo, com o seu concurso, manter a taxa de aumento anual do produto nacional líquido e real em nível superior à taxa de crescimento demográfico do país.

Neste caso, a introdução da termeletricidade nuclear redundará em incremento da produção industrial. O impacto desse aumento sobre o desenvolvimento dinâmico da economia brasileira será tanto mais benéfico e sensível, com o passar dos anos, quanto mais reprodutiva for a aplicação econômica desses sucessivos incrementos anuais da produção industrial.

O impulso evolutivo, decorrente desse incremento industrial, tenderá a extinguir-se tanto mais cedo quanto mais a fração desse aumento destinada ao consumo absorver a fração que cabe ao investimento, e quanto mais, na fração destinada ao consumo, a porção correspondente ao consumo restrito absorver a destinada ao consumo genérico. Se o aumento da produção for exportado, o impulso econômico dele proveniente tenderá a extinguir-se tanto mais rapidamente quanto mais a renda externa dele resultante for dependida na compra de bens de consumo ao invés de o ser na compra de bens de capital, no estrangeiro, e tanto mais cedo quanto maior for o dispêndio externo na aquisição, no estran-

geiro, de bens de consumo restrito em relação à de bens de consumo genérico.

Na hipótese extrema de que o incremento da produção seja totalmente empregado em consumo restrito na zona urbana da economia brasileira, duas alternativas se apresentam: ou esses produtos de consumo restrito são, na sua maior parte, produzidos no mercado interno, ou são, também na sua maior parte, importados. No primeiro caso, haverá sempre a possibilidade de manter-se por algum tempo certo impulso de desenvolvimento econômico, embora sobre bases precárias, porque dependentes de uma contínua descapitalização da economia, além da permanência dos efeitos inflacionários sobre as rendas das classes abastadas. No segundo caso, porém, esse impulso se estancará na primeira fase, visto que o efeito de multiplicação da renda se verificará em países já industrializados, normalmente exportadores desses produtos de consumo restrito, aumentando-lhes a renda e a procura de produtos semelhantes exportados por outros países industrializados, em vez de incrementar a demanda de produtos básicos, que constituem a exportação da economia brasileira e de todas as demais economias subdesenvolvidas, visto que essa demanda é mais regida pelo preço desses produtos básicos do que pela renda dos países que os importam.

Na hipótese, menos extremada, de que o incremento da produção resultante do deslocamento de uma fração da mão-de-obra rural para a zona urbana, atraída pelo surto industrial proveniente da inovação da eletricidade nuclear, seja total ou parcialmente empregado em bens de consumo genérico internamente produzidos, o seu efeito de multiplicação sobre a renda nacional será tanto mais sensível quanto mais elevada for a fração desse incremento a ser empregada nesse consumo genérico de produção interna e quanto menor for a fração desses bens a ser importada do exterior.

Em qualquer dessas duas hipóteses, supõe-se que o incremento do produto nacional resultante da introdução da eletricidade nuclear tenha sido exclusivamente empregado em bens de consumo, genérico ou restrito, produzidos no país ou importados do exterior. Entretanto, para que o impulso econômico dinâmico originado desse incremento da produção se mantenha em ritmo ascendente é necessário que uma fração desse incremento seja poupada ao invés de consumida e investida na produção de bens capitais altamente reprodutivos. Esse ritmo ascendente será tanto mais pronunciado quanto maior for a fração poupada e investida, e quanto maior for a fração desse investimento expendida na aquisição de bens capitais produzidos no país.

Finalmente, mesmo que esse investimento seja realizado ao máximo das disponibilidades de fundos capitalizáveis e com o máximo de reprodutividade, o ritmo de expansão dele proveniente poderá ser diminuído, aniquilado ou mesmo tornado negativo, pelo efeito conjunto de uma elevada taxa anual de depreciação, depleção e desuso do estoque bruto de capital nacional, e de uma elevada taxa líquida de crescimento demográfico. Se o efeito conjunto dessas duas taxas compostas anualmente,

fôr igual, inferior ou superior à taxa de crescimento da produção nacional bruta real, a taxa de aumento anual dessa produção, líquida e real, *per capita*, será, respectivamente, nula, positiva ou negativa, e a economia será, então, respectivamente, estacionária, progressiva ou regressiva.

Três obstáculos principais, portanto, se opõem à manutenção de um ritmo de ascensão do produto nacional líquido e real, *per capita*, promovido pela introdução na economia brasileira da termoelectricidade nuclear. Esses obstáculos podem ser agrupados da seguinte maneira: a) os provenientes de dificuldades em tornar o maior possível o efeito de multiplicação gerado pelo deslocamento de uma fração da mão-de-obra rural para a zona urbana; b) os originados de dificuldades da obtenção de um afluxo continuado de capital estrangeiro para financiar os investimentos necessários ao melhor aproveitamento econômico dessa mudança de ocupação de uma fração da população ativa total; e c) os decorrentes de dificuldades antepostas à manutenção da taxa de aumento anual da produção nacional bruta em ritmo de ascensão superior à dos efeitos acumulados da taxa de crescimento demográfico e da taxa composta anual de depreciação, depleção e desuso dos recursos naturais e do estoque bruto de capital existente no território nacional.

Na economia brasileira contemporânea, esses três grupos de obstáculos ao seu desenvolvimento são sobremaneira importantes. Não cabe, porém, no presente estudo, a análise pormenorizada dessas dificuldades, nem a indicação da terapêutica que poderia concorrer para a sua eliminação. Entretanto, é razoável esperar-se que as autoridades responsáveis adotem decisões que minorem, ou mesmo anulem os efeitos desses obstáculos.

