

ECONOMIA DE ESCALA PARA USINAS NUCLEARES OPERANDO EM SISTEMAS HIDROELÉTRICOS - ESTUDO DO CASO BRASILEIRO.

Gilberto Andrade

Grupo de Energia e Ambiente - IPEN/R
Travessa R, 400 - Cidade Universitária
05508-900 São Paulo - SP
email: gandrade@net.ipen.br

RESUMO

A economia de escala de usinas nucleares tem sido usada como fator para aumentar a competitividade da geração nucleoeletrica nos países que usam intensamente a termoeletricidade. No caso brasileiro, onde a geração de eletricidade é majoritariamente hidroeletrica, as condições de operação das usinas nucleoeletricas são diferentes e a economia de escala deve ser pesada em relação ao tamanho do programa nuclear e ao fator de série. Este trabalho utiliza o Modelo OMNUS para mostrar os intervalos de energia firme para os quais são competitivas unidades PWR de 300 MW, 600 MW e 1200 MW.

INTRODUÇÃO

Tem sido usado no Brasil o argumento da economia de escala das grandes usinas nucleares como forma de reduzir o custo da geração nuclear e de aumentar a competitividade da nucleoeletricidade. Procura-se mostrar a seguir que devido às particularidades do parque elétrico brasileiro, majoritariamente hidráulico, esse argumento apresenta dificuldades adicionais, já que as condições operativas das unidades térmicas são muito diferentes daquelas que ocorrem quando os sistemas são majoritariamente térmicos.

Para quantificar os efeitos da economia de escala e do fator de série, ambos importantes na análise proposta, utiliza-se o Modelo OMNUS descrito a seguir, o qual foi especialmente desenvolvido por Andrade para abordar esses e outros aspectos da competitividade dos elementos do sistema energético nuclear.

Naturalmente que o mérito dos resultados obtidos com o OMNUS depende diretamente dos modelos e valores utilizados, sendo este o motivo pelo qual se apresenta a forma como são calculados alguns itens de custo, aqui chamados de custos do programa nuclear.

O MODELO OMNUS

O Modelo OMNUS encontra-se detalhadamente descrito em [1]. As linhas gerais dos possíveis acoplamentos entre reatores e ciclos do combustível

nuclear, os quais são considerados no OMNUS, estão apresentados na Figura 1. Estão indicadas as possibilidades abertas pelo sistema energético nuclear, tanto quanto aos reatores como quanto aos ciclos, juntamente com os insumos e produtos considerados. Linhas tracejadas indicam algumas facetas da Análise do Ciclo de Vida que não são cobertas atualmente pelo Modelo, mas que se constituem em áreas de interesse para desenvolvimento futuro.

Assim, o OMNUS foi desenvolvido e incorpora atualmente modelos que permitem considerar os investimentos, os custos dos materiais e dos serviços, o aumento da radioatividade proveniente do combustível irradiado e o uso das reservas de urânio, para cada aplicação considerada isoladamente ou em conjunto, na forma de cogeração. São consideradas como aplicações possíveis a produção de eletricidade, de calor de processo, de água doce ou a propulsão.

A Figura 2. apresenta as interconexões entre os grandes blocos de cálculo, indicando a direção do fluxo de dados entre esses blocos.

Para o objetivo desse estudo serão detalhados a seguir os itens do OMNUS que se relacionam a um Programa Nuclear

CUSTOS DO PROGRAMA NUCLEAR.

