



GRUPO IX

GRUPO DE ESTUDO DE OPERAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS (GOP)

AVALIAÇÃO DA ENERGIA SECUNDÁRIA DE SISTEMAS HIDRELÉTRICOS

Marcelo Augusto Cicogna*

Secundino Soares Filho

UNICAMP

RESUMO

Este artigo apresenta um estudo sobre a disponibilidade de energia em sistemas hidrelétricos de geração com vistas a estimar a energia secundária desses sistemas. O estudo é baseado no levantamento de curvas de permanência da geração hidrelétrica mensal utilizando um modelo de simulação sobre o histórico de vazões e usando diferentes políticas operativas. O estudo foi aplicado de forma progressiva a um sistema teste constituído de quatro grandes usinas em cascata do sistema sudeste brasileiro de modo a levantar a relação entre a disponibilidade de energia e a capacidade instalada do sistema. As conclusões do estudo indicam uma grande disponibilidade de energia secundária e apontam algumas possibilidades de aproveitamento econômico dessa energia.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas hidrelétricos, Disponibilidade de geração, Energia secundária, Otimização, Simulação.

1.0 - INTRODUÇÃO

O sistema de energia elétrica brasileiro é fortemente hidrelétrico (~95%) e deverá continuar com essa característica no futuro próximo pois somente cerca de 1/4 do potencial hidrelétrico estimado no país já foi explorado [3].

A energia hidrelétrica, ao contrário da energia termelétrica, apresenta uma disponibilidade variável em função das condições hidrológicas. Enquanto as usinas termelétricas tem sua disponibilidade avaliada em função da sua capacidade instalada e de fatores de indisponibilidade forçada e programada (manutenção), as usinas hidrelétricas tem a sua disponibilidade

principalmente dependente das condições hidrológicas correntes.

Para avaliar a disponibilidade energética de uma usina hidrelétrica, um procedimento comum é baseado nos conceitos de energia firme e energia secundária. A energia firme é a máxima energia que a usina pode produzir continuamente caso ocorra qualquer condição hidrológica já registrada no passado. A energia secundária é a energia excedente à energia firme que é disponível quando as condições hidrológicas são favoráveis [1].

Durante décadas o planejamento da expansão da geração do sistema brasileiro foi baseado no conceito de energia firme. Vale dizer que o crescimento do mercado era atendido com o crescimento da energia firme do sistema através da incorporação de novas usinas hidrelétricas. Pouca ou nenhuma atenção era dada à energia secundária do sistema, que também crescia, mas cuja utilização econômica sempre foi marginal através de modalidades como Energia Garantida por Tempo Determinado ou Energia de Substituição Térmica. Mais recentemente, o conceito sucedâneo de energia garantida vem cumprindo o papel de caracterizar a disponibilidade de energia no sistema.

Este trabalho propõe avaliar a disponibilidade de energia de sistemas hidrelétricos. Baseado em resultados de um modelo de simulação com decisões tomadas a partir de modelos de otimização, foram levantadas curvas de permanência da geração hidrelétrica, as quais fornecem informação sobre as quantias de energia disponíveis e suas frequências de ocorrência. Essa informação é fundamental para a implementação de uma política de aproveitamento racional da energia hidrelétrica do sistema brasileiro.

O artigo começa definindo os conceitos envolvidos na avaliação da disponibilidade de energia em sistemas

* Departamento de Engenharia de Sistemas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação,
Universidade Estadual de Campinas

hidrelétricos, entre eles os conceitos de energia firme, energia secundária e energia garantida. Em seguida apresenta o procedimento utilizado para levantar a disponibilidade de energia em sistemas hidrelétricos, aplicando-o de forma progressiva a um sistema teste constituído de quatro importantes usinas em cascata do sistema sudeste brasileiro. Finalmente, os resultados são analisados em termos de energia mínima, máxima e média disponíveis, e a sua relação com a capacidade instalada do sistema. Algumas possíveis utilizações para o aproveitamento econômico dessa energia são apresentadas.

