

PAINEL

## Novos rumos da energia nuclear no Brasil

**FIESP**

16 de agosto de 2011

Joaquim Francisco de Carvalho

IEE/USP

[joacarvalho@usp.br](mailto:joacarvalho@usp.br)

[jfdc35@uol.com.br](mailto:jfdc35@uol.com.br)

A energia nuclear e as radiações nucleares são indispensáveis à vida moderna.

Podemos citar, por exemplo:

- As aplicações biomédicas, em diagnósticos e diversas terapias.
- Na indústria, os radioisótopos são muito usados em métodos de detecção de falhas, controle de qualidade e controle de produção, particularmente nas indústrias metalúrgicas e de construção mecânica.
- Na agricultura e na pecuária empregam-se traçadores radioativos, como o fósforo-32, para estudar a absorção de fertilizantes e o metabolismo das plantas.
- Utilizam-se radioisótopos em processos de esterilização, seja na indústria de alimentos, seja em hospitais e clínicas em geral.
- Reações de fissão nuclear constituem fonte de calor para diversas aplicações, tais como sistemas de propulsão naval e centrais nucleares para geração elétrica.

Aborda-se a seguir a questão das centrais eletronucleares, comparativamente a outras alternativas disponíveis no Brasil.

Para a geração de grandes blocos de eletricidade, as alternativas convencionais são as usinas hidrelétricas, os parques eólicos, as termelétricas a combustíveis fósseis e as **termelétricas nucleares**. Outras tecnologias surgirão, mas, no presente, estas são as efetivamente viáveis.

- A escolha da alternativa ótima deve se basear num arranjo que conduza a mínimos custos de geração da eletricidade, máxima eficiência na utilização da fonte primária disponível e mínimos impactos ambientais provocados pela operação da usina geradora e, se for o caso, pela deposição final dos rejeitos por ela produzidos.
- A seguir estão listadas as **principais** fontes primárias para a geração de energia elétrica (renováveis e não renováveis) disponíveis no Brasil, a saber, o potencial hidrelétrico, o potencial eólico, o petróleo, o gás natural, o carvão mineral e o óxido de urânio.
- Por fim é abordada a questão dos impactos ambientais e são comparados os custos de geração das usinas nucleares e das hidrelétricas, e é avaliada a capacidade de suprimento em níveis que assegurem alta qualidade de vida à população.
- Como referência, admiti que o sistema elétrico brasileiro deverá atingir uma capacidade de geração suficiente para assegurar um suprimento equivalente ao de países de alta qualidade de vida.

### Consumo de eletricidade *per capita* na Europa, em 2.007

<b>PAÍS</b>	<b>CONSUMO</b> ( <i>kWh/hab×ano</i> )
Espanha	5.835
Itália	5.400
Alemanha	6.663
Reino Unido	5.774
Portugal	4.585

**Fonte:** Energy Statistics, 2007

### Revisão da Projeção da População brasileira

<b>ANO</b>	<b>POPULAÇÃO</b> (milhões de habitantes)
2.010	193,2
2.020	209,9
2.030	215,8
2.040	219,2
2.050	215,3

**Fonte:** IBGE, 2.008

Tomando-se por base a população máxima projetada pelo IBGE, vê-se que para alcançar níveis comparáveis à média dos países acima (~5.600 kWh/hab×ano), o sistema elétrico brasileiro deverá gerar cerca de 1,2 milhões de GWh por ano

<b>Potencial hidrelétrico e seu aproveitamento</b>	<b>GW</b>	<b>%</b>
Usinas em operação (potencial em aproveitamento)	79,3	29,6
Potencial a ser aproveitado	171,0	63,8
<b>Sub total</b>	<b>250,3</b>	<b>93,4</b>
Potencial de Pequenas Centrais Hidrelétricas	17,5	6,6
<b>Total</b>	<b>267,8</b>	<b>100,0</b>