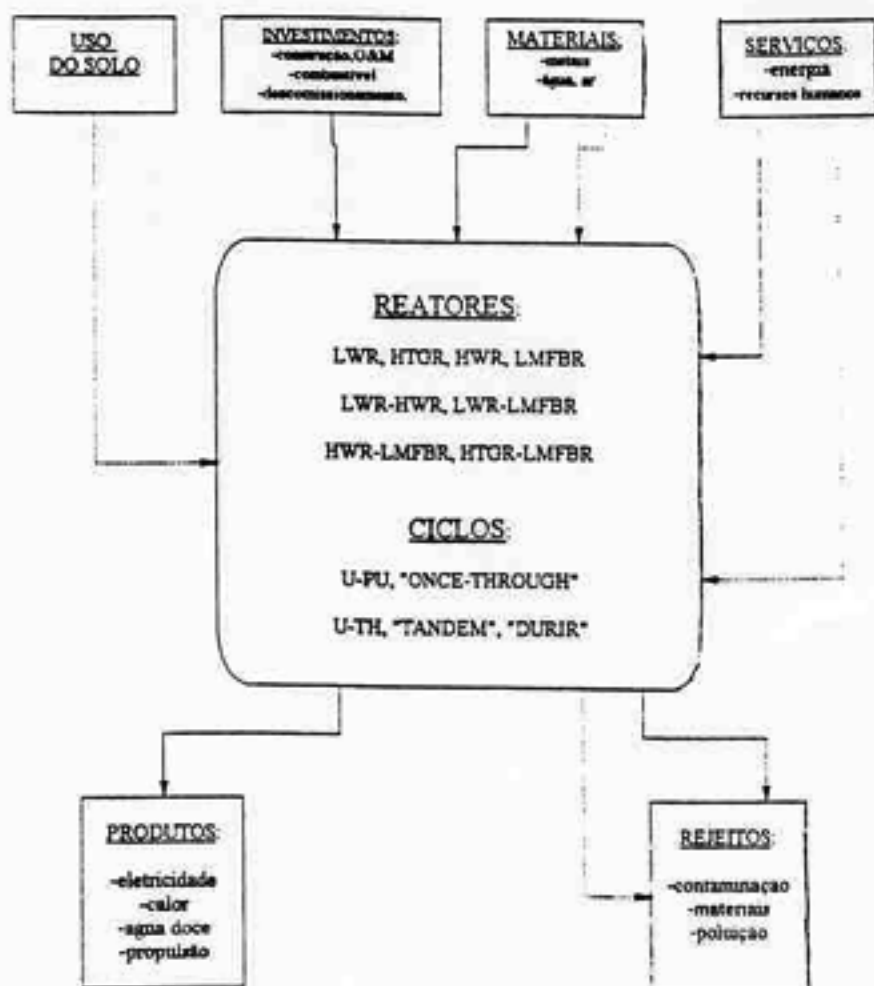
Itens que não dizem respeito a um empreendimento específico mas podem onerar

diferentemente as diversas vertentes do sistema energético nuclear, dependendo das condições objetivas nas quais esse sistema energético será efetivado, são aqui chamados de custos associados ao programa nuclear. Caracterizam atividades que normalmente transcendem à área de atuação da empresa geradora de energia, caindo na esfera do Governo.

São abordados os aspectos de padronização, economia de escala, nacionalização e de fiscalização e licenciamento, incorporando-se no OMNUS fórmulas que permitem a quantificação dos efeitos desses itens no custo nivelado do produto principal.

Quanto à padronização, é sabido que plantas isoladas, feitas de acordo com os requisitos específicos do cliente, são mais caras do que plantas padronizadas, feitas em série. Na padronização é possível ratear por um número maior de clientes os custos fixos envolvidos com o projeto e o desenvolvimento de equipamentos, cabendo a cada cliente uma parcela menor do custo global. Por outro lado, o aprendizado tecnológico e o treinamento de pessoal são diretamente transferíveis em plantas padronizadas, bem como as atividades de licenciamento e muitos outros custos indiretos, os quais são só parcialmente transferíveis em plantas não padronizadas.

