

## 6 Estudo de Casos

### 6.1. Introdução

A metodologia apresentada no capítulo anterior será avaliada neste capítulo utilizando diversos casos oficiais do MAE. “Caso” é um conjunto de arquivos contendo os dados necessários para se obter o preço spot. Ele é atualizado a cada estágio (mês ou semana) sendo que, na prática, o caso do mês T é calculado no final do mês anterior, isto é, ainda em T-1. A rigor é possível utilizar a metodologia de previsão do preço spot proposta para todo o período de planejamento (em geral de cinco anos à frente); porém, o horizonte de previsão que será avaliado neste capítulo é de até seis meses à frente, com discretização mensal. Além de seis meses, parece não ser interessante a utilização da metodologia, de acordo com os resultados encontrados.

Observe-se ainda que, desde julho de 2002, o preço spot no Brasil é definido semanalmente pelo ONS, utilizando os programas Newave e Decomp, desenvolvidos pelo CEPEL. Nada impede que se utilize o mesmo modelo proposto aqui a cada semana, desde que se disponha de dados para o treinamento do sistema neuro-fuzzy.

Para se realizar a previsão mensal a partir de julho de 2002, foi necessário adotar o valor da primeira semana do mês como sendo o preço spot do mês em questão. O ONS forneceu os dados de energia natural afluyente (ENA) e energia armazenada (EARM) e o MAE os de preços spot<sup>1</sup>.

Inicialmente, os valores esperados de CMO do Newave são brevemente analisados, a partir das distribuições esperadas de CMO no período de janeiro de 2001 a maio de 2002. Elas foram obtidas de 10 cálculos oficiais de janeiro a outubro de 2001. Em seguida, um estudo de caso passo a passo é realizado com um determinado mês de referência (abril de 2002).

---

<sup>1</sup> Dados obtidos das respectivas páginas na Internet.

Ainda, aplicando-se a metodologia proposta, são obtidas distribuições estimadas do CMO via sistemas neuro-fuzzy (SNF) para  $T+k$ , nos períodos pré-acionamento (fevereiro a maio de 2001) e pós-acionamento (março a maio de 2002). O período pré-acionamento é particularmente importante porque antecede aquele com preços bem elevados, embora o desafio seja ainda maior devido às intervenções realizadas no preço spot praticado à época. Como se sabe, durante o período de racionamento o preço spot foi definido como sendo igual ao custo de déficit, independentemente dos resultados do programa Newave.

Faixas de variação são propostas para as variáveis de entrada do sistema e intervalos de confiança são estabelecidos pelos percentis 5% e 95% das distribuições estimadas do preço spot. As estatísticas de desempenho e comparação utilizadas para o ajuste dos modelos são aquelas apresentadas nas equações (6.1) a (6.5) abaixo. Por fim, são apresentadas as distribuições esperadas para  $T+k$  utilizando a metodologia proposta via SNF bem como comparações das previsões pontuais e intervalos definidos pelos percentis das distribuições.

Considere que  $Y_t$  é a observação no tempo  $T$  e  $F_t$  é a previsão para o mesmo período, com erro dado por  $e_t = Y_t - F_t$ . Então, tem-se que:

- MAE (*Mean Absolute Error* ou Erro Médio Absoluto):

$$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |e_t| \quad (6.1)$$

- MSE (*Mean Squared Error* ou Erro Médio Quadrático):

$$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2 \quad (6.2)$$

- MPE (*Mean Percentage Error* ou Erro Percentual Médio):

$$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n PE_t \quad (6.3)$$

onde:

$$PE_t = \left( \frac{Y_t - F_t}{Y_t} \right) \times 100$$

- MAPE (*Mean Absolute Percentage Error* ou Erro Perc. Médio Absoluto):

$$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |PE_t| \quad (6.4)$$

- U-Theil:

$$U = \frac{\sqrt{\sum_{t=1}^{n-1} \left( \frac{F_{t+1} - Y_{t+1}}{Y_t} \right)^2}}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n-1} \left( \frac{Y_{t+1} - Y_t}{Y_t} \right)^2}} \quad (6.5)$$

onde:

$U = 1$ : o método ingênuo é tão bom quanto a técnica de previsão que está sendo testada;

$U < 1$ : a técnica de previsão que está sendo testada é melhor que o método ingênuo.

$U > 1$ : não existe razão para utilizar a técnica de previsão que está sendo testada uma vez que usando o método ingênuo produz-se melhores resultados.

## 6.2.

### **Análise dos Valores Esperados do CMO Obtidos do Newave**

O Newave fornece valores esperados do custo marginal do sistema (CMO) para todo o período de planejamento (em geral cinco anos), discretizados mensalmente, para cada um dos subsistemas. Observe-se que, a cada novo cálculo do Newave são obtidos também valores esperados de energia natural afluyente (ENA) e energia armazenada (EARM) usados no cálculo do valor esperado de CMO de cada estágio para todo o período de planejamento.

O preço MAE para um determinado mês é calculado pelo ONS através da construção de um novo caso ao final do mês imediatamente anterior. As saídas oficiais utilizadas na prática fornecem N (em geral 2000) valores esperados de CMO para o mês em questão, levando em consideração também os N valores simulados/definidos de ENA e EARM. É preciso ressaltar que o valor do preço spot para um determinado mês não é calculado diretamente desses 2000 valores esperados de CMO, mas através de um único despacho, levando em consideração as previsões de mercado, ENA e nível de armazenamento para o mês seguinte no chamado “Programa Mensal de Operação” (PMO).