2.0 - CONCEITOS

A disponibilidade de energia em uma usina hidrelétrica depende do histórico de vazões afluentes a ela e da forma como a usina é operada. Se o reservatório for mantido cheio, operando-se a usina como se fosse a fio d'água, a disponibilidade de energia será determinada pela disponibilidade das energias afluentes históricas, limitada pela capacidade de turbinagem da usina. Nesse caso, haverá considerável desperdício de energia vertida nos períodos de cheia. Se, por outro lado, o reservatório operar convenientemente de forma a evitar esse desperdício, a disponibilidade de energia da usina será maior. A disponibilidade, portanto, depende da forma como a usina é operada.

A disponibilidade de energia no sistema hidrelétrico brasileiro foi por muitos anos baseada nos conceitos de energia firme e energia secundária [4]:

- A Energia Firme de um sistema gerador é o maior valor possível de energia capaz de ser produzido continuamente pelo sistema, sem ocorrência de déficit, no caso de repetição das afluições do registro histórico.
- A Energia Secundária de um sistema gerador é o excesso de energia, em relação à energia firme, possível de ser produzido nas seqüências hidrológicas favoráveis. É usualmente calculada como a diferença entre a geração média em todo o histórico de vazões (média a longo termo) e a energia firme.

Decorre dessas definições que a disponibilidade de energia hidrelétrica caracterizada pela energia firme pressupõe implicitamente uma política operativa de geração constante no sistema (máxima sem déficit). A energia secundária, por sua vez, é representada pela energia vertida causada por essa forma de operar.

A partir de meados dos anos 80, a política operativa adotada no setor elétrico brasileiro mudou do antigo critério determinístico da curva limite para o critério probabilístico da programação dinâmica estocástica que tem como objetivo minimizar o custo da

complementação termelétrica e do déficit. Essa política operativa não assegura geração constante como pressupõe a energia firme. Surge assim o conceito de energia garantida em substituição ao conceito de energia firme, e que representa a energia hidrelétrica disponível com garantia de 95% do atendimento da demanda.

A seguir é apresentado o procedimento adotado nesse trabalho para a avaliação da disponibilidade de energia em sistemas hidrelétricos. O objetivo é analisar como varia essa disponibilidade em função da política de operação adotada e da configuração do sistema gerador.

3.0 - PROCEDIMENTO

O levantamento da disponibilidade de energia nos sistemas hidrelétricos analisados nesse trabalho foi determinada através da simulação da operação desses sistemas sobre o histórico de hidrologias registradas. Foram utilizadas três diferentes políticas operativas:

- Otimização Determinística (OD): A política OD é obtida por um modelo de otimização determinístico a usinas individualizadas. Como o modelo pressupõe o conhecimento exato das vazões futuras, seu resultado é um limitante superior da disponibilidade real do sistema.
- Programação Dinâmica Estocástica (PDE): A política PDE representa o sistema por um modelo equivalente que transforma variáveis hidráulicas em variáveis energéticas. Um modelo estocástico paramétrico autoregressivo de ordem 1 PAR(1) é ajustado à série histórica de energias afluentes e a técnica de programação dinâmica estocástica é utilizada para determinar as decisões de operação. A agregação das usinas em modelo equivalente e a desagregação das decisões operativas para cada uma das usinas é feita assumindo a regra de operação dos reservatórios em paralelo. Esta é, a grosso modo, a política operativa adotada pelo setor elétrico brasileiro nas últimas décadas [2] e [6].
- Otimização Determinística com Vazões Previstas (ODVP): A política ODVP é obtida pelo modelo de otimização determinístico alimentado por vazões previstas usando o modelo estocástico PAR(1). Este procedimento de previsão-otimização é repetido a cada intervalo de tempo (mês) durante a simulação para fazer frente aos desvios entre os valores previstos e verificados das vazões.

O modelo de otimização determinístico usado nas políticas OD e ODVP foi especialmente desenvolvido para resolver esse problema e utiliza um algoritmo de fluxo em rede não linear com arcos capacitados [5].

Para se levantar um conjunto substancial de dados foi feita uma simulação sobre todo o histórico de vazões utilizando as diferentes políticas operativas descritas anteriormente. O histórico de vazões considerado foi constituído pelas ocorrências hidrológicas entre os anos de 1931 a 1989.

A informação de interesse nas simulações foi a geração hidráulica mensal dos sistemas. O conjunto total de gerações mensais foi ordenado numa curva de permanência, como ilustra a Figura 1, destacando-se os valores de geração máxima, média e mínima.