FIGURA 1 - MODELO OMNUS (CICLO DE VIDA)

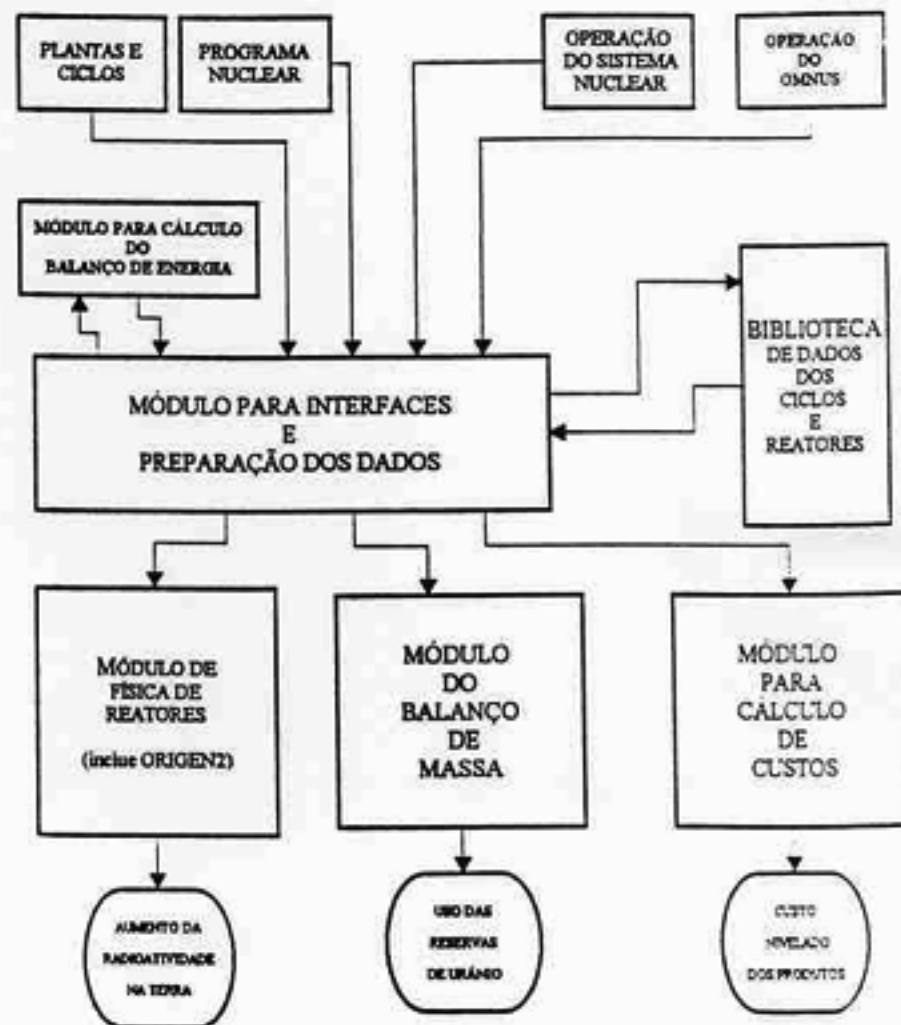


Estudos franceses, relatados pela AIEA[2], indicam que a redução do custo de investimento pode ser

expressiva quando a padronização atinge séries de até 10 unidades, não havendo ganhos adicionais a partir daí. O maior ganho é obtido até a quarta unidade da série.

Para o OMNUS, a economia trazida pela padronização será avaliada a partir da definição de um Programa Nuclear, no qual a potência total envolvida no programa é estabelecida, por exemplo, pelo número de unidades de determinada potência, implantadas em série, havendo uma redução do custo de investimento para todas as unidades englobadas no Programa.

FIGURA 2 - MÓDULOS E INTERFACES DO OMNUS



O fator de redução utilizado no OMNUS é o proposto pela experiência francesa em produção seriada, conforme estudo da AIEA já mencionado, tendo-se considerado o menor valor de ganho para cada intervalo da série, de forma a compor a tabela dada a seguir, onde "n" é o número de unidades na série e f(n) é o fator de redução do custo de investimento para todas as unidades:

n	1	2	3	4	5	6a9	>=10
f(n)	1.0	0.86	0.72	0.68	0.65	0.64	0.63

Outro aspecto ligado ao Programa Nuclear diz respeito ao porte das unidades padronizadas, havendo uma tendência de redução do custo de investimento para unidades de maior potência, desde que operando com o mesmo fator de capacidade. Este aspecto é importante para

os estudos da competitividade do sistema energético nuclear face às usinas térmicas e hidráulicas, sendo também incorporado ao OMNUS.

