

Senado Federal  
Comissão de Infraestrutura

Audiência pública sobre o sistema elétrico brasileiro

Painel

Energia nuclear

27 de março de 2013

Joaquim Francisco de Carvalho

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

## Introdução

- Veremos nesta apresentação que, quando a população brasileira estiver estabilizada em 215 milhões de habitantes – o que, segundo o IBGE, ocorrerá por volta do ano 2.050 – a capacidade de um sistema hidro-eólico interligado será suficiente para que a sociedade consuma eletricidade, em termos *per capita*, em níveis comparáveis a países de alta qualidade de vida.
- Assim, as usinas termelétricas convencionas e as nucleares tornam-se desnecessárias, salvo as usinas a gás natural já existentes, que constituiriam uma reserva técnica, para entrar em linha em períodos hidro-eólicos críticos.
- Entretanto, nenhuma sociedade desenvolvida pode prescindir das radiações nucleares.

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

Podemos citar, por exemplo:

- As aplicações biomédicas, para 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.

## Alternativas para a geração de energia elétrica em larga escala

- As alternativas convencionais são as usinas hidrelétricas, os parques eólicos, as termelétricas a combustíveis fósseis, as termelétricas a biomassas e as **termelétricas nucleares**. Outras tecnologias surgirão, mas, no presente, estas são as efetivamente viáveis.
- A escolha da alternativa ótima deve basear-se 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.

## **Fissão nuclear e demais alternativas disponíveis no Brasil.**

- No Brasil, as principais fontes primárias (renováveis e não renováveis) disponíveis para a geração de energia elétrica são o potencial hidrelétrico, o potencial eólico, as biomassas, o petróleo, o gás natural, o carvão mineral e o óxido de urânio.
- As energias hidrelétrica e eólica são de origem solar e ambas constituem fluxos renováveis.
- O potencial hidrelétrico brasileiro ainda não explorado, em associação com o potencial eólico, na forma de um sistema interligado hidro-eólico, dará ao Brasil condições de atender plenamente o consumo de energia elétrica

## Potencial hidrelétrico brasileiro

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética, o potencial hidrelétrico brasileiro passível de ser economicamente aproveitado nas atuais condições de tecnologia é de 267GW, dos quais 83 GW já estão em aproveitamento, como se vê na tabela abaixo.

<b>Aproveitamento do potencial hidrelétrico</b>	<b>GW</b>	<b>%</b>
Usinas médias e grandes, em operação	83	31
Potencial a aproveitar (inventariado)	167	63
Potencial de Pequenas Centrais Hidrelétricas	17	7
<b>Total</b>	<b>267</b>	<b>100</b>

Fonte: EPE, 2.010

## Uma possível estratégia para o aproveitamento do potencial hidrelétrico

- Cerca de 20% do potencial amazônico devem permanecer intocados, por motivos sociais e ambientais, restando, portanto, 73 MW a serem instalados na Amazônia. Neste caso, a soma das áreas ocupadas pelos reservatórios hidrelétricos amazônicos (incluindo as áreas já ocupadas pelos rios, nas estações chuvosas) seria inferior a 0,6% da área da Amazônia brasileira – uma alteração perfeitamente assimilável pela natureza.
- Devido a impactos de mudanças climáticas, cairá em cerca de 15% a energia natural afluyente, assegurada pelo fluxo dos rios da região.
- Aproximadamente 10% do potencial das demais regiões deverão ficar intocados. Sobraria, portanto, um potencial da ordem de 53 GW, fora da Amazônia.
- Nessas condições ainda será possível acrescentar uma capacidade da ordem de 126 GW aos 83 GW já em aproveitamento, de modo que o parque hidrelétrico brasileiro, como um todo, poderá ter uma capacidade total de **209** GW.
- Considerando-se um fator de capacidade de 0,43, este parque produzirá cerca de **787.000** GWh/ano

## Potencial eólico brasileiro

- Em 2001 o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) realizou um inventário do potencial eólico, estimando-o em 143 GW.
- Foram considerados ventos com velocidade média de 7km/h e parques eólicos com densidade máxima de 2 MW/km<sup>2</sup>, e não foram consideradas áreas ocupadas por florestas, lagos e rios, nem áreas sobre o mar.
- Foram consideradas curvas médias de desempenho de turbinas eólicas já encontradas no mercado, instaladas em torres de 50 m de altura.
- Estudos mais recentes apontam para um potencial da ordem de **300** GW, que pode ser atingido com o desenvolvimento tecnológico, a expansão da escala, o aprendizado e a nacionalização da cadeia produtiva eólica. Admitindo-se, conservadoramente, que o fator de capacidade dos parques eólicos brasileiros será de 22%, este potencial permitirá a geração de **578.000** GWh por ano.



