



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GPL-18  
19 a 24 Outubro de 2003  
Uberlândia - Minas Gerais

**GRUPO VII  
GRUPO DE ESTUDO DE PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS - GPL**

**PLANEJAMENTO COM INCERTEZAS - O DESAFIO DO PLANEJAMENTO DA TRANSMISSÃO**

**Jurema Baptistella Ludwig\***

**Leandro Cardoso**

**- FURNAS -**

**RESUMO**

O novo modelo do setor elétrico caracterizou como indicativo o planejamento da oferta de energia, onde a viabilização de novos empreendimentos de geração se dá através de licitações e autorizações, que podem ou não vir a se concretizar, restando ao planejamento da transmissão a difícil missão de estabelecer um plano de expansão sem o conhecimento prévio destas decisões.

Desta forma, sentindo-se a necessidade de novas ferramentas que possibilitem a convivência com este novo desafio e que venham a agregar valor às análises tradicionais de planejamento elétrico, este trabalho propõe a aplicação de diferentes critérios decisórios na procura daquele que mais se adeque as necessidades do planejamento da transmissão considerando incertezas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Planejamento da Transmissão, Cenários, Incerteza, Decisão.

**MOTIVAÇÃO**

O estabelecimento de um plano de expansão da transmissão, no contexto do novo modelo do setor elétrico, que caracterizou como indicativo o planejamento da oferta de energia vem tornando as análises de planejamento mais cuidadosas, abrangentes e estratégicas, de modo a cobrir todo o espectro de possibilidades, face às incertezas, de modo a minimizar perdas e maximizar os ganhos na escolha da melhor alternativa de expansão. Esta dificuldade aponta para a

necessidade de se adotar técnicas especiais de tomada de decisão, com ferramental específico de apoio para análise em ambientes de incerteza.

A prática vigente de planejar a expansão da transmissão de forma determinativa, considerando apenas as informações "verdadeiras" sobre a expansão da geração e as projeções do mercado pode implicar num planejamento da expansão limitado a uma visão de curto prazo, sendo realizado de forma incremental e eliminando a possibilidade de poder incorporar um enfoque econômico, propiciado por uma visão de longo prazo.

Esta proposta consiste na aplicação dos critérios decisórios em dados estruturados com a abrangência de todo espaço estado de possibilidades de ocorrência, simultânea ou não, dos estados da natureza que compõem os cenários, com a finalidade de escolher, independentemente do critério de decisão, a alternativa mais adequada ou um conjunto de alternativas que venham a minimizar perdas e maximizar ganhos.

**1.0 - METODOLOGIA**

Um processo de decisão se constitui basicamente na utilização de um critério de decisão aplicado em dados devidamente estruturados, dado que cada estratégia ( alternativa ) acarreta resultados diferentes ( perdas ou ganhos ) dependendo do evento ( cenário ) que ocorrer.

Decidir sob condições de incerteza significa a escolha, com um determinado critério, de uma dentre as várias estratégias disponíveis e motivadas por um conjunto de eventos, sem que se saiba qual o evento que irá ocorrer. A incerteza com relação a ocorrência de cada um dos

\* FURNAS – Rua Real Grandeza, 219 – sala 1601 – Bloco C – Botafogo – Rio de Janeiro – RJ – CEP 22283-900  
Tel: (0xx21) 2528-4722 – FAX: (0xx21) 2528-4857 - e-mail: [jurema@furnas.com.br](mailto:jurema@furnas.com.br)

eventos possíveis é quantificada através de uma probabilidade.

O processo de decisão, neste caso, deve seguir os seguintes passos:

1. Definir o problema e estabelecer objetivos;
2. Estabelecer cenários em função dos eventos que afetam o planejamento da transmissão;
3. Selecionar as estratégias de transmissão, através das análises tradicionais de planejamento;
4. Relacionar cenários x estratégias de modo a obter as conseqüências, isto é, o custo do investimento associado a cada uma das estratégias;
5. Estruturar o problema;
6. Avaliar as estratégias de transmissão através de critérios de decisão de forma a escolher a que melhor satisfaz aos objetivos; e
7. Implementar a estratégia escolhida e monitorar a sua performance.