A correlação indicada pela AIEA e por outros autores, por exemplo Hellman et al[3], para descrever a economia de escala é dada por:

$$I_{S1} = I_{S2} * \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{(x-1)}$$

onde I é o custo de investimento, P é a potência e o fator de escala "x" oscila entre 0 e 1, tendendo para 1 quando a economia de escala é menor.

É indicado pela AIEA que "x" normalmente situa-se entre 0.4 e 0.9, dependendo do tipo do empreendimento. Para plantas nucleares é corrente considerar que a economia de escala é um item importante, fazendo com que "x" aproxime-se de seu valor inferior.

Para o encaminhamento desse estudo, diversos valores de custo de investimento para potências específicas foram buscados e correlacionados, chegando-se à conclusão que os custos de investimento das instalações nucleares não são necessariamente tão dependentes da escala da planta. Talvez, custos mais recentes reflitam a existência de plantas padronizadas pelo fornecimento a clientes diversos, as quais já trazem uma otimização implícita no projeto, mesmo que vendidas isoladamente e com potências aparentemente não padronizadas.

Outra aspecto a ser mencionado quanto à escala vale para os LWR do tipo PWR, planta que ocupa o maior mercado nuclear. Essas são plantas que guardam uma escala fixada no próprio sistema de geração de vapor, o qual é composto por módulos de 300 MWe, fazendo com que plantas de 600 MWe ou de 900 MWe utilizem os mesmos equipamentos das plantas maiores, de 1200 MWe. Naturalmente que para outros itens, como o vaso do reator, sistemas auxiliares, etc, existe possibilidade de se obter economia de escala.

O ponto que se quer fazer é que o estudo efetuado indica a existência da economia de escala para plantas nucleares, mas com valores mais próximos dos das plantas térmicas convencionais, o que indica uma menor influência da economia de escala.

Para se estabelecer o intervalo aceitável de "x" serão considerados os valores indicados pela AIEA quando de estudo recente sobre a produção de água doce usando reatores nucleares. Nesse documento a AIEA informa os custos de investimento para diversas unidades e conclui que os valores aceitáveis para as plantas nucleares são os seguintes:

Potência (MWe)	50	300	600	900
Custo de Investimento (US\$/kWe)	2.750	2.420	1.870	1.650

Para os dados acima, o dólar de referência é o de 1990, não sendo aqui levado em consideração, pois o que se busca é a variação relativa entre potência e custo de investimento e não os valores absolutos para esses custos, os quais serão fornecidos nos dados de entrada do OMNUS.

Face às condições discutidas anteriormente, decidiu-se considerar duas faixas para o fator de escala "x", dependendo da extrapolação que se busca. São, então, sugeridos os valores seguintes:

$$0.60 \leq x \leq 0.80$$

com "x" definido por:

$$x \rightarrow 0.60 \quad \text{para} \quad 0.1 \leq \frac{P_1}{P_2} \leq 10$$

$$x \rightarrow 0.80 \quad \text{para} \quad \frac{P_1}{P_2} < 0.1 \text{ ou } \frac{P_1}{P_2} > 10$$

os quais são colocados na biblioteca de dados do OMNUS. A formulação desenvolvida acima não deve ser aplicada para plantas com potência fora do intervalo que se situa entre 50 MWe e 1200 MWe.

Para incluir outros custos nacionais, são em seguida considerados os investimentos relativos à nacionalização e às atividades de licenciamento.

Para a nacionalização de um Programa Nuclear, diversos investimentos em pesquisa e desenvolvimento são necessários, inclusive levando muitas vezes a que sejam aceitos equipamentos com preços maiores, como forma de compensar os investimentos iniciais das empresas envolvidas no esforço de nacionalização.

Este item é tratado no OMNUS pela inclusão de um investimento único estabelecido em uma data anterior à entrada em operação comercial da planta que passou pelo processo de nacionalização. Prevê-se o rateio do custo desse investimento de nacionalização por todas as unidades do Programa.

