

RENAP-MP - REATOR NACIONAL DE ÁGUA PRESSURIZADA DE MÉDIA POTÊNCIA

Nelson Leon Meldonian

Mitsuo Yamaguchi

Nanami Kosaka

João Manoel Losada Moreira

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP

Travessa R, 400 - Cidade Universitária

05508-900, São Paulo, SP

RESUMO

Este trabalho apresenta as características de uma central nuclear de média potência, denominada RENAP-MP, resultante do desenvolvimento conjunto efetuado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP) e a Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP) do Ministério da Marinha. Tendo - se em vista os planos de expansão do sistema elétrico brasileiro, a médio e longo prazos, o estudo realizado teve por objetivo determinar as condições necessárias para garantir - se a competitividade técnico-econômica do RENAP-MP frente a outras formas de geração, destacando - se : o custo médio da energia (US\$ 59 / MWh); o uso de componentes passivos inerentemente seguros; o menor período de construção (5 anos) e a conseqüente redução na escalada dos custos financeiros; e as vantagens sócio - ambientais, evitando - se o alagamento de grandes áreas, o efeito estufa e a chuva ácida.

INTRODUÇÃO

A ELETROBRÁS está prevendo, para a próxima década, um crescimento médio do consumo de energia elétrica de 5,6 % ao ano. A evolução da capacidade instalada, em contrapartida, não assegura um suprimento adequado aos sistemas elétricos do país, já na segunda metade da presente década [1, 2, 11].

O crescente afastamento dos possíveis aproveitamentos hídricos dos grandes centros de consumo, a previsão do esgotamento deste potencial e o aparecimento de questionamentos ambientais, têm levado algumas concessionárias estaduais a programarem a utilização de usinas termo-elétricas como complementação de seus sistemas de geração. A construção de usinas núcleo-elétricas de médio porte, desde que economicamente competitivas, insere-se perfeitamente neste contexto, principalmente quando se leva em conta as extensas reservas de urânio e a capacitação nuclear já adquirida pelo país. As centrais nucleares de pequeno porte, utilizando reatores projetados dentro de critérios de segurança passiva, operando como complementação térmica do parque gerador hidráulico, podem desempenhar um papel importante no sistema elétrico nacional.

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, equivalente a 21 unidades de 1.245 MWe (potência nominal de Angra-2) durante uma vida útil de 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 (31 unidades semelhantes a Angra-2), levando o potencial de geração nuclear com tecnologia PWR para 65.000 MWe somente com as reservas recuperáveis.

Atualmente, existe um grande interesse das companhias elétricas americanas, européias e japonesas pela construção de pequenos e médios reatores nucleares. Esse interesse pode ser atribuído a uma melhor adequação às incertezas nas projeções de necessidade de energia, que representa menores riscos de investimentos financeiros, redução de custos e menor tempo de construção [3, 4]. A Tabela 1 lista sete projetos em desenvolvimento por várias empresas de energia no mundo [5]. A característica principal desses reatores é a implantação de sistemas passivos de segurança.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), por intermédio do Departamento de Reatores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em estreita cooperação com a Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP) do Ministério da Marinha, vem desenvolvendo um programa de instalações nucleares de pequeno e médio porte com segurança passiva. Este projeto vem sendo denominado RENAP-MP (REator Nacional de Água Pressurizada de Média Potência) e apoia-se na tecnologia já disponível também no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) de Belo Horizonte e no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) do Rio de Janeiro.

Tabela 1 - Projetos de pequenos e médios reatores [5]

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

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 termo-elétrica. 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. Nesses casos, o fator de capacidade é, em geral, baixo e a potência economicamente recomendável para a unidade é menor do que as normalmente consideradas para operação na base do sistema.

Baseado nas previsões da ELETROBRÁS, o cenário para as usinas térmicas será de complementação térmica durante boa parte do próximo século, mesmo nas condições mais restritivas para a implantação da geração hidráulica disponível. O RENAP-MP identifica esta condição especial apresentada pelo país face ao uso da núcleo-eletricidade e considera uma central nuclear para operação em complementação térmica, a um custo competitivo. Vale lembrar que a tecnologia do RENAP-MP é uma evolução direta do RENAP-11, projetado para suportar um regime operacional severo, típico de reatores para propulsão.

