

ALTERNATIVA NUCLEOELÉTRICA NO CONTEXTO DO PLANO 2015

Nelson Leon Meldonian
João Manoel Losada Moreira
Mitsuo Yamaguchi
Nanami Kosaka

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares
CEP 05422-970 São Paulo-SP CX Postal 11049
tel: (011) 816-9000 fax (011) 212-3546

RESUMO

Este trabalho apresenta as características principais de um Reator Nacional de Água Pressurizada de Média Potência (RENAP MP) com sistemas passivos de segurança. Estas informações servem de base para estudos de planejamento energético objetivando a geração de energia nucleoeletrica, no final da próxima década.

Com a visualização do esgotamento do potencial hidrelétrico nacional, no período 2010/2020, a ELETROBRÁS (Plano Nacional de Energia Elétrica 1993/2015 - Plano 2015) prevê a necessidade de um programa termelétrico baseado em usinas a carvão e nucleares. Numa primeira etapa as usinas termelétricas terão função complementar no parque gerador de energia elétrica predominantemente hidrelétrico, passando a médio / longo prazo a ter papel mais representativo quanto ao atendimento do mercado.

Considerando os planos de expansão do sistema elétrico brasileiro a médio / longo prazos e o recurso energético disponível, a Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) delegou ao Departamento de Reatores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) a responsabilidade de estudar alternativas para a geração núcleo-elétrica no Brasil, que hoje se apresenta apenas com a possibilidade de expansão via reatores de 1200 MW (Siemens/KWU-NUCLEN). Esses estudos

resultaram na caracterização do reator acima citado que seria desenvolvido a partir do conhecimento existente nos institutos de pesquisa da CNEN e da COPESP. Destaca-se neste trabalho o custo médio da energia 59 a 81 US\$/MWh (função do fator de carga); e o uso de componentes passivos inerentemente seguros.

INTRODUÇÃO

Nos quatro cenários estabelecidos no Plano 2015, quanto as expectativas em relação ao comportamento da economia brasileira, a ELETROBRÁS está prevendo que a energia elétrica terá importância crescente na área energética e economica nacional. Segundo estudos realizados pela mesma, o crescimento anual médio do consumo de energia elétrica poderá variar de 3,8 % a 5,2 % , no período 2010 - 2015, mesmo considerando - se a incorporação de medidas de conservação, perfazendo valores que vão de 563 TWh a 826 TWh, em 2015 (VENTURA FILHO, 1994).

Para efeito de ampliação da capacidade instalada no país, de forma a assegurar o suprimento adequado dos sistemas elétricos, não se deve descartar, a priori, qualquer fonte energética para a geração de energia elétrica, mesmo num parque predominantemente hidrelétrico. Nos estudos de planejamento, há de se ter em mente o crescente afastamento de aproveitamentos hídricos dos grandes centros de consumo; a previsão de esgotamento deste

potencial, em prazo não tão distante; e o surgimento de questões ambientais - financeiras quanto às usinas hidrelétricas da Amazônia.

Em função do esgotamento do potencial hidrelétrico nacional, a ELETROBRÁS prevê que a médio / longo prazo, a opção termelétrica passe a ser alternativa necessária, objetivando o atendimento de mercado. (VENTURA FILHO, 1994)

Para este horizonte, a construção de usinas nucleolétricas, desde que economicamente competitivas, seguras e aceitáveis do ponto de vista ambiental, insere-se perfeitamente neste contexto, principalmente quando se leva em conta as extensas reservas de Urânio do país.

As reservas geológicas brasileiras de urânio (U_3O_8) são estimadas em 301.500 t, sendo que 192.500 t são reservas medidas e/ou indicadas e 109.000 t inferidas. Para fins de estimativas econômicas, a ELETROBRÁS tem considerado a reserva recuperável de 120.100 t, correspondendo a uma capacidade instalada em torno de 26.000 MWe, (25 anos.) Este é um valor subestimado, considerando as tecnologias já amplamente utilizadas pelos reatores tipo PWR, como a extensão de queima de combustível até 45.000 MWD/tU (a queima máxima do combustível de Angra-1 é de 33.000 MWD/tU) e a reciclagem do plutônio na forma de combustíveis MOX (óxido misto de urânio e plutônio), de uso corrente na Europa e no Japão.

