

ENERGIA ELÉTRICA: PERSPECTIVAS GLOBAIS, AS ASPIRAÇÕES DO BRASIL E O PAPEL DA GERAÇÃO NUCLEAR

Antonio Carlos de Oliveira Barroso, José Antonio Diaz Dieguez e Kengo Imakuma

Comissão Nacional de Energia Nuclear, CNEN
Diretoria de Pesquisa e Desenvolvimento
Travessa R, 400, Cidade Universitária Armando Salles de Oliveira,
05508-900 São Paulo/SP – Brasil
e-mail: barroso@net.ipen.br

RESUMO

No presente trabalho é feita uma avaliação das perspectivas futuras da energia núcleo elétrica no contexto mundial, levando em consideração os novos conceitos de desenvolvimento sustentável e as necessidades de energia nos países desenvolvidos e em desenvolvimento. É constatado que o papel que a energia nuclear poderá desempenhar, como uma fonte supridora de energia elétrica econômica, segura e livre da emissão de poluentes, dependerá da resolução adequada de algumas questões fundamentais. Assim sendo, a expansão do uso da energia nuclear tem o seu foco principal na necessidade de inovação, tanto do ciclo do combustível como dos reatores nucleares. Dentro deste contexto, foi realizado no Brasil um exercício de prospecção tecnológica com um pequeno grupo de especialistas, visando vislumbrar, de modo estruturado, os requisitos para os reatores do futuro. Este trabalho descreve o objetivo, metodologia, resultados e conclusões do exercício de prospecção. Também é feita uma comparação com os resultados preliminares das iniciativas internacionais do GIF e INPRO que visam identificar as tecnologias mais promissoras para as futuras gerações de reatores nucleares.

Descritores: reatores nucleares inovativos, centrais nucleares, prospecção tecnológica.

INTRODUÇÃO

O desafio do clima e do meio ambiente

A adoção da Agenda 21 na ECO 92 ("Earth Summit"), recomendando a implementação de estratégias energéticas

ABSTRACT

An evaluation of nuclear power perspectives considering the concepts of sustainable development and energy needs for developed and under development countries was made. It is clear that the role of nuclear energy as an economical, safe and emissions-free source of electric energy – will depend on the solution of some fundamental questions. Expanding capacity of nuclear energy should focus primarily on the need for innovation in nuclear fuel cycles and nuclear power plants. In connection with these evaluations a foresight study on the nuclear area was conducted in Brazil with a small group of experts in order to find out the requirements for the future reactors. This paper describes the purpose, methodology, results and conclusions of this prospective exercise. A comparison is also made with the preliminary results obtained by GIF and INPRO international initiatives whose main objective is to identify the most promising technologies for future generations of nuclear reactors.

Key words: innovative nuclear reactors, nuclear power plants, technological foresight.

sustentáveis, fez com que, governantes, políticos e legisladores passassem a atribuir **alta prioridade** ao conceito de desenvolvimento sustentável, especialmente nos países europeus da OECD ("Organisation for Economic Cooperation and Development"). O estabelecimento na conferência realizada em Kyoto, do "Protocol

to the United Nations Framework Convention on Climate Change", demandando dos países desenvolvidos reduzir suas emissões de "greenhouse gases (GHGs)" a um total 5% abaixo dos limites de 1990, até os anos 2008-2012, tem provocado algumas atitudes concretas e muitas discussões. Não obstante as controvérsias, as sementes de Kyoto terão uma indubitável influência no suprimento e demanda de energia em todos os países que participaram da conferência.

As metas acordadas em Kioto deixam claro que os Estados Unidos e muitos outros países desenvolvidos não serão capazes de limitar as emissões do carbono sem a utilização de energia nuclear. Por exemplo, a redução total das emissões do carbono proveniente da produção de energia, para os EUA, seria da ordem de 551 milhões de metros cúbicos. Baseado nos dados do DOE (Departamento de Energia dos Estados Unidos), 37% daquele total vem da geração de eletricidade, i.e. 219 milhões de toneladas métricas. Para fazer frente a tamanha redução, seria necessário desativar cerca de 150 "base-load fossil plants" de capacidade nominal de 1.000 Mwe cada [1] e, em seu lugar, instalar centrais elétricas não emissoras de gases causadoras do efeito estufa.

O acordo de Kyoto ainda não foi ratificado por todos signatários e as várias "Conferences of Parties" (COP) que têm se sucedido à reunião de Kyoto ainda não conseguiram lograr um acordo quanto à forma de implementar as metas e até a interpretação dos conceitos gerais acordados em Kyoto tem sido questionada. Recentemente, os Estados Unidos manifestaram-se pela não ratificação do acordo.