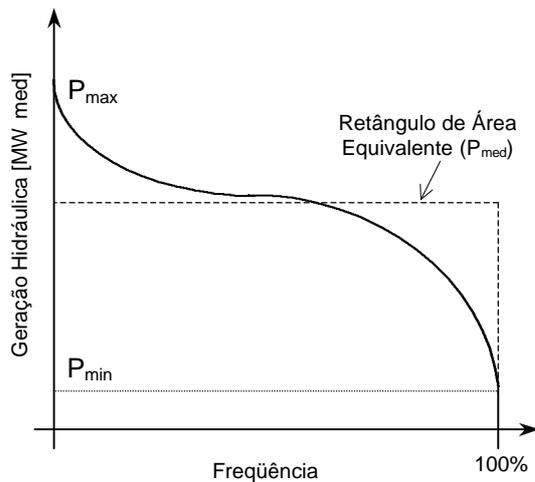


FIGURA 1. Curva de permanência

A seguir é apresentado o estudo de caso realizado com quatro grandes usinas hidrelétricas em cascata do sistema sudeste brasileiro.

4.0 - ESTUDO DE CASO

O sistema de usinas escolhido para o estudo é composto de usinas dos rios Grande e Paraná, todas localizadas na região sudeste. A FIGURA 2 apresenta um esquema da localização das usinas na cascata.

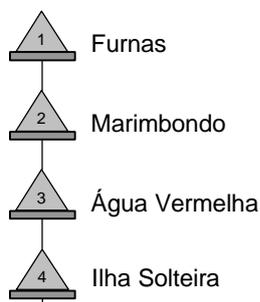


FIGURA 2. Usinas utilizadas nos estudos

A potência instalada de cada usina e o respectivo volume útil de seu reservatório estão apresentados na TABELA 1.

Os casos analisados consideram a configuração de usinas da cascata de forma progressiva. Pretende-se assim verificar o comportamento da disponibilidade de energia quando o sistema gerador sofre incrementos de capacidade instalada. A TABELA 2 apresenta um resumo dos dados dos casos estudados.

TABELA 1. Dados das Usinas

Usinas	Potência Instalada [MW]	Volume Útil [hm ³]
1 Furnas	1312	17217
2 Marimbondo	1488	5280
3 Água Vermelha	1380	5169
4 Ilha Solteira	3240	5516

TABELA 2. Estudos realizados

Configurações	Usinas	Potência Instalada [MW]
1	1	1312
2	1, 2	2800
3	1, 2, 3	4180
4	1, 2, 3, 4	7420

5.0 - RESULTADOS

A partir das configurações do sistema gerador apresentadas no item anterior, fez-se uma simulação destes sistemas segundo cada uma das políticas operativas adotadas neste trabalho. Para cada simulação determinou-se a curva de permanência da geração hidráulica ordenando-se os valores de geração obtidos na simulação.

Os resultados foram obtidos utilizando-se um sistema de apoio ao planejamento energético (SAPE) que permite configurar modelos de simulação, otimização e previsão no estudo de sistemas hidrotérmicos de potência [7].

A TABELA 3 apresenta um resumo dos resultados obtidos nas simulações com as políticas OD, PDE e ODVP para cada uma das quatro configurações do sistema gerador e apresenta também os valores de energia firme para cada configuração.

TABELA 3. Resumo numérico dos resultados

	OD				ODVP				PDE			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
P_{mim}	406	994	1689	2999	153	390	677	1857	136	616	637	1045
P_{max}	1089	2572	3980	7145	1299	2765	4149	7230	1299	2765	4133	7309
P_{med}	721	1658	2766	4860	716	1632	2678	4721	686	1538	2578	4549
E_{firme}	523	1120	1857	3308	523	1120	1857	3308	523	1120	1857	3308

Valores em MW médios

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam as curvas de permanência da geração hidráulica segundo as políticas OD, ODVP e PDE, respectivamente, para os estudos com capacidade crescente do sistema gerador.

