



Exercício de prospecção na área nuclear

*Antonio Carlos de Oliveira Barroso
Kengo Imakuma*

O melhor desempenho operacional das centrais nucleares tem contribuído para tornar o custo de geração elétrica de fonte nuclear extremamente competitivo. Diante da atual tendência na demanda mundial por eletricidade e do compromisso assumido no protocolo de Kyoto, com o conseqüente desafio da geração elétrica “limpa” para os próximos 10 a 20 anos, abrem-se novas perspectivas para o papel da energia nuclear. Neste artigo Antônio Carlos de Oliveira Barroso e Kengo Imakuma, ambos da Comissão Nacional de Energia Nuclear, descrevem como a Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento aplicou um exercício de prospecção para estudar perspectivas dos “reatores avançados”, nos próximos 15 a 20 anos e que tecnologias seriam críticas para tal – tentando entender como diversas tecnologias poderiam contribuir para restaurar a competitividade da opção nuclear.

As últimas décadas, o desempenho operacional das centrais nucleares melhorou substancialmente, o que contribuiu para tornar o custo de geração elétrica, de fonte nuclear, extremamente competitivo. Com a desregulamentação do mercado nos EUA, levado a cabo nos anos de 1998 a 2000, as concessionárias perceberam que tais centrais se constituíam excelentes ativos e, no ano passado, a geração nuclear atingiu novos recordes de disponibilidade configurando um custo de geração muito mais competitivo que o das centrais a gás.

Nos EUA, generalizou-se o entendimento que possuir e operar plantas nucleares é um excelente negócio e investir no relicenciamento por mais 20 anos, daquelas que estão em fim de licença, é uma ótima opção. Por outro lado, construir novas usinas continua a não parecer atrativo para os acionistas e decisores das empresas. Isto pode parecer paradoxal, mas há boas razões para tal.

Tentando entender como diversas tecnologias poderiam contribuir para restaurar a competitividade da opção nuclear, num sentido amplo, a Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento da CNEN deslançou um exercício de prospecção para estudar perspectivas dos "reatores avançados", nos próximos 15 a 20 anos e que tecnologias seriam críticas para tal. O presente trabalho contextualiza o estudo, descreve a metodologia e alguns dos resultados obtidos.

INTRODUÇÃO

Desde os anos de 1990, principalmente no âmbito dos países da Organização

para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico – OECD tem-se sedimentado um razoável consenso nos órgãos formuladores de políticas de Ciência e Tecnologia – C&T, quanto à ênfase que deve ser dada ao aspecto da relevância das pesquisas para o desenvolvimento econômico e melhoria da qualidade de vida. Um outro conceito, também bastante aceito, é que a gestão do financiamento de Pesquisa e Desenvolvimento – P&D deve basear-se, cada vez mais, na avaliação de objetivos verificáveis através de indicadores de resultados e de impactos.

Sob o enfoque conceitual, o financiamento de P&D passou a ser visto como uma intervenção do estado, através de organismos financiadores e que, portanto, deve ter intenção de alcançar um conjunto de resultados específicos dentro de um programa coerente. Em suma P&D deve ser gerido como um negócio de estado, sujeitos às disciplinas de planejamento e avaliação de desempenho e, para tanto, uma forte gestão estratégica é essencial.

Estabelecer um programa de P&D significa efetuar uma intervenção de governo, onde são feitas escolhas priorizando-se certas áreas em detrimento de outras. Ao implementar tais intervenções, os decisores devem estar conscientes que estarão fazendo uma análise de valor quanto ao mérito desta ou daquela área e, para tanto, deverão dispor de conhecimento para fazê-lo com eficácia. Neste contexto, os estudos prospectivos são de grande valor, pois podem ser desenhados para construir a base de conhecimento de suporte à tomada de decisões.

O CONTEXTO

O setor nuclear no tocante as aplicações de radiações e radioisótopos na saúde humana, meio ambiente, agricultura e indústria tem logrado uma boa expansão nos últimos anos. No Brasil, por exemplo, a produção de radioisótopos e radiofármacos para uso na medicina cresceu cerca de 170% de 1995 a 2000 [1]. Por outro lado, a utilização de energia nuclear para geração de energia elétrica passa por um período de inflexão, cuja análise, ainda que superficial, das causas e antecedentes revela contrastes e paradoxos.

Hoje, 435 centrais nucleares suprem cerca de 17% do consumo de energia elétrica mundial, porém os estudos [2/12] sobre o assunto estimam que esta fatia vá decrescer, dependendo do cenário, para algo entre 10% e 12% nos próximos 25 anos quando a demanda de eletricidade, teria mais que dobrado em relação ao seu valor atual. Certamente que este prognóstico pode variar bastante dependendo de como a situação evolua nos países de grande população, como China, Índia e Rússia e naqueles maiores consumidores de eletricidade, como EUA e Japão.

A China, que crescerá muito o uso de energia, continua sinalizando que fará uso de geração nuclear em proporção um pouco superior à atual, o mesmo se passa com a Índia. A Rússia, que embora seja mais difícil de prever-se, deverá manter a percentagem nuclear em sua matriz elétrica no nível atual. O Japão não irá variar muito sua matriz, mas também não deverá crescer tanto.

A grande redução da parcela nuclear viria dos EUA onde há 104 plantas nu-

cleares em operação e há mais de 25 anos [3] nenhuma nova encomenda foi feita. Este antecedente, conjugado com o processo, posto em marcha naquele país, e que resultou na desregulamentação do mercado de eletricidade em 24 dos principais estados, em 1998 e 1999, repercutiram nos cenários dos estudos acima mencionados.