Por outro lado, pela primeira vez nos últimos 10 anos os EUA estabeleceram uma política de energia explícita e compreensiva [2] e nela o papel da geração nuclear é assim mencionado: "O Grupo de Desenvolvimento da Política Energética (NEPD) recomenda que o Presidente apoie a expansão da energia nuclear nos Estados Unidos como um dos mais importantes componentes da nossa política energética".

O desafio de uma melhor equidade na condição humana

O Banco Mundial, num relatório de 1996 intitulado: "Energia Rural e seu Desenvolvimento" referiu-se ao fato de que 'há cerca de dois bilhões de pessoas em países em desenvolvimento, para quem a busca pela energia é uma árdua tarefa diária. Nele, o Banco Mundial aponta: "*Mulheres e crianças dessas famílias gastam, diariamente, horas na coleta de estume e lenha - tempo que, em outras circunstâncias, poderia ser gasto em trabalhos*

produtivos ou educação. Sua saúde é comprometida devido à fumaça proveniente desses combustíveis. Seu meio ambiente pode estar sendo danificado à medida que as árvores vão sendo talhadas para servirem de combustível."

A principal proposta para este desafio tem sido o desenvolvimento acelerado e a introdução de sistemas de produção de energia descentralizados, variados e renováveis, apropriados e específicos para cada região, e que possam ser suprido por ela mesma. Dentro deste contexto, estão inseridas as seguintes tecnologias: (1) energia solar em áreas de alta insolação; (2) biomassa e biogás quando apropriados; (3) vento quando for de alto potencial técnico; (4) hidro quando for pequeno o impacto por inundação, em regiões de baixo valor agrícola e de modesta densidade populacional. Tais sistemas de suprimento de energia renovável seriam utilizados, com vantagens, em regiões que estão fora da malha energética. A esfera de atuação da geração nuclear, com a concepção atual de grandes usinas (≥ 1000 Mwe), nesse caso seria bastante reduzida.

No entanto, existem duas questões distintas neste desafio: (a) o problema rural que é o crescimento da disponibilidade local de tipos de energia (apropriados), compatíveis ambientalmente, e que possam ser viáveis economicamente; e (b) o problema urbano que é o suprimento de eletricidade e calor para indústria, comércio, residências e sistema de transportes que sejam sustentáveis do ponto de vista de impactos ambientais locais, regionais e globais. O suprimento de eletricidade e calor para áreas urbanas propicia maiores oportunidades para sistemas centralizados e é exatamente aqui que a opção energética nuclear tem seu maior potencial e aplicabilidade [3]. É conveniente ressaltar que, no Brasil, o consumo rural representa apenas 10% do total [4].

O PAPEL DA ENERGIA NUCLEAR

No final de 2001, estavam em operação 440 centrais nucleares, totalizando 353.266 MW(e) de capacidade instalada. Estas centrais nucleares, instaladas em 31 países, são responsáveis por 16% da geração de energia elétrica no mundo. No Brasil, temos operando os reatores Angra I e Angra II, somando 1.926 MW(e) de capacidade instalada.

O fator mais positivo nestes últimos anos tem sido o crescente aumento dos fatores de disponibilidade das centrais nucleares, inclusive no Brasil, devido a importantes melhorias nas práticas operacionais, ao crescente apoio dos setores de engenharia e infra-estrutura, ao melhor gerenciamento estratégico e ao

investimento na capacitação de pessoal, resultando, também, na redução de custos e aprimoramento da segurança das centrais nucleares.

Por razões diversas, nas últimas décadas, não tem ocorrido a construção de novas centrais nucleares, apenas se têm dado continuidade a algumas que já estavam planejadas. Em 1992, o "World Energy Council", WEC, apresentou uma projeção [5] para a tecnologia nuclear para o horizonte do ano de 2020 dentro dos três cenários seguintes: 'orientado ecologicamente', 'de referência' e 'desenvolvimento econômico intensivo'. Dentro desses cenários, a produção da energia nuclear em 2020 representaria, respectivamente, 0,7; 0,8 ou 1 bilhão de toneladas equivalentes em óleo (btoe), correspondendo a uma capacidade nuclear instalada da ordem de 490; 570 ou 710 GWe. Em outro estudo, a CEA "Commissariat à l'Energie Atomique", da França, anunciou uma previsão [6] bastante próxima, entre 431 e 735 GWe de energia eletronuclear em operação no mundo em 2020. Considerando o cenário pessimista, tem-se a expectativa de que, nos próximos 20 anos, ocorra um aumento da ordem de 60% na capacidade instalada mundial de origem nuclear, ao passo que no cenário mais otimista esse aumento chegaria próximo de 100%.