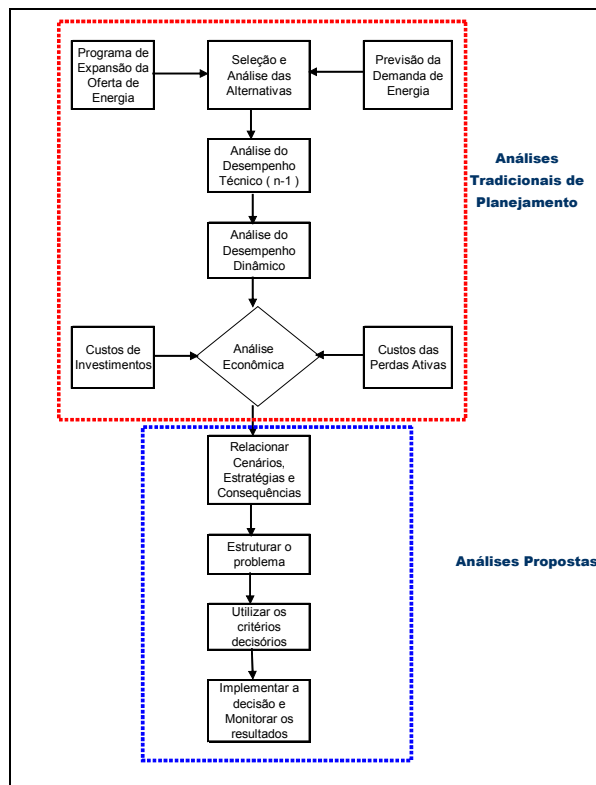


Figura 1 – Fluxograma

## 2.0 - ESTRUTURAÇÃO

Os cenários, estratégias e conseqüências podem ser estruturados de duas formas:

- matriz de decisão; e
- árvore de decisão.

### Matriz de decisão

A 1ª coluna desta matriz apresenta as estratégias vislumbradas, a 1ª linha apresenta os cenários possíveis e a matriz propriamente dita, é composta pelas conseqüências, isto é, pelo somatório dos custos

envolvidos na associação “estratégia x cenário”.

Os custos envolvidos são:

- custo das alternativas: somatório dos custos inerentes à alternativa e os reforços identificados nos estudos de regime permanente tomando-se como base os custos modulares; e
- custo das perdas: custo do diferencial das perdas ôhmicas no sistema de transmissão de interesse, obtidas nas simulações de fluxo de potência.

### Árvore de decisão

A árvore de decisão é uma representação esquemática, bastante útil para apresentar o processo de decisão com múltiplas variáveis, múltiplos objetivos e múltiplas etapas de decisão. Permite indicar, de forma gráfica, e cronológica, um caminho a ser seguido em um processo de decisão, explicitando etapas a serem cumpridas para alcançar o objetivo pretendido.

Cada estratégia de decisão forma um ramo da árvore, que contém os cenários, as probabilidades e os resultados (conseqüências).

## 3.0 - PROBABILIDADES

Com o intuito de abranger todo espaço estado de possibilidades de ocorrência, simultânea ou não, dos estados da natureza que compõem os cenários, adota-se um conjunto de probabilidades para cada um dos estados da natureza que, combinados entre si, de acordo com a estruturação do problema, totaliza todas as possibilidades a serem analisadas.

## 4.0 - CRITÉRIOS DE DECISÃO

Como os critérios de decisão são regras para definir a melhor estratégia e, tomando-se o devido cuidado, por que critérios diferentes podem levar a estratégias diferentes.

### Crítérios com Probabilidades Equiprováveis

1. Critério Max / Min (Wald)

$$\Phi(a_k) = \max_i \min_j (C_{ij})$$

➔ premissa: melhor estratégia apresenta o maior dos investimentos mínimos.

2. Critério Max / Max

$$\Phi(a_k) = \max_i \max_j (C_{ij})$$

➔ premissa: melhor estratégia apresenta o maior dos investimentos máximos.

3. Critério do Min Max Arrependimento (Savage)

Determina-se a matriz custos de oportunidade  $S_{ij}$

$$S_{ij} = \max_k (C_{kj}) - C_{ij}$$

e aplica-se o critério Min / Max

$$\Phi(a_k) = \min_i \max_j (S_{ij})$$

→ premissa: melhor estratégia apresenta o menor dos máximos arrependimentos.

