

58ª Reunião Anual da SBPC - SBPC&T Semeando Interdisciplinaridade

Simpósio Tecnológico:

Controle de Sistemas de Potência – A Energia Elétrica e o Desenvolvimento do Brasil

17/07/2006, das 14 h 00 às 15 h 45

**Situação atual e perspectivas do setor elétrico brasileiro -
Perturbações e riscos de panaceias salvadoras e de
querer controlar sistemas físicos complexos com regras de
jogos especulativos**

Carlos Portela - COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Elétrica

Situação atual e perspectivas do setor elétrico brasileiro - Perturbações e riscos de panaceias salvadoras e de querer controlar sistemas físicos complexos com regras de jogos especulativos

Carlos Portela - COPPE/UFRJ, Programa de Engenharia Elétrica

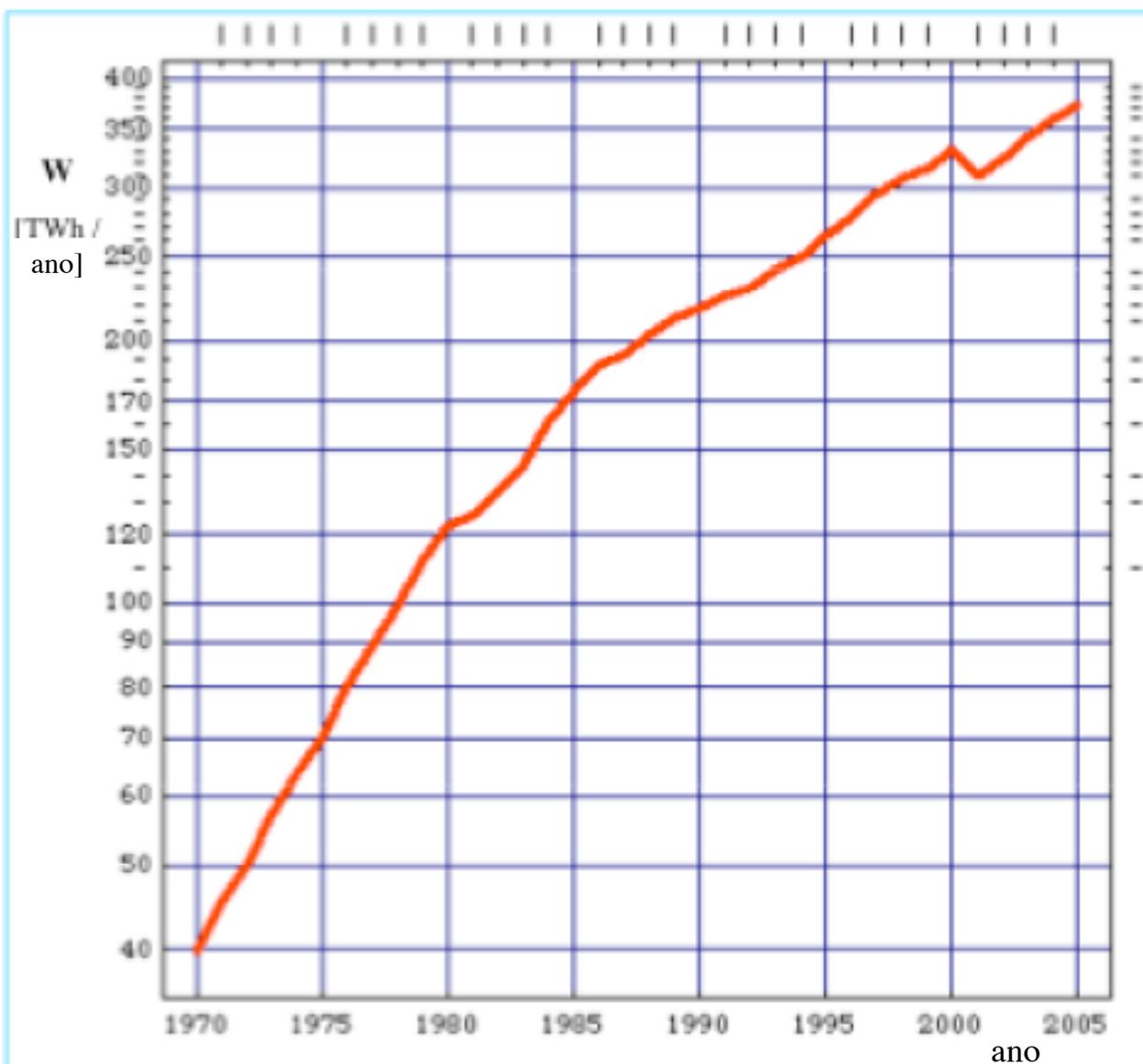
O consumo atual de energia elétrica do Brasil é extremamente baixo, em comparação com os países desenvolvidos, e, a manter-se o crescimento atual, o atraso, no tempo, tende a aumentar. Por exemplo:

- O consumo do Brasil, “per capita”, em 2005, foi idêntico ao dos Estados Unidos em 1943 (atraso de 62 anos) e ao da Alemanha Ocidental em 1957 (atraso de 48 anos).**
- Se se mantiverem as condições de aumento de consumo per capita dos últimos vinte anos, o Brasil atingirá com um atraso de cerca de 100 anos o consumo per capita dos Estados Unidos em 2005, e, com um atraso de cerca de 65 anos, metade do consumo per capita dos Estados Unidos em 2005 (ordem de grandeza do consumo per capita em 2005 de alguns dos mais importantes países europeus e asiáticos, em termos de desenvolvimento econômico).**

Infelizmente, após um período de recuperação do atraso econômico brasileiro, está-se, há bastante tempo (cerca de vinte anos), com um crescimento medíocre do consumo de energia elétrica.

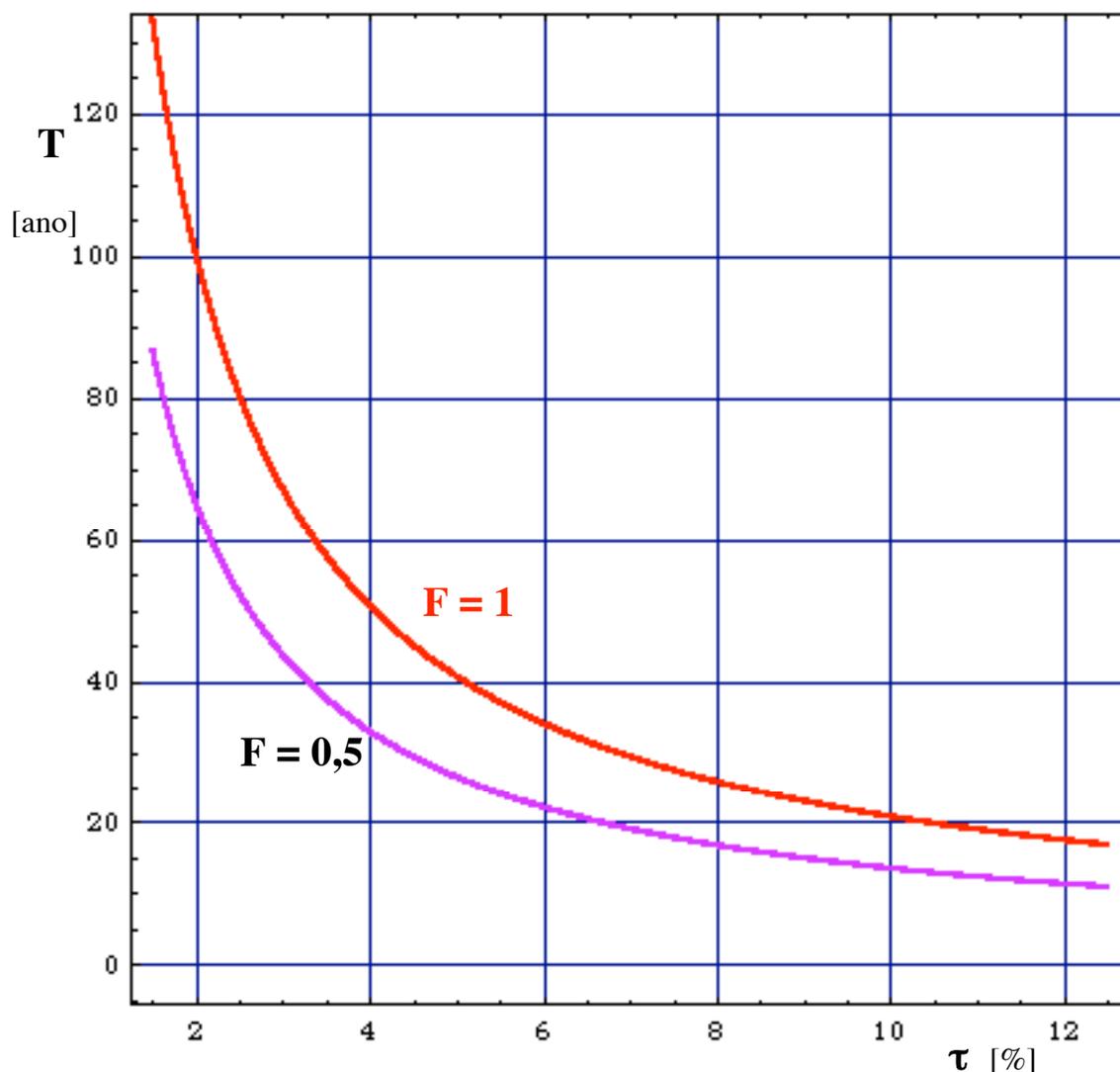
Em termos socioeconômicos, a situação atual é agravada pela grande irregularidade da distribuição do consumo, em correspondência com a diversidade do nível de desenvolvimento.