Caso o compromisso com o desenvolvimento sustentado e a redução nas emissões de gases que contribuem para o efeito estufa sejam efetivamente refletidos nas regulamentações e decisões de política energética no Brasil, então há uma oportunidade plausível para que a geração nuclear venha a ocupar um espaço razoável na matriz elétrica brasileira até 2020. Uma boa estimativa talvez seja um percentual de 4 a 7%, que se aproxima daquele estimado pelo WEC para o mundo num cenário de longo prazo com baixa participação nuclear.

Um ponto importante a ser perseguido nos próximos anos, e de cuja solução dependerá o futuro da tecnologia nuclear, é o tema da credibilidade da energia nuclear junto à opinião pública; sem a confiança do público e a definição clara do papel a ser desempenhado pela energia nuclear, haverá grandes dificuldades quanto à sobrevivência efetiva dessa tecnologia. O desafio é demonstrar que o uso presente e futuro da energia nuclear não compromete as possibilidades de satisfazer às demandas da economia e às outras necessidades da sociedade no futuro. Mais precisamente, é necessário provar que se obtêm benefícios tão bons ou melhores com o uso da energia nuclear quanto com o uso das outras fontes, já que não há dúvidas que em âmbito global, e principalmente nos países em desenvolvimento,

as necessidades da geração de eletricidade continuarão a crescer.

Reatores Nucleares do Futuro

Hoje não está claro como e com que tecnologias as questões correntes, relativas à energia nuclear, podem ser resolvidas. A confiança da opinião pública e aceitação da energia nuclear estão intimamente ligadas a como segurança, rejeitos e resistência à proliferação serão resolvidos, e se os debates em relação aos gases estufa contribuirão para o aumento da importância da energia nuclear na questão dos "créditos do carbono".

Embora, numa análise econômica do ciclo de vida, as centrais nucleares apresentem excelentes resultados, sua atratividade econômica deixa muito a desejar quanto à intensidade do investimento (\$/kWe), ao prazo de recuperação deste investimento e ao tempo de latência até começar a gerar retorno. As novas plantas nucleares terão que ser menos intensivas em capital, ter prazos de construção mais curtos, manter ou aprimorar o desempenho econômico, além de otimizar a segurança e a resistência à proliferação. Na tentativa de definir qual a tecnologia mais promissora e os rumos que a pesquisa e desenvolvimento devem tomar nos próximos 30 anos, no sentido de desenvolver os reatores do "futuro" que atendam a nova ordem mundial sob pontos de vista social, econômico e tecnológico, foram estabelecidas algumas iniciativas internacionais.

Duas iniciativas merecem destaque, pela abrangência e importância. A primeira iniciada em 2000 e liderada pelos Estados Unidos, é o Foro Internacional de Reatores de IV Geração (GIF) [7]. Fazem parte deste foro dez países, incluindo o Brasil. O objetivo principal do GIF é identificar, avaliar e desenvolver novos sistemas de energia nuclear que possam ser licenciados, construídos e operados, produzindo energia a preços competitivos e atendendo satisfatoriamente os requisitos de segurança nuclear, minimização de geração de rejeitos, resistência à proliferação e aceitação pública. Os primeiros passos executados foram: analisar e selecionar os conceitos mais promissores, definir os "gaps" tecnológicos e estabelecer "road maps" para guiar a pesquisa e o desenvolvimento necessários. A outra iniciativa é da AIEA (Agência Internacional de Energia Atômica), iniciada em 2001, através do projeto INPRO ("International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles") [8]. Participam deste projeto 12 países, entre eles o Brasil. O foco principal do projeto é assegurar que a tecnologia nuclear esteja sempre disponível, de modo a ajudar aos países, no século 21, a atender as

suas necessidades de energia e contribuir para o desenvolvimento sustentável.

Resumidamente, o desafio para o futuro da geração nuclear consiste em:

- 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.

ESTUDO PROSPECTIVO NO BRASIL

Em 1999, a DPD/CNEN promoveu um estudo prospectivo na área nuclear, bastante extensivo no tocante a seu conteúdo embora utilizando um conjunto restrito de especialistas. Neste trabalho é apresentado um resumo e seus principais resultados do exercício. Os resultados completos e detalhes metodológicos podem ser encontrados nas referências [9] e [10]. O principal objetivo do estudo foi:

- a. identificar e consensuar os fatores que viabilizariam o sucesso em resolver os problemas futuros da tecnologia nuclear, que passariam a ser definidos como objetivos estratégicos;
- b. 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;
- c. graduação dos 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;
- d. com a árvore de tecnologias descrita em dois níveis – áreas tecnológicas (ATs) e respectivas tecnologias (ou componentes tecnológicas), identificar o grau de relevância de cada AT em relação aos objetivos estratégicos; e
- 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 que isso ocorra no futuro próximo.

Numa visão mais ampla, esta iniciativa se insere num processo de identificar um espectro das possíveis evoluções para o desenvolvimento tecnológico da área nuclear, 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.

