

642

As Radiações Ionizantes como Fonte de Energia para o Homem

MARCELLO DAMY DE SOUZA SANTOS

*Instituto de Energia Atômica, São Paulo e
Universidade de Campinas, Campinas, SP*

O *Simpósio Internacional sobre as Radiações Ionizantes e o Futuro da Espécie Humana* tem, entre outras, a finalidade de abordar vários problemas relacionados com as aplicações da energia atômica para fins pacíficos e a de promover uma ampla troca de informações e de conhecimentos técnicos entre os seus participantes. Cuidaram por isso seus organizadores de incluir na programação uma mesa redonda sobre as aplicações pacíficas da energia atômica a fim de permitir ampla discussão sobre os temas principais que serão abordados nas reuniões.

A importância dessa troca de informações não pode ser subestimada, principalmente em setores do conhecimento que se desenvolvem com grande rapidez e que ainda conservam vários domínios mantidos em segredo por serem considerados de interesse militar ou tecnológico. Por isso talvez seja oportuno recordar que essa política de restrição a informações no campo científico representa fato relativamente recente na história da ciência: o enorme impacto provocado pelo emprêgo da ciência na arte bélica, por ocasião da segunda guerra mundial, interrompeu a tradição da livre troca de informações entre cientistas, em escala internacional, iniciada nos séculos 18 e 19 e que constituiu-se num dos fatores de maior importância para o seu desenvolvimento.

A ciência nem sempre esteve ligada aos problemas da tecnologia civil e da tecnologia militar. Até o fim do século 19, a tecnologia desenvolveu-se de forma mais ou menos empírica, realizando progressos apreciáveis a custa de procedimentos práticos ou de invenções baseadas em um "know how" primário que se acumulou lentamente durante milhares de anos; de outro lado, a ciência progrediu de maneira espetacular concentrando seus esforços em problemas relativamente simples e bem definidos.

Assim, enquanto a tecnologia civil e a arte militar dependiam muito pouco ou quase nada da ciência, foi possível estabelecer em bases firmes a tradição da livre troca de informações entre cientistas em escala internacional. No início deste século, à medida que o desenvolvimento tecnológico se tornava mais complexo e, por isso mesmo, mais dependente da ciência para a solução de seus problemas, as atividades científicas passaram a desempenhar uma função de crescente relevância na indústria civil. A primeira grande guerra mundial viria marcar o primeiro impacto direto da ciência sobre a tecnologia militar. Os conhecimentos sobre a propagação do som em meios líquidos, da geração e

deteção de ondas eletromagnéticas e os progressos espetaculares da química encontraram aplicações imediatas em problemas de deteção de submarinos, de comunicações entre pontos distantes e na fabricação de gases tóxicos.

No intervalo de duas décadas entre a primeira e a segunda guerra mundial, a influência da ciência sobre a tecnologia civil e militar desenvolveu-se rapidamente: com auxílio de métodos científicos, a tecnologia foi perdendo aos poucos a sua tradição de empirismo enquanto a ciência pode progredir mais rapidamente graças aos equipamentos produzidos pelas indústrias. Durante esse período, os métodos tradicionais de cooperação científica em escala internacional constituíram-se no fator principal para a promoção do progresso em várias regiões do globo, particularmente nos Estados Unidos.

Essa cooperação internacional, que se manifestava através de publicações em periódicos especializados disseminados por todo o mundo, através de conferências internacionais e simposia, desenvolveu-se por iniciativa dos próprios cientistas os únicos plenamente capacitados em reconhecer o caráter internacional da ciência e a necessidade de ampla troca de dados e informações entre os diversos laboratórios. Não deixa de ser paradoxal que as autoridades governamentais, a quem caberia incentivar esse intercâmbio seja pelas conseqüências práticas das aplicações da ciência, seja ainda pelo simples aprimoramento cultural, via de regra jamais demonstraram o menor interesse em amparar essas iniciativas.

Quando do advento da segunda guerra mundial, a interação entre a ciência e a tecnologia militar já estava plenamente estabelecida em virtude do reconhecimento da sua influência sobre a tecnologia industrial. Tornou-se então inevitável a aplicação da ciência para a arte bélica: em vários laboratórios especializados e em centros universitários foram iniciadas pesquisas destinadas ao aperfeiçoamento de armas, à criação de novas armas de defesa e de ataque e de novos métodos de proteção e de interceptação do inimigo. Criaram-se assim novas armas de poder incalculável: bastaria citar o radar, a espoleta de aproximação, o sonar, os foguetes V2 e, praticamente no término da segunda guerra mundial, a bomba atômica.

Esses sucessos espetaculares que foram conseqüência da aplicação da ciência no desenvolvimento de novas armas e na criação de novas tecnologias deixou entretanto cicatrizes profundas, pois desde as vésperas do conflito os cientistas assumiram compromisso voluntário de não divulgarem resultados de pesquisas suscetíveis de aplicações militares. Assim, quando logo mais foi instituída oficialmente a política do segredo, suas conseqüências foram aceitas sem discussão.

A segunda guerra mundial marca assim o advento da limitação das trocas de informações entre os cientistas — não apenas em escala internacional mas muitas vezes até mesmo entre os que trabalham num mesmo laboratório. Essa restrição, originariamente conseqüência de um estado de guerra, passou a ser mantida por decisão política e nos nossos dias somente assuntos que a priori não são suscetíveis de aplicações militares são disseminados em escala internacional.

Não deixa por isso de constituir-se em verdadeira ironia do destino que a descoberta destinada a revolucionar a tecnologia militar e a oferecer perspec-

tivas nunca antes vislumbradas para promover o desenvolvimento das nações atrasadas fôsse consequência exclusiva dos resultados da cooperação internacional nas vésperas da deflagração da segunda guerra mundial. Suas aplicações para fins bélicos e a antevisão de sua potencialidade para as aplicações pacíficas resultaram do trabalho cooperativo de cientistas nucleares de vários países em laboratórios norte-americanos.

A FISSÃO NUCLEAR

Vinte e oito anos já se passaram desde que o mundo científico teve conhecimento que o núcleo do átomo de urânio (235), após a captura de um neutron, podia cindir-se em dois fragmentos de massas aproximadamente iguais, projetados com enorme energia cinética e acompanhados da emissão de cerca de três neutrons em cada processo. Essa peculiaridade do fenômeno da fissão nuclear levou os físicos à conclusão que seria possível provocar a propagação do fenômeno de átomo a átomo por meio dos neutrons produzidos em cada processo. A libertação de energia, em determinada massa de urânio, não seria assim limitada a um processo num único átomo, mas seria suscetível de progredir-se a toda a massa do material presente — um fenômeno análogo ao da combustão que só termina com a destruição total do combustível. O urânio gozaria assim de uma espécie de inflamabilidade nuclear e os seus átomos, em determinadas condições, sofreriam verdadeira reação em cadeia com uma libertação de energia quase inacreditável: um quilograma de urânio (235) libertaria uma quantidade de calor equivalente à obtida pela queima de cerca de 3.000.000 de quilos de carvão ou petróleo. As reações de fissão deveriam se desenvolver de forma altamente explosiva e suas aplicações para a arte bélica tornaram-se evidentes.

A reação em cadeia se propaga de átomo a átomo por meio de neutrons emitidos na fissão. O neutron é uma partícula subatômica, descoberta em 1932, cujas propriedades já eram plenamente conhecidas por ocasião da descoberta da fissão do urânio. Essa característica da fissão sugeriu os métodos básicos do controle da reação: como foi verificado que a reação se processa de forma mais eficiente quando os neutrons possuem pequenas velocidades, tornar-se-ia necessário freiar os neutrons emitidos pelos núcleos de urânio com velocidades próximas às da luz — o que poderia ser conseguido mediante interposição de substâncias leves (como a grafite, berílio e água pesada) não absorvedoras de neutrons; o nível de energia libertada pela massa de urânio, por unidade de tempo, poderia também ser controlado com auxílio de substâncias absorvedoras de neutrons (boro, cádmio, etc.) inseridas no sistema em que a reação se processaria (reator). O controle dessa nova forma de energia permitiria colocá-la a serviço da humanidade para promover o desenvolvimento dos países carentes de fontes de energias clássicas (carvão, petróleo ou potencial hidroelétrico).