Suponha-se, portanto, que essas decisões tenham sido tomadas e estejam sendo executadas de maneira a manter o impulso adquirido na industrialização da economia brasileira. Com a introdução da electricidade nuclear a baixo custo, desenvolve-se a rede de transporte ferroviário eletrificado, o que, por sua vez, estimula a especialização industrial na produção de tecidos, de alimentos e conservas, de madeira e siderúrgica, facilitando o deslocamento industrial das proximidades das fontes rurais de alimentos para as vizinhanças das fontes de matéria-prima, vegetal ou animal, e dos mercados consumidores que se localizem em cruzamentos ferroviários.

Nessas circunstâncias, o crescimento demográfico, longe de constituir desvantagem econômica, passaria a beneficiar o desenvolvimento de processos industriais e da rede ferroviária de transporte. Rendas crescentes surgiriam, então, na economia nacional, dando margem a maior volume de investimentos, o que manteria em ritmo de aumento progressivo o produto nacional líquido e real *per capita*. Finalmente, a localização das atividades agrícolas sofreria a atração dos centros industriais e dos mercados consumidores, ao invés de atrair, dispersando-o, o esforço incipiente das atividades urbanas.

FATORES CULTURAIS NO APROVEITAMENTO DA ENERGIA ELÉTRICA NUCLEAR. O esboço de análise, acima tentado, sobre os possíveis efeitos de fatores econômicos no aproveitamento da termoelectricidade nuclear na economia brasileira, abstraiu a existência, nessa economia, de uma série de fatores institucionais que se poderão antepor, como sérios obstáculos, ao desenvolvimento econômico prognosticado.

O provimento de energia, em qualquer das suas formas, é fator obviamente preponderante, senão fundamental, no desenvolvimento dinâmico de qualquer economia. Entretanto, as economias não existem, na realidade, em estado puro, mas operam sempre em determinados quadros sociais, legais, históricos, em uma palavra, institucionais, que transcendem os limites do mercado. Assim, a energia, em geral, e a energia elétrica, em particular, só exercem influência positiva no desenvolvimento econômico de certo país ou região se encontrarem um "lastro institucional" que coopere nesse sentido. A inexistência desses fatores institucionais favoráveis poderá constituir sério obstáculo ao desenvolvimento econômico, tanto no que concerne à mais dilatada aplicação da energia, quanto no que tange ao maior aproveitamento de fontes hidráulicas, térmicas ou nucleares existentes, mas não exploradas, no território nacional.

Tais fatores, favoráveis quando presentes e desfavoráveis ao progresso econômico, quando ausentes, são de tal forma interdependentes e seus limites de influência tão indistintos, que desafiam qualquer classificação sistemática. Entendido, entretanto, o desenvolvimento econômico como sinônimo de industrialização, o primeiro desses fatores seria provavelmente certa tendência cultural e certo incentivo social à aplicação tecnológica do conhecimento científico. É necessário que a tecnologia industrial seja elemento legítimo do ambiente cultural do país. Assim, não o conhecimento dos princípios da física nuclear, mas a preocupação tecnológica em aplicá-los na construção de reatores de elevada rentabilidade econômica seria a condição necessária e suficiente para a utilização da termoelectricidade nuclear na economia brasileira. Essa preocupação tecnológica viria favorecer tanto mais o desenvolvimento econômico do país quanto menos resistências institucionais encontrasse a sua propagação à massa de técnicos, indispensável, como mão-de-obra especializada, à construção, operação e manutenção de usinas termelétricas nucleares.

Diante de certos depoimentos, como, por exemplo, o do *Relatório Geral da Comissão Mista Brasil - Estados Unidos* (Oficina Gráfica do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 1954, págs. 278-281), não resta dúvida que a relativa escassez de engenheiros civis, em geral, e de engenheiros eletricitas, mecânicos, químicos e industriais, em particular, vem constituindo sério obstáculo ao desenvolvimento econômico brasileiro, no que toca ao progresso tecnológico do seu parque industrial, à sua rede de transportes ferroviários e rodoviários e ao aproveitamento do potencial energético do país. Se, para essa escassez concorreram mal orientada política de imigração e impe-

dimentos legais, constitucionais, ao reconhecimento de diplomas estrangeiros, não teria sido menor a influência, por exemplo, da atitude mental brasileira que suspeita de ilegitimidade toda profissão ou ofício que exige a aplicação empírica de conhecimentos teóricos. Não será, assim, de estranhar que a utilização da energia nuclear na produção da eletricidade venha encontrar, no Brasil, sérios obstáculos culturais ao recrutamento da mão-de-obra especializada que exige.

Se essa fraca tendência à aplicação empírica do conhecimento científico se traduz, do lado da oferta de energia, pela escassez dos seus agentes promotores, do lado da procura ela se manifesta pela ausência de preocupação generalizada em relação a essa aplicação. Esse desinteresse, caso do Brasil, é motivado pelo hábito da técnica inferior e obsoleta, pela inércia mental na aquisição de nova técnica e pelo interesse na preservação do *statu quo* tecnológico, seja porque não atraia o capital disponível a inversão sem perspectiva de lucros monetários imediatos, seja porque o empreendedor já conquistou uma posição dominante no mercado e não o tente perturbar o equilíbrio adquirido com a adaptação do seu equipamento à nova técnica, seja porque não exista espírito contábil no planejamento da expansão a longo prazo de processos industriais específicos, nem a mão-de-obra indispensável ou porque o mercado não comporte a produção mais avançada e a rede insuficiente de transportes não induza à conquista de mercados mais distantes do local da produção. Cumpre notar, entretanto, que já não seriam mais estas as circunstâncias características de certas regiões do país, onde a economia local se acha em expansão e a estrutura social já se tornou relativamente pouco estratificada, como acontece presentemente nos Estados de São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio de Janeiro. Nessas regiões, as resistências à inovação industrial se enfraquecem pelo pouco interesse em conservar os ajustamentos já conseguidos e pelo maior espírito de risco em se aceitarem as incertezas de uma reorientação tecnológica.