Dentro das várias formas de fazer prospecção tecnológica, escolheu-se o método de Delphi pela sua particularidade de envolver a participação de especialistas, de forma anônima. A metodologia é baseada num processo estruturado 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 também pode ser visto como um processo de agregação e conciliação de informações para produzir 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, 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 [12].

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 [13],[14]. Um número de experimentos realizados, sobretudo, nas décadas de 60 e 70, 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 [15]. Por outro lado, por ser um processo demorado, este método não é prático para problemas que necessitam de respostas rápidas.

Descrição do Processo

Nas etapas preliminares, o tema "conceitos avançados de geração nuclear", no contexto anteriormente descrito, foi objeto de consultas bibliográficas 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 concretizados, ou configurados de forma favorável, deverão, com boa probabilidade, restaurar e sustentar a competitividade da opção nuclear. Este trabalho gerou a base de conhecimento inicial e

possibilitou a concepção, o planejamento do estudo e a redação inicial dos questionários.

A figura 1 apresenta uma visão contextual da coordenação e execução do processo, as figuras 2 a 5 sintetizam o processo e os resultados envolvidos em cada questionário.

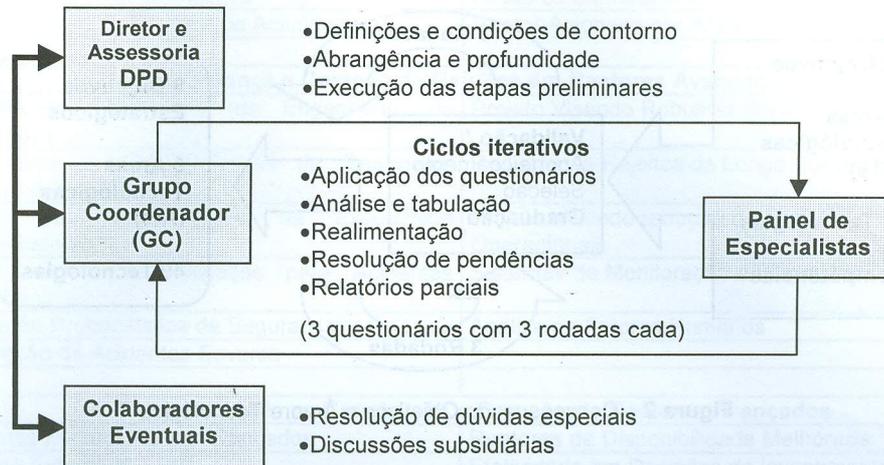


Figura 1 – Diagrama de Contexto do Processo

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

Tabela 1 – Regras para a Definição de Consenso

Regras de Consenso	
Caso	Requisito
Questões envolvendo seleção do tipo passa ou não passa	$\geq 70\%$ 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

Resultados do Primeiro Questionário

O grupamento em grandes ATs não produziu uma classificação completamente mutuamente exclusiva e, portanto, o conceito de árvore foi quebrado em 2 casos nos quais uma mesma tecnologia aparece em duas ATs diferentes. O fato foi ressaltado aos especialistas

que insistiram em mantê-las assim, esclarecendo que, embora a designação fosse a mesma, tratava-se, na verdade, de aspectos distintos de uma mesma tecnologia.

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



Figura 2 – 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, fabricação, construção, montagem, comissionamento e licenciamento
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

Tabela 3 – Árvore de Tecnologias

Áreas Tecnológicas e Tecnologias (competências)	
1. Reatores Avançados de Características Evolutivas (das gerações atuais)	
Reator Avançado de Água Pressurizada	Reator Regenerador Avançado
Reator Avançado de Água Fervente	Reator de Segurança Passiva
Reator Avançado de Água Pesada Pressurizada	Reator Avançado de Pequeno e Médio Porte
2. Novos Conceitos de Reatores Avançados (Inovativos)	
Reator de Segurança Passiva	Reatores Intrinsecamente Seguros
Reator Rápido Queimador de Actínídeos	Reator Acionado por Acelerador
3. Segurança e Geração de Rejeitos em Reatores Avançados	
Dispositivos Avançados (de Engenharia) de Segurança	Projeto Visando Robustez em Acidentes Severos
Dispositivos e Características de Segurança Passiva e Inerente	Redução de Rejeitos de Longa Duração
Análise e Realimentação da Experiência Operacional	Projeto Visando redução de Exposição e Rejeitos Operacionais
Procedimentos de Mitigação para Acidentes Severos	Sistemas de Monitoração e Diagnóstico
Avaliação Probabilística de Segurança	Análise de Fatores Humanos
Simulação de Acidentes Severos	
4. Economicidade na Construção e Geração de Reatores Avançados	
Sistemas Evolucionários Avançados	Reatores de Disponibilidade Melhorada
Queima Extendida	Efetividade em Decisões de Investimento
Extensão de Vida Útil	Tecnologia de Extensão de Vida da Usina
Monitoração e Gestão do Envelhecimento	Pequenas Centrais Nucleares para Cogeração
Construção Modular	Segurança Através da Melhoria do Desempenho Humano
5. Interface Homem-Máquina, Fatores Humanos e Sistemas de Controle Avançados	
Instrumentação e Controle Avançados	Tecnologia de Fatores Humanos
Tecnologia e Sistemas de Suporte ao Operador	Sistema de Interface Homem-Máquina
Verificação e Validação de Software	
6. Materiais para Reatores Avançados	
Ciclos de Alta Queima e Alta Conversão	Plantas de Teste de Elementos Combustíveis
Materiais para Extensão de Vida Útil	Tecnologia de Combustível de Óxido Misto
Ciclo do Tório com Uma Passada	Ciclo do Tório com Equilíbrio Auto-Sustentável
Tecnologia de Materiais para Extensão de Vida da Planta	Tecnologia do Conceito Vazar Antes de Romper
Exame Pós-Irradiação	Plantas de Alto Fluxo para Testes de Materiais
Novos Materiais	Tecnologia do Conjunto Combustível e Estrutura