Fonte: EPE, 2.010

### Distribuição geográfica do potencial a aproveitar

Região	Norte	Nordeste	Centro-Oeste	Sudeste	Sul
%	65	3	3	8	21

Fonte: EPE, 2010

Considerando que a Região Norte detem 65% do potencial a aproveitar (172,6 GW) e admitindo-se que, por motivos de caráter social e ambiental, os planos de expansão sejam reformulados, para se limitarem a apenas 80% desse potencial, ainda assim (incluindo-se as pequenas centrais hidrelétricas), o Brasil poderá adicionar uma capacidade hidrelétrica de 137,6 GW aos 71,2 GW já instalados, perfazendo uma capacidade hidrelétrica total de 226,5 GW. Com um fator de capacidade de 0,5 este parque hidrelétrico poderá gerar cerca de **993.000 GWh** por ano.

Note-se que, neste caso, a área ocupada pelos reservatórios hidrelétricos amazônicos (incluindo a área já ocupada pelos rios, nas estações chuvosas) seria de aproximadamente 27.000 km<sup>2</sup>, ou seja, apenas 0,5% da área da região – uma alteração perfeitamente assimilável pela natureza.

### Área inundada/Potência instalada

USINA	Área inundada (km <sup>2</sup> )*	Potência (MW)	A/P (km <sup>2</sup> /MW)
Itaipú	1.400	14.000	0,10
Jupiá	330	1.411	0,24
Ilha Solteira	1.239	3.230	0,39
Campos Novos	27	880	0,03
Chapecó	90	885	0,10
Jirau	258	3.450	0,08
Santo Antônio	271	3.150	0,09

\* Inclui a área que já era ocupada pelo rio, no sítio do reservatório

Fonte: Eletrobrás

**Hipótese conservadora:** na Amazônia os reservatórios inundariam cerca de 0,3 km<sup>2</sup>/MW.

## Potencial eólico, para ventos com velocidade média acima de 7 m/s

REGIÃO	Área cumulativa km <sup>2</sup>	Potência instalável GW
Norte	6.420	12,84
Nordeste	37.526	75,05
Centro-Oeste	1.541	3,08
Sudeste	14.869	29,74
Sul	11.379	22,76
BRASIL	71.735	143,47*

Fonte: CEPEL/Eletróbrás, 2.001

### \* Observações

1. Foram considerados parques eólicos com densidade máxima de 2 MW/km<sup>2</sup>, que é conservadora.
2. Não foram consideradas áreas ocupadas por florestas, lagos e rios, nem áreas sobre o mar.
3. Admitiram-se curvas médias de desempenho de turbinas eólicas já encontradas no mercado, instaladas em torres de 50 m de altura.
4. Supondo-se que o fator de capacidade dos parques eólicos brasileiros será de 30%, o que é uma hipótese conservadora, o aproveitamento do potencial medido pelo CEPEL, resultará na produção de **377.000** GWh por ano

- O sistema hidrelétrico brasileiro opera presentemente com um fator de capacidade de 0,5. Este fator poderá ser melhorado com a entrada das usinas eólicas, se estas forem integradas às hidrelétricas, na forma de um sistema hidro-eólico, no qual os despachos de carga permitam que parte da energia gerada nos parques eólicos seja “armazenada” – isto é, acumulada na forma de água nos reservatórios hidrelétricos – de modo semelhante às malhas termo-eólicas de alguns países europeus, onde a energia eólica permite que se economize gás natural ou óleo combustível (Ummels, 2.008).
- Este sistema hidro-eólico poderá operar em sinergia com usinas termelétricas a biomassa (biotermelétricas), pois a frota automotiva brasileira é em grande parte alimentada com etanol, forçando a produção do bagaço de cana (sub-produto do etanol) em escala suficiente para alimentar termelétricas de pequeno porte, totalizando, em conjunto, uma capacidade da ordem de 15 GW, a partir de 2.012 (UNICA, 2008). Com um fator de capacidade igual a 0,3 estas usinas produziriam **39,5** GWh/ano.
- Portanto, o sistema interligado hidro-eólico-biotérmico teria uma capacidade conjunta suficiente para gerar cerca de **1.349.500** GWh por ano
- O *backup* deste sistema seria assegurado por um parque de termelétricas a gás natural, que entrariam em linha apenas em períodos hidro-eólicos críticos.