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 [6, 7].

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

COMPONENTES	ANGRA-1	AP600
Bombas de segurança	25	nenhum
Bombas de seg. 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 Supply System

BOP - Balance of Plant

As economias de escala em reatores de grande porte são muito 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 [8]. 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. Com uma taxa de atualização de 5 %, o custo específico (custo por kW instalado) de um pequeno reator se torna menor, algo em torno de 3 %. Com uma taxa de atualização de 8 %, valor utilizado pelo Reino Unido, o custo específico reduz em torno de 10 %.

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

RENAP-MP - REATOR NACIONAL DE ÁGUA PRESSURIZADA DE MÉDIA POTÊNCIA

Nelson Leon Meldonian

Mitsuo Yamaguchi

Nanami Kosaka

João Manoel Losada Moreira

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN/CNEN-SP

Travessa R, 400 - Cidade Universitária

05508-900, São Paulo, SP

RESUMO

Este trabalho apresenta as características de uma central nuclear de média potência, denominada RENAP-MP, resultante do desenvolvimento conjunto efetuado pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN/CNEN-SP) e a Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP) do Ministério da Marinha. Tendo - se em vista os planos de expansão do sistema elétrico brasileiro, a médio e longo prazos, o estudo realizado teve por objetivo determinar as condições necessárias para garantir - se a competitividade técnico-econômica do RENAP-MP frente a outras formas de geração, destacando - se : o custo médio da energia (US\$ 59 / MWh); o uso de componentes passivos inerentemente seguros; o menor período de construção (5 anos) e a conseqüente redução na escalada dos custos financeiros; e as vantagens sócio - ambientais, evitando - se o alagamento de grandes áreas, o efeito estufa e a chuva ácida.

INTRODUÇÃO

A ELETROBRÁS está prevendo, para a próxima década, um crescimento médio do consumo de energia elétrica de 5,6 % ao ano. A evolução da capacidade instalada, em contrapartida, não assegura um suprimento adequado aos sistemas elétricos do país, já na segunda metade da presente década [1, 2, 11].

O crescente afastamento dos possíveis aproveitamentos hídricos dos grandes centros de consumo, a previsão do esgotamento deste potencial e o aparecimento de questionamentos ambientais, têm levado algumas concessionárias estaduais a programarem a utilização de usinas termo-elétricas como complementação de seus sistemas de geração. A construção de usinas núcleo-elétricas de médio porte, desde que economicamente competitivas, insere-se perfeitamente neste contexto, principalmente quando se leva em conta as extensas reservas de urânio e a capacitação nuclear já adquirida pelo país. As centrais nucleares de pequeno porte, utilizando reatores projetados dentro de critérios de segurança passiva, operando como complementação térmica do parque gerador hidráulico, podem desempenhar um papel importante no sistema elétrico nacional.

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, equivalente a 21 unidades de 1.245 MWe (potência nominal de Angra-2) durante uma vida útil de 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 (31 unidades semelhantes a Angra-2), levando o potencial de geração nuclear com tecnologia PWR para 65.000 MWe somente com as reservas recuperáveis.

Atualmente, existe um grande interesse das companhias elétricas americanas, européias e japonesas pela construção de pequenos e médios reatores nucleares. Esse interesse pode ser atribuído a uma melhor adequação às incertezas nas projeções de necessidade de energia, que representa menores riscos de investimentos financeiros, redução de custos e menor tempo de construção [3, 4]. A Tabela 1 lista sete projetos em desenvolvimento por várias empresas de energia no mundo [5]. A característica principal desses reatores é a implantação de sistemas passivos de segurança.

A Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), por intermédio do Departamento de Reatores do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), em estreita cooperação com a Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP) do Ministério da Marinha, vem desenvolvendo um programa de instalações nucleares de pequeno e médio porte com segurança passiva. Este projeto vem sendo denominado RENAP-MP (Reator Nacional de Água Pressurizada de Média Potência) e apoia-se na tecnologia já disponível também no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear (CDTN) de Belo Horizonte e no Instituto de Engenharia Nuclear (IEN) do Rio de Janeiro.