## Capacidade do sistema interligado

- Um sistema interligando as hidrelétricas com as eólicas e as termelétricas a biomassa, com as capacidades e fatores de capacidade indicados na tabela abaixo poderá gerar cerca de **1.405.300 GWh** por ano.
- As usinas térmicas a gás natural já existentes seriam acionadas apenas em períodos hidroeólicos críticos, servindo como seguro para reduzir riscos de racionamento.
- É necessário investir seriamente na modernização dos sistemas de transmissão e distribuição, inclusive mediante o emprego de tecnologias avançadas, como as redes inteligentes (*smart grids*), para que o despacho dos parques eólicos seja continuamente associado ao despacho das hidrelétricas, elevando consideravelmente o fator de capacidade do sistema interligado.
- O planejamento do setor energético deve ser mais abrangente e normativo e siga diretrizes estratégicas bem definidas para o longo prazo.

Parque gerador	Capacidade (GW)	Fator de capacidade *
Hídrico	209	0,43
Eólico	300	0,22
Térmico a bagaço	15	0,30

\* Conservadoramente, tomei fatores de capacidade isolados e baixos. No sistema interligado, o fator de capacidade deve superar a média ponderada dos sistemas isolados.

- O sistema hidro-eólico poderá operar em sinergia com usinas termelétricas a biomassa, pois a frota automotiva brasileira é em grande parte alimentada com etanol, forçando a produção do bagaço de cana em escala suficiente para alimentar termelétricas de pequeno porte, totalizando, em conjunto, uma capacidade da ordem de **15 GW**, segundo a UNICA. Com um fator de capacidade igual a 0,3 estas usinas produziriam **39.500 GWh/ano**.
- Portanto, o sistema interligado hidro-eólico-biotérmico teria uma capacidade conjunta suficiente para gerar cerca de **1.405.300 GWh** por ano.
- A reserva de segurança deste sistema seria assegurada pelas termelétricas a gás natural já existentes, que só entrariam em linha em períodos hidro-eólicos críticos.

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

<b>PAÍS</b>	<b>CONSUMO</b> (kWh/hab×ano)
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

Tomando-se por base a população estabilizada (IBGE), vê-se que para alcançar níveis comparáveis à média dos países acima (5.560 kWh/hab×ano), o sistema elétrico brasileiro interligado deverá gerar cerca de **1.215.000** GWh por ano

## Uso racional da energia

- A partir de um patamar razoável, o bem estar de uma sociedade não depende, necessariamente, do crescimento *à outrance* da produção física, nem de um grande consumo de energia. Países como a Suíça e a Alemanha, por exemplo, têm economias praticamente estabilizadas e, em termos *per capita*, consomem três vezes menos energia do que os Estados Unidos, no entanto os suíços e alemães desfrutam de uma qualidade de vida comparável à dos norte-americanos.
- Em outras palavras, o desenvolvimento deve ser buscado através do aprimoramento da educação e da saúde pública, do aperfeiçoamento dos processos de produção e da qualidade dos produtos, da racionalização da infraestrutura de telecomunicações e dos sistemas de transportes e assim por diante – e do uso racional da energia para essas finalidades.