Reservas energéticas não renováveis conhecidas até dezembro de 2005

Fonte	Unidade	Medidas	Estimadas	Total	Eq. $10^6$ tep*
Petróleo	$10^3$ m <sup>3</sup>	1.871.640	693.110	2.564.750	1.667.631
Gás natural	$10^3$ m <sup>3</sup>	306.395	148.059	454.454	304.250
Carvão mineral	$10^6$ t	10.096	22.240	32.336	2.756.208
U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	tU <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	177.500	131.870	309.370	1.236.287

\* Cálculo sobre as reservas medidas

Fonte: BEN 2006/2005, EPE

## **Impactos ambientais e outras questões ligadas às usinas de eletricidade**

- As usinas nucleares praticamente não agridem o meio ambiente quando estão em operação rotineira, porém implicam o risco – muito pequeno, mas existente – de acidentes que podem liberar na biosfera produtos de fissão de alta atividade, com graves conseqüências, que se podem fazer sentir sobre extensas regiões, por centenas de anos. Além disso, fica para as futuras gerações o problema dos rejeitos de alta atividade, cuja deposição final implicará importantes investimentos no futuro. A segurança das usinas geradoras e demais instalações nucleares (tratamento e enriquecimento de urânio, fabricação de elementos combustíveis, reprocessamento de combustíveis irradiados, depósitos de rejeitos, etc.) implicará importantes e custosos aparelhos policiais. Assim, países que optem pelas usinas nucleares em seus sistemas elétricos poderão ser forçados adotar métodos próprios de estados policiais.
- As usinas hidrelétricas provocam a inundação de grandes áreas, em contrapartida oferecem a vantagem de pouco emitirem gases de efeito estufa. E as inundações podem ser muito reduzidas se, em vez de grandes projetos, optar-se por seccionar as bacias hidrográficas em projetos de menor porte, convenientemente escalonados. No caso da Amazônia, as hidrelétricas alagariam cerca de 0,3 km<sup>2</sup>/MW. Limitando-se em 80% o potencial hidrelétrico a aproveitar na região, a área ocupada pelos reservatórios hidrelétricos (incluindo a área já ocupada pelos rios, nas estações chuvosas) seria de aproximadamente 27.000 km<sup>2</sup>, ou seja, apenas 0,5% da área da região – uma alteração perfeitamente assimilável pela natureza.
- As termelétricas a combustíveis fósseis provocam danos irreversíveis ao meio ambiente, causados pelas emissões de gases de efeito estufa, sendo que aquelas a carvão ainda implicam a circunstância agravante das agressões ambientais causadas pela mineração e extração do combustível. A meu ver, esta alternativa só deve ser considerada em caráter transitório, numa fase de reestruturação e adaptação do sistema elétrico a fontes primárias renováveis, como a eólica e outras.

### Outras questões a serem consideradas

- Além dos aspectos de mencionados, devem também ser avaliados e comparados os custos da energia gerada, os benefícios sociais, a eventual exposição da população a riscos de acidentes, os prazos de implantação, etc.
- No caso de usinas termelétricas que usem combustíveis importados, a garantia de suprimento destes deve ser assegurada. Este é o caso do gás natural importado da Bolívia e poderá ser o do gás da Venezuela, caso o governo invista na construção do chamado gasoduto Norte-Sul.
- No caso das nucleares, é indispensável que se domine a tecnologia das diversas etapas do ciclo do combustível, particularmente a do enriquecimento de urânio; e que haja capacidade industrial em escala suficiente para a fabricação dos elementos combustíveis.
- Vamos agora calcular e compara os custos de geração dos projetos mais significativos em implantação no Brasil, quais sejam, o da usinas de Angra III; os das novas hidrelétricas na Amazônia.