Tabela 1 - Projetos de pequenos e médios reatores [5]

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

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 termo-elétrica. 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. Nesses casos, o fator de capacidade é, em geral, baixo e a potência economicamente recomendável para a unidade é menor do que as normalmente consideradas para operação na base do sistema.

Baseado nas previsões da ELETROBRÁS, o cenário para as usinas térmicas será de complementação térmica durante boa parte do próximo século, mesmo nas condições mais restritivas para a implantação da geração hidráulica disponível. O RENAP-MP identifica esta condição especial apresentada pelo país face ao uso da núcleo-eletricidade e considera uma central nuclear para operação em complementação térmica, a um custo competitivo. Vale lembrar que a tecnologia do RENAP-MP é uma evolução direta do RENAP-11, projetado para suportar um regime operacional severo, típico de reatores para propulsão.

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 [6, 7].

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

COMPONENTES	ANGRA-1	AP600
Bombas de segurança	25	nenhum
Bombas de seg. 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

As economias de escala em reatores de grande porte são muito 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 [8]. 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. Com uma taxa de atualização de 5 %, o custo específico (custo por kW instalado) de um pequeno reator se torna menor, algo em torno de 3 %. Com uma taxa de atualização de 8 %, valor utilizado pelo Reino Unido, o custo específico reduz em torno de 10 %.

Os ganhos de escala em projetos tão diversos como uma planta de 300 MWe com conceitos de segurança passiva e uma outra 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 projeto em estudo contempla um PWR de médio porte, com potência de 300 MWe, baseado no reator RENAP-11 em construção no Centro Experimental 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:

- sistema auxiliar de alimentação;
- sistema de remoção de calor residual convencional;
- sistema essencial de água de serviço; e
- 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.

Considerando - se sua operação em regime de complementação térmica, o RENAP-MP tem o circuito secundário com dois grupos turbo-geradores independentes, cada um com capacidade de gerar 150 MWe, de forma a operar com grande flexibilidade e eficiência térmica em carga parcial. 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 ao redor de 59 US\$/MWh, compreendendo este valor, além dos investimentos diretos, os juros durante a construção (JDC), os custos de operação e manutenção e o custo nivelado do combustível [9]. 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.

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 Mecânicos	75
.Sistemas de Tubulações	100
.Instrumentação e Controle	20
.Sistemas Elétricos	50
Construção e Montagem	220
Treinamento	40
Prep. dos Procedimentos	5
Comissionamento e Testes	15
TOTAL (primeira unidade)	790
TOTAL (unidades subseqüentes)	635

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 [9]. 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:

- U_3O_8 : 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 [10] para 3 valores de potência. Nas Tabelas 4 e 5 estão apresentadas as principais características e os custos unitários do combustível considerado.

Tabela 4 - Dados do combustível do RENAP-MP

.Raio da pastilha	0,4245 cm
.Pitch	1,29 cm
.Arranjo do EC	17x17 varetas
.Densidade efetiva do UO ₂	10,1 g/cm ³
.Número de varetas de UO ₂ por EC	264
.Duração do ciclo de recarga	18 meses
.Fator de disponibilidade	90 %
.Queima média por ciclo	12 MWd/kgU
.Queima média de descarga	36 MWd/kgU
.Vida útil da usina	50 anos

Tabela 5 Necessidade e custo de combustível para o RENAP-MP de várias potências

Potência (MWe)	$m_{T/EC}$ (kg)	m_T (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

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 e que implicam em desembolso da ordem de 12 % do investimento total. O cronograma de desembolso anual é 3 %, 13 %, 35 %, 35 % e 14 %. Para fins de JDC, considerou-se uma taxa de 10 % ao ano.

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 [9].

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 hidraulicidade do sistema gerador, sensivelmente menores que o fator de disponibilidade.