Enfim, geralmente esse conjunto de N valores de CMO é a única fonte de informação que o tomador de decisão dispõe para sua estratégia de comercialização. Uma pergunta importante é se as distribuições mensais esperadas do CMO, fornecidas pelo Newave são boas (informativas, com pouca variância) e confiáveis o suficiente para esse tomador de decisões. Na verdade,

como o Newave faz simulações de ENA (e não previsões) considerando todas as possibilidades de ocorrência das vazões, de acordo com seu histórico, os valores de CMO acabam sendo influenciados pela alta variabilidade das vazões, resultando em distribuições esperadas de CMO pouco informativas e com grande variância.

Na Figura 29 são apresentadas as curvas médias dos valores mensais de CMO (2000 valores) no período de janeiro de 2001 a maio de 2002 obtidos do Newave a partir de 10 cálculos oficiais (janeiro a outubro de 2001). Seus correspondentes desvios padrão são apresentados na Figura 30.

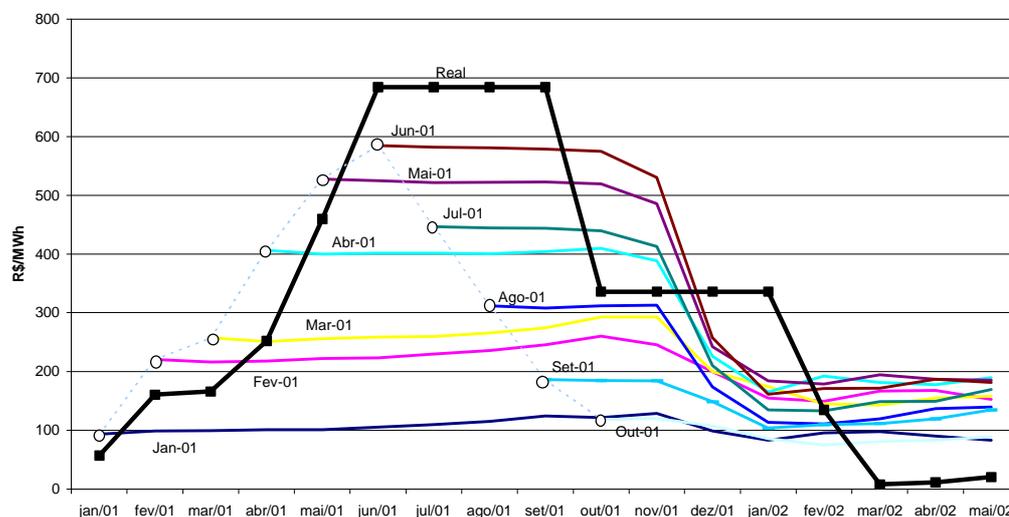


Figura 29. Valores médios de CMO de casos oficiais do Newave em 2001

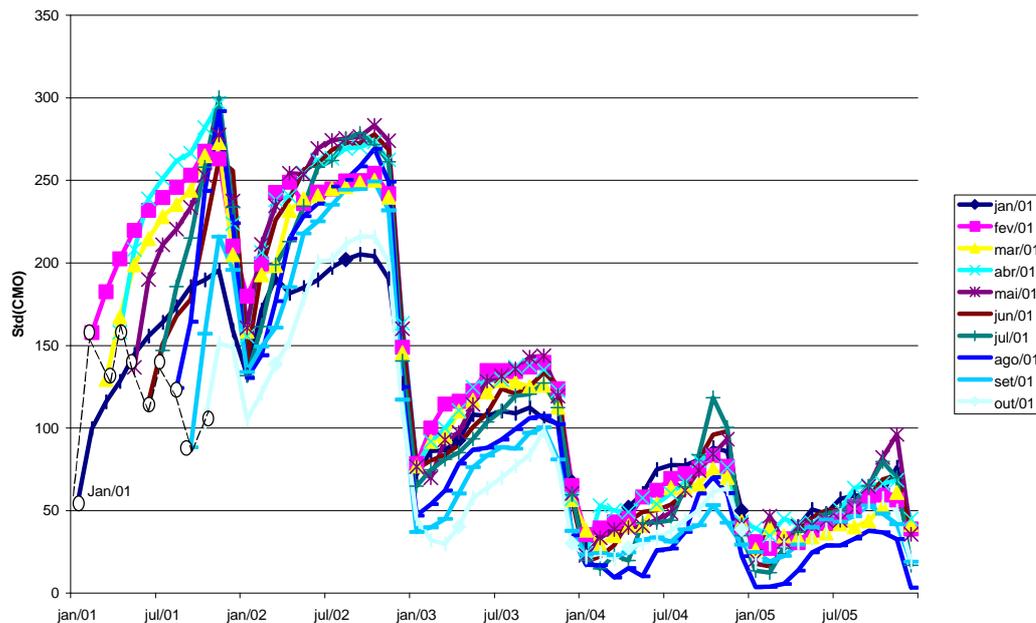


Figura 30. D.P. do CMO de casos oficiais do Newave em 2001

Observe-se na Figura 29 que todas as médias se concentram na faixa entre R\$100/MWh e R\$200/MWh ao final do horizonte de previsão. De fato, ao considerar a entrada de obras no futuro (usinas/linhas), as estimativas do Newave dos CMO tendem a cair para um determinado patamar, em geral abaixo do inicial. Note-se que o comportamento dos desvios na Figura 30 mostra a enorme dispersão do CMO.

Isso pode indicar que o preço spot apresentaria reversão à média. Porém, observe que essas são estimativas do Newave que consideram os cenários de ENA para o médio prazo, e não representam o comportamento do processo do preço spot publicado (ver Figura 11), pois, no curto prazo, o preço spot sofre influência de fatores de curto prazo, o que descartaria a aplicação do modelo de reversão para a média.

Ainda na Figura 29, observe-se que, a partir do mês T+2, as estimativas do CMO – dadas pela média das 2000 séries mensais de CMO – parecem sobreestimar o preço quando o preço spot se encontra em período de subida (janeiro a junho) e subestimá-lo quando o mesmo está decrescendo (julho a outubro). Em outras palavras, as estimativas médias do Newave para os meses T+k parecem guardar uma certa “memória”, não apresentando variações bruscas, mês a mês, tal como ocorre com a série real do preço spot.