Esta realidade é particularmente lamentável, perante as condições brasileiras, quanto a disponibilidade de recursos naturais adequados para um aumento importante da produção de energia elétrica, com energia de custo reduzido e com impacto ambiental moderado, o que, por exemplo, não sucede na quase totalidade dos países economicamente mais desenvolvidos.



Consumo de energia elétrica no Brasil, por ano, de 1970 a 2005

Intervalo [anos]	τ Taxa média de crescimento anual relativo [%]
1970 - 1980	12,0
1980 - 1986	7,3
1986 - 2005	3,7



Tempo, T , a contar de 2005, necessário para atingir F vezes o consumo per capita dos Estados Unidos em 2005, em função da taxa anual média de crescimento do consumo per capita do Brasil a partir de 2005, τ .

Com base em gráfico de consumo de 1991 a 2002 [1] e tabelas de consumo de 2002 e 2003 [2], e evolução da população do Brasil segundo [3], a taxa anual média de aumento de consumo per capita foi:

- De 1991 a 2002: $\tau = 1,8 \% / \text{ano}$
- De 2002 a 2003: $\tau = -0,4 \% / \text{ano}$

[1] Fonte: - ANEEL. 2004. Gráfico reproduzido mais adiante.

[2] Fonte: - ANEEL. 2004. Tabelas constantes da mesma publicação em que figura o gráfico referido em [1], havendo aparentemente inconsistência entre o gráfico e as tabelas.

[3] Fonte: - US Census Bureau. International Data Base (IDB).

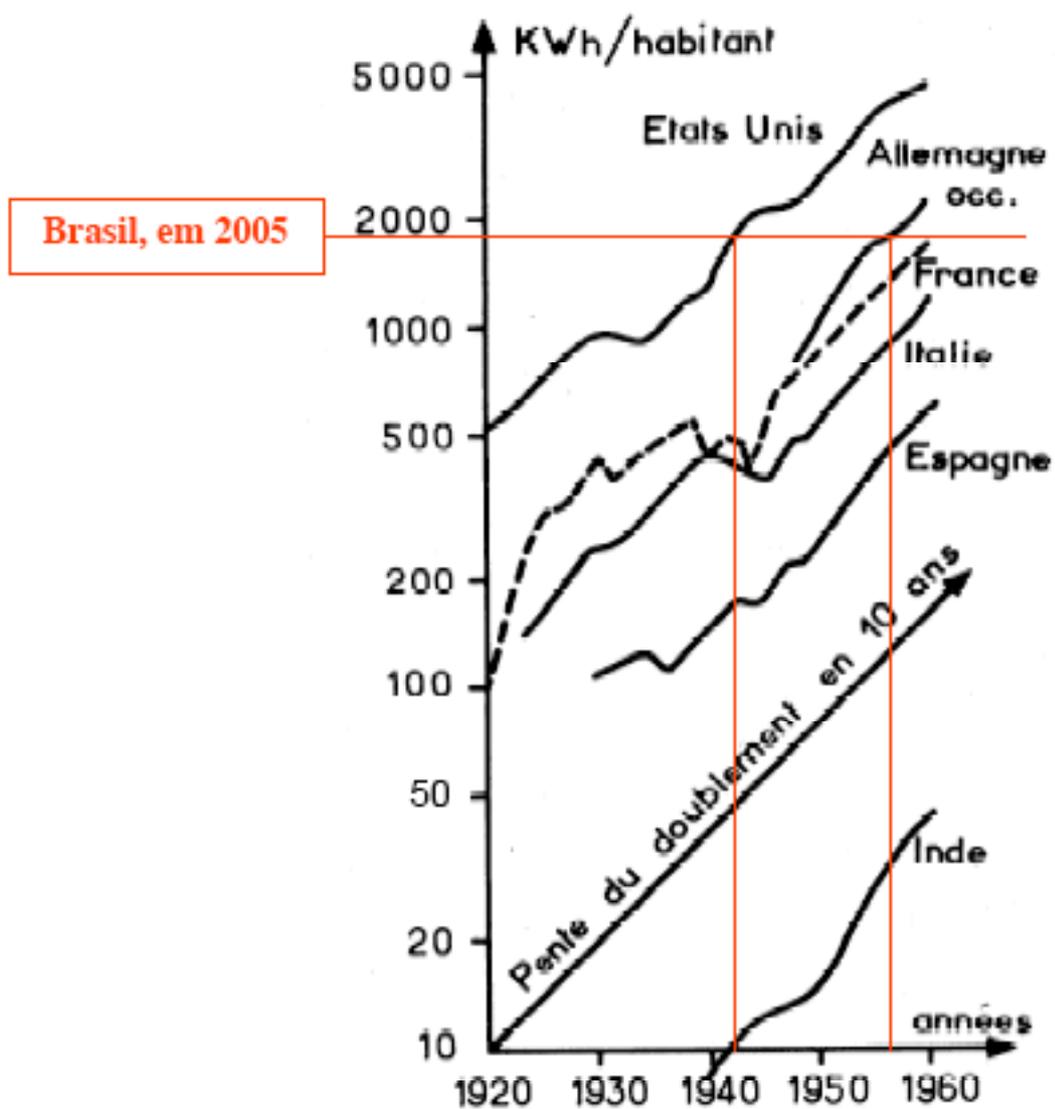
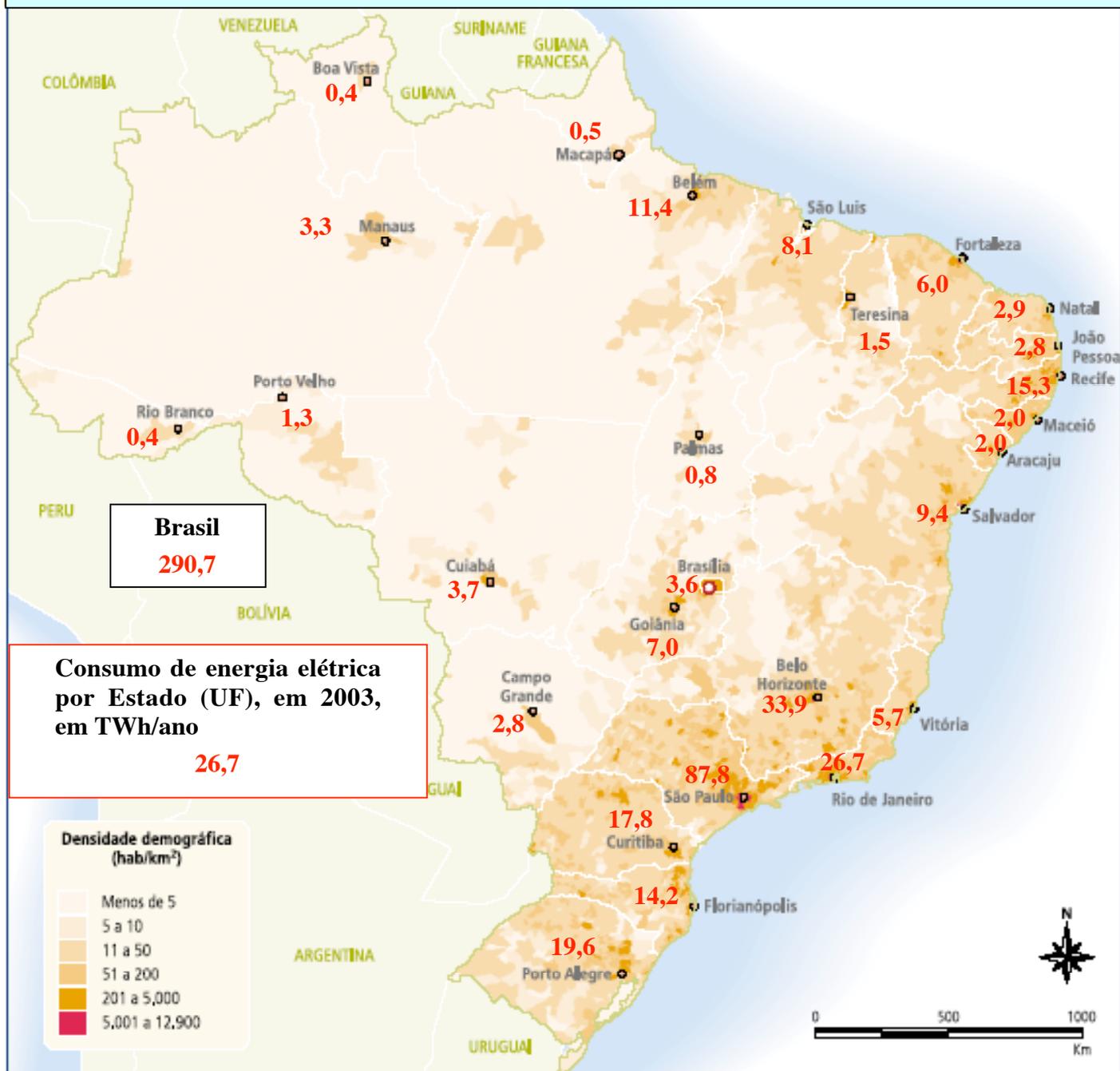


FIG. 10. — Consommation d'énergie électrique.