Considerando - se estes aspectos, obtém-se um adicional de 39.000 MWe , levando o potencial de geração nuclear com tecnologia PWR para 65.000 MWe somente com as reservas recuperáveis. (MELDONIAN, 1994)

Uma análise do mercado mundial e do Brasil de energia mostra que atualmente centrais de geração termo-elétrica de porte menor são mais adequadas para a expansão do parque gerador. A maioria das centrais termo-elétricas instaladas recentemente no mundo tem potência em torno de 400 MWe. Isto é atribuído ao fato de que menores potências são mais adequadas às incertezas nas projeções de necessidade de energia, que representa menores riscos de investimentos financeiros, redução de custos e menor tempo de construção (BRAUN, 1986; BOARD, 1991). Devido a este fato companhias

americanas, européias e japonesas demonstram interesse pela construção de pequenos e médios reatores nucleares. A Tabela 1 lista sete projetos em desenvolvimento por várias empresas de energia no mundo (CHEVALIER, 1991). A característica principal desses reatores é a implantação de sistemas passivos de segurança.

Tabela 1 - Projetos de pequenos e médios reatores

PROJETO	EMPRESA	TIPO DE REATOR	MWe
SBWR	GE	Small Simplified Safe BWR Natural Circulation	600
AP600	Westinghouse	Advanced Passive PWR - Two Loop	600
MS300	Mitsubishi	Two Loop PWR	300
SIR	RRA, S&W, UKAEA, CE	Safe Integral Reactor - Integral PWR	320
PIUS	ASEA Brown Boveri Atom	Process Inherent Ultimate Safe - Four Loop PWR	640
MHTGR	GA, CE, GE	Modular High Temperature Gas-cooled Reactor - Single Loop	135
HTRM	Interatom	High Temperature Reactor Module - Single Loop	80

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN) delegou ao Departamento de Reatores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN) a responsabilidade de estudar alternativas para a geração núcleo-elétrica no Brasil, que hoje se apresenta apenas com a possibilidade de expansão via reatores de 1200 MW (Siemens/KWU-NUCLEN). O IPEN vem desenvolvendo estudos a cerca de instalações nucleares de pequeno e médio porte com segurança passiva. Este projeto denominado RENAP-MP (REator Nacional de Água Pressurizada de Média Potência) apoia-se na tecnologia já disponível no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) de Belo Horizonte; no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) do Rio de Janeiro; na Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP) e no próprio Instituto.

O RENAP-MP deverá seguir a tecnologia proposta para o AP600. O custo de investimento do RENAP-MP foi estimado a partir dos custos de equipamentos de Angra-I, Angra-II e do projeto da INAP-11 (Instalação Nuclear de Água Pressurizada) a ser construída pela Marinha Brasileira, encontra-se detalhado na Tabela 3.

OPERAÇÃO DO RENAP-MP NA MALHA ELÉTRICA

O custo de investimento de uma central nuclear é relativamente alto quando comparado com outras formas de geração termelétrica. Inversamente, o custo do combustível nuclear é comparativamente baixo. O ciclo de recarga mais longo e a confiabilidade dos sistemas passivos de segurança permitem considerar um alto fator de disponibilidade, em torno de 90 %, para as centrais nucleares modernas. Esses fatos motivam as centrais nucleares a operarem na base do sistema, competindo favoravelmente com outras alternativas consideradas para a termo-eletricidade.

Para sistemas de geração preferencialmente térmicos, as usinas nucleares operam com alto fator de capacidade, refletindo o fato de terem o menor custo de geração para a base do sistema. Ocorrem, porém, casos em que a parcela da geração nuclear é tão significativa, como a França, que se torna

inevitável utilizar as usinas nucleares nas faixas superiores da curva de carga do sistema. É importante reforçar que não existe uma limitação tecnológica específica para esta operação mais flexível, desde que o projeto tenha claramente considerado tal requisito. A experiência internacional indica o uso das usinas nucleares como instalações para a base do sistema, devido exclusivamente à motivação econômica.