Considere-se agora o ano de 2001 como referência e as médias das 2000 séries simuladas de CMO para o mês  $T+k$  ( $k = 1, \dots, 6$ ), obtidas do Newave, definidas como os valores previstos  $k$  meses-à-frente do preço spot. A Tabela 5 traz as estatísticas básicas das “previsões” do Newave, a saber: média, desvios, erros percentuais e MAPE, entre janeiro e outubro de 2001.

Pela Tabela 5 e Figura 31 é possível notar que as médias das previsões, com algumas exceções, crescem naturalmente com  $k$ . Além disso, são encontrados valores altos em  $T$ =setembro e  $T$ =outubro de 2001, especialmente para o ano de 2002. Isto pode ser parcialmente explicado por ser o período final do racionamento, fazendo com que os preços descessem para um patamar muito baixo, da ordem de R\$10/MWh, a partir de março de 2002. De fato, em patamares como este os erros percentuais podem se tornar exorbitantes, porém eles são obviamente menos importantes do que os mesmos erros percentuais aplicados a valores elevados de preço spot.

Apesar de compreender o período de racionamento, a partir de junho de 2001, os resultados do Newave mostrados na Figura 29, na Figura 30 e na Figura 31 são importantes porque mostram exatamente o que o tomador de decisão dispõe para sua estratégia de comercialização. O objetivo da próxima seção será, então, obter melhores resultados utilizando a metodologia proposta, via sistemas “inteligentes” (neuro-fuzzy e redes neurais). É preciso deixar claro que o modelo proposto não substitui o Newave; muito pelo contrário, se utiliza dele para melhorar a qualidade da informação, ou seja, melhorar a previsão do preço spot.

Tabela 5. Estatísticas das estimativas do preço do Newave (2.000 cenários)

Mês de Referência	Previsões 6-meses-à-frente					
Mês T	T+1	T+2	T+3	T+4	T+5	T+6
Janeiro 2001	98.53 (99.59) {-38.53} [65.14]	99.37 (115.93) {-40.14} [71.02]	100.88 (128.19) {-60.00} [73.60]	100.91 (144.61) {-78.06} [80.79]	105.65 (155.81) {-84.55} [84.55]	109.56 (164.12) {-83.98} [84.01]
Fevereiro 2001	216.00 (182.57) {30.12} [88.67]	218.00 (202.59) {-13.56} [71.28]	222.18 (219.62) {-51.69} [64.24]	223.44 (231.77) {-67.33} [67.33]	229.74 (239.66) {-66.41} [66.47]	235.85 (245.73) {-65.52} [65.58]
Março 2001	251.38 (167.36) {-0.32} [56.48]	255.57 (198.83) {-44.43} [55.13]	258.74 (214.76) {-62.17} [62.17]	259.62 (227.95) {-62.04} [62.04]	265.59 (235.45) {-61.17} [61.22]	274.59 (244.07) {-59.85} [59.96]
Abril 2001	399.62 (208.28) {-13.11} [40.23]	401.04 (238.84) {-41.37} [41.37]	401.17 (250.85) {-41.35} [41.35]	400.28 (261.90) {-41.48} [41.54]	403.99 (266.48) {-40.94} [41.00]	409.56 (281.95) {21.89} [82.46]
Mai 2001	524.47 (189.98) {-23.32} [23.32]	521.63 (211.09) {-23.74} [23.74]	522.13 (220.64) {-23.66} [23.69]	522.49 (233.71) {-23.61} [23.64]	518.95 (252.82) {54.45} [90.09]	485.36 (277.61) {44.45} [91.76]
Junho 2001	581.98 (150.74) {-14.91} [14.91]	581.20 (167.85) {-15.03} [15.04]	578.71 (177.96) {-15.39} [15.47]	574.43 (219.71) {70.96} [94.53]	529.97 (262.64) {57.73} [96.09]	257.48 (255.88) {-23.37} [76.82]
Julho 2001	444.20 (185.68) {-35.06} [35.06]	444.03 (215.08) {-35.08} [35.08]	439.57 (257.99) {30.82} [77.45]	413.24 (300.13) {22.99} [90.68]	210.16 (233.73) {-37.45} [76.68]	134.77 (131.69) {-59.89} [67.45]
Agosto 2001	308.01 (164.37) {-54.97} [54.97]	312.19 (243.66) {-7.09} [66.92]	313.20 (291.91) {-6.79} [84.45]	173.72 (224.11) {-48.30} [80.67]	113.50 (130.35) {-66.22} [72.87]	110.94 (144.09) {-17.67} [86.04]
Setembro 2001	184.77 (157.11) {-45.01} [59.47]	184.32 (215.99) {-45.14} [75.38]	148.61 (195.92) {-55.77} [78.32]	103.55 (134.09) {-69.18} [76.44]	109.45 (149.33) {-18.78} [88.23]	111.38 (160.93) {1268.31} [1292.75]
Outubro 2001	119.82 (151.42) {-64.34} [75.66]	107.33 (148.83) {-68.05} [79.27]	85.81 (105.20) {-74.46} [77.25]	74.65 (121.08) {-44.60} [86.16]	80.60 (138.84) {890.17} [927.58]	83.44 (152.55) {616.82} [667.33]
Março 2002	8.06 (6.47) {-30.79} [54.88]	8.12 (7.81) {-59.60} [65.54]	8.27 (8.56) {-9.07} [75.94]	8.18 (9.04) {-48.84} [68.26]	8.31 (9.50) {-43.47} [69.60]	8.32 (9.72) {19.17} [99.24]
Abril 2002	9.89 (6.45) {-50.77} [53.99]	9.99 (7.68) {9.91} [66.00]	10.12 (8.43) {-36.70} [56.47]	9.41 (8.55) {-36.05} [60.60]	9.81 (9.26) {40.51} [96.37]	10.41 (11.29) {160.27} [202.87]
Mai 2002	17.55 (8.67) {93.12} [106.51]	16.97 (9.69) {6.14} [50.68]	16.70 (10.54) {13.53} [58.48]	16.93 (11.69) {142.50} [159.77]	18.41 (15.16) {360.24} [370.52]	19.92 (19.33) {174.06} [203.33]
<b>MAPE Médio</b>	<b>49.86</b>	<b>51.47</b>	<b>58.27</b>	<b>69.23</b>	<b>168.91</b>	<b>276.68</b>