## Custo de geração de Angra III

POTÊNCIA ELÉTRICA INSTALADA = **1.350 MW**.

- Custo da usina, s/ juros durante a construção - em mil reais: (C1) ----- = 11.200.000
- Despesas do concessionário: (8% de C1) ----- = 896.000
- Custo direto: (C2) ----- = 12.096.000
- J.d.c.(6 anos, 7,5% a.a. sobre 70% de C2 + 10% a.a sobre 30% de C2) ----- = 7.400.082
- Capital necessário para o investimento: (C3)----- = 19.496.082

CUSTOS ANUAIS (Vida útil: 50 anos, Taxa de desconto: 10% a.a. →  $FRC^* = 0,1008$ )

- Anuidade para a recuperação do capital (em mil reais) ----- = 1.965.050
- Seguros (1% de C3, ao ano) ----- = 194.908
- Manutenção (2% de C1, ao ano)----- = 224.000
- Pessoal + adicionais + administr. + encargos trabalhistas ----- = 43.000
- Total dos custos anuais ----- = 2.426.958

CUSTO DE GERAÇÃO (em reais / MWh)

- Incidência dos custos anuais (com fator de capacidade de 85%) ----- = 175 / MWh
- Combustível ----- = 12 / MWh
- Descomissionamento + administração e deposição final dos rejeitos ----- = 3 / MWh
- Soma ⇒ custo de geração de Angra III ----- **R\$ 190 / MWh**

---

\*  $FRC = i (1+i)^n / [(1+i)^n - 1]$

Custo de geração de novas hidrelétricas, na Amazônia  
(Potência elétrica típica: **3.000 MW**)

- Custo direto de uma usina típica ----- = 6.000.000
- Obras de proteção ambiental e eclusa (**mil reais**) ----- = 2.100.000
- Investimento total ----- = 8.100.000
- Juros durante a construção (5 anos, 10% a.a.) ----- = 4.945.140
- Capital necessário para o investimento ----- = 13.045.140
- CUSTOS ANUAIS (Depreciação: 30 anos; taxa de desconto:10% a.a.) →FRC = **0,106**
- Anuidade para a recuperação do capital (**mil reais**) ----- = 1.382.740
- Seguros a.a.----- = 130.451
- Manutenção a.a.----- = 81.000
- Pessoal + encargos trabalhistas + administração a.a. ----- = 20.000
- Total dos custos anuais ----- = 1.614.191
- CUSTOS DE GERAÇÃO (em reais / MWh, com fator de capacidade de 42%)
- ⇒ Custo de geração de novas hidrelétricas na Amazônia ----- = **R\$ 146,2 / MWh**

## Comparação entre os custos de geração

A comparação entre os custos da energia das usinas examinadas, colocada na rede básica, aponta na direção das usinas hidrelétricas para, em princípio, receber tratamento prioritário no processo alocação de recursos – seja do orçamento da União, seja de bancos oficiais – para sua implantação.

PROJETO	Custo da energia (R\$/MWh)	Produção anual (GWh)	Construção (anos)
Usina nuclear (1.300 MW)	190	9.686	~ 6
Hidrelétrica (3.000 MW)	147	11.045	~ 5

Uma eventual decisão de se construírem novas usinas nucleares apenas para justificar o investimento já realizado em Angra poderia abalar seriamente o equilíbrio financeiro do setor elétrico brasileiro.

- Tomando-se a diferença entre o provável custo de geração de Angra III e o das novas hidrelétricas na Amazônia, vê-se que, para gerar a mesma quantidade de energia que Angra III produziria em um ano de operação, a um custo de, aproximadamente, 1,84 bilhão de reais, uma hidrelétrica gastaria 1,41 bilhão de reais, economizando, portanto, cerca de R\$ 430 milhões de reais, por ano. Estes recursos poderiam ser aplicados no projeto do sistema nuclear de propulsão naval, que me parece estrategicamente mais importante, para um país que tem mais de 8.000 km de costa atlântica.