A essas resistências institucionais de caráter nacional se acrescentam outras de natureza internacional. Em primeiro lugar, como se sabe, há um período de adaptação à inovação industrial, que variou, historicamente, entre 20 e 50 anos, no caso da locomotiva e dos navios a vapor, e das linhas aéreas de transporte comercial. Quanto à termoeletricidade nuclear, é possível que tal período de adaptação seja abreviado, ou porque os Estados Unidos da América venham, de futuro, a procurar mercado externo para a colocação do plutônio já acumulado naquele país, em consequência da tensão política internacional, ou porque, independentemente desse fato, os países industrializados entrem em competição mútua para a venda de reatores a países economicamente subdesenvolvidos na base de relações de troca altamente favoráveis aos países industrializados; ou, finalmente, porque a evolução tecnológica na construção de reatores rápidos e intermediários venha a acelerar-se de tal forma que permita a sua industrialização em período relativamente curto, em virtude de um intercâmbio mais livre de conhecimentos de engenharia nuclear. Já foram assinaladas, no presente estudo, a impossibilidade atual de se obterem

pormenores sobre a construção de reatores intermediários e as dificuldades do mesmo gênero concernentes à construção de reatores rápidos. Nesse particular é de presumir-se que a Conferência sobre a Aplicação Pacífica da Energia Nuclear, realizada em Genebra, de 8 a 22 de agosto de 1955, haja contribuído para a diminuição da intensidade das resistências internacionais ao maior intercâmbio de conhecimentos relativos à engenharia nuclear.

A parte, porém, dessas resistências, de caráter nacional e internacional, que se antepõem à aplicação da termoeletricidade nuclear na economia brasileira, cumpre salientar, finalmente, o papel preponderante que exerceriam nessa aplicação as estruturas, política e jurídica, da organização econômica contemporânea brasileira. Cotejando, mais uma vez, o *Relatório Geral da Comissão Mista Brasil - Estados Unidos* (ibid., págs. 256-272), verifica-se que, entre os obstáculos institucionais à expansão da indústria da energia elétrica no Brasil, sobressaem os seguintes: a política de fixação de tarifas no fornecimento de energia elétrica; a limitação dos lucros com base no cálculo histórico do capital investido; a orientação política em relação à receptividade da técnica e do capital estrangeiros, no setor da produção da energia elétrica e da exploração do petróleo nacional; a tendência decidida para exploração das fontes hidrelétricas acessíveis; o auxílio decorrente do câmbio supervalorizado à importação de petróleo e derivados e de equipamento elétrico pesado; a posição já tomada em relação aos investimentos no setor da energia hidrelétrica e termelétrica; a jurisprudência de contratos e concessões para o suprimento, público e particular, da energia elétrica, bem como outros problemas, de natureza legal, que defrontam as grandes e pequenas empresas privadas, na indústria da energia.

Em resumo, o fato de poder a energia termelétrica nuclear ser tecnicamente produzida por um volume altamente concentrado de combustível físsil, o qual, por sua vez, é passível de recuperação através da cisão de combustíveis férteis, não significa, em absoluto, que a energia termelétrica nuclear se adapte industrialmente à economia brasileira com facilidade e em tempo relativamente curto. Vencidos certos problemas de engenharia nuclear nos países industrializados, a termoeletricidade nuclear encontraria no quadro social e econômico brasileiro obstáculos que poderão atrasar, ou mesmo impossibilitar, essa adaptação, no decurso dos próximos 20 anos.

A ENERGIA NUCLEAR E O MERCADO DE ENERGIA NO BRASIL. Na suposição de que esses obstáculos, econômicos e institucionais, sejam vencidos em menos de 20 anos, torna-se interessante investigar qual será a posição estatística da termoeletricidade nuclear, em face da projeção, até 1962, da oferta e da procura de energia na economia brasileira.

Excluindo-se a energia muscular, humana e animal, bem como a aproveitada pelas rodas d'água, expressando as demais formas de energia em quilowatt-hora consumido ao invés de produzido, para compensar as perdas da distribuição, e adotando taxas razoáveis de eficiência tér-

mica na conversão da energia calorífica em elétrica, o Grupo Misto CEPAL-BNDE, formado no Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico, em cooperação com a Comissão Econômica para a América Latina das Nações Unidas, afirma, em trabalho ainda não publicado, intitulado *Esbôço de um Programa de Desenvolvimento Econômico para o Brasil*, que o consumo total de energia aumentou, no Brasil, de 18,4 bilhões de kWh, em 1939, para 35,3 bilhões, em 1952, resultando desse aumento o incremento absoluto de 92 por cento, a taxa de crescimento anual de 5,1 por cento e a taxa de crescimento *per capita* de 2,8 por cento.