Fonte: P. Ailleret – Energétique – Les Besoins d'Énergie – Eyrolles, 1963

Distribuição espacial da população brasileira (densidade demográfica – hab/km²)
Consumo de energia elétrica, por Estado (UF), em 2003

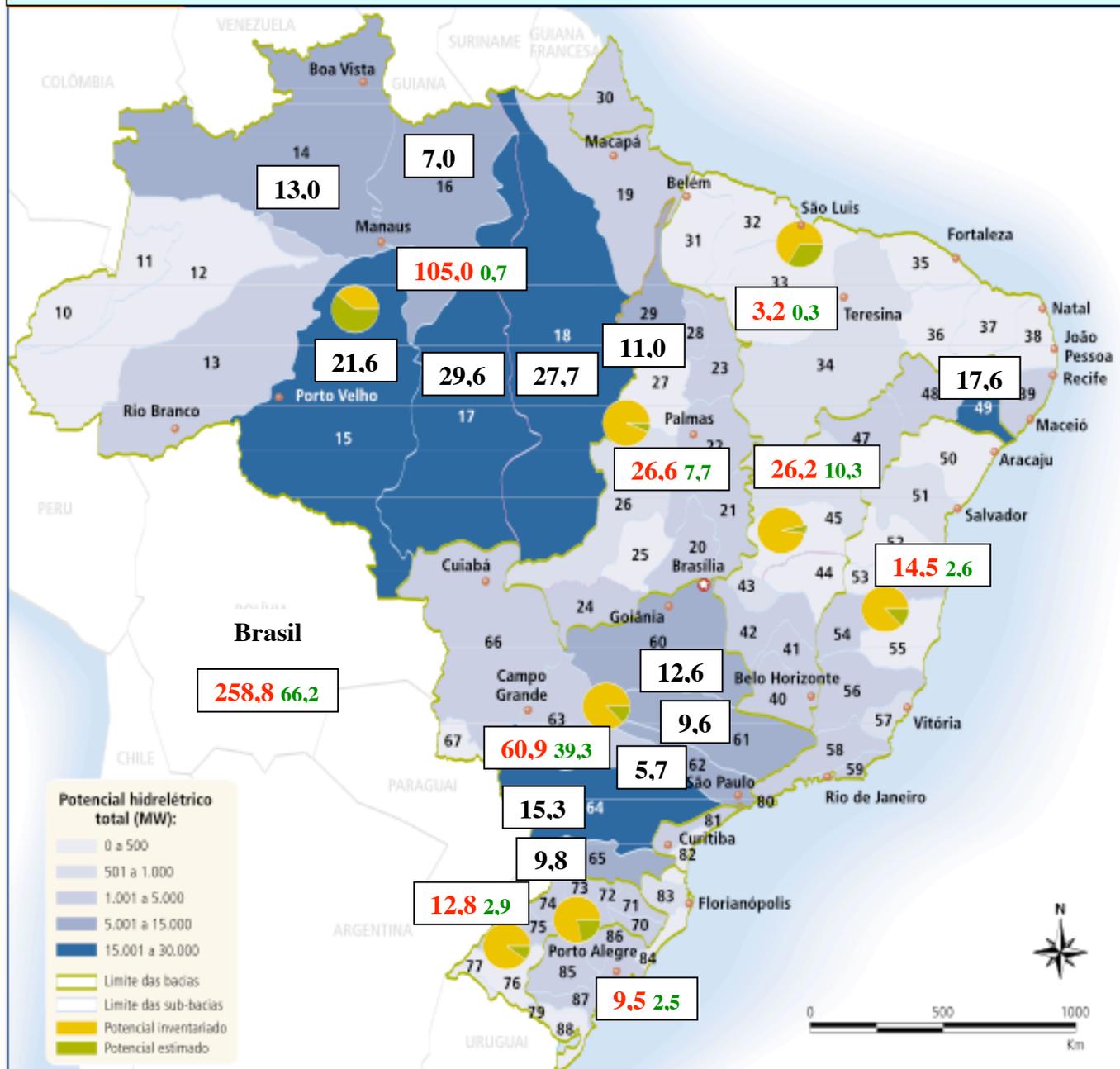


Fontes: - IBGE, Censo demográfico de 2000. ANEEL, 2004.

A realidade brasileira quanto a geração de energia elétrica é caracterizada, basicamente, pelo seguinte:

- A geração é predominantemente hidroelétrica.**
- Nas usinas recentes houve uma proporção elevada de geração térmica a gás, de justificação duvidosa, salvo como medida emergencial para atenuar efeitos de falta de decisões oportunas.**
- O Brasil tem um potencial de geração hidroelétrica de baixo custo e ainda não aproveitado que permite, pelo menos e aproximadamente, triplicar a geração hidroelétrica atual.**
- A solução natural para o aumento de geração, a médio prazo, é basear esse aumento em geração hidroelétrica de baixo custo, sem prejuízo de uso de outras fontes, porém em nível moderado e complementar.**
- A maior parte dos recursos hidroelétricos não aproveitados situa-se na Amazônia, a distâncias elevadas dos centros de consumo, da ordem de 2500 km, com condicionamentos de transmissão muito diferentes dos que serviram de base à concepção das redes de transmissão tradicionais.**

Potencial de geração hidroelétrica por sub-bacia hidrográfica (GW)



60,9 39,3

Potencial hidroelétrico e potência instalada de bacia, em GW

15,3

Potencial hidroelétrico de sub-bacia, em GW

**Potencial hidroelétrico (referido a potência a instalar) e
potência instalada (em março de 2003)**

Bacia	Cód.	Potencial hidroelétrico		Potência instalada		B/A
		A		B		
		[GW]	%	[GW]	%	%
Rio Amazonas	1	105,0	40,6	0,7	1,0	0,63
Rio Tocantins	2	26,6	10,3	7,7	11,7	29,0
Atlântico Norte/Nordeste	3	3,2	1,2	0,3	0,5	9,4
Rio São Francisco	4	26,2	10,1	10,3	15,5	39,2
Atlântico Leste	5	14,5	5,6	2,6	3,9	17,8
Rio Paraná	6	60,9	23,5	39,3	59,3	64,5
Rio Uruguai	7	12,8	5,0	2,9	4,3	22,3
Atlântico Sudeste	8	9,5	3,7	2,5	3,8	26,6
Total		258,8	100	66,2	100	25,6

Tipo	Em operação		Em construção		Outorgado entre 1998 e 2005, construção não iniciada	
	P [MW]	%	P [MW]	%	P [MW]	%
CGH	95	0,10	0,8	0,01	36	0,15
EOL	29	0,03	208	3,42	5 642	23,80
PCH	1 316	1,42	559	9,15	3 357	14,16
SOL	0,02	0,00	-	-	-	-
UHE	69 565	75,21	3 055	49,99	5 110	21,55
UTE	19 486	21,07	2 288	37,44	9 563	40,34
UTN	2 007	2,17	-	-	-	-
Total	92 499	100	6 112	100	23 708	100