#### Critérios com Probabilidades Distintas

Os critérios utilizados foram:

1. Critério Valor Esperado

$$E(X) = \sum_{i=1}^n x_i P(X = x_i)$$

→ premissa: melhor estratégia apresenta o maior dos valores esperados cujo objetivo é minimização dos investimentos.

2. Decisão baseada na função utilidade

A função utilidade transforma os resultados de um problema decisório em uma unidade de medida denominada nível de satisfação ou utilidade, cujos valores variam de zero ( pior resultado) a 1 ( melhor resultado), descrevendo o perfil do decisor.

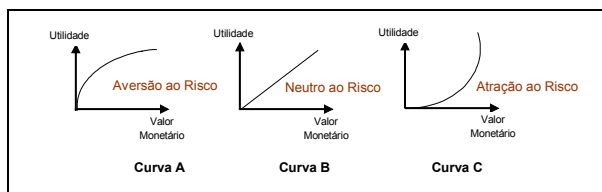


Figura 2 – Curvas de Utilidades

A Figura 2 acima mostra as curvas de utilidade relativas a tipos diferentes de comportamento frente ao risco. No eixo vertical temos a utilidade atribuída por um consumidor a diferentes resultados dispostos no eixo horizontal.

- a curva A mostra um comportamento de aversão ao risco onde o acréscimo de utilidade é decrescente com relação aos acréscimos nos valores dos resultados.
- curva B mostra um comportamento de neutralidade ao risco onde o acréscimo de utilidade é constante com relação aos acréscimos nos valores dos resultados.
- curva C mostra um comportamento de atração ao risco onde o acréscimo de utilidade é crescente com relação aos acréscimos nos valores dos resultados.

→ premissa: melhor estratégia apresenta o maior dos valores médios das utilidades.

## 5.0 - ANÁLISE DE RISCO

Esta análise determina, para todo o espaço de possibilidades de ocorrência dos estados da natureza, o desvio padrão com relação ao valor esperado e o coeficiente de variação.

#### Desvio Padrão

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2 P(X = x_i) - E(X)^2}$$

#### Coeficiente de Variação

$$v = \frac{\sigma}{E(X)}$$

→ premissa: a estratégia de menor risco apresenta o menor desvio padrão e o menor coeficiente de variação.

#### Curva Trade-Off “E(x) x v”

Foi realizada, ainda, uma análise mais detalhada, levando-se em consideração a evolução dos estados da natureza – cenários de geração, do valor esperado e do coeficiente de variação, resultando na curva Trade-off “E(x) x v”.

Cabe lembrar que esta análise é feita para todo espaço estado de possibilidades de ocorrência, o que ocasiona um grande número de soluções viáveis para o problema.

Este conjunto de soluções viáveis atende a critérios conflitantes entre si, isto é, a solução que apresenta o menor valor esperado E(x) certamente resultará no maior coeficiente de variação v.

Desta forma, para que possamos obter um conjunto de soluções viáveis que atendam aos critérios estabelecidos, devemos avaliar e eliminar as soluções que são dominadas por outras com melhor desempenho em termos de valor esperado e coeficiente de variação – conceito de Dominância.

O conjunto de soluções viáveis não dominadas ou não inferiores são chamadas Pareto – ótimas e se situam sobre a curva de eficiência econômica, conforme Figura 3.

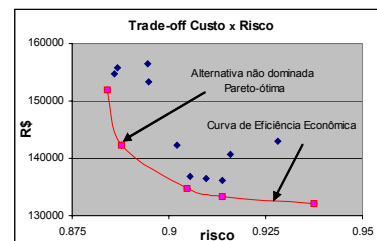


Figura 3 - Curva Trade-Off “Custo x Risco”

## 6.0 - ESTUDO DE CASO

Como este trabalho foi realizado concomitantemente com as análises tradicionais de planejamento elétrico que definiram o plano de expansão do sistema de transmissão do estado do Mato Grosso, utilizaremos este caso para demonstrar o que se propõe.

O estudo teve como objetivo identificar e analisar os requisitos e as opções de expansão de transmissão ante às perspectivas de exportação de geração pelo Mato Grosso, com ênfase nos novos cenários de geração bem como os cenários provenientes da interligação com o estado de RONDÔNIA,.