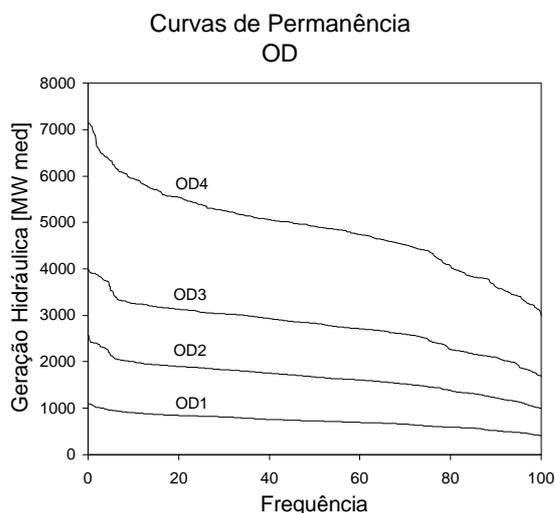


FIGURA 3. Curvas de permanência para a política OD para cada uma das configurações da cascata estudada.

Analisando as Figuras 3, 4 e 5 é possível observar que as curvas de permanência vão se tornando mais íngremes com a ampliação da capacidade instalada do sistema, o que sugere que a participação da energia secundária é crescente com a capacidade instalada.

Nota-se também que as políticas ODVP e PDE possuem gerações mínimas inferiores a política OD principalmente para a configuração da cascata com quatro usinas. Se para as políticas ODVP e PDE a geração mínima for utilizada para o cálculo da energia secundária esta possuirá valores vultuosos. Deve-se então, comparar a energia média produzida por uma determinada política com a energia firme do sistema gerador em foco.

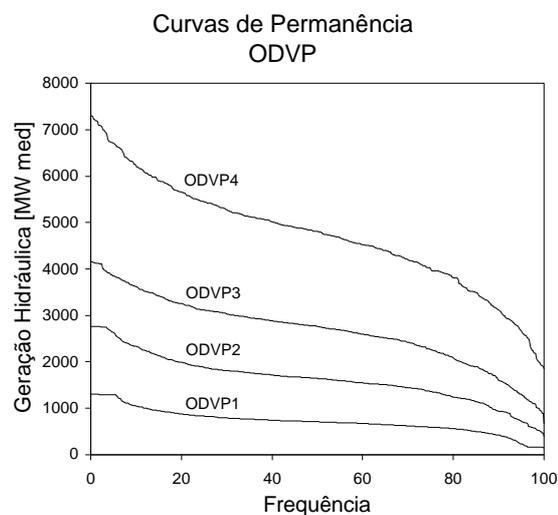


FIGURA 4. Curvas de permanência - ODVP.

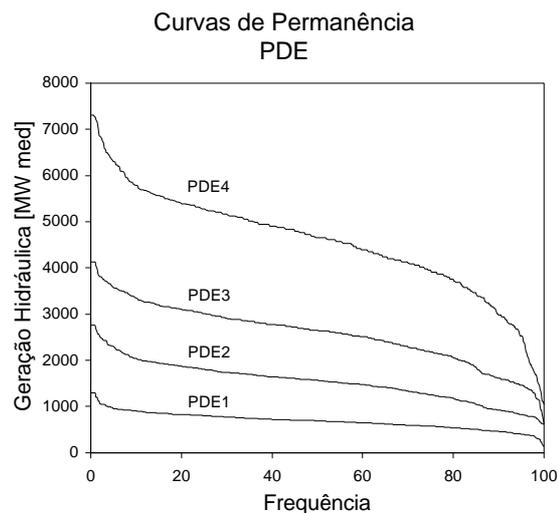


FIGURA 5. Curvas de permanência - PDE.

A Figura 6 apresenta as curvas de permanência da geração hidráulica segundo as diferentes políticas de operação para a configuração de quatro usinas.