Para sistemas de geração preferencialmente hidráulicos, as usinas térmicas operam em regime de complementação, prevendo-se baixo fator de capacidade e grande flexibilidade operativa.

Baseado nas previsões da ELETROBRÁS, o cenário para as usinas térmicas será de complementação térmica durante boa parte das próximas décadas, mesmo nas condições mais restritivas para a implantação da geração hidráulica disponível.

COMPETITIVIDADE ECONÔMICA DOS REATORES DE PEQUENO E MÉDIO PORTES COM SISTEMAS PASSIVOS DE SEGURANÇA

Os reatores avançados de pequeno e médio portes têm vários aspectos diferentes quando comparados aos PWRs convencionais, notadamente o menor número de equipamentos com os conseqüentes menores tempo de construção e investimento de capital. Simplificações no projeto de uma central nuclear com a implantação de sistemas passivos de segurança reduzem ou mesmo eliminam componentes e subsistemas, resultando em redução de custo de capital. A Tabela 2 mostra algumas simplificações no projeto de um reator com segurança passiva, no caso o AP600 da Westinghouse, comparando-as com um projeto PWR típico de 600 MWe (semelhante a Angra-1), que permitem a redução do custo de capital (VIJUK, 1988; HALL, 1991)

As economias de escala em reatores de grande porte são grandes somente quando as plantas têm sistemas totalmente semelhantes. Por exemplo, estima-se que o acréscimo do custo de capital, por kW instalado, de uma central de 600 MWe é de quase 50 % ao de 1200 MWe, que utilize a mesma tecnologia e os mesmos conceitos de

segurança. Entretanto, com relação ao projeto do reator SIR, mencionado na Tabela 1, estima-se que o custo de capital imediato por kW instalado não ultrapasse 10 % ao de um reator comercial de grande porte (HAYNS, 1991). O tempo de construção do SIR é estimado em 30 meses, enquanto que para um reator comercial de grande porte dispense-se em torno de 78 meses.

convencional de 1200 MWe não tem um comportamento linear com a potência. As diferenças tecnológicas impõem uma descontinuidade nas curvas de custo, que não podem ser contabilizadas através de simples relações de escala.

CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO RENAP-MP

O reator nuclear RENAP-MP deverá ter tecnologia típica dos projetos evolutivos na área nuclear com sistemas passivos de segurança e simplificações de sistemas de operação e manutenção. Esta tecnologia, mais apropriada a reatores de menor potência, está sendo aplicada nos projetos de reatores AP600, SIR, MARS e outros projetos que visam satisfazer às condições de segurança e de economicidade impostas pelo setor elétrico mundial. As mudanças tecnológicas envolvem a diminuição da densidade de potência dos reatores, de forma a permitir uma operação mais simples e segura, e uma mudança filosófica de projeto, que permitiu se criar sistemas com atuação via passiva baseada em princípios físicos e eliminação de sistemas. Estas alterações são baseadas na experiência adquirida a partir das plantas PWR em operação aplicada a reatores de menor porte. Os projetistas do SIR imaginam que não será necessário construir um protótipo para demonstrar o projeto para obter a certificação de projeto licenciável pelo órgão regulador (HAYNS, 1992). A Westinghouse está realizando um programa experimental para validar os sistemas passivos propostos para o AP600 e imagina receber a certificação deste projeto em 1995 (BRUSCHI, VIJNK, 1992).

O objetivo dos seus proponentes é que estas plantas nucleares possam competir, em termos de custo de geração, com as plantas de turbina a gás de ciclo combinado e plantas a carvão existentes atualmente no mercado mundial (USCEA, 1991). As simplificações e inovações tecnológicas destas plantas faz com que, embora de menor potência, tenham custo específico competitivo.