O estabelecimento da primeira reação em cadeia controlada, em dezembro de 1942, um ano apenas após a decisão do governo norte-americano de construir bombas atômicas, abriu uma nova era para a humanidade e constituiu-se numa das mais importantes conquistas científicas do nosso século: suas consequências,

no desenvolvimento da ciência, da tecnologia, da economia, da arte bélica, da política e da própria diplomacia, justificam plenamente a designação dos nossos tempos como o século da energia atômica.

O fenômeno da fissão nuclear apresenta interesse múltiplo: do ponto de vista da Física Nuclear, sua importância é enorme, pois o estudo detalhado de várias peculiaridades do fenômeno tem contribuído para um melhor conhecimento da estrutura do núcleo atômico; ao mesmo tempo, de um ponto de vista puramente prático, constitui o mecanismo essencial de uma nova fonte de energia, cuja natureza é radicalmente diversa das fontes clássicas conhecidas até o presente. Esses fatos levaram cientistas e técnicos a se interessarem em novos métodos do seu aproveitamento para fins militares e pacíficos. Essa dualidade de aplicações, desconhecida entre as fontes clássicas de energia, constitui uma peculiaridade do processo, responsável pelo estabelecimento de uma política do segredo de leis e fatos da natureza que veio a constituir-se no episódio mais deplorável, irracional e anti-científico da história da ciência.

O desenvolvimetro da nova tecnologia mostrou claramente que as reações em cadeia, que poderiam libertar quantidades quase que inimagináveis de energia para promover o progresso das nações em desenvolvimento constituíam-se também na forma mais simples, econômica e eficiente da produção de explosivos nucleares para fins bélicos (ou civis); lançando mão de uma analogia, seria como se as cinzas provenientes da combustão do carvão nas usinas termoeletricas convencionais fossem constituídas por TNT.

OS COMBUSTÍVEIS NUCLEARES

Para uma melhor compreensão do que acaba de ser dito é conveniente recordar alguns fenômenos bem conhecidos.

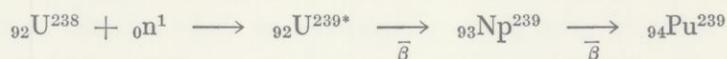
O urânio, tal como se encontra na natureza, é uma mistura de três isótopos, o U-238 com abundância de 99,3%, o U-235 com abundância de 0,7% e o U-234 com abundância desprezível.

Quando o urânio natural é bombardeado por neutrons lentos, isto é, por neutrons de velocidade de 2200 m/seg, apenas o U-235 sofre o processo de fissão: pela captura de um neutron, forma-se o "núcleo composto" U-236 que é instável e se divide em dois fragmentos de massas praticamente iguais. Os fragmentos são emitidos com energias de cerca de 200 MeV (7 eV é a energia de ligação H e O na molécula de água) e cerca de três neutrons são emitidos por processo. A fissão de um quilograma de U-235 liberta a mesma energia que a combustão de 3.000.000 de quilos de petróleo. Esses neutrons, emitidos com velocidades próximas às da luz podem ser ralentados por colisões contra átomos leves não absorventes (hidrogênio, deutério, berílio, carbono) e serem em seguida capturados por outros núcleos de U-235 dando origem a novas fissões, com novo desprendimento de energia, novos neutrons, novas fissões e assim por diante.

Pode-se assim estabelecer uma reação em cadeia em uma massa de urânio suficientemente grande para que a maioria dos neutrons emitidos seja absorvida por novos átomos de urânio.

Como a propagação da reação em cadeia se faz através de neutrons, a inserção de barras de materiais absorventes (de neutrons) permite controlar a reação e portanto o seu ritmo de desprendimento de energia. Os aparelhos em cujo interior a reação se processa de forma controlada são os reatores. Em ausência de controle, a reação pode apresentar um caráter explosivo, constituindo a bomba atômica.

Durante o funcionamento de um reator uma parte dos neutrons emitidos pode ser capturada pelo U-238 que não sofre fissão com neutrons lentos. Temos então a reação



o plutônio assim produzido é um elemento que, como o U-235, pode sofrer o fenômeno de fissão. O Pu^{239} foi utilizado na bomba de Nagasaki.

Como o U-238 efetua uma captura "parasita" de neutrons, uma das maneiras de se obter um reator eficiente (i.e., ocupando menor volume) consiste em eliminar o U-238 inerte — o que se consegue por separação física dos isótopos por preços astronômicos (\sim US\$ 25.000/kg U-235). Essa separação só é de interesse para países que possuem programa atômico para fins militares.

Países que não se interessam por programas militares e que desejam utilizar a energia atômica para fins civis têm um caminho único a seguir: construir os seus reatores produtores de energia com urânio natural, obtendo energia a preço competitivo com o proveniente de centrais térmicas convencionais e separando o plutônio produzido.

O plutônio pode ser utilizado para a construção de reatores compactos para a propulsão naval ou para o fornecimento de energia elétrica em centros de baixo consumo. Pode também ser utilizado como explosivo nuclear para fins pacíficos ou bélicos.

Existe entretanto uma utilização mais importante para esse material. Sabe-se que o tório é um material fértil — como o U-238. Em outras palavras, quando o Th é sujeito ao bombardeio de neutrons lentos, acaba por se transformar em um isótopo físsil do U — o U-233. O U-233 pode ser separado do Th irradiado por métodos simples e econômicos e pode substituir o U-235 com grandes vantagens em todas as suas aplicações, pois o número de neutrons emitidos na fissão termina do U-233 é maior do que o do U-235. Esse número é suficientemente elevado para que se possa imaginar um reator cujo núcleo seja constituído por uma mistura de U-233 e tório. Durante a fissão do U-233, produz-se calor e gera-se uma nova quantidade de U-233 (por transmutação do tório) maior do que a inicial. Esses reatores, ditos reprodutores, já funcionaram em Oak Ridge em 1951/54.

A utilização de reatores nucleares para fins puramente pacíficos como a produção de energia elétrica, traz como consequência a produção de novos elementos físséis. Esses elementos, que representam um sub-produto da operação, são do maior interesse para o desenvolvimento de atividades puramente pacíficas — como, por exemplo, a construção de reatores compactos para regiões desprovidas de energia elétrica, de reatores para a propulsão marítima ou ainda

para permitir o funcionamento dos reatores reprodutores que tornam possível a plena utilização do tório (como combustível fértil). Tais materiais podem também ser utilizados como explosivos para fins pacíficos, do mesmo modo que a dinamite pode ser empregada para fins civis ou para fins militares e a eletricidade utilizada para movimentar indústrias ou para fornecer energia para cadeiras elétricas. É claro que tais elementos podem ser igualmente utilizados em bombas para aplicações bélicas, mas, como afirmava eminente físico norte-americano, "pensar em energia atômica em termos da bomba é a mesma coisa que pensar em eletricidade em termos de cadeira elétrica".

O fato que é importante é que essa eventual aplicação para fins bélicos tem sido invocada pelos países pertencentes ao clube atômico como pretexto para impedir que outros países desenvolvam a energia nuclear de forma autônoma.

Uma análise desses problemas e das suas implicações sobre os países em desenvolvimento, ultrapassaria o âmbito desta conferência. As conseqüências dessa política, restritiva ao próprio desenvolvimento não tutelado da energia atômica, são de enorme importância, pois o emprêgo dessa nova forma de energia representa a única alternativa conhecida para que a humanidade possa manter o seu ritmo de desenvolvimento após o ano 2.000. No caso particular do Brasil, seu emprêgo representa um *imperativo de sobrevivência* para a década de 1980. Isto é, para o dia de amanhã!

OS RECURSOS MUNDIAIS DE ENERGIA

É importante assinalar que a diferença de nível de desenvolvimento que se observa atualmente entre as nações, resultou fundamentalmente do impacto da revolução industrial, iniciada no noroeste da Europa em fins do século XIX, que vem contribuindo de maneira acumulativa desde essa época a um aumento de riqueza de cerca de 2% ao ano. A ausência de fontes de energia — como o carvão e o petróleo, ou ambos, transformaram países ricos e progressistas em nações pobres e subdesenvolvidas. Não constitui surpresa portanto que esses países, quando detentores de reservas de materiais nucleares como o urânio e o tório — ou de ambos — depositem grandes esperanças que o uso pacífico da energia atômica venha a desempenhar um papel de singular importância na promoção do seu desenvolvimento, com um conseqüente aumento do padrão de vida de suas populações.