Resultados do Segundo Questionário

Foi utilizada uma escala de 1 a 5 e selecionados os 2 objetivos mais pertinentes,

desde que avaliados acima de 3,5 e satisfazendo às regras de consenso.

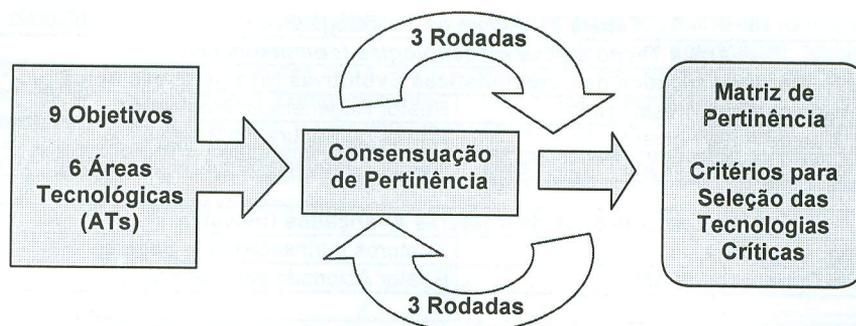


Figura 4 – Definindo os Critérios para Selecionar as Tecnologias Críticas

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 e que serão genericamente comentadas mais adiante.

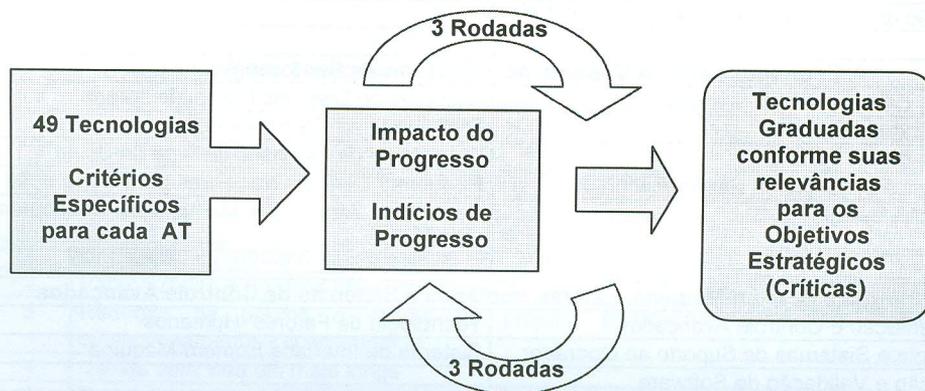


Figura 5 – Identificando as Tecnologias Críticas

O julgamento nesta etapa foi baseado em 2 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. Relevância, neste caso, foi definida como o produto do impacto (escala 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%).

Com os resultados deste exercício, foram obtidos e gerados diversos gráficos, evidenciando e identificando as tecnologias mais relevantes. Na figura 6 são apresentadas as 10 tecnologias mais relevantes, quando se considera, apenas, a média ponderada de suas relevâncias em relação aos critérios de julgamento.