O projeto em estudo contempla um PWR de médio porte, com potência de 300 MWe, baseado no reator RENAP-11 em construção no Centro Experimental

Tabela 2 - Simplificações no projeto do AP600 comparado com um reator PWR convencional semelhante a Angra-1

COMPONENTES	ANGRA-1	AP600
Bombas de segur.	25	nenhum
Bombas de segurança não nuclear	188	139
Ventiladores	52	27
Filtros	16	7
Válvulas NSSS (> 2 pol.)	512	215
Válvulas BOP (> 2 pol.)	2041	1530
Tubulação NSSS (> 2 pol.)	13.500 m	3.365 m
Tubulação BOP (> 2 pol.)	30.000 m	20.400 m
Evaporadores	2	nenhum
Geradores Diesel	2	1
Contenção + Contenção Sísmica	266.180 m ³	130.260 m ³

NSSS - Nuclear Steam Suply System
BOP - Balance of Plant

Os ganhos de escala em projetos tão diversos como uma planta de 300 MWe com conceitos de segurança passiva e uma outra

ARAMAR da COPESP, tendo como referência o reator AP600 da Westinghouse, com sistemas passivos de segurança, onde foram modificados ou eliminados alguns sistemas que normalmente são utilizados nos reatores PWR convencionais:

- a. sistema auxiliar de alimentação;
- b. sistema de remoção de calor residual convencional;
- c. sistema essencial de água de serviço; e
- d. sistema de reciclagem de boro.

Ainda foram promovidas outras simplificações, como por exemplo, a não utilização exclusiva de componentes ativos para as atuações de segurança, tais como bombas, ventiladores, refrigeradores e motores diesel. Algumas poucas válvulas necessitam ser acionadas no início de transientes inesperados, mas essas são do tipo "fail safe". Os sistemas associados de suporte, assim como os sistemas usados para a operação normal da central, não são necessariamente de classe de segurança.

O núcleo segue os padrões de um PWR convencional, mas com baixa densidade de potência, aumentando as margens de segurança do projeto.

PRINCIPAIS DADOS DA CENTRAL NUCLEAR PROPOSTA

Projeções iniciais para o RENAP-MP indicam que o custo médio da energia produzida nesta usina se situaria entre 59 e 81 US\$/MWh, compreendendo estes valores, além dos investimentos diretos, os juros durante a construção (JDC), os custos de operação e manutenção e o custo nivelado do combustível. Os dados do RENAP-MP encontram-se descritos a seguir.

Custo de investimento. Os custos de investimentos variam muito nos diversos países por uma extensa gama de razões, das quais destacam-se: as características de projetos que seguem normas particulares de seus órgãos reguladores e de suas empresas de energia elétrica, os custos de desenvolvimento de sítios, os métodos adotados para a refrigeração, a capacidade da usina, etc.

No caso específico de uma usina núcleo-elétrica avançada de médio porte (300 MWe), desenvolvida no Brasil com

tecnologia própria, estima-se em US\$ 790.000.000,00 (setecentos e noventa milhões de dólares) os custos diretos da primeira unidade, não computados neste valor, os juros durante a construção e os custos da carga inicial de combustível. Este valor foi tomado como referência para os estudos de planejamento energético visando a inserção de reatores deste tipo na malha elétrica brasileira. Como neste estudo busca-se conhecer em que condições a central se torna competitiva economicamente, o custo direto total deverá ser objeto de um estudo paramétrico. O resultado de custo competitivo será a meta principal que a equipe de projeto deverá perseguir no desenvolvimento do reator RENAP-MP.

A Tabela 3 mostra as atividades e os respectivos custos que compõem a construção da primeira unidade. Os custos das unidades posteriores poderão ser menores, pois serão compostos praticamente da compra dos equipamentos e das construção e montagem. Além disso, os equipamentos poderão ter seus custos reduzidos, a medida que as indústrias se capacitarem e adquirirem infraestrutura para a fabricação.

Custo de Operação e Manutenção (O&M). Como no caso dos custos de investimentos, há grandes diferenças, no que se refere a custos de O&M, para usinas núcleo-elétricas nos diversos países do mundo, chegando - se a uma variação superior a 4 vezes entre os casos extremos (ARRIETA, 1992). Desta forma, foi assumido um valor médio de US\$ 55 /kW.ano para o custo de O&M para a usina em questão.