Da mesma forma são considerados outros custos fixos associados ao Programa Nuclear, especialmente os relativos ao depósito final para rejeitos de alta atividade e os inerentes à preparação de uma infra-estrutura nacional capaz de responder às necessidades de uma instalação nuclear. Ambos são custos fixos, considerados como investimento únicos incorridos em datas específicas e rateados por todas as unidades do Programa.

Os itens acima, que implicam em custos fixos na forma de investimentos em datas específicas, são incluídos na formulação do custo nivelado. É também considerada a existência de uma parcela de custo variável, inerente ao Programa e coberta pelo Governo, responsável pelas atividades de licenciamento e segurança.

A equação que descreve o custo do Programa Nuclear, indicado por PG na metodologia do custo nivelado, é dada por:

$$PG = \frac{1}{n_{serie}} * [I_{lic} * (1+r)^{ngf} + I_{PD} * (1+r)^{ngd}] +$$

$$+ I_{DF} * (1+r)^{-(N+ngsp)} \frac{P}{P_{prog}} + (lic)_a * \left[\frac{1-(1+r)^{-N}}{r} \right]$$

onde aparecem os investimentos I em P&D, licenciamento e depósito final, o número de unidades e a potência total do programa, bem como a vida útil das plantas, N, e a taxa de desconto r.

Para todos os itens de custo, tanto os fixos como os variáveis, associados ao Programa Nuclear, devem ser indicados os desembolsos e os tempos dos dispêndios, conforme utilizado na formulação matemática.

HIDROELETRICIDADE E TÉRMICAS

As usinas nucleares foram desenvolvidas em países que utilizam intensamente a termoeletricidade, tendo sido a competitividade da nucleoeletricidade discutida amplamente face às usinas térmicas a óleo e a carvão.

Mais recentemente, muito se discutiu também da competição entre as nucleares e usinas de ciclo combinado usando gás natural e carvão. Nesses sistemas térmicos não existe a energia secundária, a qual é típica de sistemas hidroelétricos.

As incertezas hidrológicas associadas à geração hidráulica fazem com que as hidroelétricas tenham como garantir a longo prazo somente a energia firme, ou seja, aquela que pode ser suprida mesmo nas condições mínimas de vazão, traduzidas pelas piores séries hidrológicas históricas.

Para as usinas hidroelétricas, a energia firme depende de diversas características do projeto, tais como a existência de usinas a montante e a jusante, o tamanho do reservatório, as condições de coleta e drenagem da bacia hidráulica, etc...

A diferença entre a energia firme e a energia média que a usina pode gerar a longo prazo, é a energia secundária. Esta é uma energia que pode ser suprida, na média, durante toda a vida da usina, mas não pode ser garantida como um valor que a usina supre em todos os momentos de sua vida útil.

Quando uma usina térmica é implantada para operar em sistema majoritariamente hidráulico, especialmente considerando que as usinas térmicas apresentam fatores de disponibilidade maiores do que o percentual de energia firme oferecido pelas usinas hidráulicas, ocorre que o sistema hidro-térmico passa a contar com uma fração maior de energia firme, transformando o que seria energia secundária em energia firme. Essa é a principal vantagem trazida pelas usinas térmicas que se integram em sistemas majoritariamente hidráulicos.

Enquanto que para sistemas térmicos a introdução de novas unidades térmicas é feita para aumentar ou a energia firme ou para atender à demanda de ponta, no caso dos sistemas hidro-térmicos com prevalência hidráulica, a introdução de novas unidades térmicas é feita principalmente para aproveitar a energia secundária, sendo a ponta normalmente suprida pela energia armazenada nos reservatórios. Esta é uma diferença essencial entre operar

usinas térmicas em sistemas térmicos ou em sistemas hidráulicos.