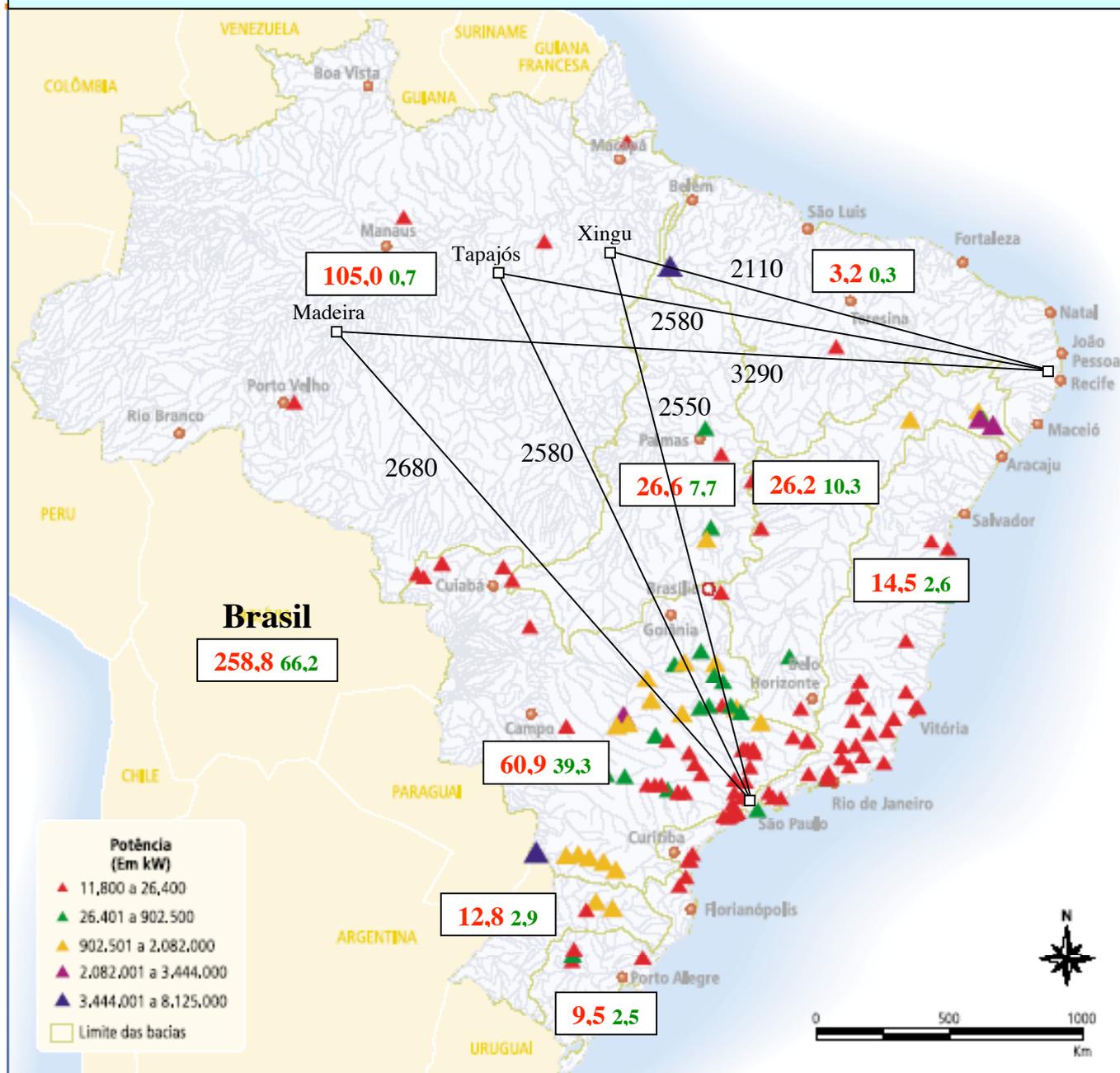
CGH Central Geradora Hidrelétrica (≤ 1 MW)
EOL Central Geradora Eoleoelétrica
PCH Pequena Central Hidrelétrica (> 1 MW , ≤ 30 MW)
SOL Central Geradora Solar Fotovoltaica
UHE Usina Hidrelétrica de > 30 MW
UTE Usina Termelétrica
UTN Usina Termonuclear

Nota:

Potência outorgada – Potência considerada no ato da outorga.

A potência indicada como “Em operação” é igual à “potência fiscalizada”, que é igual à potência considerada a partir da operação comercial da primeira unidade geradora.

Distâncias básicas de transmissão de novas usinas na Bacia do Amazonas a núcleos de carga



Fonte: ANEEL.

Nota: As distâncias são aproximadas e expressas em km .

Usinas hidrelétricas em operação em setembro de 2003

60,9 39,3

Potencial hidroelétrico e potência instalada de bacia, em GW

2680

Distância aproximada, em km , com margem de 5% para condicionamentos de traçado

Discutir diversas razões conjunturais e estruturais que contribuíram para uma redução da eficiência do setor elétrico brasileiro nas duas últimas décadas.

Aproximadamente na mesma altura, ocorreram alterações radicais na estrutura econômica e gerencial do setor elétrico dos Estados Unidos, que foram defendidas como uma “nova solução”, que iniciava uma nova era de crescimento e progresso. Em várias regiões e países, incluindo o Brasil, surgiu uma pressão muito forte para a adoção desses novos modelos no setor elétrico, que levou a uma alteração importante da estrutura econômica e gerencial, com diversos graus de implantação da “nova solução”.

Em muitos casos, a realidade foi muito diferente da expectativa, com conseqüências por vezes dramáticas.

Serão discutidos vários exemplos das conseqüências das “novas soluções”, relativos ao Brasil e a diversos outros países.

A “nova solução” foi defendida por alguns setores econômicos e políticos brasileiros. Além da eventual aceitação dos argumentos invocados a favor da mesma, ela tinha dois aspectos atrativos:

- a- Transferia para os setores internacionais e privados a responsabilidade de obter recursos financeiros para os investimentos no setor elétrico.**
- b- A venda das empresas elétricas, na maioria propriedade dos governos federal e estaduais, originaria recursos financeiros que permitiriam reduzir a dívida pública e aumentar as aplicações noutras atividades econômicas e sociais.**

Pelo menos criou-se uma expectativa, embora não tenha vindo a ser confirmada pela realidade.

Discutir alguns dos principais efeitos da adoção, no Brasil, do “novo modelo”.

Durante vários anos, manteve-se a expectativa, em muitos setores políticos e econômicos, de que os aspectos de “mercado” das “novas soluções” resolveriam naturalmente os requisitos de qualidade do fornecimento de energia, e a “regulamentação”, ou

“regulação”, focou-se em aspectos comerciais básicos e parciais. Na realidade, a cultura do setor elétrico brasileiro foi desmantelada, e as “regulamentações” e “funções” basearam-se, em grande parte, em conceitos comerciais excessivamente simplistas, que não consideram adequadamente as estreitas relações entre geração e transmissão, os aspectos estatísticos da hidrologia, os condicionamentos de garantia de fornecimento, a longa vida útil dos investimentos, durante a qual há margens de imprecisão importantes, que há que ponderar, para selecionar adequadamente as soluções e parâmetros. Em diversos aspectos, houve muitos erros e enganos, vários dos quais similares a erros cometidos noutros países, incluindo os Estados Unidos e a Europa.

De certa forma, ocorreu um divórcio entre os critérios e condicionamentos de decisão efetiva e os condicionamentos e critérios técnicos e econômicos que conduziram a soluções corretas e razoavelmente otimizadas, no que respeita a:

- Definição de condicionamentos e parâmetros técnicos e econômicos nas licitações de novos investimentos;**
- Opções e decisões de investidores e empresas; regras e condicionamentos de operação;**
- Regras de garantia de serviços de transmissão e de geração de eletricidade;**
- Regras de estabelecimento de preços;**
- Regras de interação com outras entidades ligadas com o setor elétrico.**

Em diversos casos, usando a simplicidade da regulamentação, a mesma foi usada, “legalmente”, em atividades basicamente especulativas, e eticamente condenáveis, sem correspondência com as finalidades do setor elétrico.

Discutir:

- Vários aspectos concretos das conseqüências da adoção das “novas soluções”, no Brasil e noutros países.**

- **Alguns aspectos da venda da maior parte das empresas elétricas de controle estadual, e de algumas empresas de controle federal.**

A adoção de soluções e critérios sem correspondência, quer com a realidade física do setor elétrico, quer com critérios econômicos robustos, e o desmantelamento da cultura do setor elétrico, aliadas a diversas outras causas gerenciais e a ausência de decisões tempestivas, culminaram com o racionamento da energia elétrica, que evidenciou, de forma dramática, o risco de falta de racionalidade e competência e de correr atrás de panaceias.

Discutir alguns aspectos das causas da situação que conduziu ao racionamento, e da inadequação de parte das medidas corretivas adotadas.

Em termos conceituais e metodológicos, a experiência infeliz do setor elétrico brasileiro durante os últimos vinte anos tem embutidos muitos aspectos que podem ser encarados sob a ótica do controle do setor elétrico, envolvendo não só o controle em termos estritos associado a equipamentos e algoritmos, como também o controle, em sentido mais geral, envolvendo, além das atuações e decisões baseadas em equipamentos e algoritmos considerados usualmente como parte do processo de controle, também as atuações e decisões de investimento e de operação.

Essas atuações e decisões existiam tradicionalmente, no setor elétrico, mas foram praticamente desmanteladas, ou simplificadas de maneira inadequada, com a adoção das novas soluções. Por exemplo, quando há uma ocorrência que não origina atuação automática e desejável de proteções e automatismos de controle que sejam a atuação mais conveniente para essa ocorrência, esperava-se, segundo a cultura tradicional do setor elétrico, que os operadores dos “despachos” e “hierarquia” tempestiva dos mesmos tivessem competência e discernimento adequado para identificar o problema e tomar tempestivamente medidas corretas no sentido de minimizar as conseqüências negativas da ocorrência. A realidade, corroborada por apagões extremamente graves nos Estados Unidos e na Europa, mostrou que essa cultura foi desmantelada. Em contrapartida, surgiu uma nova cultura

preocupada apenas em seguir estritamente as especificações comerciais simplistas dos contratos de compra e venda aplicáveis num determinado instante, que têm lógica de mera contabilidade, segundo a qual as potências contratadas (e gamas de flutuação respectivas), por exemplo, em várias linhas interligando duas regiões, são adicionáveis aritmeticamente.