Do ponto de vista das fontes de energia utilizadas, o referido Grupo Misto, no trabalho citado, organizou o Quadro VI, anexo, do qual se verifica o seguinte: a) em 1939, dos 18,4 bilhões de kWh consumidos no país, 70,5 por cento, ou cerca de 13 bilhões, provieram de combustíveis sólidos, dos quais 72,6 por cento, ou 9,4 bilhões de kWh, se originaram da combustão de lenha, carvão vegetal e bagaço de cana; ainda em 1939, 17,1 por cento dos 18,4 bilhões de kWh consumidos, ou seja, 3,1 bilhões, provieram de combustíveis líquidos, e os restantes 12,4 por cento, ou cerca de 2,3 bilhões de kWh, da força hidráulica; b) em 1952, dos 35,3 bilhões de kWh consumidos no país, 14 bilhões, ou cerca de 40 por cento, provieram de combustíveis sólidos, dos quais 10,3 bilhões, ou cerca de 73,6 por cento, se originaram da combustão de lenha, carvão vegetal e bagaço de cana; e ainda nesse mesmo ano de 1952, 14,6 bilhões de kWh, ou seja, cerca de 41 por cento dos 35,3 bilhões consumidos, provieram de combustíveis líquidos, e os restantes 19 por cento, ou cerca de 6,6 bilhões, da força hidráulica; c) conseqüentemente, entre 1939 e 1952, houve no Brasil sensível substituição de combustíveis sólidos por combustíveis líquidos, e, em bem menor proporção, de combustíveis sólidos por energia hidráulica: ao passo que o consumo geral de energia duplicou no aludido período, a participação de combustíveis sólidos manteve-se praticamente estacionária, a dos combustíveis líquidos quintuplicou e a da energia elétrica de origem hidráulica duplicou; e, finalmente, d) em 1939, dos 18,4 bilhões de kWh consumidos no país, 5,6 bilhões, ou cerca de 30,4 por cento, provieram de energia de fonte importada, isto é, carvão de pedra e, principalmente, petróleo e derivados, ao passo que, em 1952, a participação da energia de fonte importada ascendia a 15,9 bilhões de kWh, ou cerca de 45,1 por cento dos 35,3 bilhões consumidos nesse ano.

Com base em certo ritmo de crescimento anual da economia brasileira em termos de incremento da produção nacional líquida e real *per capita*, bem como na hipótese preliminar de uma oferta elástica de energia e da existência provável de um excesso de procura de energia não revelado em vista da deficiência da oferta, o referido Grupo Misto CEPAL-BNDE projetou, para 1962, a tendência do consumo de energia proveniente das várias fontes citadas no Quadro VI, anexo. Efetuada essa projeção preliminar, verificou a viabilidade da mesma do ponto de vista

como, por exemplo, no tocante à ampliação futura e provavelmente inevitável da usina de Piratininga, ampliação essa que poderá elevar o consumo de óleo combustível importado pelas empresas de serviço público para a geração de eletricidade a cerca de 1,130 mil toneladas.

Do que se expôs acima, verifica-se que a termoeletricidade nuclear terá ainda por muitos anos, no Brasil, um papel marginal e supletivo do potencial hidrelétrico. Seria, portanto, razoável instalar-se, no Brasil, a primeira central termelétrica nuclear nas vizinhanças do mercado para o qual já se ache esgotado o potencial hidrelétrico local, como, por exemplo, ao redor de São Paulo, do Rio de Janeiro e dos centros de produção metalúrgica de maior expansão. Com Paulo Afonso, supõe-se que o consumo nordestino não necessite, tão cedo, de reserva termelétrica. O Sul, a partir do Paraná, suplementará ainda durante algum tempo o seu potencial hidrelétrico por meio da termoeletricidade proveniente do carvão nacional, conforme está, aliás, previsto nos Planos Nacionais do Carvão e da Eletrificação. Assim, à expansão de Piratininga com base nuclear deveria ser concedida a mais elevada prioridade, no momento atual, em face da demanda prevista para 1962. De outra forma, o potencial hidráulico brasileiro, que se calcula em cerca de 14,4 milhões de kW, ainda seria a principal fonte de energia elétrica no Brasil contemporâneo, seja pela facilidade de expansão das unidades produtoras já instaladas sem elevados custos adicionais, como acontece nas usinas termelétricas, seja porque as instalações hidrelétricas, ao contrário das térmicas, podem participar de planos de investimentos que compreendam o controle de enchentes, irrigação, melhoramento da navegação fluvial e reflorestamento.

ESBÔÇO DE PROGRAMA BRASILEIRO DE ENERGIA TERMELÉTRICA NUCLEAR. O primeiro passo em um programa brasileiro de energia termelétrica nuclear seria, possivelmente, o da criação e expansão de uma equipe de engenheiros nucleares não necessariamente numerosa e o da obtenção de equipamento experimental para a construção de reatores e de fábricas de "enriquecimento" de urânio natural. Nesse sentido já se manifestou a iniciativa do governo brasileiro, seja ao celebrar com os Estados Unidos da América um acordo com o objetivo de serem fornecidos por esse país um reator experimental e certa quantidade de urânio "enriquecido" necessário à sua operação, seja ao enviar bolsistas brasileiros às universidades americanas, no decurso dos últimos três ou quatro anos, para se especializarem em física e engenharia nuclear.

Sendo pouco provável que os reatores térmicos do tipo CALDER HALL venham a ser instalados no Brasil em bases econômicas, o segundo passo no referido programa seria o estudo da construção, em futuro próximo, de um reator rápido do tipo que, segundo consta, teria sido oferecido à venda pela Westinghouse Co. Ltd. em Genebra, durante a Conferência sobre o Emprêgo Pacífico da Força Nuclear, pela soma de 4 milhões de dólares, de capacidade de 10.000 kW, resfriado

a "água leve" sob pressão. Consta que o primeiro dêsses reatores foi adquirido pela fábrica Fiat italiana, para fornecer energia adicional necessária à expansão daquela empresa, sem sobrecarga da rede de distribuição de energia da cidade de Milão. O mesmo poderia ser feito no Brasil por indústria, como a siderúrgica, que necessite expandir-se a curto prazo e que, não possuindo fonte de energia hidrelétrica, tenha sido a isto obstada pela escassez de combustível líquido decorrente de dificuldades do balanço de pagamentos.