As principais incertezas que se apresentaram com relação à geração e/ou importação de energia são:

- **UTE Cuiabá II** - indefinição quanto ao montante de geração e a data para entrada em operação;
- **interligação com o sistema Acre-Rondônia** - indefinição quanto aos montantes de importação/exportação e data de entrada em operação;
- **aproveitamento do Rio Sangue** - indefinição quanto ao montante inventariado para exploração e aos prazos para licitação da ANEEL;
- **importação de energia proveniente de usinas à gás na Bolívia** – indefinição quanto ao montante de energia e concretização das consultas;
- **aproveitamento dos Rios Verde, Claro e Corrente** - indefinição quanto ao montante inventariado para exploração, ponto de conexão e aos prazos para licitação da ANEEL.

Os cenários destacam-se pela combinação de 4 estados da natureza:

- ocorrer somente as usinas que estão em construção/licitação e paralização do investimento em novas fontes de energia no Mato Grosso,
- ocorrer a entrada em operação da UTE Cuiabá II,
- ocorrer a interligação do sistema Acre-Rondônia com o sudeste e
- ocorrer o aproveitamento do Rio Sangue.

Foram visualizados, então, os cenários, descritos a seguir:

- Cenário 1 – Base;
- Cenário 2 – Interligação Acre-Rondônia em 2005;
- Cenário 3 – Interligação Acre-Rondônia em 2005 e UTE Cuiabá II em 2006;
- Cenário 4 – Interligação Acre-Rondônia em 2005 e aproveitamento do Rio Sangue em 2007; e
- Cenário 5 – Interligação Acre-Rondônia em 2005, aproveitamento do Rio Sangue em 2007 UTE e Cuiabá II em 2008.

**Alternativas**

As alternativas analisadas, já incorporando os reforços identificados nas análises em regime permanente e regime dinâmico, estão descritas a seguir.

- Expansão em 230 kV;
- Expansão híbrida em 230 kV → 500 kV;
- Expansão em 500 kV; e
- Expansão híbrida em 500 kV → 230 kV.

**Matriz de decisão**

A Tabela 1 apresenta a matriz de decisão utilizada na análise.

Tabela 1 – Matriz de Decisão

ESTRATÉGIAS	CENÁRIOS - custo das estratégias+perdas				
	2004	2005	2006	2007	2008
	Base	Base Interlig.	Base Interlig. Cuiabá	Base Interlig. Rsangue	Base Interlig. Cuiabá Rsangue
230 kV	71,173	278,178	408,217	295,820	369,772
230 kV/500kV	71,173	279,409	422,839	297,051	382,771
500 kV	71,173	261,970	407,037	261,970	377,209
500 kV/230kV	71,173	273,881	407,603	273,881	378,741

\* Custo: (US\$\*1000)

**Probabilidades Associadas**

Com o intuito de abranger todo espaço estado de possibilidades de ocorrência, simultânea ou não, dos estados da natureza que compõem os cenários, foi realizada uma análise bastante abrangente, onde adotou-se para cada um dos 4 estados da natureza, o conjunto de probabilidades:

0 0,25 0,5 0,75 1

que, combinados entre si, totalizaram 375 casos a serem analisados.

**Árvore de Decisão**

A Figura 4 mostra a árvore de decisão com as 4 alternativas e os vários caminhos possíveis para os cenários estudados.