Legenda: Média (Desvio padrão) {Erro percentual} [MAPE da amostra]

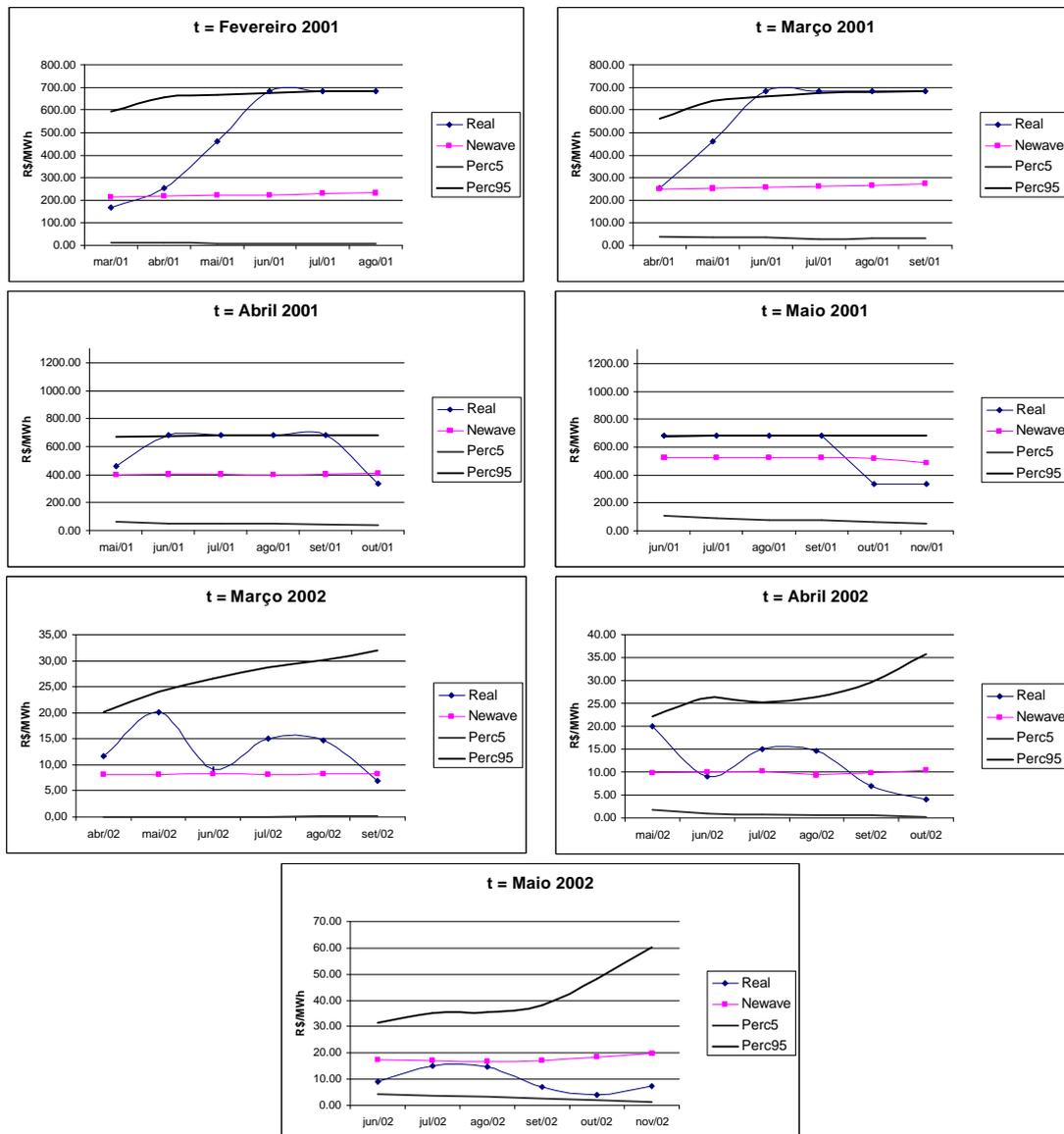


Figura 31. Estimativas de preço do Newwave com intervalos (perc. 5% e 95%)

### 6.3. Aplicação da Metodologia Passo-a-Passo

#### 6.3.1. Escolha das Variáveis

Esta seção tem por objetivo realizar um estudo prático aplicando a metodologia proposta no capítulo anterior. Observe-se que são feitas aqui comparações com resultados do Newwave, mas estas comparações não serão exaustivas.

A configuração adotada é a do caso oficial (caso base) de abril de 2002 (T = abril de 2002) e, a título de ilustração, o foco será apenas na previsão do preço spot 1 passo-à-frente, ou seja, buscar-se-á uma distribuição esperada do preço spot somente para maio de 2002. Outros horizontes e demais casos serão apresentados na próxima seção. As variáveis que não serão utilizadas neste estudo são ENA, EARM e CMO.