Se houvesse um entendimento básico, da parte operadores responsáveis, quando aos condicionamentos físicos de operação duma rede, e se houvesse uma cultura de precedência das leis da física em relação a regras comerciais simplistas de que a Natureza não tomou conhecimento, precedência essa aplicável nas decisões dos operadores, as conseqüências graves, nesses apagões, poderiam ter sido evitadas, com uma perturbação muito menor em termos de corte de carga e duração.

Este mesmo condicionamento de “controle” do setor elétrico, com base em decisões racionais e tempestivas, aplica-se, também, com alteração de “objetivo”, a decisões e opções de planejamento tomadas por “pessoas”. Naturalmente, as “constantes de tempo” envolvidas no “controle” de planejamento, são, tipicamente, diferentes das decisões envolvidas no “controle de operação”, mas os conceitos envolvidos e a física que os afeta são similares. Também o fato de um elemento da “cadeia de controle” ser uma pessoa, um equipamento, ou um algoritmo, não envolve os aspectos conceituais básicos.

Comentar alguns exemplos concretos que evidenciam a importância da existência efetiva de funções adequadas de controle normalmente exercidas pelo homem, e que não são normalmente encaradas com a ótica de sistemas de controle.

Um dos condicionamentos mais importantes da evolução do sistema elétrico brasileiro é a necessidade de transportar grandes blocos de potência da Região Norte, onde se situam os recursos hidroelétricos mais importantes, de baixo custo, ainda não aproveitados, para a Região Sudeste (fortemente interligada à Região Sul), onde se situa a maior parte dos consumos. Esse transporte envolve distâncias de transmissão da ordem de

2500 km ou mais. Para as potências e distâncias envolvidas, não é adequado usar sistemas de transmissão similares aos que têm sido usados recentemente no Brasil, quer em termos técnicos, quer em termos de custo e de impacto ambiental.

Faz-se uma apresentação sumária de um tipo de solução não convencional potencialmente adequado para transmissão, em corrente alternada, de grandes blocos de potência a distâncias da ordem de 2500 km. Evidencia-se alguns aspectos destes sistemas de transmissão, sob o ponto de vista de controle. Os condicionamentos de controle são significativamente diferentes dos condicionamentos de controle de sistemas tradicionais.

Comentar os condicionamentos básicos de comparação correta desse sistema de transmissão, não convencional, com outra alternativa, também potencialmente interessante, para transmitir grandes blocos de potência, a distância da ordem de 2500 km, em corrente contínua.

EXEMPLOS DE SISTEMAS TRANSMISSÃO A DISTÂNCIAS MUITO LONGAS

EXEMPLO 1

Sistema de transmissão baseado em linhas de 500 kV , similares às linhas tradicionais, com compensação reativa maciça, para reduzir o “comprimento elétrico” do conjunto “linha e sistema de compensação” a bastante menos que um quarto de comprimento de onda a 60 Hz , extrapolando o que é usual para linhas com poucas centenas de quilômetros.

Esta concepção tem sido usada em linhas recentes, incluindo, por exemplo, as linhas “Norte-Sul 1”, “Norte-Sul 2”, “Nordeste-Sudeste”.

Para concretização, considero o caso da linha “Norte-Sul 1”.

Esta linha é apresentada apenas para efeitos comparativos, e não corresponde às soluções que considero mais adequadas para transmissão, a longa distância, de grandes blocos de potência, por exemplo, da Amazônia para a Região Sudeste.

Esta linha tem **1020 km** e liga algumas usinas e as redes Norte e Sudeste-Sul do Brasil. Foi instalada com cerca de 100 % de compensação em derivação (1632 Mvar em doze reatores de 136 Mvar) e cerca de 60 % de compensação em série (966 Mvar em seis bancos de capacitores de 161 Mvar), ambas fixas, e compensação em série, controlada, adicional. Além desta elevada compensação reativa, para transmitir potência nesta linha, é necessária compensação reativa adicional nas duas redes terminais. Para permitir uma potência transmitida **1000 MW** com esta linha compensada, foi instalada, nas duas redes, compensação reativa fixa adicional, de 2313 Mvar. A compensação reativa fixa total é $Q = 4911 \text{ Mvar}$.

EXEMPLO 2

Sistema de transmissão baseado em linhas não convencionais (LNC), trifásicas, trifásicas duplas ou hexafásicas, definidas com base nos seguintes critérios:

- Não impor restrições traduzindo meramente soluções usuais.**
- Impor apenas restrições correspondentes a condicionamentos físicos básicos e de desempenho, segurança e impacto ambiental.**
- Otimização de parâmetros físicos para o objetivo específico da linha, incluindo custo, perdas, confiabilidade operacional, gama de transmissão e condicionamentos de operação, ponderados ao longo da vida útil do sistema de transmissão e gama de cenários pertinente.**

Identificou-se um conjunto de propriedades físicas básicas que permite selecionar um número limitado de parâmetros com elevada correlação com diversos outros parâmetros físicos, de desempenho e de custo.

É viável uma análise robusta de otimização, baseada num número moderado de parâmetros e nos condicionamentos específicos do sistema de transmissão em causa.

Estabeleceu-se metodologias de otimização e validação seguindo esse tipo de análise.

A transmissão a distâncias muito longas (da ordem de 2000 km ou mais) tem condicionamentos muito diferentes da transmissão a distâncias “usuais”.

A simples extrapolação dos procedimentos “usuais”, para distâncias muito longas, conduz, naturalmente, a soluções inadequadas ou não otimizadas.

As metodologias em causa foram aplicadas a uma gama significativa de condições e a um número elevado de exemplos, o que permitiu uma definição aproximada de potências de

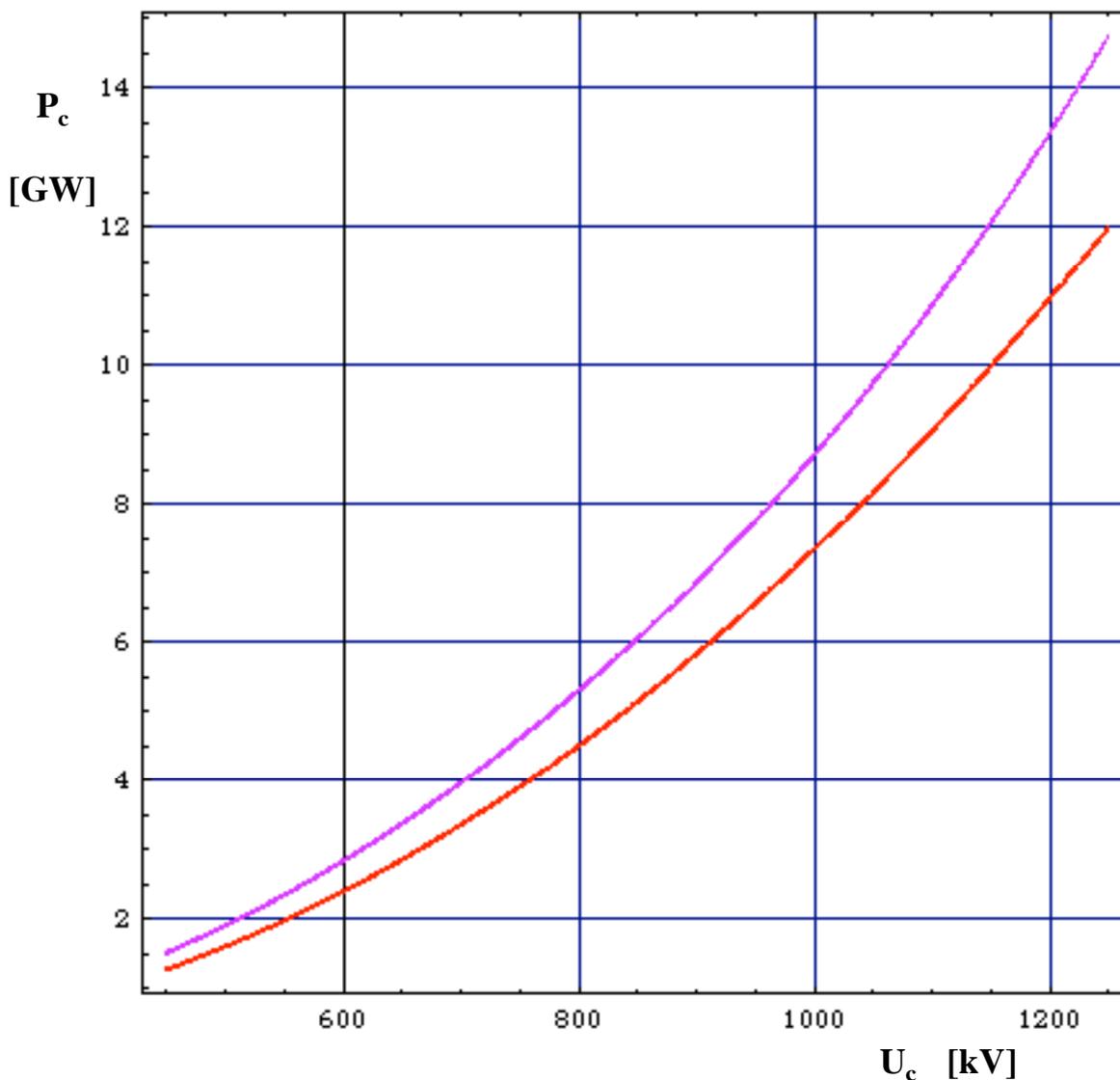
transmissão factíveis praticamente, com critérios prudentes, para transmissão a distâncias muito longas.