Ao garantir a energia secundária já disponível no sistema, a introdução de usinas térmicas em sistemas predominantemente hidráulico é feita utilizando unidades que tendem a ser pouco operadas, pois o objetivo delas não é gerar energia e sim liberar a energia secundária já disponível no sistema, permitindo que seja comercializada uma fração adicional de energia firme sem que seja necessário queimar o combustível da usina térmica. Conseqüentemente, nesse caso as usinas térmicas apresentarão baixo fator de capacidade, sendo preferidas as unidades menores, mesmo que pouco econômicas no caso de operação por longos períodos, pois a probabilidade que isso ocorra é muito baixa.

O parque térmico brasileiro reflete essa realidade apresentando grande número de plantas de baixa potência, onde mais de 60% são unidades menores do que 100 MWe e somente as usinas nucleares têm unidades maiores que 500 MWe.

Andrade et al[4] abordam esse assunto, mostrando as peculiaridades que conduziram o parque térmico nacional a essa condição, fruto mais da falta de planejamento no uso da termoeletricidade e não de uma política de complementação térmica sistematicamente implementada. De qualquer forma, mesmo que otimizado, a tendência seria para manter unidades de porte menor do que as existentes em sistemas predominantemente térmicos.

Comparativamente com outras usinas térmicas, as usinas nucleares apresentam elevado custo de investimento e baixo custo de combustível, sendo sua operação competitiva somente quando empregadas com alto fator de capacidade e em unidades maiores que 300 MWe. Consideram-se hoje unidades de até 1500 MWe para sistemas térmicos de grande porte, nos quais as nucleares operam como unidades de base. Esta tem sido a forma encontrada para tornar as usinas nucleares novamente competitivas, já que o custo do carvão e do gás natural tem se mantido baixo.

Para unidades de ponta no sistemas térmicos, normalmente são selecionadas instalações de pequeno porte ou unidades no final da vida útil e pouco competitivas, utilizando combustíveis fósseis.

Para mostrar a dependência do custo de geração das nucleares para diferentes fatores de capacidade, bem como para analisar comparativamente as térmicas convencionais face às nucleares, utiliza-se o Modelo OMNUS.

Para os custos das térmicas convencionais e das nucleares foram usados os valores da Tabela 1, transformados adequadamente para permitir sua introdução no Modelo OMNUS, onde os custos de combustível e de O&M foram somados para compor a despesa anual com a operação da planta, de forma a utilizar o item de custo O&M do OMNUS.

A relação que permite processar esta transformação é dada por:

$$(O \& M)_{transf} = \left[\frac{H * (O \& M + F)}{1000} \right] * fee$$

com *fee* indicando a eficiência do ciclo térmico e onde $(O \& M)_{transf}$ é o valor a ser usado no OMNUS e *O & M* e *F* são os custos de operação e manutenção e de combustível, respectivamente, indicados para as plantas térmicas convencionais e nucleares, dados em US\$/MWh.

TABELA 1.
PARÂMETROS PARA CÁLCULO DE CUSTO DAS PLANTAS TÉRMICAS PELO MODELO OMNUS

TIPO E FAIXA DE POTÊNCIA (MWe)	CUSTO DE CONSTR. (US\$/MWh)	CUSTO O&M e COMBUST. (US\$/MWh)	$(O \& M)_{transf}$ (US\$/kWe)
DIESEL (50 a 100)	1100	4 + 30 = 34	297* <i>fee</i>
TURBINA A GÁS (100 a 200)	440	6 + 49 = 55	482* <i>fee</i>
CALDEIRA ÓLEO/GÁS (150 a 400)	660 a 550	5 + 32 = 37	324* <i>fee</i>
CALDEIRA A CARVÃO (500 - 800)	1540 a 1320	3 + 22 = 25	219* <i>fee</i>
NUCLEAR (50 a 900)	2750	15 + 10 = 25	218* <i>fee</i>
	a	a	a
	1650	9 + 6 = 15	131* <i>fee</i>

A Tabela 2 lista os custos de geração para diferentes plantas térmicas em função da energia firme gerada. A montagem dessa Tabela é feita considerando as

TABELA 2.
CUSTO DE GERAÇÃO PARA TÉRMICAS (US\$/MWh)

ENERGIA FIRME (MWe)	DIESEL	TURB. GÁS	CALD. GÁS	CALD. CARVÃO	NUCLEAR
10	122	92			
50	57	70	93		80
100		64	59	134	73
200			54	79	68
300			46	61	68
400				52	56
500				51	51
600				48	48
700	57	64	46	48	44

faixas de potência para as quais as diversas plantas são indicadas na Tabela 1 e para fatores de capacidade médios anuais que oscilam entre 20% e 80%. Cada tipo de tecnologia foi sempre considerado com o menor custo de geração, obtido conjugando o tamanho da unidade e o fator de capacidade.