Considere-se que quando o Newave faz o cálculo com o referido caso, tem-se uma distribuição das variáveis ENA e EARM para  $T+k$  = maio de 2002 (Figura 32). Neste caso específico, a média e desvio padrão da distribuição de ENA são de 26.000 e 5.000 MW médios, respectivamente. A média e desvio padrão da distribuição de EARM, por sua vez, são de 122.000 e 11.000 MW mês, respectivamente. Observe-se que o intervalo de variação dessas variáveis é muito grande, variando de um mínimo de 13.842 MW médios e máximo de 45.832 MW médios para ENA, e de 93.947 MW mês a 160.361 MW mês para a EARM.

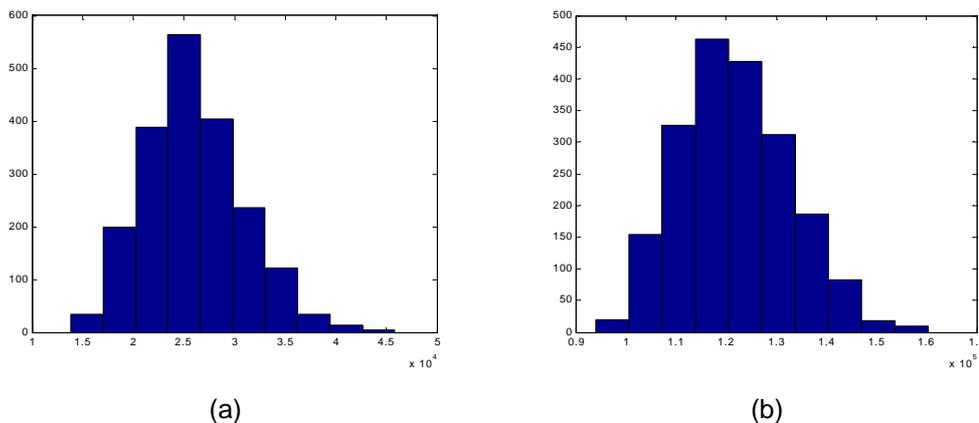


Figura 32. Histograma da (a) ENA e (b) EARM para  $T+1$ =Maio/02 (Newave)

Assim, a partir dos valores de ENA e EARM da Figura 32 é possível calcular via despacho operativo uma distribuição esperada do CMO para cada um dos 2000 cenários, para o mês de maio de 2002 (Figura 33). O valor esperado (média) e a mediana desta distribuição são, respectivamente, 9,89 e 8,58 reais o MWh. Considerando essas estatísticas como estimadores para o preço spot e sabendo que o preço que vigorou em maio de 2002 foi de R\$20,09, tem-se erros percentuais aproximados de  $-50\%$  e  $-57\%$ , respectivamente<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> A média será a estatística usada aqui como o estimador do preço spot.

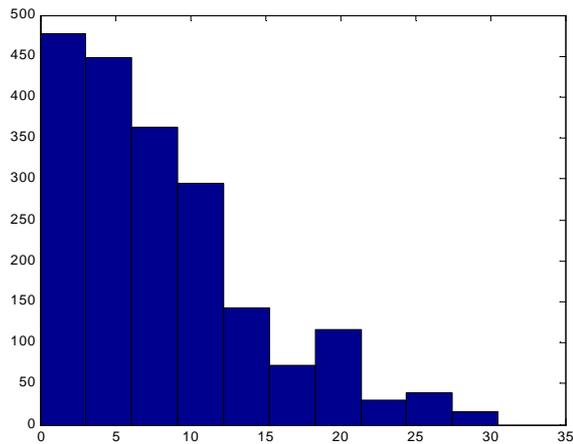


Figura 33. Histograma do CMO para T+1=Maio/02 (Newave)

### 6.3.1.1. Definição das Faixas de Variação

De acordo com o verificado na Figura 32, os intervalos de variação de ENA e EARM são bem grandes. Assim, o próximo passo é a definição de *faixas de variação* suficientemente largas de ENA e EARM, porém com menor variância do que as simuladas pelo Newave. Em última análise, buscam-se melhores distribuições esperadas de ENA e EARM para maio de 2002. Isso pode ser feito através de modelo univariados (como o ARIMA), via sistemas “inteligentes”, através da análise das distribuições das variáveis ou mesmo de forma *ad hoc*.

Por exemplo, para o caso em questão, podem-se definir as seguintes faixas de variação: ENA (15.000; 30.000) MW médios; EARM (95.000; 120.000) MW mês. Note-se que o CMO também ganha sua faixa de variação definida e.g., entre (0; 30) reais o MWh. É interessante observar que essas faixas não necessariamente devem incluir o valor real, até porque não se conhecem ainda os valores verdadeiros para o mês  $T+k$ , isto é, maio de 2002; porém, é preciso que elas estejam dentro dos limites mínimo e máximo dos valores simulados pelo Newave (Figura 32). Observa-se, entretanto, que na maioria dos casos esses limites de variação incluem os valores reais, pois estes são bem amplos. Isso acontece também com maio de 2002, onde os valores reais de ENA e EARM foram, respectivamente, de 23.933 MW médios e 110.140,50 MW mês, e o preço spot R\$20,09.

### 6.3.1.2. Estimação dos Parâmetros: Treinamento

O próximo passo é treinar um SNF com os dados definidos nas etapas anteriores para que se possa obter uma estimativa ou uma distribuição de CMO. Neste estudo de caso, utilizar-se-á um sistema do tipo ANFIS, tal como descrito no capítulo anterior<sup>3</sup>. A Tabela 6 mostra os parâmetros do modelo utilizado.