Para inferirmos a importância do impacto que a energia nuclear poderá ter no desenvolvimento das nações, é útil recordar que de uma população mundial de pouco mais de três bilhões de habitantes, 2,2 bilhões se encontram em países subdesenvolvidos (71,8%), consomem apenas 20,6% da energia total produzida e geram apenas 14,8% da eletricidade produzida no mundo.

De outro lado, existem argumentos que demonstram que o uso da energia de origem nuclear representa a única alternativa para a humanidade dentro de prazo não superior a 30 anos.

Estudos realizados por economistas das Nações Unidas sobre os recursos mundiais de energia e sobre as suas necessidades previsíveis nos próximos

anos, foram apresentados nas conferências sobre o Uso Pacífico da Energia Atômica, reunidas em Genebra em 1955, 1958 e 1964.

Esses estudos demonstravam, já em 1955, que se os atuais países industrializados continuarem a utilizar carvão e petróleo no mesmo ritmo com que o vinham fazendo entre 1930 e 1955, as reservas mundiais, desses combustíveis, economicamente exploráveis, estariam esgotadas no ano 2.000. Na conferência de 1958 o resultado dessa previsão foi confirmado e Bhabha e Dayal mostraram que se as nações subdesenvolvidas atingirem no ano 2.000 o mesmo padrão médio de vida existente na Europa atualmente, com um consumo de energia per capita equivalente a 3 toneladas de carvão por habitante por ano (compare-se com o consumo atual nos EU de 8 toneladas/habitante/ano), esses recursos mundiais estariam esgotados *em menos de 30 anos, isto em torno de 1990!*

Existem outras razões, entretanto, que nos levam a crer que, mesmo antes dessa época, o uso do carvão e do petróleo como fontes de energia será severamente limitado.

Na discussão sobre o esgotamento progressivo das fontes de energia, a energia proveniente de fontes hidroelétricas não foi considerada por ser de pouca significação: a produção de energia hidroelétrica em escala mundial representa menos do que 3% do total — comparável em importância apenas à energia de origem muscular. O estudo realizado por Bhabha e Dayal a que nos referimos, baseado em estatísticas das Nações Unidas mostra que sua contribuição atual é pequena e será totalmente desprezível no ano 2.000.

Entre as razões que nos levam a crer que a energia nuclear nas próximas décadas tornarão sem sentido a construção de centrais baseadas na utilização de combustíveis fósseis, duas merecem destaque especial:

1.º) Os cálculos recentes (dos últimos 5 anos) e a experiência do funcionamento de centrais nucleares mostram que usinas com capacidade de 300.000 ou mais KW competem economicamente com as centrais clássicas. Essas centrais nucleares, que vêm funcionando há vários anos em diversos países já permitiram atingir condições de segurança de regularidade de funcionamento que ultrapassaram as das melhores centrais convencionais. Como resultado, a instalação de centrais nucleares em países subdesenvolvidos e nos países detentores de grandes reservas de carvão e óleo como os Estados Unidos, em lugar de centrais convencionais, é fato notório.

Dessa forma, não tem mais sentido inquirir-se se a fissão nuclear pode ser utilizada como uma fonte prática de energia para produzir eletricidade. Essa pergunta já foi respondida em escala mundial. Negar essa evidência, como algumas vezes ocorre entre os inimigos do progresso, é atitude comparável a daqueles que, mesmo nos nossos dias, preferem subir as escadas de um arranha-céu por não confiarem nos motores elétricos dos elevadores.

2.º) A segunda razão a que desejamos fazer referência não é menos importante. Nossa geração teve a oportunidade de presenciar a uma verdadeira revolução científica e tecnológica, que vem alterando de maneira profunda a própria maneira de viver. A Química, por exemplo, sofreu tais transformações em consequência da introdução de métodos físicos para a análise, observação

e interpretação de fenômenos que a distinção entre alguns ramos da Física e outros da Química tornou-se impossível.

A Química Orgânica, por exemplo, progrediu de maneira espetacular durante os últimos vinte anos e a indústria química vem desempenhando funções nunca antes vislumbradas. Os produtos sintéticos praticamente eliminaram do mercado a indústria da seda e da lã naturais. O algodão e o couro vêm sendo paulatinamente eliminados das indústrias têxteis e das indústrias de manufatura de calçados, substituídos por materiais mais resistentes, mais uniformes quanto à qualidade e de custo mais baixo. Na própria indústria civil, a indústria dos plásticos vem fornecendo materiais para a construção, para a engenharia, para a construção de veículos e de instrumentos.

As matérias primas utilizadas pela indústria química, na manufatura de tecidos, plásticos, couro artificial e outros produtos semelhantes são o gás natural, o carvão e o petróleo. Em outras palavras, a matéria-prima para a indústria química dos nossos dias é constituída pelos combustíveis fósseis. Tais combustíveis existem em reservas relativamente pequenas e constituem um patrimônio que, se destruído em menos de um século, da forma primitiva e irracional a que tem sido submetido desde a sua descoberta, desaparecerá da superfície da terra e não poderá ser reproduzido, pois resultou da ação da natureza durante milhões de anos.

Verificamos assim que a destruição desses produtos orgânicos existentes na natureza, que podem ser transformados em produtos nobres do mais elevado interesse para o bem-estar da humanidade, constitui ato de imprevidência mais grave do que a destruição das matas, pois estas podem ser recuperadas num espaço de tempo comparável ao de uma geração.

Para melhor compreendermos a significação que o desenvolvimento da energia nuclear poderá ter para o Brasil é útil evidenciar alguns fatos nem sempre reconhecidos.

Primeiramente, é útil lembrar que a energia atômica representa tecnologia recente, e como tal, suscetível de desenvolvimentos quase imprevisíveis. Sob esse aspecto, apresenta características que são radicalmente diversas das fontes de energia convencionais. Os métodos de aproveitamento da energia hidroelétrica e da energia térmica já atingiram a uma fase de progresso e perfeição que alterações futuras, suscetíveis de maior rendimento são pouco prováveis e quase impossíveis; representam assim tecnologias em vias de obsolescência quando comparadas com a energia atômica que, desenvolvida em época em que pode se valer de todos os progressos técnicos das usinas convencionais, apresentando entretanto tais perspectivas de desenvolvimento que é difícil vislumbrar a sua potencialidade. Possivelmente, as suas maiores limitações no momento presente são oriundas da própria limitação da inteligência humana. Mesmo assim, os seus progressos têm sido espetaculares: o emprego de elementos combustíveis capazes de trabalharem em temperaturas muito mais elevadas do que se poderia atingir com os combustíveis fósseis (com consequente aumento do rendimento termodinâmico); a descoberta de novas ligas de urânio com outros metais capazes de resistir a taxas maiores de irradiação e a simplificação dos seus métodos de construção são alguns dos fatores que a tornaram economicamente competitiva com as centrais convencionais a óleo e

a carvão. As centrais de potências de 200.000 kw, ou maiores, representam a solução econômica para a geração de energia elétrica mesmo em países detentores de grandes reservas de carvão e de petróleo — como é o caso da Grã-Bretanha e dos Estados Unidos. No Brasil, pela limitação das nossas reservas de petróleo, pela má qualidade e pelo custo proibitivo do carvão, as centrais nucleares de porte médio representam a solução racional do problema energético em regiões onde não exista potencial hidroelétrico competitivo.

O tão decantado potencial hidroelétrico não se acha uniformemente distribuído, fator responsável, entre outros, pela desigualdade do desenvolvimento industrial de várias regiões do país. Nas regiões onde esse potencial é carente e nas quais existem riquezas naturais suscetíveis de utilização industrial, a instalação de pequenas centrais nucleares pode representar uma condição indispensável para o progresso. Em outras regiões do país onde o potencial hidroelétrico é abundante, mas apenas suscetível de aproveitamento em larga escala, exemplificado por exemplo pela necessidade de construção de barragens de custo vultoso, a utilização da energia atômica com reatores de pequeno porte poderia permitir o desenvolvimento de indústrias que criariam o mercado para as futuras centrais hidroelétricas de grande porte. Regiões representativas desse caso particular encontram-se no nordeste, norte e oeste do país.