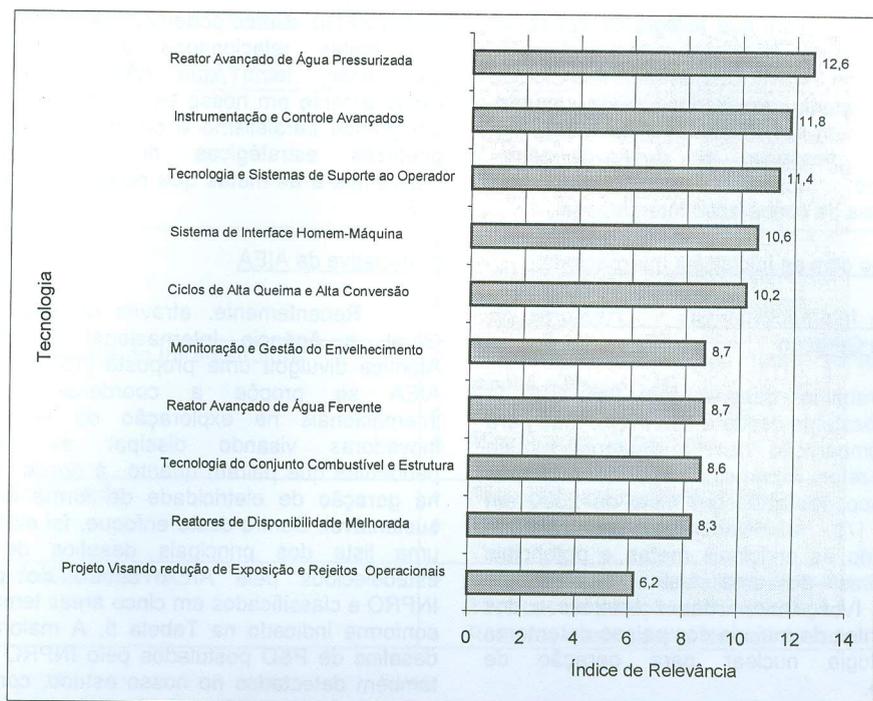


Figura 6 – Tecnologias mais Relevantes (valor máximo do índice = 15)

Considerações gerais sobre a Metodologia e Resultados

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.

Confirmando o que é registrado na literatura, se o processo for bem conduzido, com questões bem formuladas, análises perceptivas e realimentações objetivas, a convergência para o consenso se dá em 2 ou 3 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:

(a) 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;

- (b) 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 ocorre; e
- (c) respostas polarizadas, caracterizadas por uma distribuição bimodal. Neste caso os argumentos centrais 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 pela “expertise”, 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, principais resultados deste estudo, deverão também ser detalhadas, no futuro, em linhas de pesquisa e desenvolvimento, considerando nosso estado atual e possibilidades de cooperação internacional.

Comparação com as Iniciativas Internacionais

a) Forum Internacional GIF - Reatores de Quarta Geração

Os trabalhos desenvolvidos pelo GIF já evoluíram bastante desde o seu início, mas para fins de comparação com o presente estudo vamos nos referir à primeira etapa, quando após um workshop, realizado em maio de 2000 em Bethesda [7], foi elaborado um relatório apresentando as principais metas e potenciais características de uma Usina Nuclear de Geração IV, fruto das opiniões dos representantes da maioria dos países detentores de tecnologia nuclear para geração de eletricidade.

Tendo em vista as diferenças de escopo dos dois trabalhos, a comparação é apropriada apenas em termos gerais. Isto é feito através de uma matriz de inter-relacionamento (tabela 4) entre nossos objetivos estratégicos com as

metas do GIF. Como podemos ver com exceção das metas relacionadas à resistência à proliferação, tema que não foi abordado explicitamente em nosso estudo prospectivo, há um grande paralelismo e congruência entre as diretrizes estratégicas do exercício que realizamos e as metas que norteiam a iniciativa GIF.

b) Iniciativa da AIEA

Recentemente, através do seu Diretor Geral, a Agência Internacional de Energia Atômica divulgou uma proposta [16] na qual a AIEA se propõe a coordenar esforços internacionais na exploração de tecnologias inovadoras visando dissipar as dúvidas pendentes que pairam quanto à opção nuclear na geração de eletricidade de forma limpa e sustentável. Dentro deste enfoque, foi elaborada uma lista dos principais desafios de P&D estabelecidos pela AIEA dentro do projeto INPRO e classificados em cinco áreas temáticas, conforme indicado na Tabela 5. A maioria dos desafios de P&D postulados pelo INPRO foram também detectados no nosso estudo, conforme pode ser observado através da comparação entre as Tabelas-5 e 3. A exceção é, também neste caso, a meta relacionada com a resistência à proliferação.