Tabela 6. Parâmetros do modelo neuro-fuzzy ANFIS

Parâmetros	Valor
Número de nós	34
Número de parâmetros lineares	32
Número de parâmetros não lineares	18
Número total de parâmetros	50
Número de pares de dados de treinamento	1.714
Número de pares de dados de checagem	286
Número de regras fuzzy	8
Número de épocas	50
Número de funções de pertinência por variável de entrada	2
Tipo da função de pertinência	Gbellmf
Método AND (operador t-norma)	Produto
Método OR (operador t-conorma)	Máximo

Na etapa de treinamento, utilizar-se-ão três variáveis: ENA, EARM e CMO, da maneira como foi definida anteriormente no modelo predictor. A função de pertinência associada às três variáveis de entrada é a sino generalizada, “Gbellmf” (*Generalized bell curve membership function*), uma extensão da pdf Cauchy. A Figura 34 ilustra as funções de pertinência iniciais adotadas para as variáveis de entrada.

<sup>3</sup> Na próxima seção, os resultados serão comparados com os obtidos através de uma rede neural.

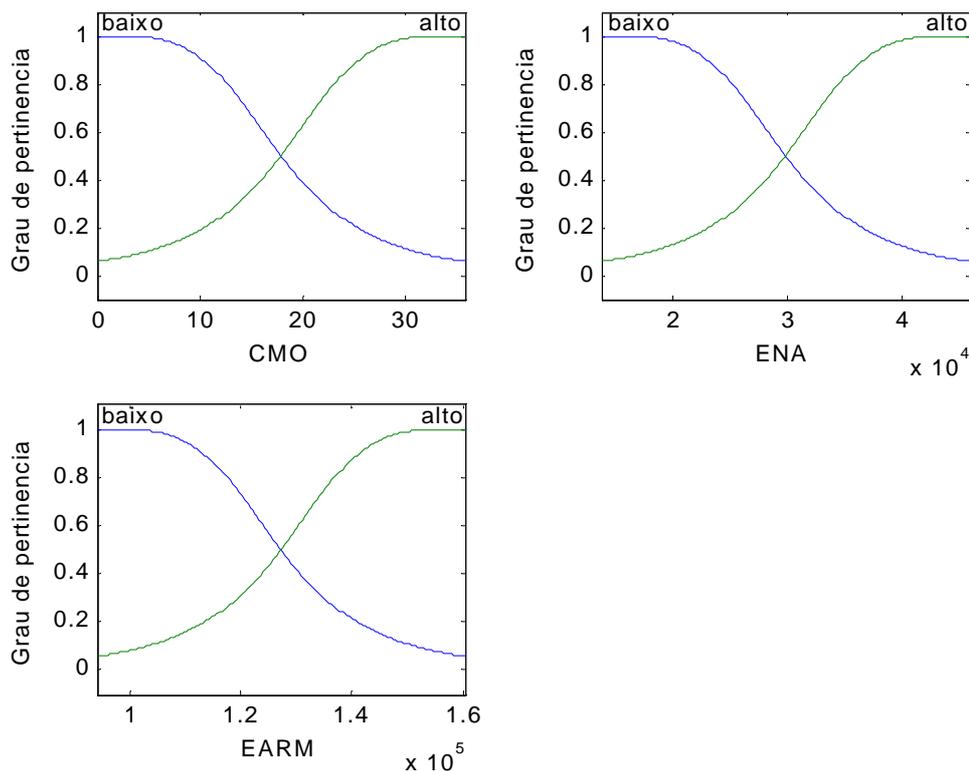


Figura 34. Funções de pertinência iniciais das entradas do modelo

Diversos testes foram realizados e concluiu-se que a utilização de mais de duas funções de pertinência por variável não apresentaria um ganho que compensasse o esforço computacional. Além disso, o modelo fica muito ajustado aos dados de treinamento (*in sample*) comprometendo os resultados de validação do modelo (*out-of-sample*).

Na Tabela 7 são mostradas as regras fuzzy do sistema e as equações finais das funções de pertinência de saída do sistema. Como são duas funções de pertinência por variável, tem-se oito regras ao total. Observe-se que as saídas são funções lineares das variáveis de entrada. Ainda, as funções de pertinência e as regras definem qual das funções de saída será usada e quando.

Tabela 7. Regras fuzzy e equações finais de saída para maio de 2002

SE CMO	E ENA	E EARM	Então PREÇO SPOT =
(é baixo)	(é baixa)	(é baixa)	$-0,3034*CMO - 0,001203*ENA - 0,0007903*EARM + 128,5$
(é baixo)	(é baixa)	(é alta)	$0,7388*CMO + 0,0001596*ENA - 0,0004341 *EARM + 68,84$
(é baixo)	(é alta)	(é baixa)	$1,039*CMO - 0,0006999*ENA + 0,0001325*EARM + 18,03$
(é baixo)	(é alta)	(é alta)	$-1,249*CMO - 0,0001104*ENA + 0,0000445*EARM - 6,583$
(é alto)	(é baixa)	(é baixa)	$0,3241*CMO + 0,0005609*ENA - 0,0005879*EARM + 64,79$
(é alto)	(é baixa)	(é alta)	$-1,951*CMO - 0,006734*ENA - 0,0052*EARM + 828,4$
(é alto)	(é alta)	(é baixa)	$-1,438*CMO + 0,005251*ENA - 0,004706*EARM + 342,4$
(é alto)	(é alta)	(é alta)	$11,36*CMO - 0,0005778*EARM + 0,0006073*EARM + 36,1$

O SNF consegue um bom ajuste, como é possível verificar pela Figura 35, que mostra o gráfico dos ajustes aos dados de treinamento e de validação com os últimos trinta valores das respectivas amostras<sup>4</sup>, e pela Figura 36, que traz a comparação das funções de distribuição cumulativa (cdf) das duas estimativas. A Tabela 8, por sua vez, apresenta as estatísticas do ajuste do modelo.