Poderíamos ainda lembrar que os reatores podem ser considerados como fonte de força motriz — para bombeamento de água tornando possível o aproveitamento de vastas regiões do país dotadas de terras férteis mas carentes de água; de outro lado a utilização de parte do calor produzido em centrais nucleares elétricas permite dessalinizar a água do mar a baixo custo; seria útil lembrar ainda que com o desenvolvimento da tecnologia e a obtenção de temperaturas extremamente elevadas nos reatores (que teoricamente poderiam elevar-se a milhões de graus centígrados), os reatores poderiam ser utilizados como fonte térmica para a extração de metais de vários minérios.

Os fatos que acabamos de citar mostram ser imperioso o desenvolvimento dessa tecnologia no país, pois de outra forma não nos encontraremos preparados para colher os seus benefícios em tempo oportuno, correndo o risco de continuarmos na era da lenha e das rodas de água numa época em que o homem já conquista o espaço interestelar.

Para compreendermos a elevada significação do impacto da energia nuclear sobre o nosso país e a necessidade premente de desenvolvê-la sem as peias e restrições impostas pelos países do Clube Atômico aos usuários da sua tecnologia, estudaremos com algum detalhe o problema das necessidades energéticas da região centro-sul do país.

A NECESSIDADE DE UMA NOVA FONTE DE ENERGIA PARA O BRASIL

O Brasil, com uma população atual superior a 80 milhões de habitantes, distribuídos com densidade variável numa área de 8.500.000 quilômetros quadrados, atravessa uma fase de transição de uma economia de base agrícola para uma economia industrial. A produção industrial vem aumentando de maneira significativa desde a segunda guerra mundial, com uma taxa média de crescimento do produto nacional bruto de cerca de 7% ao ano, atingindo o

aumento da produção industrial a um valor de 12,7% ao ano durante o período 1957-1962. Uma comparação desses dados com o coeficiente médio de aumento da população de 3,2% ao ano dá uma clara representação do aumento populacional e das tendências da nossa economia.

Uma fração ligeiramente superior a 40% da população acha-se localizada na região centro-sul do país, constituída pelos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Guanabara e o sul de Minas Gerais.

Essa região representa apenas 8% da área territorial brasileira, mas a sua produção industrial corresponde a cerca de 75% da produção nacional; a energia elétrica instalada e o seu consumo são superiores a 80% do potencial instalado e do consumo nacionais. A região centro-sul é a mais industrializada da América Latina.

Nessa região, as necessidades reais de demanda de energia correspondem a uma taxa de aumento de 14,5% ao ano e a capacidade de geração atingirá a cerca de 12.000.000 de kilowatts (ou 12.000 MW) em 1970. Essa energia elétrica é produzida essencialmente por centrais hidroelétricas, pois as centrais térmicas existentes contribuem apenas com cerca de 10% do total.

Ainda que se admita um valor inferior à taxa de crescimento da demanda, o ritmo de desenvolvimento industrial exigirá a duplicação da potência elétrica instalada cada seis anos (o que corresponderia a cerca de 11% de aumento por ano).

O potencial hidroelétrico existente na região centro-sul, economicamente explorável, situa-se entre valores de 12.800 MW e 40.600 MW; as avaliações mais recentes, que estão sendo conduzidas pelo Canambra Engineering Consultants Ltd, para a Eletrobrás, conduziriam a um valor intermediário. A fim de raciocinarmos com segurança tomemos o limite superior da previsão, isto é, 40.600 MW.

Em 1970 o potencial instalado na região centro-sul será de 12.000.000 KW; como o período de dobramento da potência instalada é de 6 anos, será necessário dispôr de 24.000.000 KW em 1976 e de 48.000.000 em 1982.

A consequência que se pode tirar do que acaba de ser exposto é que, mesmo adotando hipóteses conservadoras, o potencial hidroelétrico disponível na região centro-sul estará plenamente utilizado na década de 1980. As avaliações supra mencionadas incluem o potencial de Sete Quedas — cujo aproveitamento é sujeito a críticas desfavoráveis por vários engenheiros hidroelétricos da maior reputação e competência. Outra lição que poderemos tirar do que acaba de ser exposto é que mesmo a existência hipotética do dobro do potencial estimado, apenas atrasaria a exaustão das fontes hidroelétricas disponíveis por um prazo de seis anos. O próprio relatório preliminar da Canambra afirma "À medida que os locais mais favoráveis para a implantação de usinas hidroelétricas forem sendo progressivamente utilizados, haverá certamente necessidade de se instalarem grandes centrais térmicas, convencionais ou nucleares, para a suplementação das hidráulicas" (pág. 7 do sumário).

Uma vez que o potencial hidroelétrico economicamente explorável na região centro-sul estará totalmente utilizado em torno de 1980, a manutenção do ritmo de desenvolvimento exigirá a utilização de uma nova fonte de energia.

Ora, existem três outras fontes apenas que podem ser consideradas: a energia térmica, produzida pela combustão do carvão, a proveniente da queima do petróleo e a energia atômica. Veremos a seguir que apenas a última pode fornecer solução para o problema.

Os depósitos de carvão acham-se localizados na região centro-sul do país. O carvão vapor, obtido como sub-produto da produção de carvão siderúrgico, apresenta baixo poder calorífero, o seu conteúdo de cinzas é superior a 50% e apresenta enormes quantidades de piritas disseminadas na massa do carvão. A essas desvantagens é importante ainda recordar que em decorrência da própria natureza dos depósitos, o custo de sua extração onera de maneira substancial o preço do produto: o carvão nacional, na fonte de produção, é de custo superior ao do melhor carvão do mundo, importado dos Estados Unidos ou da Europa e transportado até a boca da mina.

A êsses fatores, acrescente-se ainda que os depósitos nacionais dêsse carvão de "boa qualidade" são limitados e portanto insuficientes para o atendimento das demandas previstas. Acrescente-se o efeito corrosivo dos gases de combustão sobre as componentes da central e sobre a região vizinha e o custo quase proibitivo da energia gerada para compreendermos porque o carvão só é utilizado no país em centrais anti-econômicas localizadas nas vizinhanças imediatas das minas. No caso de uma eventual utilização de centrais a carvão em outras regiões do país, ao custo do transporte dever-se-ia ainda acrescentar a necessidade dos investimentos para o estabelecimento de um novo sistema de transportes marítimos e terrestres — o que tornaria proibitivo o custo da energia. Sua comparação com a energia de origem nuclear não tem sentido, pois o conteúdo energético aproveitável de um kilograma de urânio 235 é equivalente ao obtido da combustão completa de 3.000 toneladas de carvão de boa qualidade e equivalente a mais de 6.000 toneladas de carvão nacional.

Não se deve inferir, do que acaba de ser afirmado, que somos contrários à utilização do carvão nacional. Apesar dos inconvenientes citados, desempenha êle função de material estratégico para a siderurgia e é necessário que se promova a sua utilização para essa finalidade com o intuito de melhorar ao máximo a sua qualidade para que o país se torne cada vez menos dependente de sua importação. Êsse alvo não pode ser facilmente atingido e o seu custo será sempre mais elevado do que o de proveniência externa em razão do seu baixo conteúdo energético. O carvão vapor, obtido como sub-produto do carvão siderúrgico, deverá ser utilizado em centrais situadas à boca da mina para que as despesas de transporte — sempre menores que as de transmissão de energia não venham a onerar de maneira substancial o consumidor. Do que foi dito resulta também que tais centrais deverão fornecer energia a sistemas interligados nos quais o excesso do custo da energia possa ser convenientemente diluído. O que positivamente não tem sentido é de promover-se a instalação de centrais térmicas a carvão em regiões situadas a distâncias apreciáveis das fontes de abastecimento, como tem sido preconizado algumas vezes por leigos, sem um exame cuidadoso dos aspectos econômicos do problema. Bons exemplos para corroborarem o que afirmamos são representados pela decisão de utilizar óleo (para o abastecimento das usinas térmicas Piratininga, em S. Paulo e por estudos recentes realizados pela Canambra para a complementação da geração hidroelétrica — relatório da Canambra, Vol 1, p. VI-4). Nesse relatório são

comparados os custos de uma central de 500 MW com fator de carga anual de 0,8 nas seguintes hipóteses: a) instalada em Tubarão, Sta. Catarina, queimando carvão vapor nacional cujo preço próximo às minas é de US\$ 9,10/tonelada; b) a mesma central do caso anterior, porém instalada em São Paulo ou Rio de Janeiro, com um preço de US\$ 18,34/tonelada para o carvão adquirido em Sta. Catarina e transportado até a usina; c) uma central de 500 MW a óleo Bunker importado pelo preço de US\$ 194/tonelada. Segundo o relatório citado, os preços para a energia gerada, calculada em milésimos de dólar por kilowatt-hora, são os seguintes: 9,62 para o caso a), 12,64 para a hipótese b) e 7,96 para o caso c), isto é, para uma central alimentada a óleo.