Tabela 4 – Comparação das Metas para Reatores de IV Geração com os Objetivo Estratégicos (Delphi)

MATRIZ DE INTERRELACIONAMENTO (A = alto, M = médio, B = baixo)	OBJETIVOS ESTRATÉGICOS (Prospecção DPD/CNEN)								
	Legislação e Regulamentação Estáveis	Padronização e projetos Pré-licenciados	Redução de Prazos e Custos no Projeto, Fabric., Constr., Mont., Comission. e	Usinas de vida Útil mais Longa	Projetos com Alto Nível de Segurança Inerente	Facilidade e Eficiência de Operação, Manutenção e Supervisão	Alta disponibilidade	Ciclos de carregamento mais Longos e Maior aproveitamento do Combustível	Minimização na Geração de Rejeitos em Todas as Operações
METAS (REATORES DE IV GERAÇÃO - GIF)									
Custo Competitivo da Eletricidade no Barramento		M	A	M					
Risco Aceitável para o Capital Investido		A	A			A	A	M	
Prazos Reduzidos de Projeto e Construção	M	A	A						
Baixa Probabilidade de Danos do Núcleo					A	M			
Demonstração da não ocorrência de Danos Severos ao Núcleo		B			A	B			
Eliminação da Necessidade de Respostas à Emergência fora do Sítio da Usina					A				M
Tolerância em relação a Erros Humanos		B			A	A			
Soluções para todos os Tipos de Rejeitos								M	A
Aceitação Pública das Soluções para os Rejeitos								B	A
Minimização de Rejeitos								M	A
Mínimização da Atratividade de Potenciais Materiais Proliferantes								B	
Resistência Intrínseca e Extrínseca a Proliferação									
Possibilidade de Avaliação da Resistência à Proliferação									

Tabela 5 – Desafios de P&D do INPRO [8, 16]

ÁREA TEMÁTICA	DESAFIOS DE P&D
Economia	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Intensidade de investimento (redução) ◆ Prazos de construção e licenciamento (redução) ◆ Adaptabilidade às demandas do mercado (tamanhos variados)
Segurança	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Fatores Humanos ◆ Simplificação no projeto e operação ◆ Sistemas passivos de segurança
Compatibilidade de Infra-estrutura	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Estabilidade operacional (para variações de tensão e frequência) ◆ Facilidade de licenciamento ◆ Minimização de rejeitos
Não Proliferação	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Potencial para controle passivo ◆ Técnicas inovativas de detecção
Ciclo do Combustível	<ul style="list-style-type: none"> ◆ Demonstração de repositório permanente ◆ Técnicas de partição e transmutação ◆ Reatores queimadores de actinídeos

CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Dentro do aspecto intrínseco à metodologia Delphi, este exercício revelou interessantes aspectos não só quanto à funcionalidade do método mas também quanto aos fatores ligados ao comportamento individual dos especialistas que compuseram o painel de respondentes. A oportunidade de praticar este exercício foi de extrema valia para o grupo coordenador, pela experiência adquirida no planejamento, execução e interpretação dos resultados.

A grande convergência encontrada entre os objetivos estratégicos da prospecção realizada neste trabalho e as metas do GIF refletem o fato que a comunidade nuclear internacional e do Brasil tem uma compreensão mais ou menos consolidada de quais são as grandes questões de futuro para a geração nuclear, além disso, respeitadas as diferenças de palavras, a identificação dos objetivos e metas tecnológicas que o setor nuclear deve lograr é objeto de grande consenso.

No tocante às áreas tecnológicas e tecnologias relevantes, há também uma boa concordância entre os resultados do nosso estudo e aqueles do INPRO, embora, as diferenças na formatação do problema, tenham feito com que os enunciados resultantes apresentassem uma razoável diversidade de termos e de partição de conteúdo. Nesse ponto deve-se notar que ao formularmos nosso estudo pedimos que fossem levadas em conta as condições e estágio tecnológico do Brasil. Isto

talvez explique algumas diferenças notáveis, como o fato de nosso trabalho não ter incluído as questões relativas à resistência à proliferação e os repositórios para rejeitos de longa vida e alta atividade. Para a primeira omissão contribui grandemente o fato da seriedade com que a filosofia e as medidas de salvaguardas (medidas extrínsecas para não proliferação) são encaradas e implementadas no Brasil. Nosso país assinou e ratificou três tratados internacionais sobre o assunto (Quatupartito, Tlateloco e TNP) que resultaram em uma sistemática de inspeções bastante frequentes por parte de dois organismos internacionais: ABACC e AIEA, na quais se incluem até instalações militares.

Portanto, estando tal filosofia inserida na cultura de nossa comunidade nuclear, havia um certo entendimento tácito que o nível de proteção atual é satisfatório e esta preocupação não foi trazida pelos especialistas. Para o segundo item, embora não nos pareça tão evidente, a explicação pode residir no fato de termos apenas duas usinas nucleares e esta ser uma questão de longo prazo para o país e essencialmente do ciclo do combustível no seu sentido amplo. Neste caso, como nosso estudo enfocara a competitividade da próxima geração de reatores nos próximos 20 anos, a questão passou despercebida.