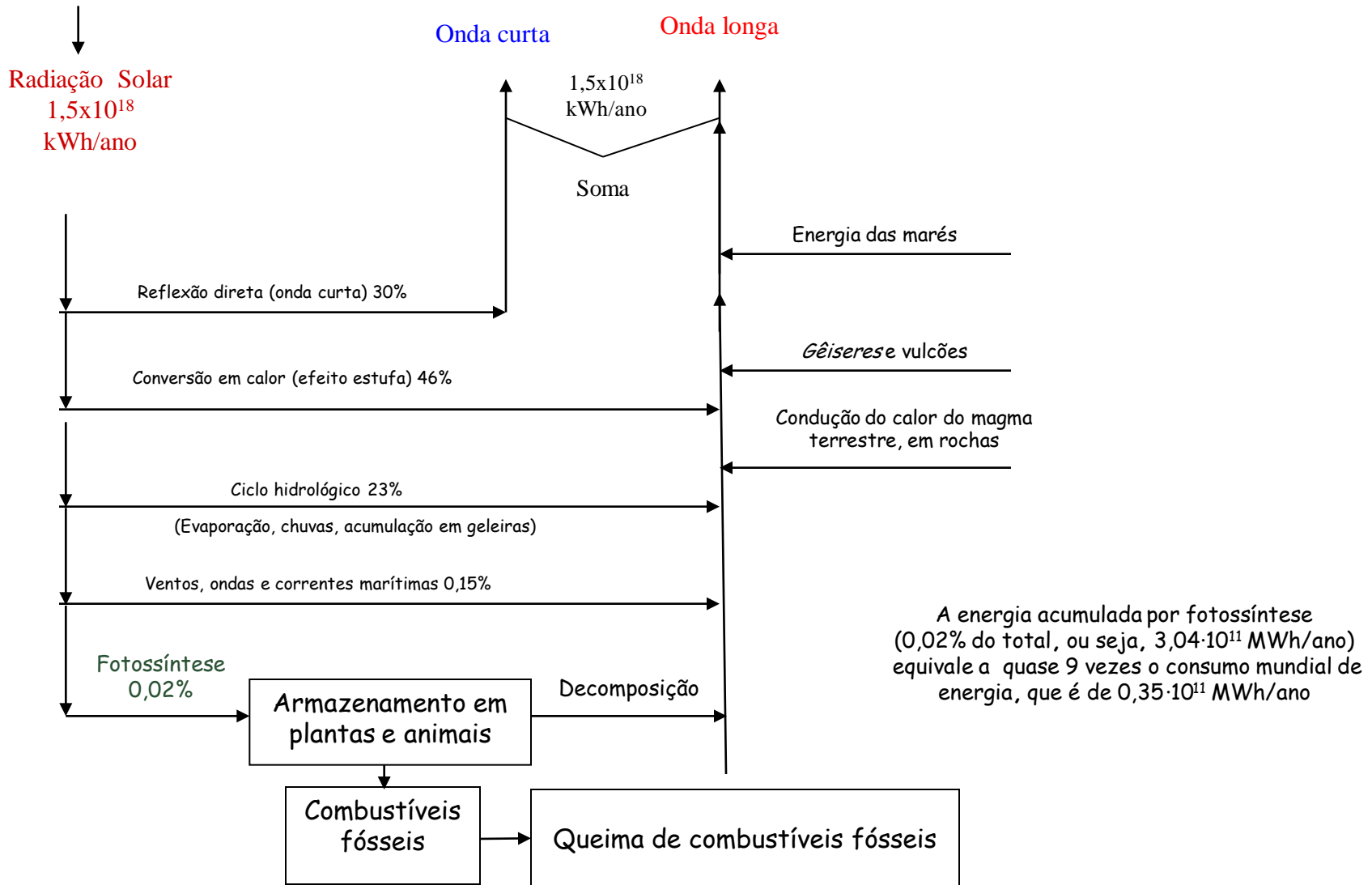
# Conclusões

- Tomando-se por base a população estabilizada projetada pelo IBGE (215 milhões de habitantes) e multiplicando-a pelo consumo *per capita* médio dos países europeus listados anteriormente (~ 5.650 kWh por habitante, por ano), pode-se dizer que uma condição necessária para que a população venha a ter um alto nível de qualidade de vida é que o consumo total de energia elétrica no Brasil seja da ordem de **1,215×10<sup>6</sup>** GWh/ano.
- Um sistema integrado hidro-eólico-biotérmico, planejado para aproveitar racionalmente o potencial disponível, poderá gerar até **1,405×10<sup>6</sup>** GWh/ano, tornando desnecessárias as usinas termelétricas convencionas e as nucleares.
- A construção de centrais nucleares de potência deslocará recursos que deveriam ir para o desenvolvimento das tecnologias energéticas efetivamente renováveis e limpas, que deverão prevalecer no futuro, ainda que apenas nos países mais avançados.
- O Ministério da Ciência e Tecnologia deveria criar uma linha específica para incentivar o desenvolvimento tecnológico na área das energias renováveis, caso contrário continuaremos na retaguarda dos países industrializados, que já estão investindo importantes recursos nessa área.
- No Brasil, o espaço da energia nuclear encontra-se na pesquisa científica, nas aplicações biomédicas, industriais e agrícolas – e, eventualmente, na propulsão naval.