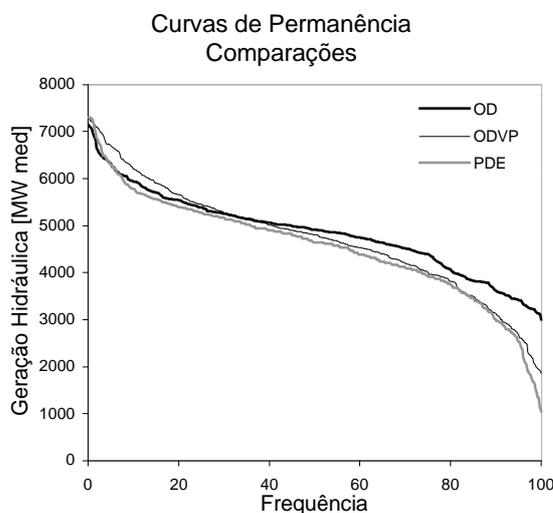


FIGURA 6. Comparação entre as curvas de permanência de geração hidráulica obtidas com as políticas OD, ODVP e PDE para o estudo com quatro usinas.

Note que a curva de permanência da política OD é superior a curva de permanência das políticas PDE e ODVP para a maioria das hidrologias, sobretudo para aquelas menos favoráveis. Note também que a curva de permanência da política OD é a que se apresenta menos íngreme das três, o que era esperado uma vez que essa política pressupõe o conhecimento das vazões futuras e portanto pode homogeneizar melhor a oferta de energia no sistema.

Outra conclusão que se pode retirar da Figura 6 é que a política ODVP apresenta uma disponibilidade de energia sempre superior a obtida pela política PDE, especialmente nos períodos de cheia. Esse resultado ocorre para todas as configurações estudadas, mostrando uma superioridade consistente dessa política em relação a política adotada no setor elétrico brasileiro.

A curva de permanência fornece informação sobre as frequências associadas às disponibilidades energéticas do sistema, informação fundamental para qualquer política de exploração econômica dessa energia. A partir da Figura 6, utilizando praticamente qualquer uma das políticas consideradas, podemos concluir que em 30% das situações o sistema pode gerar uma energia superior a 5200 MW médios.

As proporções entre os valores de energia média e energia firme em relação a potência instalada para os sistemas geradores estudados estão apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente.

TABELA 4. Energia Média x Potência Instalada

Políticas	$P_{med}/(Pot. Inst.)$			
	1	2	3	4
OD	54,95%	59,21%	66,17%	65,50%
ODVP	54,57%	58,29%	64,07%	63,63%
PDE	52,29%	54,93%	61,67%	61,31%

TABELA 5. Energia Firme x Potência Instalada

$P_{firme}/(Pot. Inst.)$			
1	2	3	4
39,86%	40,00%	44,43%	44,58%

As Tabelas 4 e 5 mostram que a relação entre energia firme e potência instalada gira em torno de 40% para os sistemas estudados ao passo que a energia média disponível varia em torno de 60% da potência instalada. Note que tanto a energia média quanto a energia firme aumentam com o acréscimo de potência instalada no sistema gerador. Baseados nesse números podemos concluir que a energia secundária dos sistemas considerados situa-se em algo próximo a 20% da potência instalada, um valor que estendido para o sistema interligado brasileiro apontaria para uma disponibilidade de 12.000 MW médios. Se considerarmos que a maior usina em operação no mundo, Itaipú, possui uma capacidade instalada de 12600 MW, a energia secundária disponível no sistema gerador brasileiro é possivelmente superior a geração de Itaipú, uma vez que esta não permite a geração intermitente de sua potência instalada.

6.0 - APROVEITAMENTO

O aproveitamento econômico da energia secundária é um fator fundamental para o uso racional dos recursos energéticos do país. Duas utilizações são aqui apresentadas:

- Comercialização da energia secundária junto a consumidores interruptíveis. Esta comercialização poderia ser feita a partir da criação de mercados de energia oferecida segundo diferentes frequências de interrupção no fornecimento. A frequência e os valores de energia oferecidas nestes mercados são estimados diretamente das curvas de permanência anteriormente apresentadas. Uma vantagem deste tipo de aproveitamento econômico da energia secundária é que ela não requer novos investimentos em geração e/ou transmissão do

sistema. Uma ilustração da determinação desses mercados e de suas garantias de oferecimento pode ser visualizada na FIGURA 7.

- Firmar energia secundária via construção de um parque termelétrico complementar. Este tipo de aproveitamento econômico aumenta a energia firme do sistema via fornecimento de energia termelétrica durante as condições hidrológicas mais críticas. A FIGURA 8 ilustra o processo de aumento de energia firme. As curvas de permanência poderiam estimar o custo de combustível necessário a operação desse parque termelétrico em regime de complementação.