Na visão dos analistas as centrais nucleares não seriam competitivas no mercado pouco regulado e seriam descomissionadas ao fim de sua vida útil, licenciada, de 40 anos, ou mesmo antes disso, sendo substituídas por outras centrais, provavelmente a gás. Como o parque de geração nuclear nos EUA tem uma idade média superior a 30 anos, em 2025 seria nula ou marginal a geração nuclear. Como os besouros que continuavam voando, de acordo com suas necessidades, apesar das modelagens aerodinâmicas, feitas na década de 1970, indicavam ser isto impossível, as centrais nucleares americanas mostraram-se altamente competitivas operacionalmente.

Não me alongarei discutindo as causas que produziram tais resultados, mas descreverei alguns fatos e as conseqüências que deverão modificar um pouco as hipóteses balizantes dos cenários de geração nucleoeleétrica.

A indústria nuclear americana sempre se caracterizou por um forte e compreensivo sistema de regulamentação, onde pontua a Comissão de Regulamentação Nuclear – NRC como encarregada de garantir a segurança, com todas as prerrogativas de órgão licenciador, normativo e inspetor.

A partir de 1985, quando havia poucas centrais nucleares em processo de

licenciamento, a NRC pôde concentrar-se numa revisão essencial de seus processos, visando aumentar a eficácia e a efetividade de sua ação sem introduzir esforços adicionais ou constrangimentos na atuação dos operadores. Esta foi uma transformação gradual e que resultou na reformulação da normatização e sistemática de inspeção, que passou a ser baseada em indicadores de desempenho com foco em operação e segurança.

Tais indicadores desenvolvidos com base em extensos estudos de análise probabilística de risco permitem uma monitoração completa e integrada da segurança da central e focalizam a ação de inspeções e auditorias naquilo que realmente é importante.

Esta abordagem foi extremamente bem recebida pela indústria que procurou contribuir com subsídios e estudos adicionais para embasá-la. Além disso, a indústria passou a usar uma ampliação desses conceitos e indicadores para guiá-los em *benchmarkings* [4] de melhores práticas e estratégias de operação e manutenção.

O fato é que, gradativamente, foi-se tornando claro a grande sinergia entre segurança e excelência no desempenho operacional. As conseqüências foram que de 1988 a 2000 o fator de capacidade médio, considerando todas as centrais nucleares, aumentou de 65% para 90% e, além disso, 57 delas passaram por pequenas reformas que permitiram aumentos em suas potências que totalizaram 2,2 GWe.

Portanto, mesmo sem novos reatores a geração nuclear subiu de aproximadamente 300 bilhões de kWh em 1980 para 750 bilhões de kWh (20% do

consumo total) em 2000, um impressionante aumento de 150% [5]. Concomitantemente o custo médio de geração das centrais nucleares caiu de 3,04 cents/kWh em 1988 para 1,71 cents/kWh em 1999.

Ao mesmo tempo, os indicadores de segurança aumentaram em todos os aspectos, por exemplo, em 1998 dois terços das usinas nucleares não apresentaram qualquer desligamento não planejado e a taxa de acidentes industriais ficou abaixo de 10% do valor médio da indústria americana em geral.

Este dramático salto de desempenho, desencadeado, em parte, pela nova abordagem de sinergia entre segurança nuclear e desempenho operacional, foi certamente embasado e alavancado por iniciativas de compartilhamento de conhecimento na indústria nuclear. Tais iniciativas, com início na década de 1980, ocorreram principalmente no desenvolvimento e uso comum de sofisticadas ferramentas analíticas (metodologias e *software*) e de repositórios de conhecimento desenvolvidos pela indústria.

Aproveitando-se do fato que a indústria nuclear, por força de sua regulamentação, é obrigada a efetuar ricos registros de informações operacionais, com detalhes de qualquer desvio da operação normal, quatro conjuntos de “bases de conhecimento” foram constituídos e funcionaram como pilares para difundir e consagrar o conceito da ampla utilização da informação de riscos tanto para a gerência da operação, por parte das concessionárias, como para a gestão, execução e avaliação de inspeções, por parte do órgão regulador. Tais conjuntos são:

- as bases de dados de confiabilidade de equipamentos, extraídas dos históricos de falhas mantidos por cada operador;
- o repositório de “lições aprendidas” mantido pelo INPO, um instituto criado pelas empresas operadoras de centrais nucleares;
- uma base de dados de confiabilidade de centrais de geração elétrica, mantida pelo “Conselho Norte-americano de Confiabilidade da Eletricidade”; e
- o sistema de relatório de eventos operacionais da NRC, que é a Comissão de Regulamentação Nuclear dos EUA.

Tudo isso teve reflexos nos mais efetivos mecanismos de “compartilhamento” de conhecimento do mercado que são os indicadores econômicos como custos, lucratividade etc. e motivou um repensar nas empresas em relação ao futuro de suas plantas nucleares. Neste sentido vários ensaios e estudos, preparados no passado, com objetivo de avaliar a extensão da vida útil de centrais nucleares, tornaram-se muito mais viáveis devido aos seguintes fatores:

- desde 1996 o custo de geração nuclear figura entre os melhores e esta liderança tem se acentuado nos últimos anos;
- a presença de grandes margens de segurança, embutidas nos projetos nucleares, resultantes da cultura da indústria para facilitar o licenciamento;
- os dados experimentais acumulados e as novas tecnologias desenvolvidas que permitem fazer a gestão de vida útil de equipamentos, avaliando com precisão a integridade funcional e estrutural dos mesmos.

As concessionárias se depararam com uma nova realidade, que é comparar o custo de descomissionar suas melhores usinas nucleares ao fim do período da licença operacional (40 anos) e substituí-las por centrais a gás de ciclo combinado a um custo total (capital + geração) de 3,5 a 4,5 cents/kWh, ou tentar um relicenciamento de suas unidades por mais 20 anos a um custo total (capital + taxas + geração) de 2,0 a 2,5 cents/kWh [6].