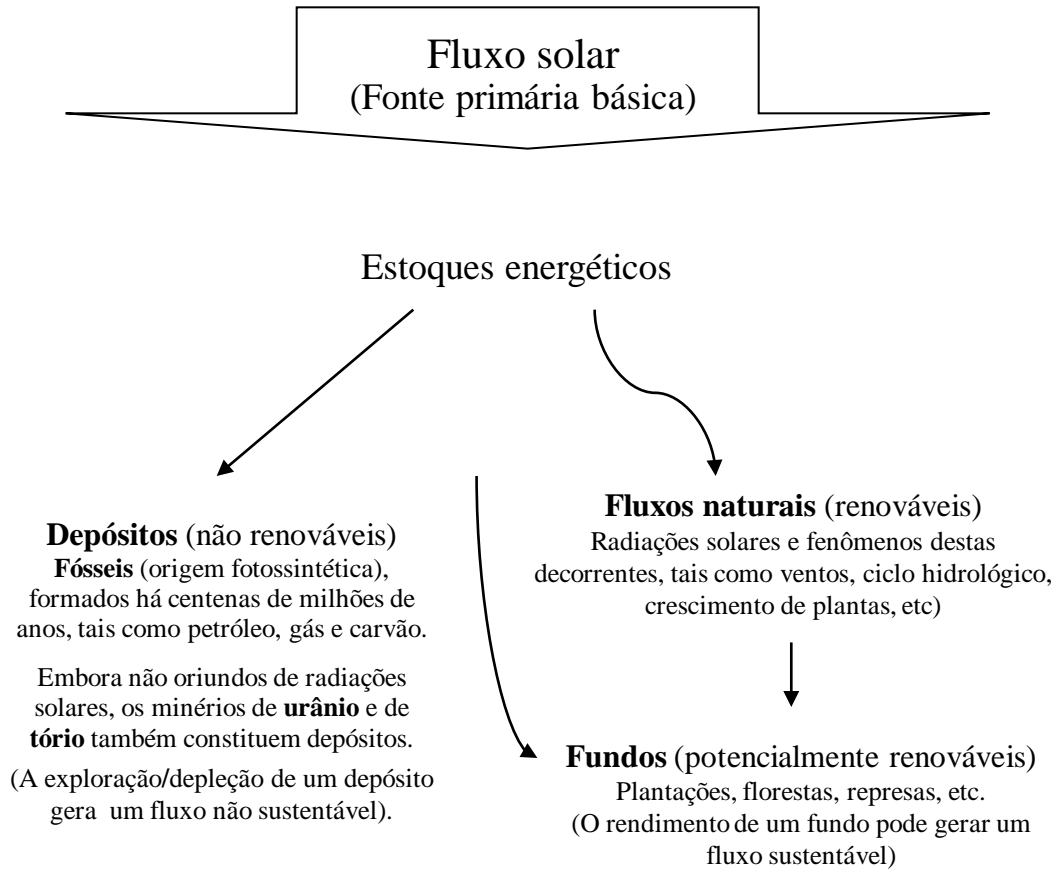
## **ANEXOS**

# Diagrama 1

## A energia solar que incide sobre a Terra



## Diagrama 2





## 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
Chapécó	90	885	0,10
Belo Monte	503	11.233	0,04
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.