Naturalmente, para cada condição específica, há necessidade de uma análise de otimização e validação.

Para transmissão a distâncias “muito longas” (da ordem de 2000 km ou mais):

- **Há soluções interessantes baseadas aproximadamente em:**
 - **Selecionar troncos de transmissão que se comportem com um “comprimento elétrico” de pouco mais de meia onda.**
 - **Ligação ponto a ponto, sem manobra por trechos.**
 - **Compensação reativa nula ou muito reduzida.**
 - **Linhas não convencionais (LNC) com elevada capacidade de transmissão (em comparação com linhas convencionais).**
 - **Otimização conjunta de linhas, equipamentos da rede e critérios de manobra e proteção, detectando e evitando condições potencialmente críticas.**
- **Estas soluções permitem:**
 - **Bom comportamento do tronco quanto a estabilidade eletromecânica.**
 - **Bom comportamento do tronco quanto a sobretensões de manobra.**
 - **Custo muito inferior ao de soluções “tradicionais”.**
 - **Confiabilidade operacional muito superior à de soluções “tradicionais”.**
 - **Impacto ambiental muito inferior ao de soluções “tradicionais”.**

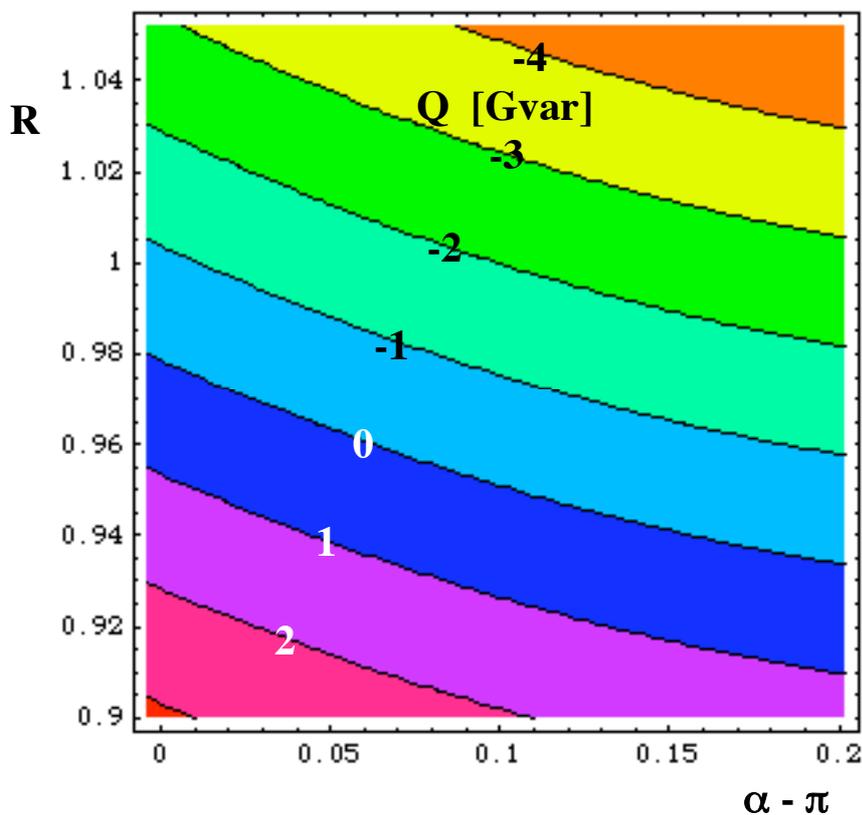
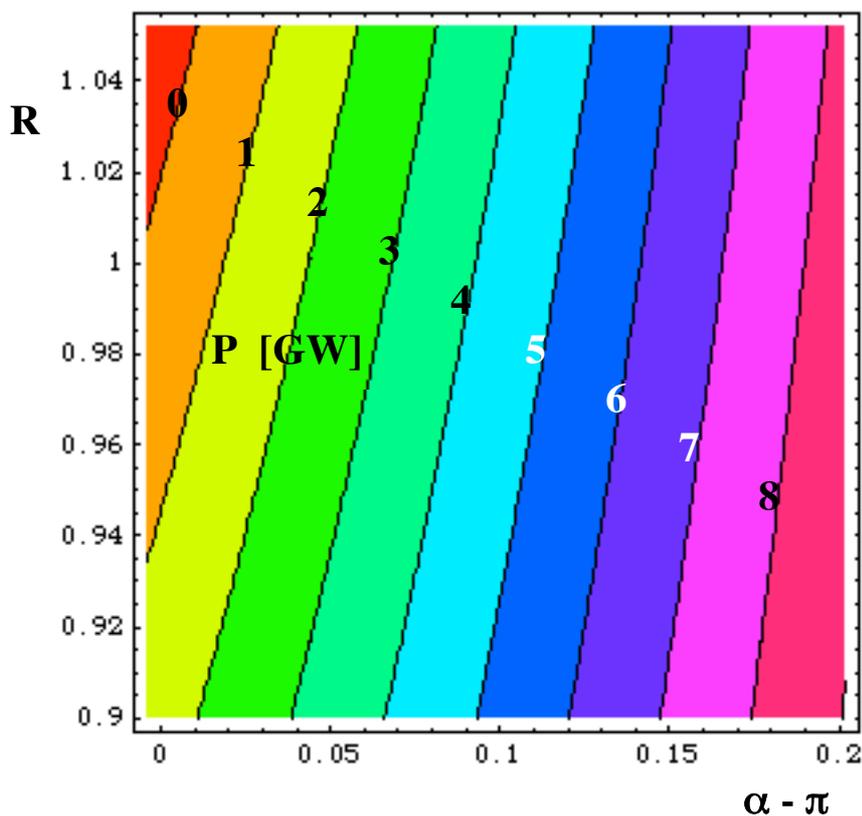
Exemplo de resultados relativos a linhas não convencionais (LNC) trifásicas, de tensão até 1250 kV, otimizadas para transmissão a distâncias “muito longas” (da ordem de 2000 km ou mais)