A segunda opção está sendo preferida e houve, portanto, uma grande reversão de expectativas, cuja tendência é se acentuar já que, segundo dados da Agência de Informações de Energia do US-DOE, houve um aumento de 56% no preço médio do gás, pulando de 2,55 para 3,99 US\$/bilhão de Btu entre 1999 e 2000. A consequência é que já em 2000 duas centrais nucleares concluíram seu processo de relicenciamento para mais 20 anos e diversas concessionárias anunciaram planos idênticos para mais 30 usinas. A NRC estima que 80% das unidades em operação passarão por processos semelhantes nos próximos 20 anos.

A questão de fundo é que, embora a opção nuclear tenha uma grande vantagem competitiva em relação ao gás (paradigma do mercado) no tocante ao custo de geração, a situação se inverte no tocante ao custo de capital. Neste aspecto as plantas nucleares situam-se na faixa de 1.500 a 2.000 US\$/kW contra 500 a 600 US\$/kW. Mesmo assim o custo total (capital + geração) por kWh é favorável à nuclear.

A grande dificuldade reside no tempo de construção e comissionamento, onde há que se comparar um prazo mé-

dio de 15 a 24 meses para as centrais a gás com quatro a oito anos para as nucleares. Neste caso, os maiores encargos de capital, prazos maiores e menos previsíveis resultam em um valor bem maior em risco, por mais tempo e um risco maior na contratação dos empréstimos, em função da maior incerteza quando a planta começará a dar retorno. Esta trinca de aspectos desfavoráveis dá uma certa alergia aos acionistas e decisores das empresas concessionárias ao elaborarem seus planos de expansão e reposição de unidades geradoras.

Do ponto de vista dos negócios, centrais nucleares em operação são excelentes ativos (autênticas *cash machines*), o relicenciamento das que estão em fim de licença de operação constitui-se em excelente oportunidade de investimento. Por outro lado, investir na construção de novas unidades, embora conduza a bons retornos numa análise de longo prazo, torna-se muito complicado numa análise de fluxo de caixa e riscos a curto e médio prazos. Nítidamente esses últimos aspectos dominam as decisões empresariais e esta é a maior explicação para o paradoxo entre o desempenho da geração nuclear e a ausência de novas encomendas nos EUA.

NECESSIDADES FUTURAS DE ELETRICIDADE E O PAPEL DA GERAÇÃO NUCLEAR

Há uma certa concordância nos estudos de previsão da evolução do consumo de energia elétrica apontando para um dobramento nos próximos 20 a 25 anos e indicando que o maior crescimento deverá ocorrer nos países em desenvolvimento. Há um conjunto de

indicadores cuja tendência dá credibilidade a essa previsão e até motivo para pensar que ela pode ser ultrapassada.

Como exemplo, cito o fato que o crescimento da população mundial está ocorrendo mais aceleradamente nas regiões urbanas, onde o consumo *per capita* é maior que nas regiões rurais; a tendência para a eletrificação na "pizza" do consumo energético [7]; e as elevadas taxas de crescimento do consumo em países muito populosos como China e Rússia.

Do ponto de vista ético é desejável que em paralelo a esse crescimento ocorra uma amenização nas distorções quanto ao acesso à eletricidade, por exemplo, em 1998, o Canadá, país líder no índice de desenvolvimento humano – IDH, apresentava um consumo específico de 17.549 kWh/habitante enquanto a Nigéria, um dos de menores índices, consumia apenas 143 kWh/habitante [8]. É indisputável que a confortável disponibilidade de energia elé-

trica, a preços razoáveis, é um ingrediente crítico para o desenvolvimento econômico e social de uma nação.

O Brasil, em função de suas características, se pretende nos próximos 15 anos alcançar uma condição de desenvolvimento econômico e social semelhante a que é desfrutada hoje, por Portugal e Coreia, terá que conseguir que sua economia cresça a uma taxa média anual de 6,5% e sua geração elétrica a 6,8%, aproximadamente.

Certamente que estas não são metas fáceis, mas que não estão fora de alcance. No campo econômico basta lembrar que, na década de 1970, o Brasil cresceu à taxa de 8,6% e, mais recentemente, finda a década perdida de 1980, superados os transientes da transição democrática, realizadas, ainda que parcialmente, as reformas estruturais e vencidas as crises econômicas (asiática e russa), o País emergiu de um crescimento negativo de -0,2% em 1998, para cerca de 4%, em 2000.

Crescimento sustentável, que tem grande probabilidade de, em 2001, superar a inflação, pela primeira vez em 30 anos, e que, além disso, fechou o ano de 2000 com uma taxa média de desemprego de 7,1%, a menor nos últimos três anos, e com o valor de dezembro em 4,8% apenas. Também o déficit das contas externas foi o menor em três anos, ficando em 4,2% do PIB. Em resumo, há fortes indícios que nos últimos anos o caminho foi pavimentado para uma arrancada no desenvolvimento.

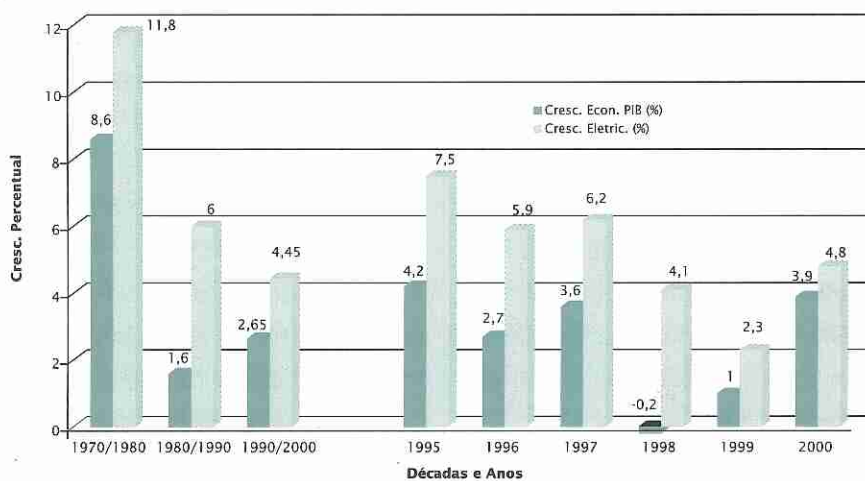
No tocante ao crescimento do consumo de eletricidade, a taxa em questão tem grande possibilidade de ser atingida ou ultrapassada, mesmo que a economia não se desenvolva tanto, se lembrarmos que na década de 1970 houve um crescimento anual de 11,8% e mesmo na década de 1980 o crescimento foi de 6,0%. Observando a figura 1, nota-se que o fator de elasticidade, com que a taxa de crescimento do consumo elétrico supera a do crescimento econômico, apresentou os seguintes valores médios: 1,37, 3,75 e 1,76, respectivamente nas décadas de 1970-90.