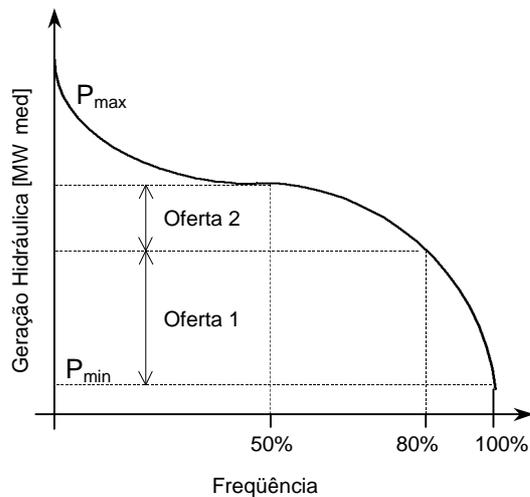


FIGURA 7. Esquema de aproveitamento da energia secundária segundo oferecimento de mercados de energia interruptível.

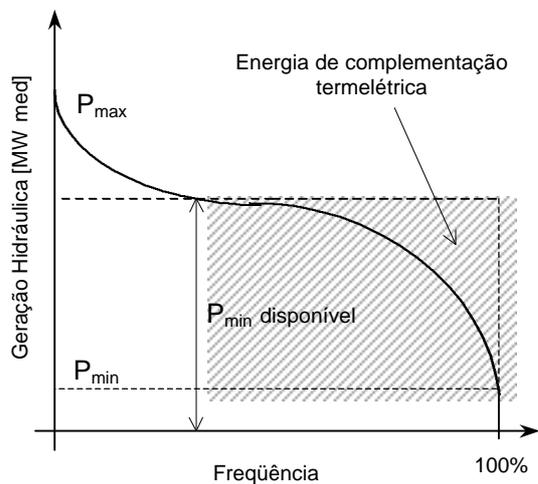


FIGURA 8. Esquema de aproveitamento da energia secundária segundo complementação termelétrica

7.0 - CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um estudo sobre a avaliação da disponibilidade de energia em sistemas hidrelétricos. O estudo é baseado no levantamento de curvas de permanência para a geração hidrelétrica obtidas a partir de um modelo de simulação e segundo diferentes políticas operativas. O estudo foi aplicado de forma progressiva a um sistema teste constituído de quatro grandes usinas em cascata do sistema sudeste brasileiro. Os resultados indicam um potencial expressivo de energia secundária no sistema assim como uma relação crescente com a capacidade instalada do sistema.

Qualquer política racional para a exploração dos recursos energéticos do setor elétrico brasileiro não pode continuar a ignorar esse enorme potencial de energia secundária disponível cujo aproveitamento não requer novos investimentos adicionais.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o apoio da FAPESP, do CNPq e da CAPES.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CICOGNA, M. A., SOARES, S. Metodologia Para a Determinação da Energia Secundária de Sistemas Hidrelétricos – Anais XII CBA Uberlândia, MG, Vol.3, n. 11-15, pp. 1005-1009 Setembro 1998.
- [2] CRUZ, Jr. Modelo Equivalente Não Linear para o Planejamento da Operação a Longo Prazo de Sistemas de Energia Elétrica – Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, Dezembro 1998.
- [3] ELETROBRÁS, página localizada na internet: <http://www.eletronbras.gov.br>.
- [4] FORTUNATO, L.A. et al. Introdução ao Planejamento da Expansão e Operação de Sistemas de Produção de Energia Elétrica – Universidade Federal Fluminense EDUFF, Niterói, (1990).
- [5] OLIVEIRA, G.G., SOARES, S. A Second-Order Network Flow Algorithm for Hydrothermal Scheduling - IEEE Transactions on Power Systems, Vol.10, n.3, pp. 1635-1641 (1995).
- [6] TERRY, L.A. et al. Modelo a Sistema Equivalente - Descrição Geral - Rel. CEPEL – Eletrobrás (1980).
- [7] VINHAL, C. N. Sistema de Apoio à Decisão Para o Planejamento da Operação Energética de Sistemas de Energia Elétrica – Tese de Doutorado, FEEC/UNICAMP, Dezembro 1998.