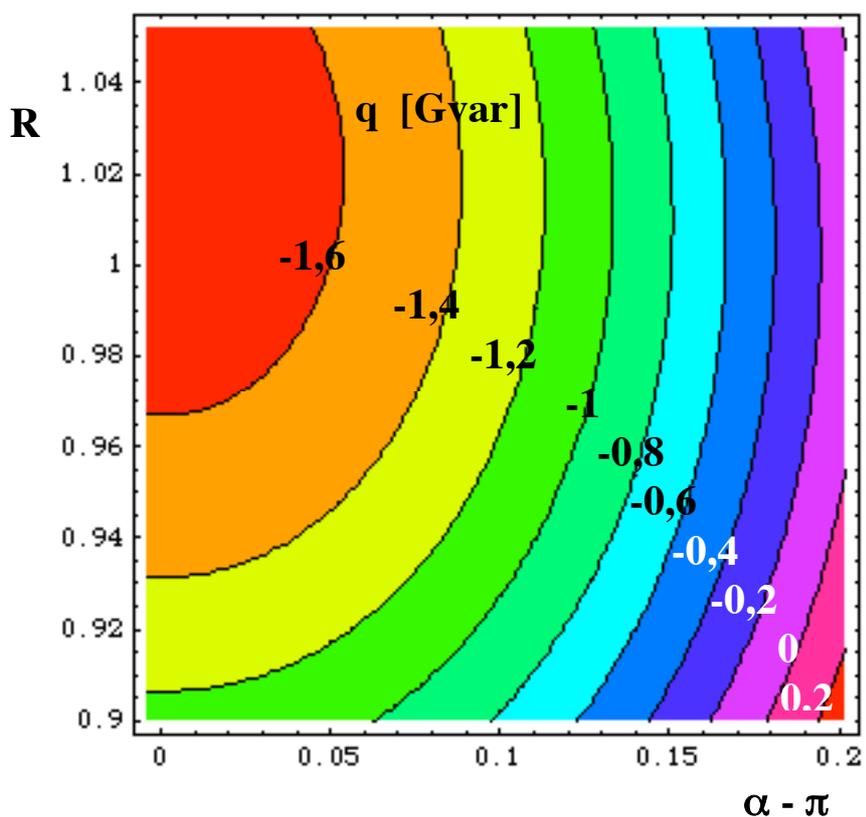
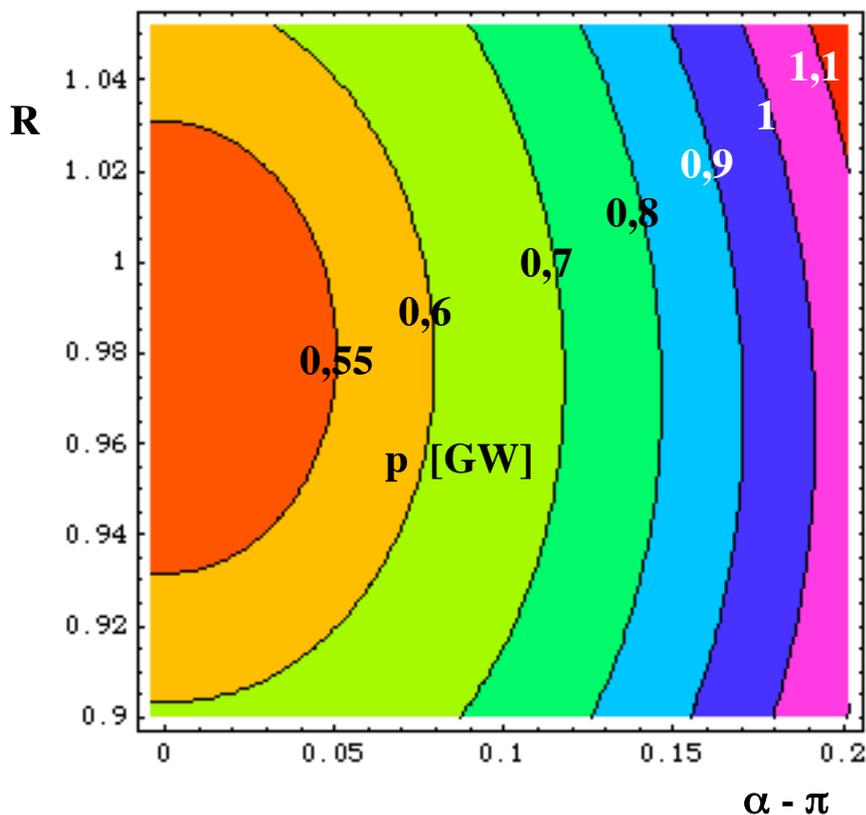
Potência característica, P_c , que pode ser obtida com linhas não convencionais (LNC), trifásicas, com critérios prudentes, em função da tensão, U_c (valor eficaz da tensão entre fases), para tensão até 1250 kV .

Para transmissão a distâncias muito longas (da ordem de 2000 km ou mais):

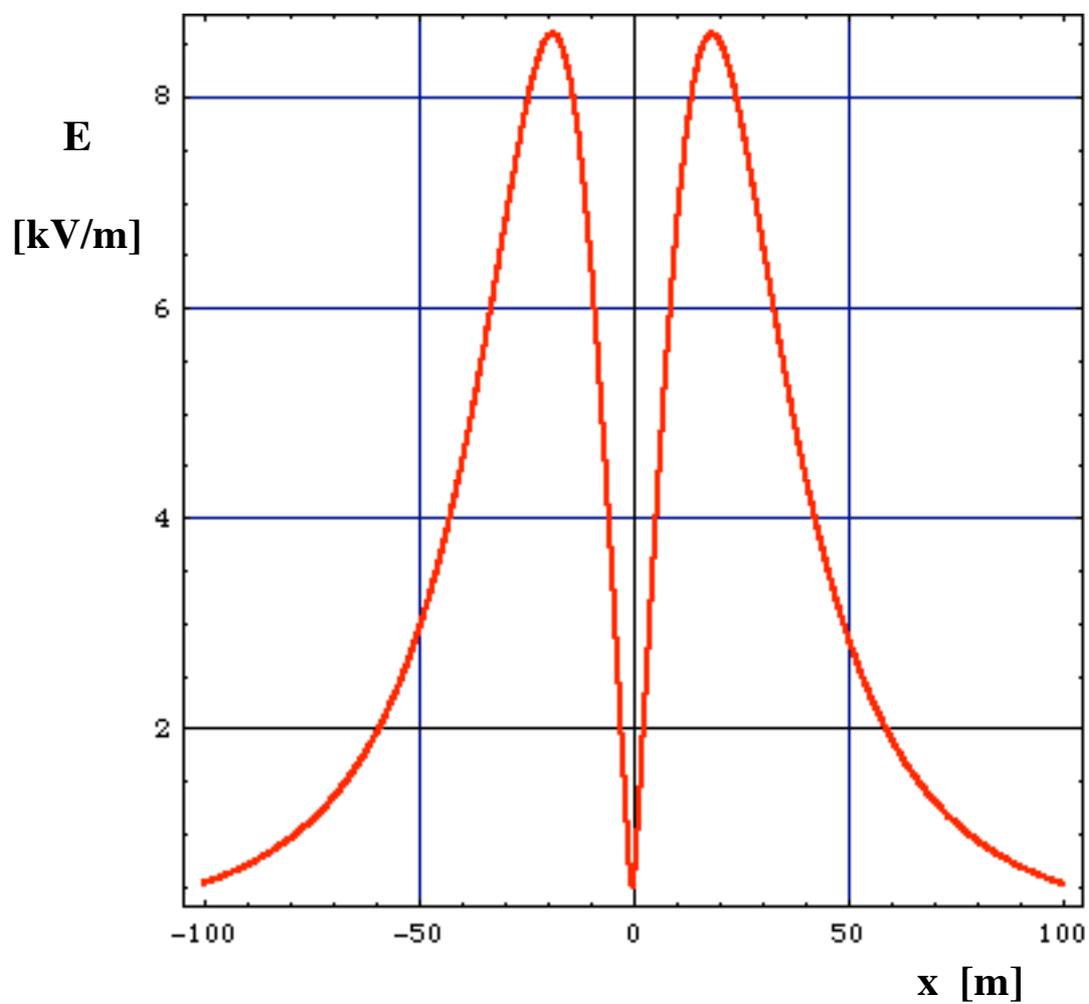
- **A potência característica traduz aproximadamente o limite de potência transmitida (diferentemente do que sucede para distâncias “curtas”).**
- **As condições de maximização de potência característica traduzem também, exata ou aproximadamente:**
 - **Maximização de limite de potência a transmitir.**
 - **Minimização de perdas.**
 - **Minimização de efeito coroa.**
 - **Maximização de tensão de operação viável.**
 - **Minimização de potência reativa em diversas condições de operação.**
 - **Minimização de sobretensões em diversas condições de operação.**



Potência, P (em GW), e potência reativa, Q (em Gvar), no terminal 1 da linha, com tensão $U_1 = 1000$ kV, em função da defasagem, α , e da relação, R , entre módulos das tensões nos terminais 2 e 1.



Perdas, p (em GW), e consumo de potência reativa, q (em Gvar), na linha, com tensão $U_1 = 1000$ kV, em função da defasagem, α , e da relação, R , entre módulos das tensões nos terminais 2 e 1.



Campo elétrico ao nível do solo, a meio do vão, com tensão $U = 1000$ kV.