CONCLUSÃO

Uma das diretrizes principais dos estudos utilizados como base para o planejamento da expansão da geração, contidas no Plano 2010, ressalta a necessidade de se "desenvolver um programa mínimo de usinas nucleares, de modo a assegurar a capacitação industrial e a viabilidade de uma transição para maior utilização da energia nuclear, quando do aproveitamento total do potencial hidro-elétrico competitivo" [11].

O crescimento mais lento dos requisitos do mercado de energia elétrica, para os horizontes de curto e médio prazo, não invalida a diretriz acima mencionada, mas associado às restrições financeiras para o investimento do setor elétrico nos próximos anos, resultou na postergação da entrada em operação de muitas hidro-elétricas, bem como em modificações temporais no programa termo-elétrico mínimo (carvão, nuclear). Com isto, o risco anual de déficit de energia (> 5 %), para o sistema interligado Sul/Sudeste/Centro-Oeste, após 1995, é bastante acentuado.

Considerando-se que uma usina nuclear, em um sistema de características predominantemente hidrelétricas, tem a finalidade de operar em regime de complementação térmica, julgamos que o RENAP-MP poderá atender esta função, respeitadas as condições de competitividade técnico-econômica frente a outras formas de geração, quando da sua consecução.

O valor projetado de 59 US\$/MWh, associado a aspectos relevantes, tais como a operação por longos períodos de tempo, sem paradas para recarga e manutenção, menor período de construção e conseqüente redução na escalada dos custos financeiros, o uso de componentes de segurança passiva e vantagens sócio-ambientais perante às termo-elétricas convencionais (efeito estufa, chuva ácida), faz com que o RENAP - MP se apresente como opção atrativa a partir do ano 2015. Esta constatação se torna mais evidente quando se nota que o custo da energia elétrica fornecida pelas usinas hidrelétricas tem tendência de alta em função da agregação dos custos ambientais, bem como das longas distâncias até os centros de carga.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Eng. Gilberto Gomes de Andrade (IPEN/COPESP) e ao Eng. Jorge Trinkenreich (ELETROBRÁS) pelo apoio técnico.

REFERÊNCIAS

- [1] ELETROBRÁS: Relatório Anual, 1991.
- [2] ELETROBRÁS: Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010 - Plano 2010 - Relatório Geral, 1997.
- [3] 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.
- [4] BOARD, J. A., Economic targets for small PWR reactor design, Nuclear Energy, 75-78, Vol. 30, No. 2, April 1991.
- [5] CHEVALIER, A. B. H., Passive safety features - a considered view of UK safety arguments, Nuclear Energy, 79-83, Vol. 30, No. 2, April 1991.
- [6] 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.
- [7] HALL, A. e SHERBINE, C. A., PWRs with passive systems, Nuclear Energy, 95-103, Vol. 30, No. 2, April 1991.
- [8] HAYNS, M. R. e SHEPHERD, J., SIR - reducing size can reduce cost, Nuclear Energy, 85-93, Vol. 30, No. 2, April 1991.
- [9] ARRIETA, L. A., Diretrizes e requisitos gerais de projeto para a PWR nacional de pequeno porte, CNEN/IEEN-RJ, Maio-1992.

[10] 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.

[11] ELETROBRÁS, Plano Decenal de Expansão 1993 - 2002, Setembro 1992.

ABSTRACT

In this work is presented the main characteristics of a medium nuclear power plant, named RENAP - MP, which has been developed by the "Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN / CNEN - SP) and "Coordenadoria para Projetos Especiais (COPESP) from de Brazilian Navy. The study aims at determining the necessary conditions for such a plant compete, in Brazil, technically and economically with other means of thermal power generation, such as coal, gas and oil. Results show that the energy average cost should be around 59 dollars / MWh; the construction time should be less than 5 years in order to reduce financial costs; and the design should emphasize the use of inherently safe technology, in order to reduce substantially the risks of nuclear accidents. It should be pointed out that the nuclear power technology has some environmental and social advantages when compared to hydro and other thermal power technologies, since it does not require flooding of large areas, reduces green house and acid rain effects, and can be located near consumption areas.