## Conclusões

- Tomando-se por base a população máxima projetada pelo IBGE (215 milhões de habitantes) e multiplicando-a pelo consumo *per capita* médio dos países europeus listados anteriormente, vê-se que o consumo total de energia elétrica no Brasil deve ser da ordem de  $1,2 \times 10^6$  GWh/ano, a fim de que a população venha a ter um alto nível de qualidade de vida.
- Nenhum outro país das dimensões econômicas e demográficas do Brasil dispõe de um potencial energético renovável como o brasileiro, de modo que este pode ser o primeiro grande país do mundo a ter um sistema elétrico de fato sustentável.
- Se for implantado no Brasil um sistema integrado hidro-eólico-biotérmico para aproveitar racionalmente o potencial disponível, será possível gerar até  $1,35 \times 10^6$  GWh/ano, tornando desnecessárias as usinas a gás, a carvão e as nucleares. A isto opõem-se os *lobbies* da indústria nuclear e das indústrias ligadas aos combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão).
- No Brasil, o espaço da energia nuclear encontra-se na pesquisa científica, nas aplicações biomédicas, industriais e agrícolas – e na propulsão naval. Os recursos que se pretende aplicar em centrais nucleares de potência trariam maiores benefícios para o país se fossem canalizados para as referidas aplicações – e para o desenvolvimento tecnológico na área das energias renováveis; caso contrário continuaremos na retaguarda dos países industrializados, que já estão investindo importantes recursos nessa área. Insistir na construção de centrais nucleares de potência é uma atitude paradoxal, voluntariosa e contrária ao desenvolvimento das tecnologias energéticas efetivamente renováveis e limpas, que deverão prevalecer no futuro, ainda que apenas nos países mais avançados.
- Por fim, é importante assinalar que a Constituição Brasileira de 1.988, em seu artigo 21 - inciso XXIII-a, dispõe que “toda atividade nuclear em território nacional somente será admitida para fins pacíficos e mediante aprovação do Congresso Nacional”. Além disso, em 1.997 o Brasil aderiu ao Tratado de Não-Proliferação de Armas Nucleares, renunciando a qualquer tipo de atividade relacionada à produção e emprego da energia nuclear para fins militares.

## Bibliografia

- EPE, 2.010 – Balanço Energético Nacional.
- Atlas do Potencial Eólico Brasileiro – CRESESB/CEPEL/Eletróbrás, 2.001
- Hydro Power and Dams World Atlas *in Leckscheidt, J. Tjaroko, T. S. Overview of mini and small hydropower in EuropeGrIPP - N E T, 2001.*
- World Nuclear Association, 2009, Nuclear Power in France, *in: <http://www.world-nuclear.org/info/inf40.html>.*
- IBGE, 2008, [http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia\\_visualiza.php?id\\_noticia=1272&id\\_pagina](http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/noticia_visualiza.php?id_noticia=1272&id_pagina)
- Ummels, B.C., Pelgrum, E. and Kling, W.L., Integration of large-scale wind power and use of energy storage in the Netherlands' electricity supply. IET Renewable Power Generation, 2 (1), 2008. 12
- Energy Statistics, 2007, *in: [http://www.nationmaster.com/graph/ene\\_ele\\_con\\_percap-energy-electricity-consumption-per-capita&date=2007](http://www.nationmaster.com/graph/ene_ele_con_percap-energy-electricity-consumption-per-capita&date=2007)*
- INSEE, 2009, Consommation finale d'électricité en France, par secteur, *in [http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg\\_id=0&ref\\_id=NATTEF11358](http://www.insee.fr/fr/themes/tableau.asp?reg_id=0&ref_id=NATTEF11358)*
- Energy Policy, v. 37, p. 1580-1584, 2009, Does Brazil need Nuclear Power Plants