Concomitantemente, a Light & Power de São Paulo deveria ser convidada a submeter ao governo brasileiro um relatório onde se considerassem todos os aspectos técnicos e econômicos de um plano de expansão da usina de Piratininga com base na termoelectricidade nuclear.

ANEXOS

QUADRO I
OS ELEMENTOS

NÚMERO ATÔMICO	PÊSO ATÔMICO	ELEMENTO	SÍMBOLO
1	1,008	Hidrogênio	H
2	4,003	Hélio	He
3	6,940	Lítio	Li
4	9,013	Berilo	Be
5	10,82	Boro	B
6	12,01	Carbônio	C
7	14,01	Azoto	N
8	16,00	Oxigênio	O
9	19,00	Fluor	F
10	20,18	Néon	Ne
11	23,00	Sódio	Na
12	24,32	Magnésio	Mg
13	26,97	Alumínio	Al
14	28,06	Silício	Si
15	30,98	Fósforo	P
16	32,07	Enxofre	S
17	35,46	Cloro	Cl
18	39,94	Árgon	A
19	39,10	Potássio	K
20	40,08	Cálcio	Ca
21	45,10	Escândio	Sc
22	47,90	Titânio	Ti
23	50,95	Vanádio	V
24	52,01	Crômio	Cr
25	54,93	Manganês	Mn
26	55,85	Ferro	Fe
27	58,94	Cobalto	Co
28	58,69	Níquel	Ni
29	63,57	Cobre	Cu
30	65,38	Zinco	Zn
31	69,72	Gálio	Ga
32	72,60	Germanico	Ge
33	74,91	Arsênico	As
34	78,96	Selênio	Se
35	79,92	Bromo	Br
36	83,7	Cripton	Kr
37	85,48	Rubídio	Rb
38	87,63	Estrôncio	Sr
39	88,92	Ítrio	Y
40	91,22	Zircônio	Zr

(Continua)

NÚMERO ATÔMICO	PÊSO ATÔMICO	ELEMENTO	SÍMBOLO
41	92,91	Niôbio	Nb
42	95,95	Molibdênio	Mo
43	(99)	Technécio	Tc
44	101,7	Rutênio	Ru
45	102,9	Ródio	Rh
46	106,7	Paládio	Pd
47	107,9	Prata	Ag
48	112,4	Cádmio	Cd
49	114,8	Índio	In
50	118,7	Estanho	Sn
51	121,8	Antimônio	Sb
52	127,6	Telúrio	Te
53	126,9	Iodo	I
54	131,3	Xenon	Xe
55	132,9	Césio	Cs
56	137,4	Bário	Ba
57	138,9	Lantânio	La
58	140,1	Cério	Ce
59	140,9	Prasodímio	Pr
60	144,3	Neodímio	Nd
61	(147)	Prométio	Pm
62	150,4	Samário	Sm
63	152,0	Európio	Eu
64	156,9	Gadolínio	Gd
65	159,2	Térbio	Tb
66	162,5	Disprósio	Dy
67	164,9	Hólmio	Ho
68	167,2	Érbio	Er
69	169,4	Túlio	Tm
70	173,0	Ítérbio	Yb
71	175,0	Lutécio	Lu
72	178,6	Háfnio	Hf
73	180,9	Tântalo	Ta
74	183,9	Wolfrâmio	W
75	186,3	Rênio	Re
76	190,2	Ósmio	Os
77	193,1	Iródio	Ir
78	195,2	Platina	Pt
79	197,2	Ouro	Au
80	200,6	Mercurio	Hg
81	204,4	Tálio	Tl
82	207,2	Chumbo	Pb
83	209,0	Bismuto	Bi
84	210	Polônio	Po
85	(210)	Astatina	At

(Continua)

NÚMERO ATÔMICO	PÊSO ATÔMICO	ELEMENTO	SÍMBOLO
86	222	Rádum	Rn
87	(223)	Frâncio	Fr
88	226.0	Rádio	Ra
89	227	Actínio	Ac
90	232, 1	Tório	Th
91	231	Protoactínio	Pa
92	238, 1	Urânio	U
93	(237)	Netúnio	Np
94	(239)	Plutónio	Pu
95	(241)	Americio	Am
96	(242)	Cúrio	Cm
97		Berquílio	Bk
98		Califórnio	Cf
99	(*)	Einsteinio	
100	(*)	Férmio	

(*) Elementos já descobertos, mas cujo peso atômico ainda não foi divulgado.

NOTA — Não se conhece ainda acuradamente o peso atômico de certos elementos radioativos; nesses casos, foi pôsto entre parênteses o peso atômico do isótopo mais estável.

QUADRO II
TABELA PERIÓDICA DOS ELEMENTOS

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII		
1	H							He		
2	Li	Be	B	C	N	O	F	Ne		
3	Na	Mg	Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni
	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr		
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd
	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe		
6	Cs	Ba	(*)	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt
	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn		
7	Fr	Ra	(**)							

(*) Série das terras raras ou lantânicas.
(**) Série actínica.