A análise da Tabela 2. indica que a nuclear só se apresenta como competitiva para potências elevadas e isso sem esquecer que está se considerando a energia firme associada à uma ou mais plantas, ou seja, para a energia de 700 MWe a potência instalada situa-se em 1000 MWe, se o fator de capacidade for de 70%.

O resultado da análise é ilustrativo da complexidade de se decidir por uma determinada tecnologia para a geração térmica. Vale enfatizar que entre as plantas consideradas não estão incluídas as plantas com ciclo combinado gás-carvão, as quais apresentam hoje sensível vantagem devido ao melhor rendimento nos ciclos térmicos. Para o intuito dessa análise, porém, a exclusão não é prejudicial pois nosso enfoque é a competitividade entre térmicas e hidráulicas e entre nucleares e térmicas convencionais, de forma geral, e não entre plantas específicas.

Ainda para ilustrar o encaminhamento do estudo, é útil conhecer a forte dependência que o custo de geração das usinas nucleares apresenta com o fator de capacidade no qual a unidade é operada. Naturalmente que agora o caso é o de uma planta já instalada, para a qual estão ocorrendo ao longo da vida diferentes fatores de capacidade. A Figura 3. mostra esta dependência para as plantas de 50 e 900 MWe e indica claramente que não é razoável implantar uma unidade nuclear de grande porte a não ser para usá-la com alto fator de capacidade.

As indicações acima mostram a inadequação com que hoje se utiliza a geração nucleoeletrica no Brasil, o que fica patente quando se lembra que o fator de capacidade durante toda a vida da Usina Angra 1 não ultrapassa 30%, embora sua disponibilidade seja bem maior, mesmo considerando todos os problemas que enfrentou durante sua implantação.

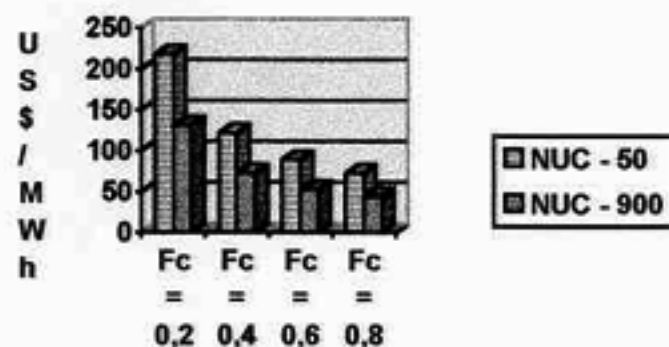


Figura 3 - CUSTO DE GERAÇÃO NUCLEAR E FATOR DE CAPACIDADE (OMNUS)

Outro ponto a ser destacado e que confirma os dados acima reside no planejamento a longo prazo da Eletrobrás, onde as nucleares são consideradas como

contribuindo com 50% de energia firme. Energia firme, no caso das térmicas, confunde-se com sua disponibilidade, indicando que o fator de capacidade esperado é menor que 50%, como efetivamente ocorre com Angra 1. Enfim, essas são as circunstâncias e a realidade do sistema elétrico brasileiro.

ECONOMIA DE ESCALA

Muito tem-se falado na economia de escala das unidades de 1200 MW, embora pouco se comente sobre o fato dessa economia de escala ter como pressuposto um fator de capacidade maior que 70% e não levar em conta o fator de série. Para enfatizar esse aspecto a Tabela 3 apresenta o custo de geração para diferentes unidades, variando a potência instalada e o número de unidades, ou seja, o tamanho do Programa Nuclear. A consideração do tamanho do Programa é importante devido à economia que resulta do fator de série. Consideram-se fatores de capacidade de 30%, 50% e 70% para a vida da planta, e taxas de retorno de 6% e 12%.