# Apêndices

# I

## As usinas eletronucleares e o desenvolvimento tecnológico

- A finalidade de usinas eletronucleares é a de gerar energia elétrica, o que não requer tecnologia de projeto e construção das usinas, mas apenas *know how* de operação e manutenção. A Eletronuclear já dispõe de quadros altamente qualificados, que adquiriram grande experiência na operação e manutenção de Angra I e Angra II. Esses quadros renovam-se continuamente, com os mais jovens, que ingressam na empresa, sendo treinados e absorvendo *know how* dos que estão próximos da aposentadoria. Não é necessário construir novas usinas para preservar esse *know how*, ou para desenvolver tecnologia.
- Construir novas usinas nucleares com o objetivo de desenvolver tecnologia de geração eletro nuclear equivaleria a comprar modernos aviões Airbus A380, que podem ser muito bem pilotados por pilotos formados e treinados no Brasil, mas que não são preparados para projetar e construir aviões. De fato, as companhias aéreas brasileiras sempre compraram e operaram aviões modernos, no entanto a indústria aeronáutica brasileira só se desenvolveu com a criação do Instituto Tecnológico da Aeronáutica, que estimulou a criação da Embraer e suas empresas satélites, nos segmentos de metalurgia; mecânica fina; eletrônica de instrumentação e controle, etc. Analogamente, a capacidade brasileira para fazer o projeto básico, desenvolver os materiais, desenhar os sistemas e construir uma usina nuclear, só será adquirida quando o governo – em vez de comprar projetos feitos no exterior, como o de Angra III – entregar a instituições e centros de excelência locais a responsabilidade de desenvolver e construir um protótipo para, em seguida, escalá-lo para escala industrial.  

A oportunidade de se criar *know how* para a indústria nuclear e suas satélites só surgirá quando o desenvolvimento tecnológico do setor for entregue a instituições e centros de excelência, tais como o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares de São Paulo, a COPPE / UFRJ; o Centro Tecnológico da Marinha em Aramar, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo e outros de nível comparável. Os projetos de P&D para o setor poderiam ser financiados com recursos provenientes da diferença entre os custos de geração de Angra III e das novas hidrelétricas. Uma experiência dessa natureza exerceria um importante efeito germinativo sobre diversos segmentos das indústrias metal-mecânica; eletro-eletrônica; eletrônica de instrumentação e controle e outras, que estão situadas na cadeia produtiva do setor nuclear.
- No tocante à unidade de enriquecimento de urânio, em Rezende, nada impede que sua implantação seja completada e que o governo compre parte da respectiva produção, para acumular um estoque estratégico de urânio enriquecido a 3%, que é impróprio para fins bélicos, porém importantíssimo para ser usado mais tarde, em usinas desenvolvidas no contexto de um programa nuclear efetivamente brasileiro.

## II

### Emissões de CO<sub>2</sub> por uma termelétrica de 1.000MW, a gás

Temos:

Potência: 1.000 MW

Operação: 24horas por dia

Energia gerada:  $1.000 \times 24 \times 60 \times 60 = 8,64 \times 10^7$  MJ/dia

Eficiência do sistema: 49,5%

Poder calorífico do GN (Petrobrás) = 39,8 MJ/m<sup>3</sup>

Portanto: Consumo diário de GN em metros cúbicos = 4.382.700 m<sup>3</sup>/dia

Densidade do GN = 0,75 kg/m<sup>3</sup>

Consumo diário de GN em kg = 3.287.019 kg/dia

Do balanço de massas da reação de combustão do GN (essencialmente metano) temos:

1 kg de metano ~ 2,8 kg de CO<sub>2</sub>

Assim, uma usina de 1.000 MW, a gás, emite cerca de 9.203.532kg/dia, de CO<sub>2</sub>, ou seja, **nove mil e quinhentas e setenta e duas toneladas por dia.**