Custo de Combustível. Para a determinação deste valor, foram considerados preços do mercado internacional de urânio, a saber:

- U₃O₈: 37,50 US\$/kg (mercado de médio e longo prazo); o custo nacional, de Poços de Caldas, varia entre 90,00 e 110,00 US\$/kg;
- conversão: 6,50 US\$/kgU;
- enriquecimento: 150,00 US\$/kgUTS (URENCO);
- fabricação: 500,00 US\$/kgU (KWU).

A título de referência, o custo do combustível foi calculado com o programa NUCOST 1.1 (MASCARENHAS, 1989) para 3 valores de potência. Na Tabelas 4 estão apresentadas as principais características e

os custos unitários do combustível considerado.

Tempo de Construção e Cronograma de Desembolso. O prazo previsto para a construção e montagem, uma vez estabelecida a infra-estrutura local, é de 5 anos.

Deve ser salientado que, por se tratar da primeira usina do gênero, deve ser acrescido um período de 5 anos para a fase de concepção, projeto básico, detalhamento, certificação e licenciamento que antecedem a construção propriamente dita.

O cronograma de desembolso anual é 3 %, 13 %, 35 %, 35 % e 14 %. Para fins de JDC, considerou-se uma taxa de 10 % ao ano.

Tabela 3 - Atividades e custos da construção do RENAP-MP de 300 MWe.

ATIVIDADE	CUSTO (US\$ $\times 10^6$)
Projeto e Licenciamento	95
Compra de Componentes:	
.Gerador de Vapor	100
.Turbina-Gerador	70
.Equipamentos	75
Mecânicos	
.Sistemas de	100
Tubulações	
.Instrumentação e	20
Controle	
.Sistemas Elétricos	50
Construção e Montagem	220
Treinamento	40
Preparação dos	
.Procedimentos	5
.Comissionamento e	
.Testes	15
TOTAL (primeira unid.)	790
TOTAL (unidades subs.)	635

Deve ser salientado que, por se tratar da primeira usina do gênero, deve ser acrescido um período de 5 anos para a fase de concepção, projeto básico, detalhamento, certificação e licenciamento que antecedem a construção propriamente dita. O cronograma de desembolso anual é 3 %, 13

%, 35 %, 35 % e 14 %. Para fins de JDC, considerou-se uma taxa de 10 % ao ano.

Tabela 4 - Necessidade e custo de combustível para o RENAP MP de várias potências

Potencia (MW _e)	m _u /EC (kg)	m _u (ton)	Custo (US\$/MWh)
200	345,78	33,54	11,03
400	432,22	52,30	9,98
600	478,77	69,42	9,64

Vida Útil da Usina. A vida útil de uma usina do tipo AP600 é estimada em 60 anos, mas por se tratar de um projeto em um país que não dispõe das mesmas experiência e infra-estrutura, estimou-se uma vida útil de 50 anos para o reator RENAP-MP.

Fator de Disponibilidade e Fator de Carga. A usina deve ser projetada para uma disponibilidade média anual de 90 % por toda sua vida útil, considerando-se para tanto as seguintes durações de parada:

- paradas planejadas: menos de 25 dias/ano;
- paradas forçadas: menos de 5 dias/ano; e
- grandes paradas: menos de 180 dias/10 anos.

Observa-se, porém, que o regime de operação em complementação térmica e segmento de carga implicará, necessariamente, em fatores de carga dependentes das condições de hidráulidade do sistema gerador, sensivelmente menores que o fator de disponibilidade.

CONCLUSÕES

Com o esgotamento do potencial hidrelétrico competitivo e ambientalmente viável por volta de 2010 e 2015, caberá às termelétricas atenderem às necessidades de suprimento de eletricidade do Brasil. Para garantir o fornecimento desta energia após 2015 é necessária a consolidação das tecnologias de geração térmica no Brasil no período 1995-2015. Dentro deste cenário de consolidação de tecnologia a ELETROBRÁS prevê a construção de Angra-II e de mais 3900 MW de energia núcleo-elétrica até 2015.