GEOMETRIA BÁSICA DA LINHA DO EXEMPLO 3

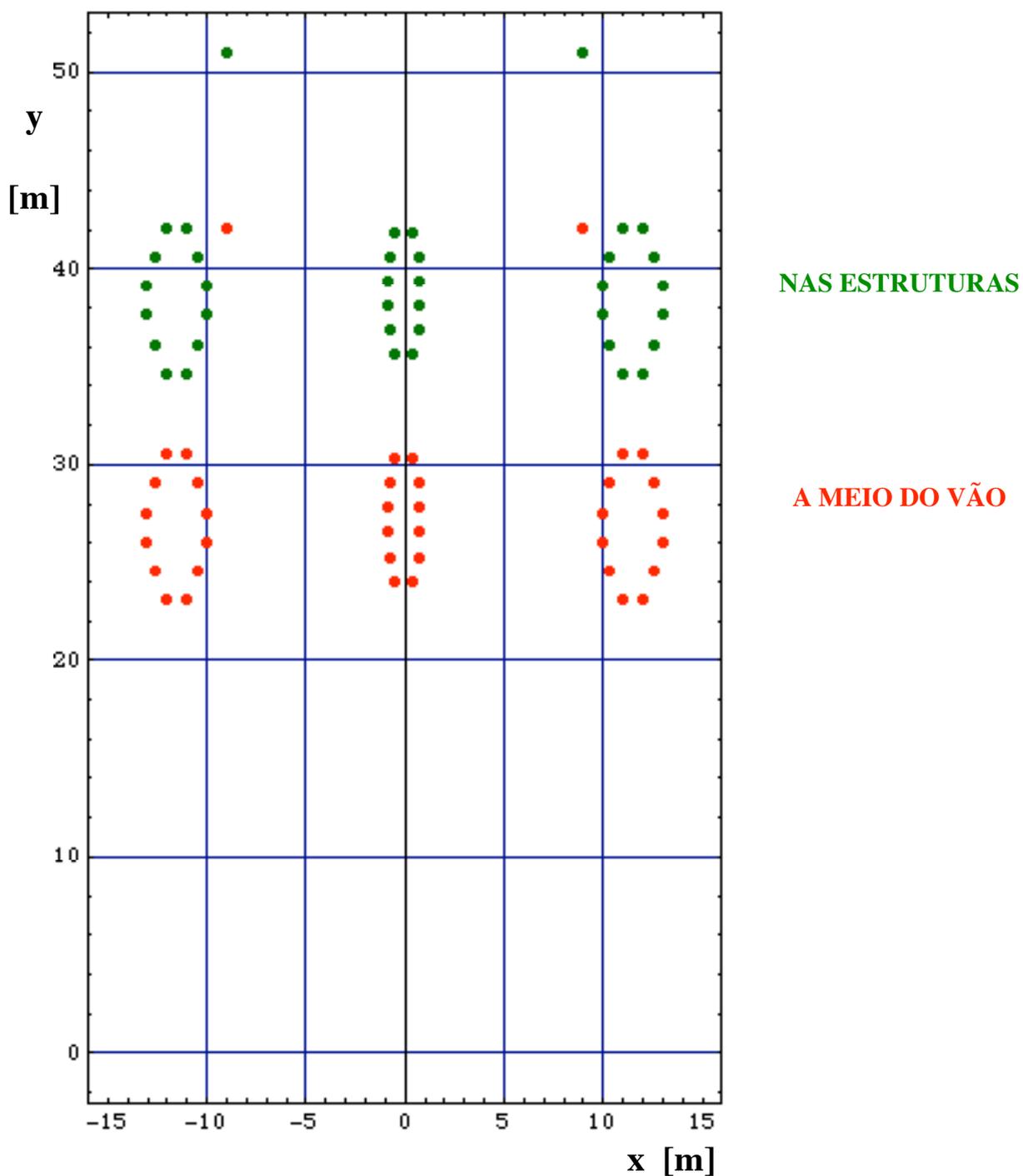


Fig. 1 – Disposição dos condutores, a 25°C , num vão de 500 m, em terreno plano, sem vento.

HIPÓTESE β DE CONCEPÇÃO MECÂNICA

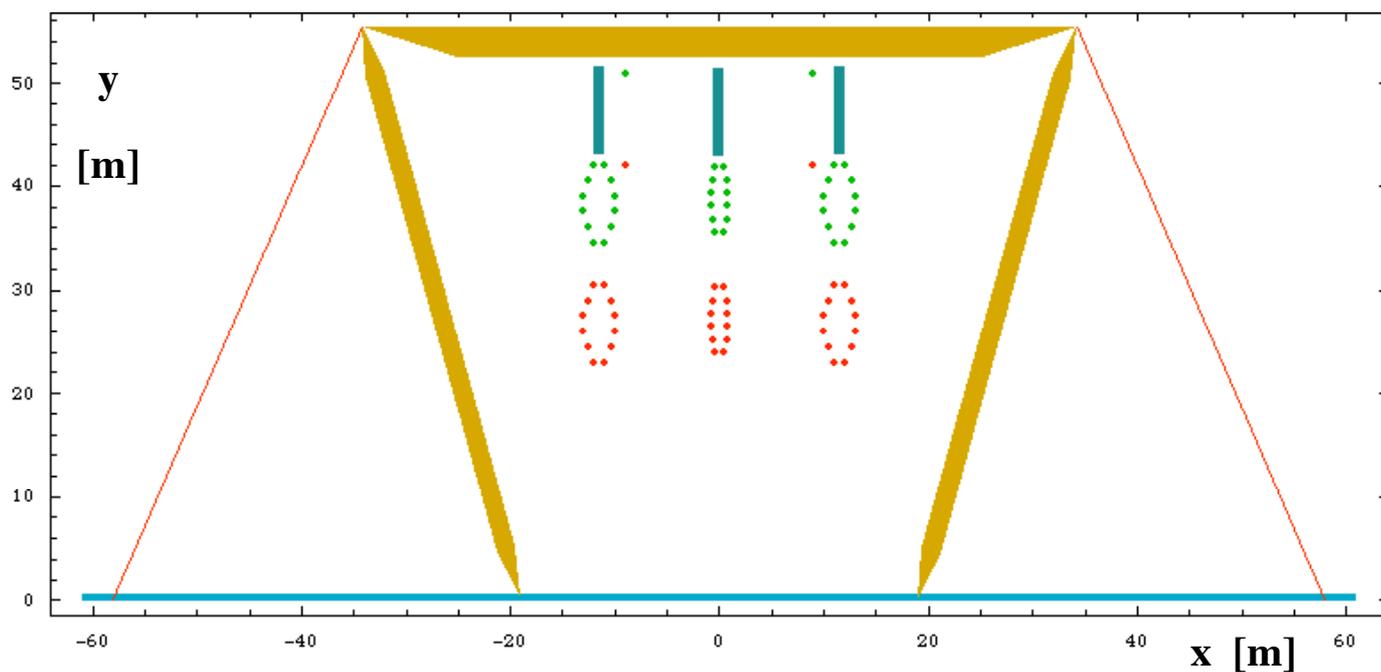


Fig. 2 – Disposição dos condutores e das estruturas estaiadas, a 25 °C, num vão de 500 m, em terreno plano, sem vento.

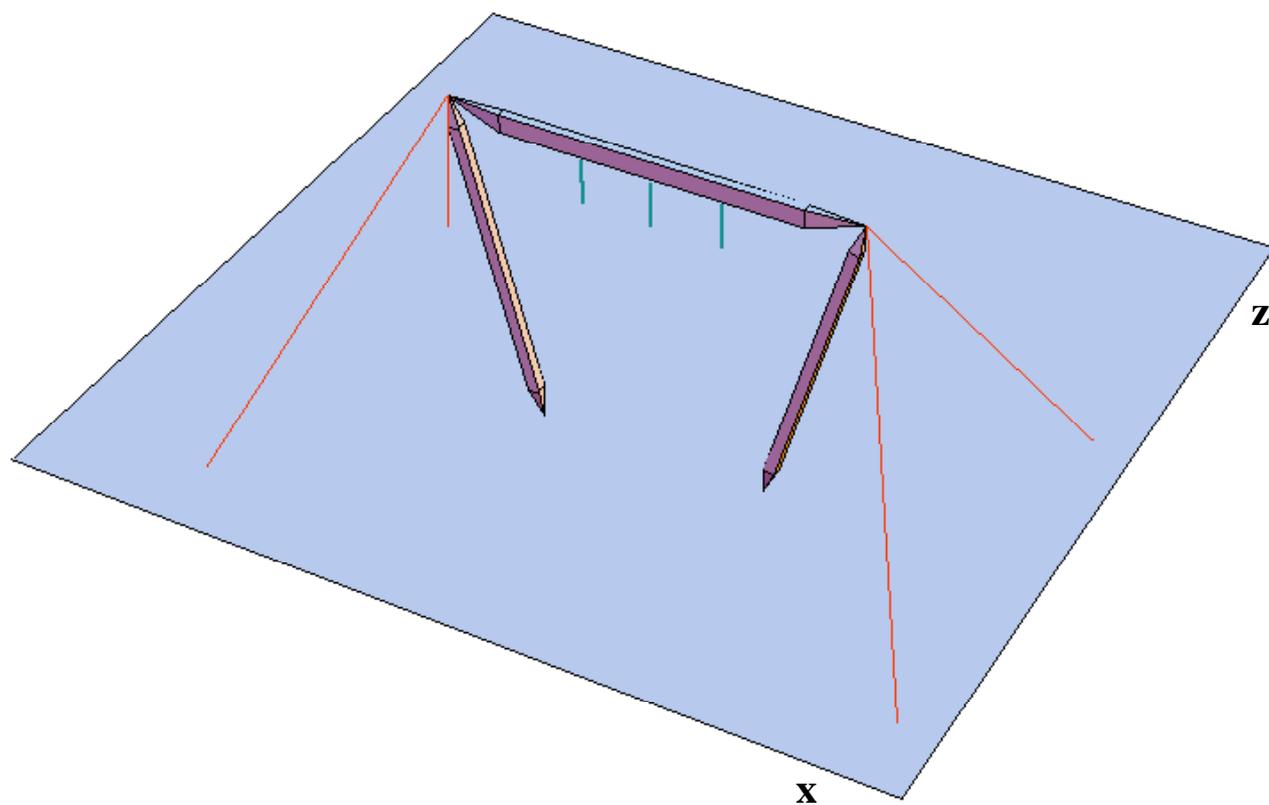


Fig. 3 – Disposição das estruturas estaiadas, a 25 °C, num vão de 500 m, em terreno plano, sem vento.

Rio de Janeiro, 14/07/2006

Carlos Portela