La	Ce	Pr	Nd	Pm
Sm	Eu	Gd	Tp	Dy
Ho	Er	Tm	Yb	Lu

Ac	Th	Pa	U
Np	Pu	Am	Cm
Bk	Cf		

QUADRO III
ISÓTOPOS DE ALGUNS ELEMENTOS LÉVES E PESADOS

NÚMERO ATÔMICO	ELEMENTO	PÊSO ATÔMICO	ABUNDÂNCIA ISOTÓPICA
1	Hidrogênio.....	1,008145	99,985
		2,014741	0,015
		3,016997	.....
2	Hélio.....	3,016997	0,00013
		4,003879	99,99987
		5,013700	.....
		6,020833	.....
3	Lítio.....	5,013600	.....
		6,016970	7,52
		7,018220	92,48
		8,025020	.....
4	Berilo.....	7,019160	.....
		8,007850	.....
		9,015030	100,0
		10,016770	.....
5	Boro.....	8,026400	.....
		9,016200	.....
		10,016110	18,98
		11,012811	81,02
6	Carbono.....	11,014950	.....
		12,003844	98,892
		13,007505	1,108
		14,007670	.....
		15,014300	.....
7	Azoto.....	12,022700	.....
		13,009880	.....
		14,007550	99,635
		15,004902	0,365
		16,010900	.....
		17,013900	.....
8	Oxigênio.....	15,007800	.....
		16,000000	99,759
		17,004535	0,037
		18,004883	0,204
		19,009100	.....

(Continua)

NÚMERO ATÔMICO	ELEMENTO	PÊSO ATÔMICO	ABUNDÂNCIA ISOTÓPICA
91	Protoactínio.....	226, 104940	.....
		227, 107100	.....
		228, 108230	.....
		229, 110880	.....
		230, 114410	.....
		231, 116070	.....
		232, 117680	.....
		233, 120270	.....
		234, 122810	.....
92	Urânio.....	228, 108630	.....
		229, 112580	.....
		230, 112220	.....
		232, 116500	.....
		233, 119370	.....
		234, 112900	0,0058
		235, 115600	0,715
		237, 130100	.....
		238, 124100	99,28
93	Netúnio.....	239, 137040	.....
		231, 117760	.....
		237, 129320	.....
		238, 132550	.....
94	Plutônio.....	239, 136200	.....
		232, 119730	.....
		234, 122690	.....
		236, 126670	.....
		238, 131060	.....
		239, 136200	.....
		241, 139090	.....

NOTA — Este quadro foi compilado apenas a título ilustrativo; para dados mais completos, veja-se Henry Semmat, *Introduction to Atomic and Nuclear Physics*, Chapman & Hall, Ltd., Londres, 1954.

A coluna da abundância isotópica exprime, em fração decimal, a ocorrência percentual do isótopo na natureza, e, em linhas pontilhadas, os isótopos artificiais já analiticamente isolados.

Os pesos atômicos são expressos com base no peso atômico do oxigênio de ocorrência isotópica mais abundante, arbitrariamente tomado como igual a 16.

QUADRO IV

ALGUMAS CONSTANTES E FATORES DE CONVERSÃO

Velocidade da luz	$2,998 \cdot 10^{10}$ cm/secg
Constante de Planck	$6,62/10^{27}$ erg·secg
Unidade de massa atômica (amu)	$1,66/10^{24}$ da grama
Massa do elétron	$9,106/10^{28}$ da grama
Massa do próton	$1,673/10^{24}$ da grama
Massa do neutron	$1,675/10^{24}$ da grama
Carga eletrônica	$4,80/10^{10}$ do c.s.u.
Número de Avogadro	$6,03 \cdot 10^{23}$ molécula/mole
Constante de Boltzmann	$1,37/10^{16}$ erg/centigrado
Constante de Bydberg	109,7 milésimos do cm
1 MeV	$1,6/10^6$ do erg
1 Curie	$3,7 \cdot 10^{10}$ desinteg/secg
1 Barn	$1/10^{24}$ do cm^2
1 Roentgen	83,8 ergs/grama de ar
1 Cisão	200 MeV de energia
1 Watt	$3,1 \cdot 10^{10}$ cisões/secg = 1 joule/ seg = 10^7 ergs/secg
Amu em MeV	931.192 MeV por amu
Ev em ergs	$1,60207/10^{12}$ erg/cv
Gramas em MeV	$5,60999 \cdot 10^{26}$ MeV/grama

NOTA — Um mole ou uma molécula-grama é a massa de substância pura cujo peso em grammas é numericamente igual ao peso molecular da substância. O número de moléculas contidas em 1 mole de qualquer substância pura é igual ao número de Avogadro.

QUADRO V

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE ALGUNS REATORES (*)

(a) Chicago, CP-1; (b) 2.12.42; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio natural; (e) grafita; (f) não possui resfriador; (g) 200 W.

(a) Argonne National Laboratory, Chicago, CP-2; (b) 43; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio natural; (e) 472 toneladas de grafita; (f) não possui resfriador; (g) 2 kW; (i) 10 metros por 10 metros por 7 metros.

(a) Oak Ridge, Tennessee; (b) 4.11.43; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio natural em barras; (e) grafita; (f) ar sob pressão; (g) 2.000 kW; (h) cubo de 7 metros cúbicos; (i) 15 metros por 12 metros por 10 metros; (j) 10 elevado à 12ª potência; (k) 245 graus centígrados no combustível e 130 graus centígrados no moderador.