Mostraremos que êsses custos para a energia, seja ela proveniente do óleo ou do carvão (mesmo com uma central situada na boca da mina) representam valores que superam por mais de 35% e de 65% o custo da energia produzida por um reator de urânio natural moderado a grafita com 50% de participação nacional. No caso particular da comparação com a central térmica instalada em S. Paulo ou Rio, alimentada com carvão de Sta. Catarina, o custo da energia seria cerca de 2,2 vezes maior do que o da nuclear.

Verifica-se assim, mais uma vez, que quando o problema da energia nuclear é discutido no país, os inimigos do progresso lançam mão de argumentos emocionais, pois os números são irretorquíveis e o Brasil não pode se dar ao luxo de pagar uma energia de preço mais alto somente para favorecer a mineração do carvão.

A outra fonte de energia considerada face ao esgotamento progressivo das reservas hidroelétricas da região centro-sul, foi o petróleo. Sabemos que a produção nacional desse combustível corresponde a menos de 40% do consumo atual no país e que as reservas medidas são suficientes para a manutenção dessa produção durante 10 anos. Ora, é de se esperar que o magnífico e patriótico trabalho que vem sendo desenvolvido pela Petrobrás nos setores da prospecção e da exploração do petróleo torne possível em breve o atingimento a uma fase de autosuficiência na produção (com um aumento apreciável das reservas). Entretanto, mesmo um aumento de 600% das reservas conhecidas não alteraria de maneira apreciável o panorama atual: significaria apenas que poderíamos atingir a autosuficiência no nível atual de consumo e mantê-la por um período de pouco mais de duas décadas.

A utilização do petróleo para a indústria petroquímica e a elevação do seu preço, que será inevitável face ao esgotamento progressivo das reservas mundiais, e a competição do seu uso para fins mais nobres, trarão como consequência um aumento do preço da energia elétrica produzida — que não é competitiva com a proveniente das centrais nucleares mesmo nos nossos dias.

Qualquer tentativa em se promover o desenvolvimento de centrais térmicas, a óleo importado, representa ônus inaceitável para o consumidor e desperdício de divisas que poderiam ser melhor utilizadas para a importação de equipamentos indispensáveis à nossa industrialização.

A análise desenvolvida mostra que o uso da energia nuclear no Brasil representa verdadeiro imperativo de sobrevivência e de manutenção do seu ritmo de desenvolvimento. Quaisquer medidas destinadas a afastar o seu uso e a desencorajar o seu desenvolvimento constituem séria ameaça para o nosso futuro como país livre e soberano e devem ser consideradas como anti-nacionais.

A COMPETIÇÃO ENTRE A ENERGIA ATÔMICA E A ENERGIA HIDROELÉTRICA

Num país rico em potencial hidráulico como é o caso do Brasil, surge com freqüência a discussão sobre a conveniência de ser iniciado um programa nuclear antes do esgotamento total das reservas hidroelétricas consideradas como economicamente exploráveis. Tal discussão só poderia ser de interesse no momento atual pois, como já tivemos a oportunidade de mencionar, o potencial hidroelétrico da região centro-sul estará totalmente utilizado dentro de duas décadas, se for mantido o atual ritmo de demanda de energia, reflexo do desenvolvimento industrial; a partir dessa época, não haverá outra possibilidade senão lançar mão da energia atômica. É importante entretanto assinalar mais uma vez que essa "fatalidade" deverá ser antecipada, pois, mesmo no momento atual, a energia nuclear, para centrais de porte igual ou maior do que cerca de 200 a 300 megawatts já compete economicamente com as centrais a carvão e a óleo.

Em relação ao custo da energia fornecida por centrais hidroelétricas torna-se necessário lembrar que cada central representa um problema particular e os custos de suas instalações variam grandemente de uma para outra. Além dessa circunstância, é oportuno lembrar que o fator de carga das centrais hidroelétricas da região centro-sul situa-se entre 50% e 60%, sendo variável de ano para ano segundo a precipitação pluvial. Isso equivale a afirmar que a energia gerada durante o ano corresponde a 50% ou 60% do que se poderia esperar em face à potência instalada; outra maneira de afirmarmos a mesma coisa consiste em lembrar que se o fator de carga é, por exemplo, de apenas 50%, o custo efetivo da central, considerada como geradora de energia para ser vendida ao mercado, é o *dobro do custo nominal da instalação*. Esse é o inconveniente de centrais hidroelétricas supermotorizadas: nos períodos de grande hidraulicidade elas podem funcionar a plena carga mas são forçadas a reduzirem a geração de energia por falta de água.

Nas comparações dos custos com a energia nuclear, será sempre necessário nos lembrarmos que as centrais nucleares podem funcionar a plena carga (o fator de utilização dos reatores a urânio natural e grafite na Grã-Bretanha atingiu a 96%).

A fim de melhor situar os problemas dos custos do investimento das centrais hidroelétricas e das átomo-elétricas, torna-se conveniente lançar mão dos dados relativos aos custos reais, pois com freqüência são levantados argumentos destituídos de qualquer fundamento. Afirma-se, por exemplo, que para as centrais hidroelétricas "a instalação de um KW custa 200 dólares, o que é muito barato em relação ao aproveitamento da energia nuclear"; argumenta-se também que "o Brasil tem um potencial hidroelétrico de 150 milhões de KW, dos quais somente cerca de 8 milhões estão aproveitados, portanto ainda sobra muito".

As avaliações mais recentes e autorizadas sobre os custos reais das instalações hidroelétricas foram realizadas para o Ministério das Minas e Energia pela Canambra Engineering Consultants Limited, com auxílio do Fundo Especial das Nações Unidas, como resultado de um contrato estabelecido pelas Centrais Elétricas de Furnas, S.A. e a Canambra Engineering Consultants Limited em junho de 1963.

Os custos reais das instalações acham-se expostos no Vol. 1, Cap. V, pg. V-10 e V-12 (dezembro de 1963): ver tabelas anexas.

TABELA V-4

PROJETO	POTÊNCIA NOMINAL COM 0,9 pf KW	CUSTOS UNITÁRIOS EM US\$	
		PARA A POTÊNCIA NOMINAL	POR KW DE ENERGIA FIRME NOS PERÍODOS MAIS SECOS
Três Marias Exp.....	122,800	88.75	301.80
Peixoto Exp.....	300,000	80.30	250.90
Piraju.....	83,000	301.20	396.90
São Miguel.....	56,000	227.00	363.30
Funil (Grande).....	122,000	155.50	364.90
Estreito.....	800,000	114.80	248.30
Jaguara.....	532,000	135.80	253.50
Rosal.....	110,000	147.39	579.07
Aiuruoca.....	30,000	258.00	703.60
Igarapava.....	150,000	353.80	804.10
Volta Grande.....	480,000	236.00	575.00
Gambá.....	1,044,000	168.60	414.20
Maribondo.....	768,000	204.70	488.30
Dois Irmãos.....	144,000	267.90	482.20
Caraguatatuba + Dams	350,000	216.10	609.92
Paraibuna "B" } s e m	—	—	527.00
Paiol Grande.. } Cara-			
Jaguari..... } guata-			
Buquira..... } tuba			

TABELA V-5

Projetos em Construção

PROJETO	POTÊNCIA NOMINAL COM 0,9 pf KW	CUSTOS UNITÁRIOS EM US\$	
		PARA A POTÊNCIA NOMINAL	POR KW DE ENERGIA FIRME NOS PERÍODOS MAIS SECOS
Barra Bonita.....	122,800	338.20	1182.80
Bariri.....	124,200	324.50	983.00
Ibitinga.....	117,000	256.50	566.20
Furnas.....	864,000	253.50	263.90
Chavantes.....	360,000	207.40	494.40
Graminha.....	76,000	234.30	712.40
Funil (Paraíba).....	236,000	274.00	770.50
Fumaça.....	39,600	243.00	437.50
Jupiá.....	1,209,000	186.00	324.50

Esses valores devem ser comparados com os custos da energia atômica-elétrica; o confronto será limitado ao caso dos reatores de urânio natural por serem os que têm demonstrado maior índice de eficiência de funcionamento (fator de carga) e de apresentarem preços mais baixos para o KW instalado do que os de urânio natural e água pesada.