Este índice, quando o País está crescendo de forma sustentável, depende de características de nossa economia e infra-estrutura que não mudam rapidamente, portanto, descartando-se o valor de 1980 e, considerando-se também que em dezembro de 2000 ele foi de 1,23, não se pode esperar que este quociente fique fora da faixa de 1,2 a 1,7. Portanto, mesmo que o País cresça a 4,5% nesta década, o crescimento do consumo elétrico deverá se situar em torno de 6,5%.

A adoção da Agenda 21 na ECO 92 (*Earth Summit*), recomendando a im-

Figura 1

Evolução da economia e do consumo de energia elétrica



Fonte: IBGE e Eletrobrás

plementação de estratégias energéticas sustentáveis, fez com que, desde então, governantes, políticos e legisladores pasassem a atribuir alta prioridade ao conceito de desenvolvimento sustentável, especialmente nos países da OECD.

O estabelecimento na conferência realizada em Kyoto, do "Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change", obrigando os países desenvolvidos a reduzir suas emissões de, *greenhouse gases* (GHGs) a um total 5% abaixo dos limites de 1990, até os anos 2008-2012, tem provocado atitudes mais eficazes dos países desenvolvidos na preservação do meio ambiente. O panorama pós-Kyoto terá uma indubitável influência no suprimento e demanda de energia desses países [9].

Caso o compromisso com o desenvolvimento sustentável e a redução nas emissões de gases que contribuem para o efeito estufa sejam efetivamente refletidos nas regulamentações e decisões de política energética do Brasil, então há uma oportunidade plausível para que a geração nuclear venha a ocupar um espaço de 4% a 6% na matriz elétrica brasileira nos próximos 20 anos.

De qualquer forma, seja no Brasil ou no mundo, o futuro da geração nuclear passa por provar que é economicamente competitiva num ambiente gerido pelas forças de mercado e comprovar a aceitação pública nas questões de segurança, deposição de rejeitos e proliferação. Com esta colocação, surgiu a idéia de realizar-se um trabalho de prospecção sobre as perspectivas da energia nuclear no panorama futuro de geração de eletricidade. Decidiu-se estudar os chamados "reatores avançados" para um horizonte futuro de 10 a 20 anos.

O FUTURO DA PRÓXIMA GERAÇÃO DE CENTRAIS NUCLEARES

Numa visão mais ampla, esta iniciativa se insere num processo para delinear um espectro das possíveis evoluções para o desenvolvimento tecnológico no futuro, e estabelecer um processo de compreendê-las com clareza suficiente para tornar possível estabelecer quais decisões devem ser tomadas 'hoje' para propiciar um 'amanhã' melhor possível. De um modo geral, este estudo compreende quatro passos[10]:

- Fixar e estruturar o problema.
- Obter informações e organizar uma base de conhecimento inicial.
- Selecionar e aplicar os métodos.
- "Utilizar" as prospecções realizadas.

O Método Delphi e sua Utilização

Dentre as várias formas de fazer prospecção tecnológica, escolheu-se o método de Delphi pela sua particularidade de envolver a participação de especialistas, de forma anônima e possibilitar bastante elasticidade quanto à sincronia das atividades de cada participante. Além disso, as instituições nucleares no Brasil possuem nos seus quadros um bom elenco de especialistas de vários campos de formação, dentro da Tecnologia Nuclear e também em áreas de conhecimento correlatas, o que torna bastante viável a aplicação do método.

Este método propõe uma forma sistemática para estruturar o processo de comunicação entre os participantes, que emitem sua opinião e tomam conhecimento das opiniões de seus pares de uma forma não identificada. Na

maioria dos casos, o objetivo das aplicações visa a exploração confiável e criativa de idéias ou produção de informações para subsidiar a tomada de decisões. A metodologia é baseada num processo de coleta e destilação de conhecimento de um grupo de especialistas, através de uma série de questionários que são realimentados, de forma controlada, com as opiniões extraídas da análise das respostas de cada etapa [11].

O método Delphi não é novo. A noção básica, proposição teórica e metodologia originaram-se nas décadas de 1950 e 1960 na Corporação RAND. A primeira aplicação foi na área de prospecção tecnológica, com intuito de sondar prováveis invenções e novas tecnologias e avaliar os conseqüentes impactos sociais e econômicos causados pela mudança tecnológica. A partir de então, este método tem sido amplamente utilizado para prospecção de diversas áreas do setor público como educação, saúde, ciência e tecnologia, e outras.

O método Delphi pode ser visto como um processo de agregação e conciliação de informações para produzir alguma forma de conhecimento.

Do ponto de vista epistemológico, conhecimento é entendido como uma informação, opinião, idéia ou teoria que tenha sido efetivamente comprovada, científica ou empiricamente, por uma comunidade, sendo então aceita como verdade. Do ponto de vista prático, no conceito de Peter Drucker expresso em seu livro *The New Realities in Government and Politics...*, conhecimento é a informação que muda algo ou alguém – tanto por tornar-se base para ação como por fazer um indivíduo, ou uma

organização, capaz de decisões mais eficazes.