Todos esses resultados comprovam que com apenas duas variáveis, ENA e EARM, mais a estimativa do CMO, é possível ajustar um bom modelo para o preço spot. Apesar dos resultados apresentados aqui se referirem apenas ao caso de maio de 2002, o mesmo desempenho foi encontrado aplicando-se um SNF em diversos meses de 2001 e 2002 (próxima seção).

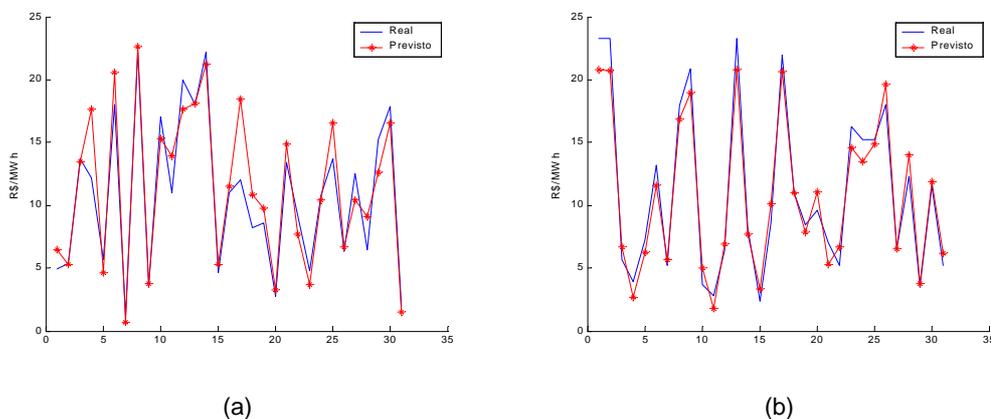


Figura 35. Resultados do ajuste do modelo (a) estimação e (b) validação

<sup>4</sup> Como existiam dados suficientes, optou-se por utilizar 85% dos mesmos na amostra de treinamento e os outros 15% na amostra de validação, aproximadamente.

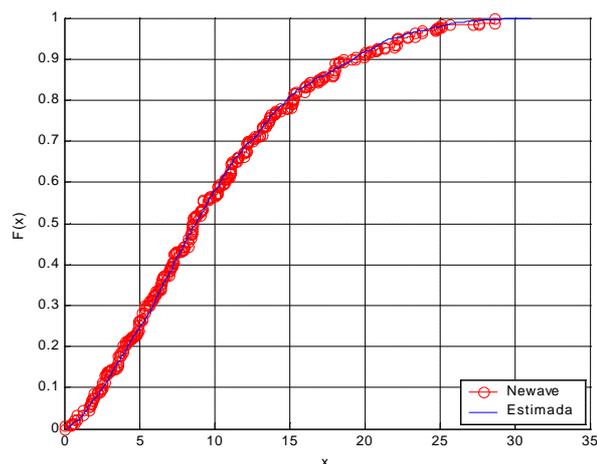
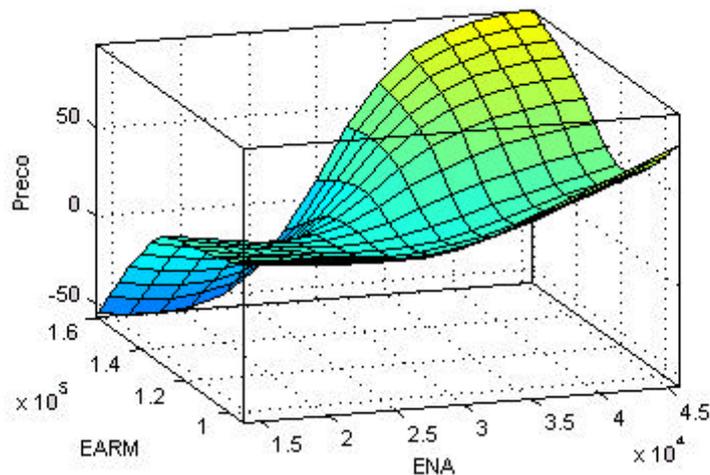


Figura 36. CDF do Preço estimado via SNF e Newave

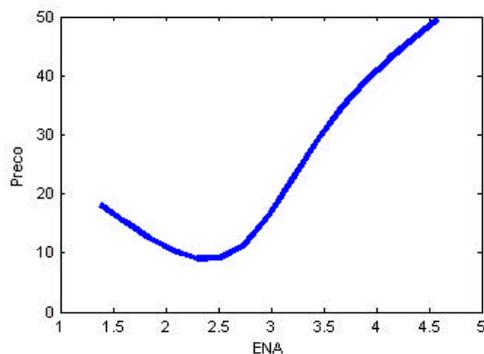
Tabela 8. Resultados do ajuste do SNF em T=Abril/2002 para Maio/2002

Amostras	Estatísticas	Valores
<b>Treinamento</b>	MAE	1.08
<i>(in sample)</i>	MSE	2.14
	MAPE	14.82
	UTHEIL	0.12
	MPE	0.20
<b>Validação</b>	MAE	1.08
<i>(out-of-sample)</i>	MSE	1.93
	MAPE	13.41
	UTHEIL	0.09
	MPE	-0.56

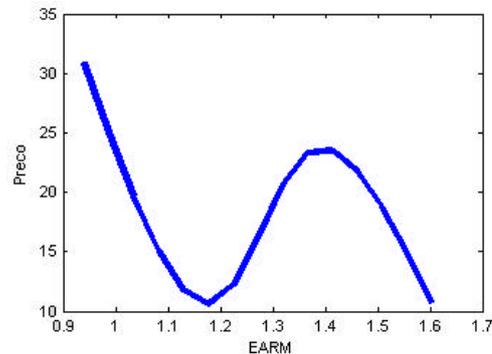
Finalmente, a Figura 37 mostra o relacionamento entre o preço spot e as variáveis ENA e EARM do caso em questão. Note-se que, segundo este mapeamento, as relações entre o preço e as variáveis ENA e EARM, ao se levar em consideração todo o espaço, são não-lineares, ao contrário do que se poderia pensar inicialmente. Como se pode verificar nessa figura, um modelo linear por partes também pode, *a priori*, ser uma opção para a modelagem do preço.