(a) Argonne National Laboratory, Chicago; (b) 15.5.44; (c) térmico, heterogêneo; (d) 3 toneladas de barras de urânio natural; (e) 6,5 toneladas de "água pesada"; (f) "água pesada" sob pressão a 200 galões por minuto; (g) 300 kW; (h) tanque cilíndrico de alumínio de 2 metros de diâmetro e 2,80 metros de altura; (j) cerca de 10 elevado à 12ª potência; (k) 95 graus Fahrenheit.

(a) Los Alamos, New Mexico, LOPO; (b) 12.44; (c) térmico, homogêneo; (d) urânio "enriquecido" com 1,2 libras-peso de urânio 235; (e) "água leve"; (f) "água leve"; (g) 0,05 W; (h) esfera de aço de 12 polegadas de diâmetro; (k) 39 graus centígrados.

(a) Los Alamos, New Mexico, HYPO; (b) 12.44; (c) térmico, homogêneo; (d) urânio "enriquecido" com 1,9 libras-peso de urânio 235; (e) "água leve"; (f) "água leve" sob pressão, em serpentina dentro da esfera, a 50 galões por hora; (g) 6 kW; (h) esfera de aço de 12 polegadas de diâmetro; (j) 3 por 10 elevado à 11ª potência; (k) cerca de 100 graus centígrados.

(a) Hanford, Washington, onde existem pelo menos 3 reatores; (b) 44-45; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio natural; (e) grafita; (f) "água leve"; (g) cerca de 100.000 kW; (k) menos de 100 graus centígrados.

(a) Harwell, Berkshire, GLEEP; (b) 15.8.47; (c) térmico, heterogêneo; (d) 12 toneladas de urânio natural e 21 toneladas de óxido de urânio; (e) 505 toneladas de grafita; (f) ar sob pressão a 5.000 pés cúbicos por minuto; (g) 100 kW; (h) cilindro de 6 metros de diâmetro por 5,5 metros de altura; (j) 3 por 10 elevado à 10ª potência; (k) 60 graus centígrados.

(a) Chalk River, Ontário, ZEEP; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio natural; (e) 10 toneladas de "água pesada"; (f) não possui resfriador; (g) 3,5 W; (h) tanque de aço de 2,20 metros de diâmetro e 3 metros de altura; (j) 5,7 por 10 elevado à 13ª potência; (k) cerca de 100 graus centígrados.

(a) Harwell, Berkshire, BEPO; (b) 3.49; (c) térmico, heterogêneo; (d) 40 toneladas de urânio natural; (e) 850 toneladas de grafita; (f) ar sob pressão a 180.000 pés cúbicos por minuto; (g) 6.000 kW; (h) cubo de 9 metros cúbicos; (i) cubo de 16 metros cúbicos; (j) 10 elevado à 12ª potência; (k) 200 graus centígrados.

(*) As letras entre parênteses significam: (a) a localização do reator; (b) o início do funcionamento; (c) o tipo do reator; (d) o combustível; (e) o moderador; (f) o resfriador; (g) a potência; (h) as dimensões da câmara de combustão do reator; (i) as dimensões totais; (j) o fluxo máximo de nêutrons em nêutrons por centímetro cúbico por segundo; (k) a temperatura de operação.

(a) Chalk River, Ontário, NRX; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio natural; (e) "água pesada"; (f) "água leve"; (g) cerca de 10.000 kW; (h) cilindro de 2,80 metros de diâmetro e 3,20 metros de altura; (i) cilindro de 8,40 metros de diâmetro e 8,40 metros de altura; (j) 5,8 por 10 elevado à 13ª potência.

(a) Brookhaven, New York; (b) 22.850; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio natural; (e) grafita; (f) ar sob pressão a 300.000 pés cúbicos por minuto; (g) 28.000 kW; (i) cilindro de 9 metros de diâmetro e 18 metros de altura; (j) 4 por 10 elevado à 12ª potência; (k) 175 graus centígrados.

(a) Fort Chatillon, França, ZOE; (c) térmico, heterogêneo; (d) 3,6 toneladas de dióxido de urânio; (e) 6 toneladas de "água pesada"; (f) "água pesada"; (g) 5 kW; (j) cerca de 100 graus centígrados.

(a) Windscale, Cumberland, 2 reatores; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio natural; (e) grafita; (f) ar.

(a) Los Alamos, New Mexico; (c) rápido; (d) plutônio 239; (e) não possui moderador; (f) mercúrio como resfriador e transferidor térmico; (g) 10 kW; (i) 5 metros cúbicos aproximadamente; (j) 5 por 10 elevado à 12ª potência.

(a) Kjeller, Noruega; (c) térmico, heterogêneo; (d) 2 toneladas de urânio natural; (e) 7 toneladas de "água pesada"; (f) "água pesada" sob pressão a 4 litros por segundo; (g) 300 kW; (h) cilindro de 2 metros de diâmetro; (j) 10 elevado à 12ª potência; (k) 40 graus centígrados.

(a) Downey, Califórnia, North American Aviation Inc.; (b) 53-54; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio "enriquecido"; (e) grafita; (f) "água pesada"; (g) 160 kW; (h) prisma hexagonal de 54 polegadas de diâmetro menor e 54 polegadas de altura; (i) octógono de 3,80 metros de largura e 3,10 metros de altura; (j) 10 elevado à 12ª potência; (k) cerca de 100 graus centígrados.

(a) Raleigh, North Carolina, North Carolina State College; (b) 53-54; (c) térmico, homogêneo; (d) solução aquosa de urânio "enriquecido"; (e) "água leve"; (f) "água leve"; (g) 10 kW; (h) cilindro de 11 polegadas de diâmetro e 11 polegadas de altura; (i) octógono de 5,80 metros de largura e 3,10 metros de altura; (j) 5 por 10 elevado à 11ª potência; (k) 80 graus centígrados.