Como podemos ver ao procurar chegar ao consenso entre os especialistas em cada questão, a metodologia Delphi reproduz, ainda que imperfeitamente, um caminho análogo à produção do conhecimento no sentido epistemológico. Igualmente ao ser usado para gerar uma "base de conhecimento" para tomada de decisões mais conscientes, este método aproxima-se da conceituação de Drucker para conhecimento.

Ziglio [11] aponta várias virtudes do método Delphi e que são resumidas abaixo:

- O método propicia reunir painel ou conselho de especialistas, preservando a possível heterogeneidade entre eles, assegurando o anonimato e evitando que qualquer um deles, comprometido com algum interesse ou devido à sua forte personalidade, venha a monopolizar ou polarizar o processo de comunicação.

- É um método de trabalho em grupo, voltado para a geração de idéias, integração de informações e formação de consenso, que, por força de suas características de interação indireta entre os participantes, permite trabalhar com grandes painéis de especialistas, geograficamente dispersos, dispensando reuniões e possibilitando uma razoável elasticidade quanto à sincronia das atividades de cada um.

- Como os especialistas contribuem anonimamente no processo, isto propicia uma maior variedade de idéias e evita o medo dos participantes emitirem opiniões pouco convencionais, que poderiam causar estranheza se de co-

nhecimento público, contribuindo para que eles acabem por externar todas as alternativas possíveis para discussão.

O critério para decidir o tamanho da amostra na constituição de um painel não precisa ser puramente estatístico, no sentido de que apenas grandes amostras conseguirão representar adequadamente o consenso da coletividade dos especialistas. Por outro lado, quanto maior for a diversidade e quantidade de conhecimento envolvido para responder às questões, maior deverá ser o grupo, para se garantir que haverá sempre um número razoável de especialistas com conhecimento de cada aspecto do problema.

A literatura sobre este assunto sugere que podem ser obtidos bons resultados com um grupo de especialistas razoavelmente pequeno, na faixa de 10 a 15 indivíduos. O problema reside na correta escolha dos especialistas, com o perfil adequado aos assuntos em pauta, disponibilidade de tempo necessário ao exercício Delphi e que tenham boa habilidade de expressão e comunicação por escrito. Quando a variedade dos assuntos em pauta é grande, há a tendência (ou necessidade) de trabalhar-se com um grupo grande, o que complica o trabalho de coordenação e análise das respostas.

Usuários do método Delphi reconhecem a necessidade e importância de um grupo coordenador, encarregado da facilitação e do intercâmbio de comunicações. O papel desse grupo é principalmente importante nas questões mais abertas, quando as opiniões dos especialistas são expressas apenas discursivamente e não por múltipla escolha. Em tais casos é essencial que tal grupo

seja bastante perceptivo para extrair as idéias básicas de cada texto, identificar as concordâncias e discordâncias e redigir textos que agreguem as idéias mais coincidentes, de forma que a cada rodada se dê mais um passo na direção do consenso.

Cabe ao grupo coordenador criar todas as condições para que as respostas, fruto do julgamento coletivo e interativo dos especialistas (via realimentação controlada), sejam melhores do que qualquer dos julgamentos iniciais isoladamente.

A teoria por trás do método Delphi procura demonstrar que o julgamento de um grupo de alto nível de conhecimento, alcançado através desta metodologia é mais confiável que qualquer julgamento individual.

Um número de experimentos realizados, sobretudo, nas décadas de 1960 e 1970, demonstrou que para se discutir e concluir sobre um assunto, cuja melhor informação disponível é o julgamento de indivíduos de reconhecida sabedoria, o método Delphi tem nítidas vantagens sobre formas tradicionais de discussão como reuniões, conferências, *brainstorming* e outros processos interativos grupais. Por outro lado, por ser um processo demorado, este método não é prático para problemas que necessitam de respostas rápidas.

Ao se utilizar o método Delphi deve-se lembrar que as características do processo (p.ex. a metodologia de coleta das opiniões dos membros do painel, a escala utilizada e a forma de administrar a realimentação) podem ter efeitos importantes no processo de comunicação entre os especialistas e nos resultados conclusivos finais. Assim sen-

do, esclarecimentos, escalas para avaliação e quaisquer outros instrumentos utilizados para coleta dos pareceres devem ser previamente testados de modo apropriado.

A Definição do Problema e os Objetivos do Estudo

Em termos objetivos, o problema pode ser assim contextualizado e definido:

Diante da atual tendência na demanda mundial por eletricidade e do compromisso assumido no protocolo de Kyoto, com o conseqüente desafio da geração elétrica "limpa" para os próximos 10 a 20 anos, abrem-se novas perspectivas para o papel da energia nuclear. Para tanto, a energia elétrica de fonte nuclear deve responder ao seguinte desafio:

- provar que é economicamente competitiva num ambiente gerido pelas forças de mercado; e
- comprovar a aceitação pública nas questões de segurança, deposição de rejeitos e proliferação.

Resumidamente, o âmago do problema é a competitividade, em termos amplos, dos reatores avançados nos próximos 10 a 20 anos.

O objetivo do estudo visou:

- identificar e consensuar os eventos e fatores que viabilizariam o sucesso em resolver o problema acima enunciado e, que passariam a ser definidos como objetivos estratégicos;
- identificar e consolidar a árvore de tecnologias e competências a ser considerada como o conjunto, que, com grande probabilidade, engloba aquelas que serão críticas (habilitantes) para responder ao desafio;
- graduar os objetivos: (i) quanto à sua importância para atender às exigências

de mercado, ambientais e regulatórias, contribuindo para a competitividade da opção nuclear; e (ii) quanto à probabilidade de ocorrência;

- com a árvore de tecnologias descrita em dois níveis – áreas tecnológicas (ATs) e respectivas tecnologias (ou componentes tecnológicos), identificar o grau de relevância de cada AT em relação aos objetivos estratégicos; e
- identificar aquelas tecnologias denominadas como críticas ou habilitantes, graduando cada uma delas em relação aos critérios, mais pertinentes à sua AT, considerando o impacto que um rápido progresso nela causaria nos objetivos e também qual a probabilidade de que isso ocorra num futuro próximo.