Os custos específicos para as centrais nucleares de urânio natural e grafite são:

CAPACIDADE DA CENTRAL (em megawatts)	INVESTIMENTO (US\$/KW)
100	435
200	330
300	284
400	255
500	235

Para uma central nuclear de 500 MW do tipo acima especificado, o KWh é produzido a um preço de 5,79 milésimos de dólar e é o resultado da soma de várias parcelas que incidem sobre o custo: 3,19 para o investimento, 0,49 para a primeira carga de urânio, 0,71 representando o custo de operação e de manutenção e 1,40 devido ao consumo do combustível; verifica-se que o combustível contribui com 1,89 milésimos de dólar computando-se para o urânio o preço do mercado internacional. Numa central térmica funcionando com óleo importado (de 500 MW e 0,8 de fator de carga), o custo do combustível atingiria a 5,30 milésimos de dólar em cada KWh, enquanto que para uma central a carvão nacional, nas mesmas condições de fator de carga e de potência, a incidência do preço do combustível no KWh gerado seria de 4,69 ou 9,45 milésimos de dólar, segundo fôsse instalada na boca da mina (Tubarão) ou em São Paulo ou Rio de Janeiro.

Essa análise mostra mais uma vez, de maneira irretorquível, que a geração de energia por meio de carvão ou óleo é anti-econômica e representa ônus sobre o consumidor que não pode ser tolerado, apesar dos benefícios que traria para a indústria carbonífera do país.

Se compararmos os custos do investimento entre centrais nucleares e hidroelétricas, cujos *custos reais* são os da tabela V-4 da Canabira, várias conclusões podem ser tiradas (é importante assinalar que como o combustível de um reator nuclear é urânio e não água, o seu fator de carga não varia com a estação do ano nem com a precipitação pluviométrica: o custo da sua energia e do seu investimento devem ser comparados com os valores do KW de energia firme no período de seca):

- a) Não existe na região centro-sul do país, ao contrário do que vem sendo propalado com frequência, nenhuma usina hidroelétrica em funcionamento cujo investimento seja inferior a US\$ 250 /KW, mas encontramos centrais cujos investimentos atingem até US\$ 804/KW!
- b) A construção de pequenas centrais de capacidade reduzida corresponde a investimentos injustificáveis na maioria dos casos, podendo ser substituídas por uma ou mais centrais átomo-elétricas de grande porte com real economia para o consumidor.
- c) No caso das centrais hidroelétricas em construção, o que acaba de ser dito assume aspecto nítido numa comparação com os investimentos correspondentes às potências firmes a serem geradas pelas centrais de Barra Bonita, Bariri, Ibitinga e Graminha, e Fumaça, cuja capacidade total atinge a cerca de 500 MW. Em tôdas essas centrais, o menor investimento é de US\$ 437,50/KW e o maior é de US\$ 1.182/KW!

Essas centrais — e outras, vêm sendo construídas em função de vários fatores que podem ter importância: a eventual necessidade de regularizar o curso de um rio, o atendimento de necessidades locais de naturezas várias, etc. O que é importante, entretanto, é que não pode ser usado um sistema de dois pesos e de duas medidas no estabelecimento da comparação entre os custos da energia de natureza hidroelétrica e termoelétrica, de um lado, e a nuclear de outro. Se o critério for o econômico, é difícil compreender porque vem sendo levantada há tantos anos uma reação irracional e despropositada ao uso dessa nova forma de energia. O que é necessário é que esses problemas sejam sempre resolvidos de maneira objetiva e não emocional, realista e não demagógica.

Com essas considerações sobre os custos da energia atômica e os custos reais das centrais hidroelétricas e térmicas instaladas no país (note-se que a energia hidroelétrica no Brasil figura entre as mais caras do mundo), torna-se oportuno ainda mencionar o problema das reservas reais do potencial hidroelétrico disponíveis na região centro-sul, isto é, reservas economicamente exploráveis.

Em relação a esse problema encontramos também afirmações despropositadas de leigos e estimativas dignas de confiança por técnicos. Os dados mais atuais são apresentados nos relatórios da Canambra Engineering Co (Power Study of South Central Brasil — Vol 1, Report on Program Development to Meet Market Requirements Through 1970, December 1963), que engloba todas as informações disponíveis na época, representando o resultado de estudos cuidadosos realizados pelos grupos CEMIG, FURNAS, RIO LIGHT, SÃO PAULO LIGHT, CHEVAP, CELUSA, CHERP, etc., acrescidas pelos trabalhos realizados pelo grupo técnico canadense-brasileiro para o Ministério das Minas e Energia (Eletrobrás). “Da tabela V-4 na página V-10 da seção V, pode-se mostrar que cerca de 3.500 megawatts de potencial hidroelétrico com um fator de capacidade anual de 59 por cento poderia ser obtido no período mais seco a partir de projetos hidroelétricos que estão em consideração, a um custo de capital inferior a US\$ 400 por kilowatt — de fato, cerca de 2.250 megawatts poderiam ser produzidos a um custo inferior a US\$ 250 por kilowatt”. (trad. do autor).

Os valores acima assinalados representam os dados dignos de confiança para a região centro-sul; outros apresentados como argumento contrário à utilização da energia nuclear são destituídos de fundamento. Entre esses, os tão propalados 150 milhões de kilowatts (ou 150.000 megawatts) que podem existir no rio Amazonas ou em outras bacias suficientemente distantes para que seu uso se torne ainda mais anti-econômico do que a central de Barra Bonita (1.182,80 dólares por KW firme instalado!).

O potencial economicamente explorável, segundo a Canambra, estaria totalmente utilizado entre 1970-72 e o advento da energia átomo-elétrica seria imperativo a partir dessa ocasião!

Tomemos uma outra estimativa que situa o total do potencial disponível para a região centro-sul em 40.560 MW, incluindo as regiões contíguas. (Estudo realizado CEMIG, isto é, pelas Centrais Elétricas de Minas Gerais para o Ministério das Minas e Energia e para a Eletrobrás, englobando dados utili-

zados no pedido de empréstimo à Aliança para o Progresso, preparado para a C.E. Furnas, pela Companhia Internacional de Engenharia, relativo à construção da Central de Estreito).

BACIA	POTENCIAL, EM MW
Rio São Francisco.....	1.650
Rio Jequitinhonha.....	1.000
Rio Mucuri.....	100
Rio Doce.....	1.400
Rio Itabapoana.....	300
Rio Paranaíba.....	5.000
Rio Grande.....	8.550
Rio Paraíba.....	3.000
Rio Tietê (inclusive desvio para a Serra do Mar)....	1.700
Rio Paranapanema.....	1.200
Rio Ribeira de Iguape.....	500
Rio Paraná (Urubupungá e Sete Quedas).....	12.800
Rio Iguassú (Saltos do Iguassú).....	3.000
Pequenos potenciais, em Minas Gerais e São Paulo..	360
TOTAL.....	40.560 MW

Essa estimativa, bastante mais otimista do que a da Canambra, representa os valores por nós assumidos para a discussão das necessidades energéticas da região centro-sul. Qualquer alteração no sentido de diminuir os números apresentados apenas acelerará o esgotamento do potencial disponível, tornando mais urgente a utilização das centrais nucleares em grande escala.