CONCLUSÃO

A decisão sobre o porte mais adequado das unidades nucleares depende do tamanho do Programa Nuclear, não havendo uma economia de escala válida universalmente.

Para um Programa Nuclear de 1200 MW, existe a conveniência de se instalar unidades de 300 MW, já que não existe um ônus maior devido ao diferencial de custo de geração. Como vantagem adicional de se usar quatro unidades de 300 MW tem-se a padronização da produção da indústria local em séries maiores. Esse foi o motivo que levou a China, por exemplo, a optar por esse porte de instalação para o início de seu programa autônomo, prevendo série futura de unidades PWR de maior porte.

Para 2400 MW aparecem como mais vantajosas unidades de 600 MW, as quais não perdem muito em custo de geração, mesmo no caso do programa de 4800 MW. Adicionalmente, a modularidade das plantas PWR faz com que uma instalação de 1200 MW seja composta dos mesmos equipamentos, com exceção do reator, já que a planta é montada em módulos de 300 MW para cada circuito primário.

De forma geral, unidades de 600 MW parecem ser mais adequadas mesmo no caso de programas de grande porte operando com fatores de capacidade intermediários, como no caso brasileiro.

REFERÊNCIAS

- [1] Andrade G.G., "A Energia Nuclear no Contexto Energético Brasileiro - Reatores e Ciclo", COPPE/UFRJ, 1996. (a ser publicado).
- [2] AIEA, "Technical and Economic Evaluation of Potable Water Production Through Desalination of Seawater", TECDOC 666, Setembro, 1992.
- [3] Hellman R. and Hellman C. J. C.; "The Competitive Economics of Nuclear and Coal Power", Lexington Books, Mass., USA, 1983.
- [4] Andrade G.G., Meldonian N.L., Mattos L.A.T., "Termoeletricidade no Brasil - Perspectivas Futuras", IPEN/R, Junho/1996.

ABSTRACT

Economy of scale is considered to enhance competitiveness of nuclear energy for electricity generation but only when high capacity factors are considered. This study shows that for the Brazilian electricity generation system low capacity factors are expected and economy of scale has to be considered against the size of the Nuclear Program. Units of 600 MW are competitive both for small and large Programs.

TABELA 3.

CUSTO DE GERAÇÃO PARA PLANTAS PWR DE 300, 600 E 1200 MW PARA PROGRAMAS NUCLEARES DE 600 A 4800 MW. (US\$/MWh)

	r=12%			r=6%		
	fc=30%	fc=50%	fc=70%	fc=30%	fc=50%	fc=70%
PROG. 600 MW						
1 X 600	111,40	69,80	51,97	73,42	46,11	34,41
2 X 300	120,61	75,33	55,92	78,92	49,41	36,77
PROG. 1200 MW						
1 X 1200	98,58	62,11	46,48	65,76	41,52	31,13
2 X 600	98,97	62,34	46,65	65,99	41,66	31,23
4 X 300	100,10	63,02	47,13	66,67	42,06	31,52
PROG. 2400 MW						
2 X 1200	87,95	55,73	41,92	59,40	37,70	28,40
4 X 600	82,99	52,76	39,80	56,44	35,93	27,14
8 X 300	95,54	60,29	45,18	63,94	40,43	30,35
PROG. 4800 MW						
4 X 1200	74,27	47,32	36,06	51,24	32,80	24,90
8 X 600	79,44	50,63	38,28	54,32	34,65	26,23
16 X 300	94,40	59,60	44,69	63,26	40,02	30,06

A análise da Tabela 3 deixa claro que o menor custo de geração das unidades de 1200 MW só aparece efetivamente quando são consideradas séries de quatro unidades. Esse é um fato interessante pois o Programa Nuclear da Nuclebrás propunha exatamente implantar quatro unidades iniciais, duas em Angra e duas em Peruíbe.