Trata-se, pois, de um estudo centrado na determinação de tecnologias críticas em relação ao tema em foco. A geração completa de cenários foi evitada, sendo realizada apenas a identificação dos fatos positivos, componentes dos cenários favoráveis, que foram aferidos quanto à sua importância. O levantamento da árvore de tecnologias, que poderia se constituir num estudo separado, ocupou uma boa parte deste trabalho, mas constituiu-se apenas num produto intermediário, necessário para se identificar as tecnologias críticas, estas sim nosso interesse maior.

A Descrição e a Coordenação do Processo

Resumidamente, o processo no método Delphi envolveu oito etapas, algumas das quais poderiam ser caracterizadas como subprocessos e outras como tarefas:

- Seleção da equipe de trabalho encarregada da preparação, facilitação e

processamento do exercício (equipe Delphi).

- Definição do problema e dos objetivos do estudo, identificação dos principais fatores e aspectos em jogo e compilação de uma base de conhecimento inicial.
- Concepção geral do processo e elaboração dos questionários básicos.
- Montagem de um painel de especialistas.
- Condução do processo de aplicação, realimentação, aperfeiçoamento e consensuação das respostas ao primeiro questionário.
- Idem para o segundo questionário.
- Idem para o terceiro questionário.
- Interpretação dos resultados e elaboração dos relatórios.

A figura 2 apresenta uma visão contextual da coordenação e execução do processo.

O tema "reatores avançados", no contexto acima descrito, foi objeto de consultas iniciais levantando-se aproximadamente 500 artigos. O material foi analisado com o duplo objetivo de esboçar a árvore de tecnologias e identificar os eventos e fatores que se concretizaram, ou configurados de forma favorável, deverão, com boa probabilidade, restaurar e sustentar a competitividade da opção nuclear.

Estas tarefas foram executadas por um grupo de quatro pessoas ao longo de várias sessões de discussão, *brainstorming* e diagramas de afinidade, intercaladas por etapas de estudo e preparação individual. Este trabalho gerou a base de conhecimento inicial e possibilitou a concepção, o planejamento do estudo e a redação inicial dos questionários.

Grande cuidado foi tomado na preparação dos questionários, de forma a garantir sua clareza e objetividade. Todos eles são precedidos por texto introdutório, que além de contextualizar as questões, sintetizava, também, a evolução ocorrida nas rodadas anteriores.

Com exceção das perguntas destinadas a colher novas alternativas para aumentar as listas apresentadas, ou para melhorar a redação destas, as questões foram sempre redigidas de modo a permitir alguma forma de quantificação e facilitar a monitoração da marcha para o consenso, ou da ocorrência de alguma anomalia, que necessitasse de tratamento especial.

Os indicadores usados para “definir consenso” e corte na seleção de alternativas foram previamente explicados aos especialistas e sua evolução, ao longo das rodadas, foi sempre relatada no texto introdutório. A tabela 1 sintetiza os critérios usados.

A APLICAÇÃO

E OS RESULTADOS DO PROCESSO

Resultados do Primeiro

Questionário

É importante observar que o grupo em grandes ATs não produziu uma classificação completamente, mutuamente exclusiva e, portanto, o conceito de árvore foi quebrado em dois casos nos quais uma mesma tecnologia aparece em duas ATs diferentes. O fato foi ressaltado aos do painel que insistiu em mantê-las assim, esclarecendo que, embora a designação fosse a mesma, trata-se, na verdade, de aspectos distintos de uma mesma tecnologia (figura 3).

Figura 2

Diagrama de contexto do processo

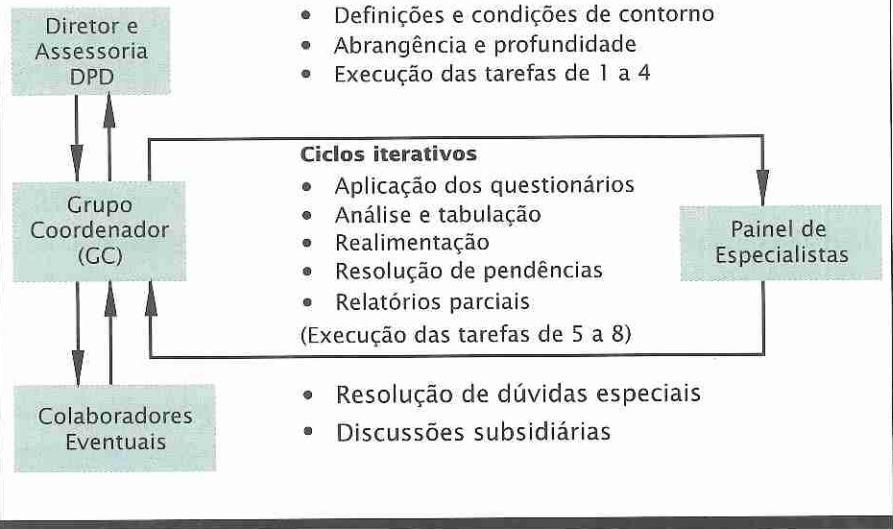


Tabela 1

Regras para a definição de consenso

Regras de Consenso	
Caso	Requisito
Questões envolvendo seleção do tipo passa ou não passa	≥ 70% de aceitação
Questões envolvendo graduação com escala numérica 1 a 5, 1 a 4, ou 0% a 100%. Calcula-se a média (m) e o desvio padrão (σ).	$(m-2,8\sigma, m+2,8\sigma) \leq 70\%$ da escala, ou que 85% das respostas em torno da média estejam numa faixa de 70% da escala