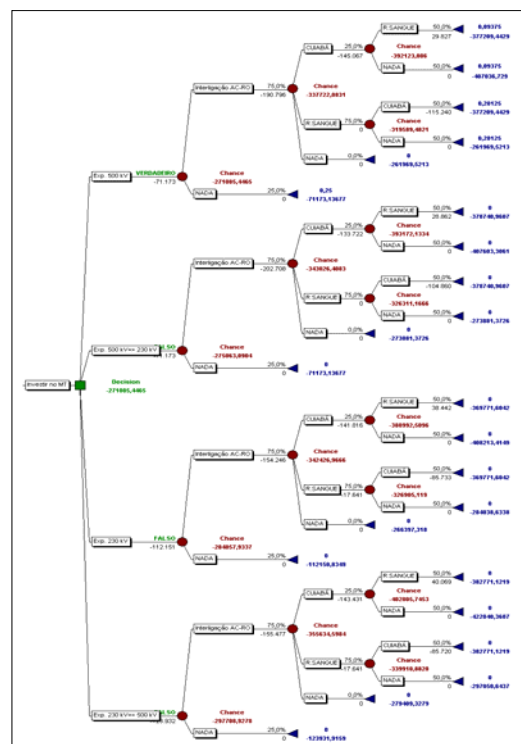


Figura 4 – Árvore de Decisão

### Critérios com Probabilidades Equiprováveis

A Tabela 2 sintetiza os resultados destas análises, considerando o ranqueamento das alternativas.

Tabela 2 – Critérios com Probabilidades Equiprováveis

CRITÉRIOS	CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS			
	1	2	3	4
MAXMIN	500 kV	500 kV/230kV	230 kV	230 kV/500kV
MAXMAX	230 kV/500kV	230 kV	500 kV/230kV	500 kV
MINMAX Arrependimento	500 kV	500 kV/230kV	230 kV	230 kV/500kV

### Função Utilidade

A figura 5 mostra a função utilidade que serviu de base para as análises de decisão, para os diferentes tipos de comportamento frente ao risco.

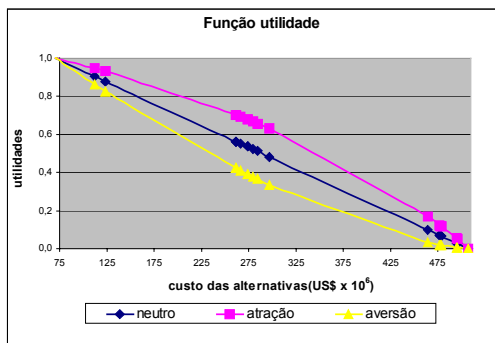


Figura 5 – Função Utilidade

### Critérios com Probabilidades Distintas

Os resultados alcançados com estes critérios estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 – Critérios com Probabilidades Distintas

CRITÉRIOS	CLASSIFICAÇÃO DAS ALTERNATIVAS			
	1	2	3	4
VALOR ESPERADO	500 kV	500 kV/230kV	230 kV	230 kV/500kV
F.Utilidade	500 kV	500 kV/230kV	230 kV	230 kV/500kV
AVERSÃO AO RISCO	500 kV	500 kV/230kV	230 kV	230 kV/500kV

### Curva Trade-Off “E(x) x v”

A Figura 6 mostra o todo conjunto de soluções viáveis para o problema bem como o conjunto de soluções viáveis não dominadas ou não inferiores são chamadas Pareto – ótimas.

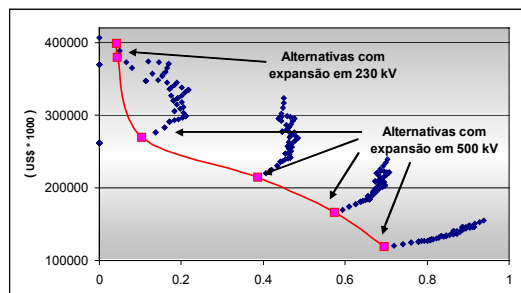


Figura 6 – Trade-Off “E(x) x v”

### 7.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma proposta de aplicação de diferentes critérios decisórios na procura daquele que mais se adequa as necessidades do planejamento da transmissão considerando incertezas.

A escolha da expansão do sistema de transmissão do estado do Mato Grosso em 500 kV está aderente às análises tradicionais de Planejamento que através da análise econômica das alternativas já indicava esta expansão como a mais atrativa. Porém, como as diferenças eram marginais a seleção utilizando a metodologia tradicional ficou prejudicada, indicando a necessidade de um ferramental adicional que levasse em conta o ambiente de incertezas.

A aplicação desta proposta mostrou, também, que outras fontes de incerteza, por exemplo, taxa de crescimento da demanda, pode ter tratamento semelhante ao aqui analisado, desde que seja estruturado de maneira conveniente.