(a) Oak Ridge, Tennessee; (b) 50; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio "enriquecido" com 3 quilos de urânio 235; (e) "água leve"; (f) "água leve"; (g) 100 kW; (h) 12 polegadas de largura por 12 polegadas de comprimento por 24 polegadas de altura; (j) 3 por 10 elevado à 12ª potência; (k) cerca de 100 graus centígrados.

(a) Schenectady, New York; (b) 52; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio "enriquecido" com 2,8 quilos de urânio 235; (e) grafita; (f) não possui resfriador; (g) 100 kW; (h) tanque anular de alumínio de 24 polegadas de altura, 12 polegadas de diâmetro interno e 18 polegadas de diâmetro externo; (j) 3,4 por 10 elevado à 9ª potência.

(a) Arco, New York; (b) 31.352; (c) térmico, heterogêneo; (d) urânio "enriquecido"; (f) "água leve" sob pressão a 20.000 galões por minuto; (g) 30.000 kW; (j) 4 por 10 elevado à 14ª potência.

QUADRO VI
CONSUMO DE ENERGIA NO BRASIL SEGUNDO A NATUREZA
 (em milhões de kWh)

FONTES DE ENERGIA	1939	1952
TÔDAS AS FONTES.....	18.405	35.331
COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS.....	3.157	14.617
Gasolina de aviação.....	27	407
Gasolina comum.....	989	5.430
Querosene.....	283	859
Óleo diesel.....	362	2.154
Óleo combustível.....	1.448	5.704
Outros (*).....	48	63
COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS.....	12.984	14.055
Carvão mineral.....	3.556	3.704
Nacional.....	985	1.928
Importado.....	2.571	1.776
Lenha (**).....	7.171	6.362
Bagaço de cana.....	1.004	2.211
Carvão vegetal.....	1.253	1.778
HIDRELÉTRICA.....	2.264	6.659

(*) Inclui óleo para produzir gás, "signal-oil" e álcool adicionado à gasolina.

(**) Não inclui lenha destinada à produção de carvão vegetal.

Fonte — Para quadro completo, de 1939 a 1952, veja-se *Esboço de um Programa de Desenvolvimento Econômico para o Brasil*, primeira redação mimeografada, Capítulo VI e seus anexos, Grupo Misto CEPAL-BNDE, Rio de Janeiro, 1954.

QUADRO VII
PROJEÇÕES DA PROCURA DE ENERGIA NO BRASIL
(em milhões de kWh)

FONTES	1949	1952	1962
COMBUSTÍVEIS LÍQUIDOS	8.720	14.617	35.550
Gasolina de aviação.....	314	407	978
Gasolina comum.....	3.085	5.430	13.469
Querosene.....	522	859	2.020
Óleo diesel.....	1.174	2.154	6.590
Óleo combustível.....	3.537	5.704	12.493
Outros.....	88	63	.....
COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS	12.861	14.055	20.407
Carvão mineral.....	3.472	3.704	5.732
Nacional.....	1.957	1.928	3.316
Importado.....	1.515	1.776	2.416
Lenha.....	6.598	6.362	3.181
Bagaco de cana.....	1.740	2.211	8.330
Carvão vegetal.....	1.051	1.778	3.164
ENERGIA ELÉTRICA	6.237	7.608	22.320
Termelétrica.....	693	949	3.323
Hidrelétrica.....	5.544	6.659	18.997
TOTAL GERAL (*)			
Incluída a lenha.....	27.125	35.331	74.954
Excluída a lenha.....	20.527	28.969	71.773

(*) Deduzida a energia térmica consumida pela produção da energia termelétrica.

FONTE -- *Esboço de um Programa de Desenvolvimento Econômico para o Brasil*, primeira redação mimeografada, Grupo Misto CEPAL-BNDE, Rio de Janeiro, 1954.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

a) de conteúdo elementar e geral:

ANDRADE, E. N. DA CUNHA — *The atom and its energy* — G. Bell & Sons Ltd., Londres, 1947.

HECHT, E. — *Explaining the atom* — Gollancz, Londres, 1955.

SODDY, F. — *The story of atomic energy* — Nova Atlantis, Londres, 1949.

THOMPSON, G. P. — *The atom* — Oxford University Press, Oxford, 1949.

b) de conteúdo mais adiantado e especializado:

BETHE, H. A. — *Elementary nuclear theory* — John Wiley & Sons Ltd., Nova York, 1950.

GAYNOR, F. — *Pocket encyclopedia of atomic energy* — Philosophical Library, Nova York, 1950.

GLASSTONE, S. — *Sourcebook of atomic energy* — Van Nostrand Inc., 1950.

GLASSTONE, S. e EDLUND, M. C. — *The elements of nuclear reactor theory* — Macmillan, Nova York.

GOODMAN, C. C. (editor) — *The science and engineering of nuclear power* — 2 vols., Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Mass., 1947-48.

ISARD, W. e WHITNEY, V. — *Atomic power, an economic and social analysis* — Allen & Unwin, Londres, 1952.

MURRAY, R. L. — *Introduction to nuclear engineering* — Allen & Unwin, Londres, 1955.

SEMAT, H. — *Introduction to atomic physics* — Rinehart & Co., Nova York, 1946.

c) e as publicações oficiais do governo britânico:

A Programme of Nuclear Power, Cmd. Paper n° 9389.

Harwell 1946-51, Londres, 1952.

Britain's Atomic Factories, Londres, 1954.

Atomic Energy Research at Harwell, Londres, 1955.