## Custo de geração de Angra III

Capacidade elétrica (MW)	1.350
<b>Custo da usina - C1</b> (R\$ 10 <sup>3</sup> )	11.200.000
Despesas do concessionário: (8% de C1)	896.000
Custo direto - C2	12.096.000
Juros durante a construção (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
<b>Custos anuais</b> (R\$10 <sup>3</sup> /ano)	
Vida útil: 50 anos, Taxa de desconto: 10% a.a. FRC ⇔	0,1008
Anuidade para a recuperação do capital (R\$ 10 <sup>3</sup> )	1.965.050
Seguros (1% de C3, ao ano)	194.908
Manutenção (2% de C1, ao ano)	224.000
Pessoal + adicionais + administração + encargos trabalhistas	43.
	00
	0
<b>Total dos custos anuais</b>	<b>2.426.958</b>
Incidência dos custos anuais	175
Combustível	22
Descomissionamento + administração e deposição final dos rejeitos	3
<b>Custo da energia gerada</b> , em R\$/MWh, com fator de capacidade = 0,85	<b>200</b>

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

## Custo de geração de novas hidrelétricas, na Amazônia

Capacidade elétrica típica (MW)	3.000
<b>Custo direto</b> (R\$ 10 <sup>3</sup> )	7.500.000
Eclusa e obras de proteção ambiental	2.250
Investimento total	9.750.000
Juros durante a construção (5 anos, 10% a.a)	5.952.472
Capital necessário para o investimento	15.702.472
<b>Custos anuais</b> (R\$10 <sup>3</sup> /ano)	
Depreciação: 30 anos, taxa de desconto: 10% a.a FRC* ⇒	0,106
Anuidade para recuperação do capital	1.664.462
Seguros	157.024
Manutenção	60.000
Pessoal + encargos trabalhistas + administração	20.000
Total dos custos anuais	1.901.486
<b>Custo da energia gerada</b> , em R\$/MWh, com fat. cap. = 0,45	<b>80,34</b>

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

## Comparação entre os custos de geração

- A comparação entre os custos de geração de energia em hidrelétricas e em nucleares, 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 (MWh)
Usina nuclear (1.300 MW)	200,00	9.686.000
Hidrelétrica (3.000 MW)	80,43	1.045 .000

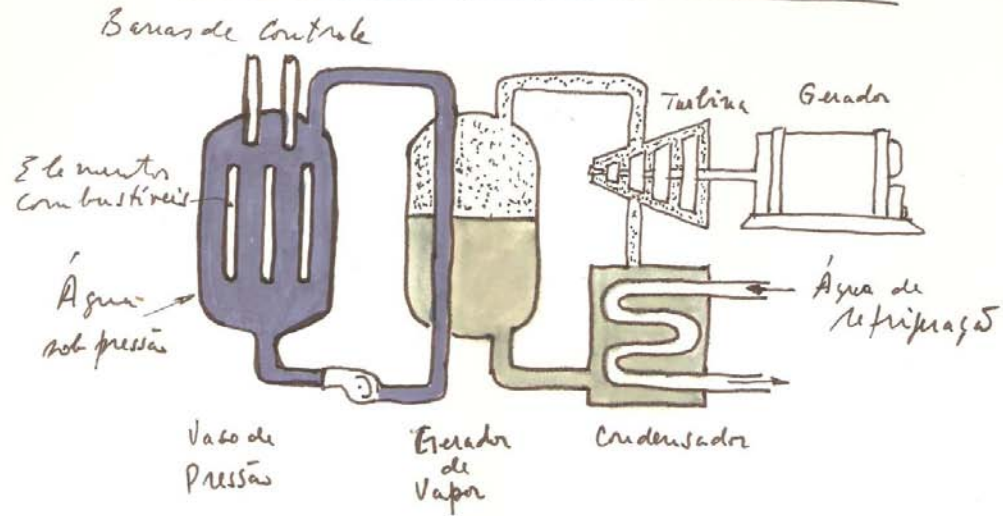
- Uma eventual decisão de se construírem novas usinas nucleares apenas para justificar o investimento já realizado em Angra poderia abalar seriamente o equilíbrio financeiro do setor elétrico brasileiro.
- Tomando-se a diferença entre o provável custo de geração de Angra III e o das novas hidrelétricas 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, 1,97 bilhão de reais, uma hidrelétrica gastaria 779 milhões de reais, economizando, portanto, cerca de R\$ **1,15** bilhões de reais, por ano. Estes recursos (que saem da economia) trariam maiores benefícios se fossem aplicados no desenvolvimento tecnológico no campo dos painéis fotovoltaicos, sistemas eólicos, energia dos mares, etc.