Figura 3

Consensuando objetivos e árvore tecnológica



Tabela 2
Objetivos consensuados

Objetivos Estratégicos	
1	Legislação e regulamentação estável
2	Padronização e projetos pré-licenciados
3	Redução de prazos e custos no projeto, fabric., constr., mont., comiss. e licenc.
4	Usinas com vida útil mais longa
5	Projetos com alto nível de segurança inerente
6	Facilidade e eficiência de operação, manutenção e supervisão
7	Alta disponibilidade
8	Ciclos de carregamento mais longos e maior aproveitamento do combustível
9	Minimização na geração de rejeitos em todas as operações

As tabelas 2 e 3 apresentam, respectivamente, os objetivos estratégicos e a árvore de tecnologias que foram consensuados.

Resultados do Segundo Questionário

A tabela 4 resume o resultado obtido. Foi usada uma escala de valores de 1 a 5 e selecionados como critérios os objetivos mais pertinentes, desde que avaliados acima de 3,5 e satisfazendo às regras de consenso. Vale destacar que inicialmente desejava-se usar apenas dois critérios para avaliar as tecnologias de cada AT, porém no caso das ATs 1, 2, e 4 a pontuação ficou muito próxima para que fosse, estatisticamente, razoável selecionar apenas 2 objetivos (figura 4).

Resultados do Terceiro Questionário

Esta etapa foi uma das mais ricas em relação às interações do grupo coordenador com os especialistas, e demandou muita atenção para resolver certas "anomalias", que foram detectadas

Tabela 3
Árvore de tecnologias

Áreas Tecnológicas e Tecnologias (competências)	
AT1. Reatores Avançados de Características Evolutivas (das gerações atuais)	
Reator PWR avançado (A)	Reator regenerador avançado
Reator BWR avançado (F)	Reator de segurança passiva
Reator PHWR avançado	Reator avançado de pequeno e médio porte
AT2. Novos Conceitos de Reatores Avançados (Inovativos)	
Reator de segurança passiva	Reatores intrinsecamente seguros
Reatores rápidos queimadores de actíneos	Reator estimulado por acelerador
AT3. Segurança e Geração de Rejeitos em Reatores Avançados	
Dispositivos avançados de segurança	Projeto visando robustez a acidentes severos
Dispositivos de segurança passiva ou inerente	Redução de rejeitos de longa vida
Análise e realimentação das experiências operacionais	Projeto visando reduzir rejeitos radioativos e exposição ocupacional (J)
Procedimentos de mitigação de acidentes severos	Sistemas de monitoração e diagnose
Avaliação probabilística de segurança	Análise de fatores humanos
Simulação de acidentes severos	
AT4. Economicidade na Construção e Geração de Reatores Avançados	
Sistemas evolucionários avançados	Reatores de disponibilidade aperfeiçoada (I)
Combustível de queima estendida	Efetividade das decisões de investimento
Análise de extensão de vida	Tecnologia de extensão de vida da central
Gestão e monitoração do envelhecimento (H)	Pequenas plantas nucleares com co-geração
Construção modular	Segurança através da melhoria do desempenho humano
AT5. Interface Homem-Máquina, Fatores Humanos e Sistemas de Controle Avançados	
Controle e instrumentação avançados (B)	Tecnologia de fatores humanos
Tecnologia e sistemas de suporte à operação (C)	Sistemas de interface homem-máquina (D)
Validação e verificação de <i>software</i>	
AT6. Materiais para Reatores Avançados	
Ciclos de altas taxas de queima e conversão (E)	Plantas de teste de elementos combustíveis
Materiais para extensão de vida	Tecnologia de combustível MOX
Ciclo do tório de passe único	Ciclo do tório c/ equilíbrio auto-sustentável
Tecnologia de materiais para extensão de vida da planta	Tecnologia do conceito: vaziar antes de romper
Análise pós-irradiação	Plantas de alto fluxo p/ testes de materiais
Novos materiais	Tecnologia do conj. combustível e estrutura (G)

Tabela 4
Matriz de pertinência para avaliação das tecnologias

Objeto número	Áreas Tecnológicas					
	AT1	AT2	AT3	AT4	AT5	AT6
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
Índice de implicação da AT*	29,0	29,3	26,1	29,3	24,4	26

*Fornecer uma indicação complementar do potencial de contribuição do AT para todos os objetivos (≤ 31).

e que serão comentadas no relatório final deste exercício (figura 5).

O julgamento nesta etapa foi baseado em dois aspectos: (i) o impacto que um grande progresso da tecnologia, em questão, teria no objetivo estratégico considerado; e (ii) se há indícios e quais as chances de tal progresso ocorrer nos próximos 5 a 10 anos. A relevância, neste caso, foi definida como o produto do impacto (escala de valores de 1 a 5) pelo índice de ocorrência avaliado com escala de 1 a 3 onde: 1 = improvável (<30%); 2 = razoavelmente provável (de 30% a 70%); e 3 = bastante provável (>70%).

Na figura 6 é apresentado um dos muitos gráficos que foram gerados para destacar a identificação das tecnologias mais relevantes, feita neste exercício. Nesta figura são apresentadas apenas as 10 mais relevantes, quando se considera, apenas, a média de suas relevâncias em relação aos critérios de julgamento.

COMENTÁRIOS FINAIS

O exercício foi conduzido com um painel de 15 pessoas e, por se tratar de um grupo de dimensões reduzidas, foi dada a diretriz que nunca se tivesse menos de 12 respondentes, em cada rodada, ou seja taxa de retorno de 80%. Lembrando que são comuns, relatos de taxas de retorno abaixo de 50%, pode-se ter idéia de que isto obrigou o grupo coordenador a um zelo redobrado e causou algum atraso em função de férias e viagens dos participantes.