AMANHÃ SERÁ TARDE DEMAIS

A apreciação da evolução das necessidades energéticas da região centro-sul nas próximas décadas e das disponibilidades do seu potencial hidroelétrico economicamente explorável, conduzem-nos à conclusão irrelutável que, mesmo na hipótese mais otimista da existência de tais recursos, a utilização da energia nuclear será imperativa na década de 1980.

Com o propósito de melhor situar a significação desse fato no que tange ao planejamento das atividades nucleares no país, torna-se oportuno raciocinar de forma regressiva no tempo, pois dessa forma ressalta com maior clareza a necessidade imperiosa de ser estruturado o programa nacional de utilização da energia nuclear.

Na década de 80 deverá estar totalmente utilizado o potencial hidroelétrico existente na região, situado, de maneira otimista, em um nível de 40 megawatts. A partir dessa data a geração elétrica na região deverá ser feita por usinas termoelétricas.

A menos que descobertas imprevisíveis de grandes depósitos de petróleo ou jazidas de carvão de qualidade comparável ao importado venham a ser descobertas, toda a geração de energia deverá ser feita por centrais átomo-elétricas. No caso da eventual descoberta de jazidas de petróleo e de carvão a que nos referimos acima, uma parte dessa geração deveria ser realizada por centrais convencionais, a fim de permitir o aproveitamento eventual do carvão vapor e do óleo residual.

De qualquer forma, como entre 1980 e 1986 haverá necessidade de instalar centrais com capacidade de várias dezenas de megawatts (talvez 40, mas certamente mais de 20), a participação nuclear será, na pior das hipóteses, de vários milhões de megawatts. Para que essas centrais possam entrar em funcionamento em 1986, deverão ter a sua construção iniciada em 1980, pois situa-se em torno de seis anos o prazo de construção de uma central nuclear de grande porte.

Partindo-se do princípio que o desenvolvimento científico e industrial do país permita a construção integral dessas centrais com material e técnica nacionais (o que é hipótese conservativa se recordarmos que países menos industrializados do que o Brasil, como a Índia e a China já atingiram êsse estágio nos nossos dias), os projetos dessas centrais deverão ser iniciados pelo menos dois anos antes do início da sua construção — isto é, em 1978.

Êsses projetos deverão basear-se em experiência prévia adquirida com ao menos um reator de porte médio. Calculando em dois anos o período para que os engenheiros, cientistas e técnicos adquiram essa experiência com o protótipo de potência intermediária (de cerca de 300 megawatts), isto equivale a afirmar que em 1976 o Brasil já deverá dispor de um reator de potência em pleno funcionamento. Como a sua construção levará, na melhor das hipóteses seis anos (pois a indústria nacional deverá ser chamada a participar pela primeira vez na construção, pelo menos em 50-80% de suas componentes), a conclusão a que se chega é que o início de sua construção deverá ser situado entre 1969 e 1970.

Lembrando novamente que os projetos dessa central levarão cerca de dois anos para serem executados, verificamos que o seu início já deveria ter sido fixado no primeiro semestre do ano corrente.

É óbvio que para o desenvolvimento dêsse programa mínimo, para o qual os prazos para a construção do primeiro reator foram fixados em seis anos e o tempo do projeto em dois, será indispensável contar com a cooperação internacional, por parte de países que estejam realmente interessados em auxiliar o Brasil na sua decolagem para a conquista dessa nova forma de energia. Em ausência dêsse auxílio os prazos calculados para o primeiro reator deveriam ser maiores. Verificamos assim que o programa nacional de centrais nucleares está atrasado e que o tempo perdido é irrecuperável. Sob êsse aspecto tem pouco sentido construtivo lembrar que se o programa de instalação da primeira central nuclear para a região centro-sul não houvesse sido inexplicavelmente abandonado desde 1964, estaria o nosso país em situação melhor em face ao futuro. O que é importante entretanto é ter sempre presente que as demandas de energia são de tal ordem de magnitude, e para um futuro tão próximo, que não teria sentido nos lançarmos na aventura de adquirir reatores fabricados no exterior: seriam simples caixas pretas, cujos botões seriam apertados por técnicos brasileiros e nada significariam para o desenvolvimento nacional.

A perspectiva do atendimento das necessidades energéticas do Brasil nas próximas décadas apresenta-se assim com um panorama sombrio, dada a necessidade de ser desenvolvida uma infra-estrutura científica, tecnológica e industrial que não pode ser improvisada. Obviamente, as hipóteses assumidas nesta discussão, que envolvem o início da produção de energia pelo átomo em

grande escala somente a partir de 1980, não representam a solução ideal, pois seria desejável e prudente que a transição se fizesse de forma contínua para que as indústrias nacionais dispusessem de tempo para se adaptarem ao problema gradualmente, ao mesmo tempo em que o número de técnicos e cientistas fôsse aumentando face a um programa articulado a longo prazo.

A conclusão importante que decorre desta exposição é que o Brasil não pode mais se atrasar no seu desenvolvimento nuclear. Qualquer tentativa de decisão dos problemas básicos dêsse desenvolvimento não pode ser tomada apenas por burocratas, conhecedores profundos de leis e de regulamentos, mas jejunos de ciência e de técnica. A exemplo de outros países, o estabelecimento de um plano de desenvolvimento a longo prazo se impõe e é necessário que seja criado um precedente no país: não deixar que a pseudo-técnica e que a pseudo-ciência elaborem programas irrealizáveis.

Um programa objetivo, elaborado com o concurso dos cientistas e dos técnicos terá que ser feito sem perda de tempo, pois representa imperativo de desenvolvimento e de segurança nacionais. Se êsse objetivo puder ser realizado e se a política respeitar a ciência e a técnica, o Brasil poderá dispôr de energia para o seu desenvolvimento.

O essencial é que não se perca mais tempo: o programa de desenvolvimento nuclear deveria ter sido iniciado ontem: amanhã será tarde demais.

FUSÃO NUCLEAR

As reservas mundiais de urânio e tório são suficientes para o atendimento das necessidades mundiais de energia durante várias centenas de anos: à medida que forem se esgotando os depósitos de urânio e de tório economicamente exploráveis, a tecnologia continuará a se desenvolver permitindo um melhor aproveitamento do combustível e do calor nuclear, com uma tendência para o barateamento da energia produzida. Ainda recentemente o Prof. Weinberg, diretor do Laboratório Nacional de Oak Ridge, chamou a atenção para o fato, mostrando que com o progresso dos reatores reprodutores, dentro de algumas décadas poderia ser considerada econômica a extração das pequenas quantidades de tório e de urânio contidas nas formações graníticas para seu uso posterior como combustível. Em outras palavras, o custo da energia deverá diminuir de tal forma que será possível a utilização das rochas como combustível.

Entretanto, após algumas centenas de anos os recursos mundiais de urânio e de tório estariam esgotados, sem que outras fontes clássicas de energia pudessem dar uma contribuição apreciável. O futuro da humanidade seria sombrio se não fôsse possível prever o uso de outra nova fonte de energia que, como a fissão, tem a sua origem em processos nucleares. Êsse processo, responsável pela libertação da energia nas estrêlas, é a fusão nuclear.

O interesse fundamental da fusão decorre da esperança que em futuro próximo ela possa ser utilizada para a produção de energia de forma controlada para fins industriais. Reações de fusão têm sido provocadas de forma não controlada nas bombas de hidrogênio. Nas reações de fusão, o combustível primário utilizado é o deutério, um isótopo do hidrogênio de massa 2, encon-

trado sempre nos compostos que contém o hidrogênio comum (de massa 1) numa proporção de cerca de 0,01%. As águas dos rios, dos lagos e a própria água do mar constituem um manancial praticamente inesgotável desse combustível, cuja separação pode ser efetuada por métodos relativamente simples e econômicos quando comparados com os empregados para a separação do urânio 235 do urânio 238.

O interesse das pesquisas sobre o controle dessa energia é enorme, pois se os reatores reprodutores, em futuro próximo, nos permitirão queimar as rochas, as reações de fusão transformariam as águas dos mares em fontes de combustível. Sua utilização resolveria assim, de maneira permanente, o angustiante problema da rápida exaustão dos combustíveis fósseis.