### 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Expansão do Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso – CCPE/CTET 027-2001
- (2) Expansão do Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso – Avaliação de Cenários Adicionais - CCPE/CTET 045-2002
- (3) Expansão do Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso – Relatório Final - CCPE/CTET 08-2002
- (4) Referência de Custos de LT's e SE's de AT e EAT da ELETROBRÁS, publicado em junho de 1999
- (5) Plano Indicativo de Transmissão da Região Sudeste/Centro-Oeste – Período 2000/2009 – CCPE/CTET - 10/00 – junho 2000
- (6) Pamplona, E.O. / Montevechi, J.A.B. – Engenharia Econômica II, Itajubá, 1997
- (7) Cazaroto Filho, N. / Kopittke, B. H. – Análise de Investimentos, 9ª edição, São Paulo, ed. Atlas, 2000
- (8) Shimizu, T. – Decisão nas Organizações, São Paulo, ed. Atlas, 2001
- (9) Schuyler, J. - Risk and Decision Analysis in Projects – second edition, Project Management Institute, 2001
- (10) R.Keeney, H.Raiffa - Decision with multiple objectives: preferences and values tradeoff — N.York: J.Wiley, 1976
- (11) Morozowski, M; Bordin, Schuch, G – “Novo enfoque para planejamento de sistemas elétricos em ambiente competitivo” – V SEPOPE, maio 1996.
- (12) A.C.G. Melo, B.G. Gorenstin, A.M. Oliveira, M.E.P. Macieira, M.S. Reis, S.N.G. Faria – “Análise financeira de projetos de investimentos sob enfoque de incertezas” - XV SNTTEE, outubro 1999.
- (13) B.G. Gorenstin, P. di Novella, J.P. Costa, N. Paciornik – “Planejamento sob incertezas” – XIII SNTTEE, 1995.
- (14) R.N.F. Filho, M.Th. Schilling, P. Gomes, J.C.O. Aires – “Enfrentando incertezas no planejamento da transmissão de sistemas de potência” – V SEPOPE, maio 1996.

- (15) L.A.F. Manso, A.M. Leite da Silva – “Planejamento da expansão de sistemas de potência baseado em critérios de confiabilidade” – XVI SNPTEE, outubro 2001.
- (16) Z.S. Machado Jr, N. Maculan, J.P. Costa, S. Binato, L.A.Terry – “Planejamento da expansão da oferta de energia elétrica considerando incertezas e garantia de suprimento”- VIII SEPOPE, maio 2002.
- (17) D.L.S. Tortelly, J.C.O.Aires, P.M.A. Senra, M.V.F. Pereira, J.C.O. Mello, B.G. Gorenstin – “Expansion planning under uncertainty and competition” – V SEPOPE, maio 1996.
- (18) R.C.G. Teive, L.G.S. Fonseca – “Integrated power systems planning utilizing expert systems “ – V SEPOPE, maio 1996.
- (19) J.C.O. Mello, A.C.G. Melo, E.Salgado, M.Roitman – “Um enfoque avançado de planejamento em ambientes competitivos”- XV SNPTEE, outubro 1999.
- (20) E.L. Silva, R.N. Fontoura, H.A. Gil – “Planejamento da expansão da transmissão em ambiente competitivo” – XV SNPTEE, outubro 1999.
- (21) A.C.G. Melo e outros – “Problemas e estratégias emergentes em sistemas de potência” – V SEPOPE, maio 1996.
- (22) J.C.O Aires, M.A. Araújo, L.M.V.G. Pinto, R.N. Fontoura – “Novas técnicas de planejamento da expansão” – V SEPOPE, maio 1996.
- (23) J.O. Siqueira, R. Sassatani – Formação do preço de opção baseada no valor da informação : uma abordagem bayseana” - IV SEMEAD, outubro 1999.
- (24) A.C.G. Melo, A.M. Oliveira, M.E.P. Macieira, R.P. Caldas, A.C.C. Pinhel, L.L. Gomes, D. Jardim – “Avaliação do impacto do mecanismo de realocação de energia no risco financeiro de projetos hidroelétricos”- XVI SNPTEE, outubro 2001.
- (25) J.R.Paes de Barros – “Uma metodologia de Planejamento da Expansão da Transmissão baseada em Trade-Off e Indicador de Mérito Econômico”- Tese de Mestrado UFPE – dezembro de 2000.