Confirmando o que é registrado na literatura, se o processo for bem conduzido, com questões bem formuladas,

Figura 4

Definindo os critérios para selecionar as tecnologias críticas



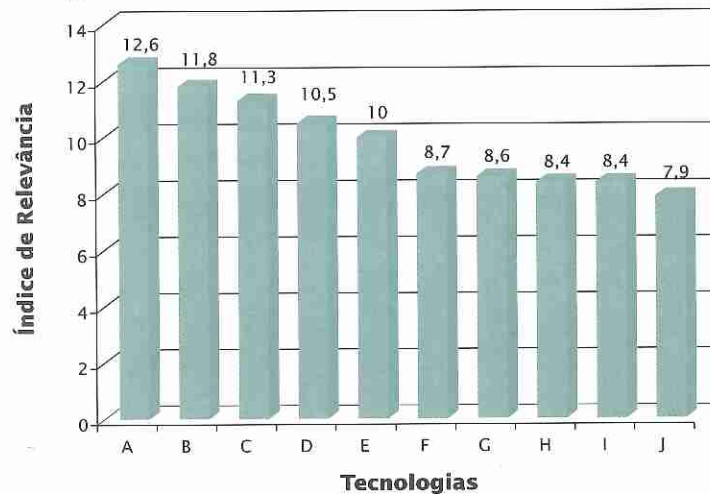
Figura 5

Identificando as Tecnologias Críticas



Figura 6

Tecnologias mais Relevantes no Contexto Geral



Obs.: a) Valor máximo do índice = 15, e b) As tecnologias, de A a J, estão identificadas, na tabela 3, em negrito.

análises perceptivas e realimentações objetivas, a convergência para o consenso se dá em duas ou três rodadas no máximo. Nem sempre há consenso, pois o item pode ser polêmico ou não existir uma base de conhecimento suficiente entre os especialistas para formação de uma opinião de grupo, mas essa situação fica bem caracterizada em duas ou três rodadas.

Uma boa análise da rodada inicial é essencial, nela todos os casos que estão afastados da regra de consenso devem ter suas distribuições e justificativas das respostas analisadas para distinguir-se três possíveis ocorrências:

- justificativas que indicam diferentes percepções da questão, provavelmente causada por ambigüidade de formulação. Neste caso, esclarecimentos adicionais e uma hábil reformulação podem, ainda, conduzir ao consenso;
- justificativas que indicam que, apesar da questão ter sido interpretada uniformemente, a diversidade de opiniões é muito grande. Neste caso, junto com o resultado numérico intermediário, um sumário dos posicionamentos mais bem construídos e plausíveis deve ser realimentado na esperança de se conseguir uma “fusão”, o que muitas vezes não ocorre; e
- respostas polarizadas, caracterizadas por uma distribuição bimodal. Neste caso as “cores” das justificativas de cada pólo devem ser realimentadas de forma bem nítida, pois nem sempre as diferenças são irreconciliáveis.

Todas as perguntas, ou blocos delas quando de mesma natureza, foram acompanhadas de uma questão solicitando uma auto-avaliação do especialista naquele assunto. Isto permitiu que

se obtivesse médias e desvios-padrão ponderados e não-ponderados, permitindo comparações interessantes e *insights* mais precisos para realimentar o painel. Na análise das questões mais delicadas procurou-se observar também a taxa de aproximação ao consenso a cada rodada, e a folga com que a regra de consenso foi atingida.

De uma forma geral, as tecnologias críticas, principal resultado deste estudo, deverão ser detalhadas, um pouco mais, em linhas de pesquisa e desenvolvimento, considerando nosso estado atual e possibilidades de cooperação internacional. Neste aspecto, há uma série de comentários que não serão discutidos neste artigo, porque não seriam de interesse do leitor.

REFERÊNCIAS

- [1] BARROSO, Antonio Carlos de O. Nuclear Energy in Latin America – Accomplishments and Perspectives. ANES/ENA 2000, Miami, USA, dez. 2000.
- [2] Joint IIASA-WEC Study, *Global Energy Perspective*, Cambridge University Press, 2000.
- [3] LAKE, James A. Foundations for the Fourth Generation of Nuclear Power. *Nuclear News*, nov. 2000.
- [4] GILBERT, Vince. Nuclear Industry Benchmarking Tools with a Future. *Nuclear Energy Institute*, ICON 8, April 3, 2000.
- [5] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. Record – Setting Nuclear Power Plants Ready to Shoulder Winter Electricity Demands, NEI home page <http://www.nei.org> – December 2000.
- [6] NUCLEAR ENERGY INSTITUTE. The Outlook for Nuclear Business in a Competitive Electricity Business, NEI home page <http://www.nei.org>
- [7] EPRI Journal, v. 23, n. 1, p. 36-41, jan./fev. 1998.
- [8] UNDP. *Human Development Report 2000*. Oxford University Press, 2000.
- [9] ARGIRI, Maria and BIROL, Fatih. World energy to 2020: prospects and challenges, *Observer*, n. 215, p. 34-36, jan. 1999.
- [10] ARMSTRONG, J.Scott. “Standars and

Practices for Forecasting” in *Principles of Forecasting: A Handbook for Researchers and Practitioners* Norwel, MA: Kluwer Academic Publishers, Warthon-University of Pennsylvania, 1999.

- [11] ZIGLIO, Erio. “The Delphi Method and its Contribution to Decision-Making”, in *Gazing into the Oracle-The Delphi Method and its Application to Social Policy and Public Health*, Edited by Michael Adler and Erio Ziglio, Jessica Kingsley Publishers, London and Bristol, Pennsylvania, 1996.

Antonio Carlos de Oliveira Barroso
Kengo Imakuma

Diretoria de
Pesquisa e Desenvolvimento da
Comissão Nacional de Energia Nuclear