Considerada como uma fonte de energia, a fusão nuclear apresenta certas características que lhe são próprias e que apresentam enorme atrativo: os subprodutos das reações não são radioativos e os reatores a fusão, isto é, os aparelhos em cujo interior as reações de fusão se processariam de forma controlada, possuem uma segurança ilimitada, pois nada poderia fazê-los escapar ao controle: o pior acidente previsível seria a sua paralisação.

Sabemos que os núcleos dos átomos são constituídos por duas espécies de partículas elementares — prótons e nêutrons. Numa reação de fusão, a colisão nuclear de dois átomos provoca um re-arranjo mútuo dos seus núcleons (prótons e nêutrons) para a formação de dois ou mais produtos da reação, que são emitidos com enorme energia cinética — isto é, em temperatura extremamente elevada. Normalmente essa energia comparece como energia cinética, mas em alguns processos, uma parte dessa energia pode ser transportada em energia de excitação interna de um dos núcleos resultantes da reação, sendo re-emitida sob a forma de radiação gama quase que instantaneamente.

Nas reações de fissão, um núcleo pesado (o U-235) cinde-se em dois átomos mais leves, de massas praticamente iguais. Nas reações de fusão, dois átomos se agregam para constituírem um novo núcleo, com emissão eventual de partículas elementares.

As reações de fissão podem ser produzidas por nêutrons de qualquer energia cinética, pois sendo o nêutron isento de carga elétrica pode aproximar-se de um núcleo atômico sem encontrar forças repulsivas de natureza elétrica. Em contraste com essas reações, as de fusão exigem uma energia cinética inicial apreciável por parte dos projéteis para que possam vencer a repulsão eletrostática e provocarem a reação. Esse fenômeno, conhecido experimentalmente há cerca de 50 anos pelos trabalhos pioneiros de RUTHERFORD é explicado pela teoria de GAMOW. A energia relativa das partículas que devem interagir aumenta com a carga nuclear Z — o que é equivalente a dizer que as reações de fusão ocorrem mais facilmente com elementos de baixo número atômico.

As reações mais favoráveis ao aproveitamento da energia por esse processo são as que ocorrem com os isótopos do hidrogênio de massas 2 e 3 (deutério e trítio). As temperaturas necessárias entretanto são extremamente elevadas em relação às usuais; assim para que a reação de fusão possa ocorrer na bomba de hidrogênio, torna-se necessário que a temperatura se eleve a 35 milhões de graus Kelvin — o que pode ser obtido, por exemplo, pelo emprego de uma

bomba atômica de urânio ou plutônio utilizada como espoleta. Uma vez atingida essa temperatura, a energia libertada pelas primeiras reações produzidas mantém a temperatura do sistema e a reação se processa em cadeia até que o suprimento do material suscetível de sofrer a reação (isto é, o combustível) esteja exaurido. A reação pode também ser paralizada por um resfriamento da mistura — o que ocorre, por exemplo, por ocasião da expansão do gás subsequente à explosão.

Foram construídas bombas desse tipo capazes de libertar energias superiores a $4,18 \cdot 10^{23}$ ergs — isto é, superiores a 10 megatons (um megaton é o equivalente a um milhão de toneladas de TNT).

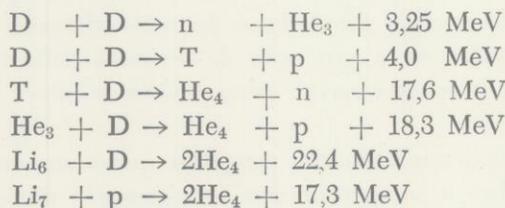
As reações de fusão foram descobertas em torno de 1920, quando elementos de baixo número atômico (Z) eram utilizados como alvos de bombardeio de feixes de prótons e de neutrons acelerados a energias apreciáveis. A energia nuclear total libertada nesses bombardeios é sempre microscópica quando comparada com a própria energia do feixe incidente. A razão fundamental é que a maior parte da energia desse feixe é dissipada em fenômenos de ionização e excitação de átomos ao atingirem o alvo; apenas uma pequena fração das partículas incidentes consegue aproximar-se suficientemente dos núcleos do alvo para provocar reações nucleares.

As reações de fusão podem ser auto-mantidas desde que ocorram em temperaturas elevadas. Em outras palavras, se o combustível para a fusão encontrar-se sob a forma de um gás de elevada temperatura, constituído por núcleos (átomos ionizados) e eletrons livres, isto é, sob a forma de um *plasma*, a energia de agitação dos núcleos pode vencer a sua repulsão mútua dando origem à reação. Esse é o mecanismo responsável pela libertação de energia nas estrelas e na bomba de hidrogênio ou de fusão. É também o método que vem sendo empregado em estudos para a libertação controlada da energia de fusão, que se procura provocar em uma mistura de gases a baixa pressão contidos no interior de uma garrafa magnética.

Nas reações de fusão — como no processo de fissão — a energia libertada depende das diferenças de massa dos núcleos iniciais e finais: esses valores podem ser determinados por medidas diretas (espectrômetros de massa) ou através das próprias reações.

REAÇÕES SIMPLES

A lista seguinte apresenta algumas das reações de fusão mais importantes, os seus produtos de reação e as energias libertadas (em milhões de eletrons-volts (MeV)).



Se recordarmos que a libertação de energia entre o oxigênio e o hidrogênio, ao se combinarem para a produção de água, é de 1 eV por reação, verificamos

que, a paridade de massa, os combustíveis de fusão nuclear libertam energias milhões de vezes superiores às libertadas pelos combustíveis químicos.

As duas reações alternativas apresentadas no tope da lista ocorrem praticamente com a mesma probabilidade para partículas incidentes de energias idênticas. Deveremos notar que os produtos finais pesados, trítio e hélio-3 podem reagir com os núcleos de deutério com libertação de enorme quantidade de energia. É possível assim visualizar uma reação em cadeia na qual 6 dêuterons são finalmente transformados em núcleos de hélio-4, 2 prótons e dois neutrons — com uma libertação total de energia de 43 MeV — o que corresponde a uma libertação de 100.000 kilowatt-horas de energia por grama de deutério. Essa energia é consideravelmente maior do que a proveniente da fissão de um grama de urânio e vários milhões de vezes do que as produzidas nas reações químicas de natureza explosiva com a mesma massa de reagentes.

REACTORES A FUSÃO

O reator a fusão nuclear seria um aparelho no qual uma reação de fusão, automantida, se desenvolveria de maneira controlada produzindo energia útil. A reação se desenvolveria em uma atmosfera rarefeita, extremamente quente, de uma mistura de isótopos de hidrogênio, hélio ou lítio. A fim de evitar o seu amortecimento rápido, seria necessário que a reação se processasse em uma câmara evacuada, dotada de meios que impedissem que o plasma em alta temperatura pudesse entrar em contacto com as paredes da câmara. No momento atual, garrafas magnéticas e dispositivos toroidais parecem ser os únicos meios disponíveis para o atingimento desse objetivo.

Apesar de não existirem reatores a fusão nuclear em funcionamento, tem sido considerável o progresso realizado nesse setor do ponto de vista experimental. Trata-se de setor da Física para o qual não existem ainda teorias plenamente satisfatórias, dada a complexidade dos fenômenos em jogo. Uma das dificuldades principais encontradas pelos físicos experimentais — a manutenção do plasma em elevada temperatura durante o intervalo de tempo apreciável (algumas centenas de microsegundos) para que haja reação completa entre as partículas do plasma, foi resolvido no início deste ano com o dispositivo toroidal de Kerst e Ohkawa, nos EE.UU.

É fora de dúvida que as dificuldades que se antepõem à obtenção de reações termonucleares ou de fusão controladas são enormes e representam um desafio para a imaginação dos cientistas. Os benefícios que resultariam da solução do problema são de conseqüências imprevisíveis, pois a humanidade disporia de uma nova fonte de energia ilimitada e de custo desprezível. Essa energia, que pode ser libertada sem a produção de resíduos radioativos, poderia ser empregada para a propulsão naval, trens, aviões e talvez até para veículos menores.

É de se esperar que, como resultado das pesquisas que vem sendo realizadas em escala mundial sobre o comportamento de plasmas e sobre os problemas do seu confinamento magnético, dentro de duas ou três décadas os problemas básicos já possam ser suficientemente conhecidos para que essa nova forma de energia possa ser posta ao serviço da humanidade no ano 2.000.