O Brasil está efetivamente engajado nas iniciativas GIF e INPRO. A primeira delas, já produziu uma certa coletânea de informações e conhecimentos que resultaram em duas listas de conceitos promissores e, brevemente, teremos disponível um "roadmap". Estas listas referem-se

aos conjuntos de conceitos denominados como "International Near Term Deployment – INTD" e "Generation IV". O primeiro grupo inclui aqueles conceitos que, já satisfazendo substancialmente às metas do GIF, poderiam estar disponíveis para uso nos próximos 15 anos, porque não dependem de desenvolvimentos tecnológicos de grande monta. O segundo, reúne os conceitos julgados mais promissores em termos de atendimento das metas, mas cuja utilização só se crê possível nos próximos 30 anos, em função dos hiatos tecnológicos hoje existentes.

O "roadmap" a ser emitido em outubro de 2002 pelo GIF identifica as tecnologias que precisam ser desenvolvidas e traça os roteiros para tal, de forma a incentivar a pesquisa colaborativa entre países interessados. De posse desse "roadmap" seria interessante desenvolver um novo trabalho prospectivo para, através de um painel de especialistas, elencar aqueles itens estrategicamente mais convenientes, em termos de custo-benefício, para eventual adesão do Brasil.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a colaboração do grupo de especialistas que participaram deste pioneiro exercício de prospecção no país na área nuclear.

REFERÊNCIAS

- [1] CHARLES W. PRYOR JR, The Economics of Nuclear Energy, *Nuclear Plant Journal*, p. 40-43, september-october 1998.
- [2] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, National Energy Policy, *Report of the National Energy Policy Development Group*, may 2001. Disponível em: www.fe.doe.gov/general/energypolicy/nationalenergypolicy.pdf, acesso em 26 ago. 2002.
- [3] JEFFERSON, M. Nuclear power in global energy perspectives of the twenty-first century, *Nuclear Energy*, vol. 36, n° 2, p. 115-122, 1997.
- [4] ELETROBRÁS, *Plano Decenal de Expansão 1999/2008*. 2000. Disponível em: www.eletronbras.gov.br/atuação/mercado.htm. Acesso em 17 nov. 2000.
- [5] WORLD ENERGY COUNCIL, Energy for Tomorrow's World – The Realities, the Real Options and the Agenda for Achievement, WEC, 1993. Disponível em: www.worldenergy.org/wec-geis/reports/etwan/download/download.asp. Acesso em 30 ago. 2002.
- [6] CEA, Prospective életronucléaire mondiale 2020 dans le contexte énergétique global, Paris, Juillet 1992.
- [7] DEPARTMENT OF ENERGY, Discussion on Goals for Generation IV Nuclear Power Systems, GENERATION IV WORKSHOP, MAY 1-3, 2000, Bethesda, **Reports...** Bethesda, July 31, 2000.
- [8] KUPITZ, J. The IAEA's International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles (INPRO), In: ICONE10, 10th INTERNATIONAL CONFERENCE ON NUCLEAR ENGINEERING, ARLINGTON, April 14-18, 2002, Arlington *Proceedings...* Arlington: ICONE 10, 2002.
- [9] BARROSO A.C.O. E IMAKUMA, K. *Papel da Energia Nuclear para Geração de Eletricidade nos Próximos 10 a 20 anos – O Caso Brasileiro*, julho 2000. (Relatório Interno).
- [10] BARROSO A.C.O. E IMAKUMA, K. Exercício de Prospecção na Área Nuclear, *Revista Inteligência Empresarial*, n. 5, p.16-27, outubro 2000.
- [11] ZIGLIO, E., THE DELPHI METHOD AND ITS CONTRIBUTION TO DECISION-MAKING. IN: ADLER M. AND ZIGLIO E. *Gazing into the Oracle: The Delphi Method and its Application to Social Policy and Public Health*, London and Bristol: Jessica Kingsley Publishers, 1996. P. 3-33.
- [12] DRUCKER, P.F., *The New Realities in Government and Politics / in Economies and Business / in Society and World View*, Harperbusiness, 1994.
- [13] HELMER, O., The Systematic Use of Expert Judgement in Operations Research, The RAND Corporation, Santa Monica, CA, 1963. Apud: ADLER M. AND ZIGLIO E. *Gazing into the Oracle: The Delphi Method and its Application to Social Policy and Public Health*, London and Bristol: Jessica Kingsley Publishers, 1996.
- [14] HELMER, O., Convergence of Expert Consensus through Feedback, , The RAND Corporation, Santa Monica, CA, (1964). Apud: ADLER M. AND ZIGLIO E. *Gazing into the Oracle: The Delphi Method and its Application to Social Policy and Public Health*, London and Bristol: Jessica Kingsley Publishers, 1996.
- [15] DALKEY, N.C., Toward a theory of group estimation, 1975. In: *The Delphi Method: Techniques and Applications*, Reading: Addison-Wesley, 1975.
- [16] EL BARADEI M. The need for innovation for nuclear power in the 21st century, *Nuclear News*, v.43, n. 12, p. 29-32, November 2000.