## **Impactos ambientais causados por usinas de eletricidade**

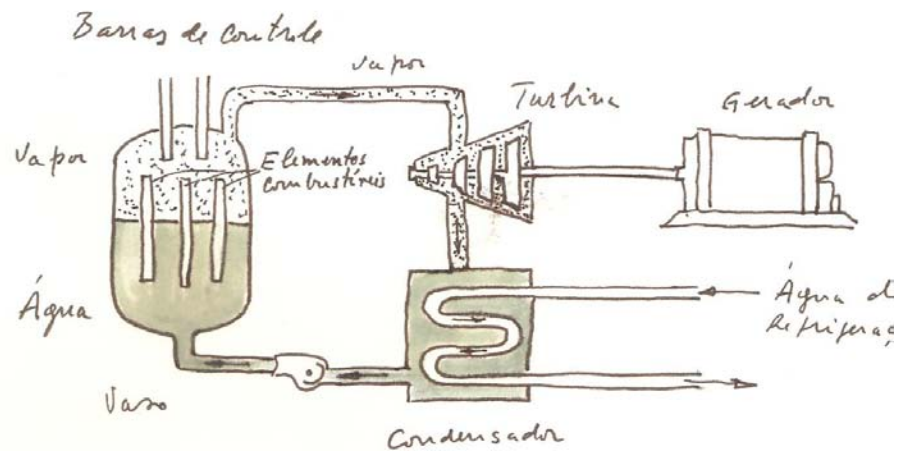
- As usinas nucleares praticamente não agridem o meio ambiente quando estão em operação rotineira, porém implicam o risco – muito pequeno, mas existente – de acidentes que podem liberar na biosfera produtos de fissão de alta atividade, com graves conseqüências, que se podem fazer sentir sobre extensas 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 70% o potencial hidrelétrico a aproveitar nesta região, a soma das áreas ocupadas pelos reservatórios hidrelétricos (incluindo as áreas já ocupadas pelos rios, nas estações chuvosas) seria inferior a 0,6% 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.

# Tipologia de reatores

# Reator a água pressurizada (PWR)

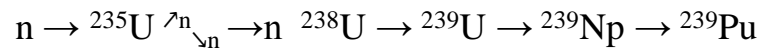
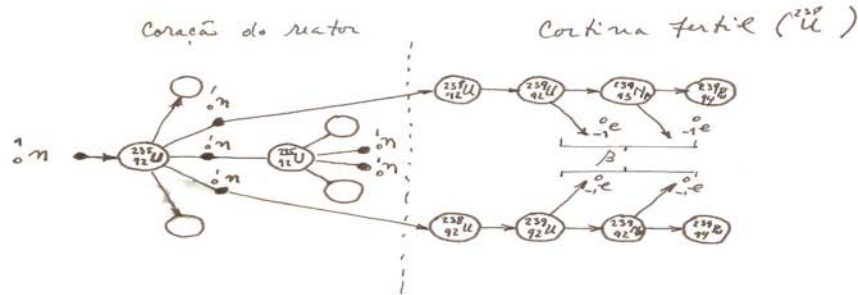
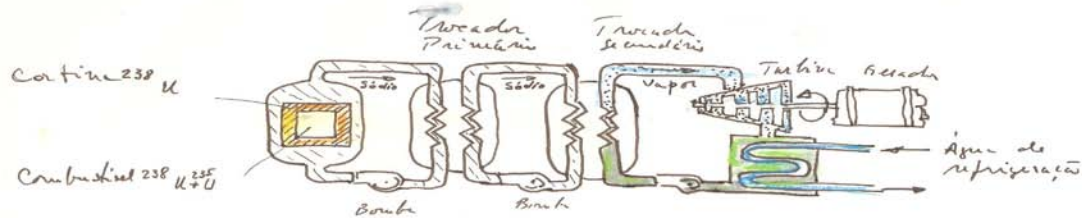


## Reator a água fervente (BWR)





# Reator Regenerador - (FAST BREEDER)



# Reator RBMK