Dada a escassez de recursos financeiros no setor elétrico o IPEN/CNEN-SP está propondo outra alternativa para a geração núcleo-elétrica no país, que hoje se apresenta apenas com a possibilidade de expansão via reatores de 1200 MW (Siemens/KWU-NUCLEN). O reator RENAP-MP de 300 MWe com adoção de sistemas passivos de segurança e baseado na tecnologia evolucionária do AP600, consolidaria a tecnologia com custos de investimentos inferiores aos reatores de grande porte.

Este reator tem custo de investimento estimado em US\$790 milhões sem considerar juros durante a construção. O valor projetado para o custo da energia gerada é de 59 a 81 US\$ / MWh (fator de carga entre 60 e 90 %). Este custo de geração está associado a aspectos relevantes, tais como a operação por longos períodos de tempo sem paradas para recarga e manutenção, menor período de construção (5 anos) e conseqüente redução na escalada dos custos financeiros.

O RENAP-MP apoia-se na tecnologia já disponível nos centros de pesquisa da CNEN, e principalmente na colaboração entre o IPEN e a COPESP para o desenvolvimento da INAP-11 em Aramar.

REFERÊNCIAS

VENTURA FILHO, A.; ELETROBRÁS; O papel da Geração Nuclear no Atendimento do Sistema Elétrico Brasileiro a Longo Prazo; Anais do V Congresso Geral de Energia Nuclear; Vol. III; Rio de Janeiro; set. 1994.

MELDONIAN, N.L. et alii; IPEN / CNEN-SP; Renap mp Reator Nacional de Água Pressurizada de Média Potência; V Congresso Geral de Energia Nuclear; Vol. III; Rio de Janeiro; set. 1994

BRAUN, C., Major trends affecting the prospects for small reactors in the U. S., Electric Power Research Institute, ENC-4 & FORATOM IX, Geneva, June 1-6, 1986.

BOARD, J. A., Economic targets for small PWR reactor design, Nuclear Energy, 75-78, Vol. 30, No. 2, April 1991.

CHEVALIER, A. B. H., Passive safety features - a considered view of UK safety arguments, Nuclear Energy, 79-83, Vol. 30, No. 2, April 1991.

VIJUK, R. e BRUSCHI, H., AP600 offers a simpler way to greater safety, operability and maintainability, Nuclear Engineering International, Vol. 33, No. 412, November 1988.

HALL, A. e SHERBINE, C. A., PWRs with passive systems, Nuclear Energy, 95-103, Vol. 30, No. 2, April 1991.

HAYNS, M. R. e SHEPHERD, J., SIR - reducing size can reduce cost, Nuclear Energy, 85-93, Vol. 30, No. 2, April 1991.

ARRIETA, L. A., Diretrizes e requisitos gerais de projeto para a PWR nacional de pequeno porte, CNEN/IEN-RJ, Maio 1992.

MASCARENHAS, H. A., Manual de utilização de NUCOST 1.0, código de cálculo de custo de geração núcleo-elétrica, Nota Técnica DETR-256/89, Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear, Belo Horizonte, MG, Novembro 1989.

ELETROBRÁS, Plano Decenal de Expansão 1993 - 2002; Rio de Janeiro; Set.;1992.

ANDERSON, T.; AP600: A new standard 600 Mw plant for new order of business; ASME/JSME Nuclear Engineering Conference; Vol. 2; p.605; San Francisco, CA; março; 1993.

BRUSCHI, H. J. E VIJNK, R. P.; AP600 plant design - meeting industry needs, The Nuclear Engineer; Vol. 32; No. 5; p.155; 1992.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY; Nuclear baseload electricity generation cost experience; IAEA-TECDOC-701; p. 40-41 e p.53-54; abril; 1993.

WEISS, E. J.; AP600: Progress toward commercialization; Nuclear Europe Worldscan; p.16; novembro-dezembro;1990.