(a)



(b)



(c)

Figura 37. Relação entre o preço spot e (a) variáveis (b) ENA (c) EARM

### 6.3.1.3. Simulação e Previsão

Definidas as faixas de variação das variáveis de entrada e após o treinamento do SNF é possível estimar uma distribuição do preço spot para  $T+k$  (maio de 2002), a partir da simulação das variáveis de entrada segundo uma determinada distribuição. Com relação a esta distribuição empírica das variáveis de entrada, considera-se que não existe nenhum conhecimento prévio das variáveis para o mês em que se quer prever, com exceção dos limites mínimo e máximo. Em outras palavras, utilizam-se distribuições uniformes discretas para a simulação dos valores das variáveis de entrada do modelo. Evidentemente, o uso de distribuições mais adequadas (mais informativas) deve levar a melhores distribuições do preço spot, porém o intuito neste capítulo é apenas demonstrar a metodologia proposta.

Observe-se que a vantagem de se utilizar sistemas como o SNF é que todo o procedimento é feito de forma rápida, sem a necessidade de se utilizar novamente o Newave para investigar relações, simular valores ou fazer análises de cenários das variáveis ENA, EARM e Preço. Além disso, a solução via SNF possibilita a eventual simulação de um número de cenários diferente dos 2.000 do Newave. Por exemplo, nos estudos de caso deste capítulo foram considerados 9.261 cenários de cada variável CMO, ENA e EARM na estimação do preço spot (mês T para T+k).

Assim, após a simulação e cálculo do preço no modelo ajustado, tem-se uma distribuição estimada do preço spot para maio de 2002 (Figura 38). Observe-se que ela é única para as distribuições das variáveis de entrada adotadas. Obviamente, ao se alterar as distribuições simuladas, muda-se também a distribuição esperada para o preço spot do mês em questão.

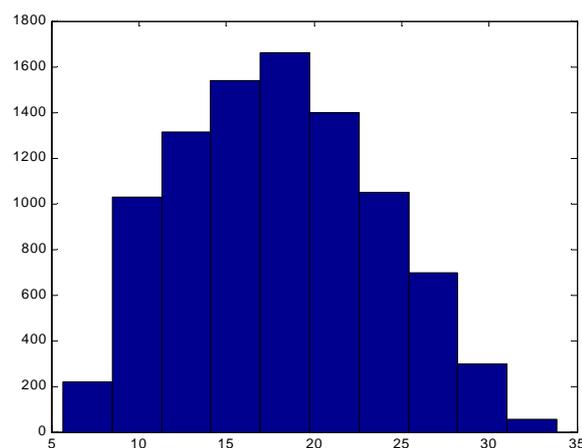


Figura 38. Histograma do preço spot estimado para T+1=Mai/02

É interessante notar, também, que a média da distribuição estimada da Figura 38 é R\$18,01, ou seja, obteve-se agora um erro percentual na previsão pontual de aproximadamente -10%. Os percentis 5% e 95% da distribuição estimada são de R\$9,41 e R\$27,63, respectivamente.

Apesar do erro percentual via SNF ter sido bem menor do que o obtido pelo Newave, o mais importante é que a distribuição estimada do preço para maio de 2002 é mais informativa e “comportada” do que a distribuição obtida com os

2.000 valores de CMO (Figura 33), o que traz um ganho para o tomador de decisão.

Uma observação importante é que nos testes realizados, os eventuais valores de preço maiores que o custo de déficit foram truncados em R\$684,00 e o menor valor adotado de saída do modelo foi de R\$4,00. Estes são os respectivos valores máximos e mínimos adotados atualmente para o preço spot. Note-se que o SNF proposto é flexível caso esses valores máximos e mínimos venham a sofrer qualquer alteração no futuro. A seguir, diversos outros casos serão apresentados e resultados comparados para diferentes horizontes de previsão.

#### **6.4. Estudos Comparativos**

Nesta seção são apresentados os resultados a partir de diversos meses de 2001 e 2002. Dois períodos foram escolhidos para a previsão do preço spot: um período pré-acionamento (fevereiro a maio de 2001) e outro pós-acionamento (março a maio de 2002).

O primeiro período é importante porque apresenta uma fase de elevação nos preços e valores próximos ao custo de déficit, embora tenham ocorrido neste período fortes intervenções na série de preço. Como se constatará, esse período em particular representa um enorme desafio para os modelos de previsão em decorrência da subida drástica no preço spot praticado. O segundo período, pós-acionamento, é também muito importante porque apresenta preços em um patamar muito baixo (R\$4,00/MWh a R\$20,00/MWh), com uma transição nada suave com o período anterior (acionamento).

Na Figura 39 são mostradas comparações das previsões pontuais via Newave, SNF e RNA. Observe-se que a denominação “faixas” no gráfico refere-se à aplicação dos respectivos métodos apenas utilizando os dados do Newave compreendidos dentro das faixas de variação das variáveis de entrada CMO, ENA e EARM, definidas mais adiante na Tabela 10 (ou seja, um subconjunto dos 2000 cenários). Note-se, ainda, que a solução via SNF é a que melhor segue o movimento do preço spot, tendo a solução RNA também obtido bons resultados.

A Tabela 9 mostra os MAPE das estimativas pontuais do preço spot considerando os seis meses-à-frente. Observe-se que, em média, o MAPE da

metodologia empregando os SNF foi ligeiramente menor que o das RNA e aproximadamente 10% menor do que o do Newave.

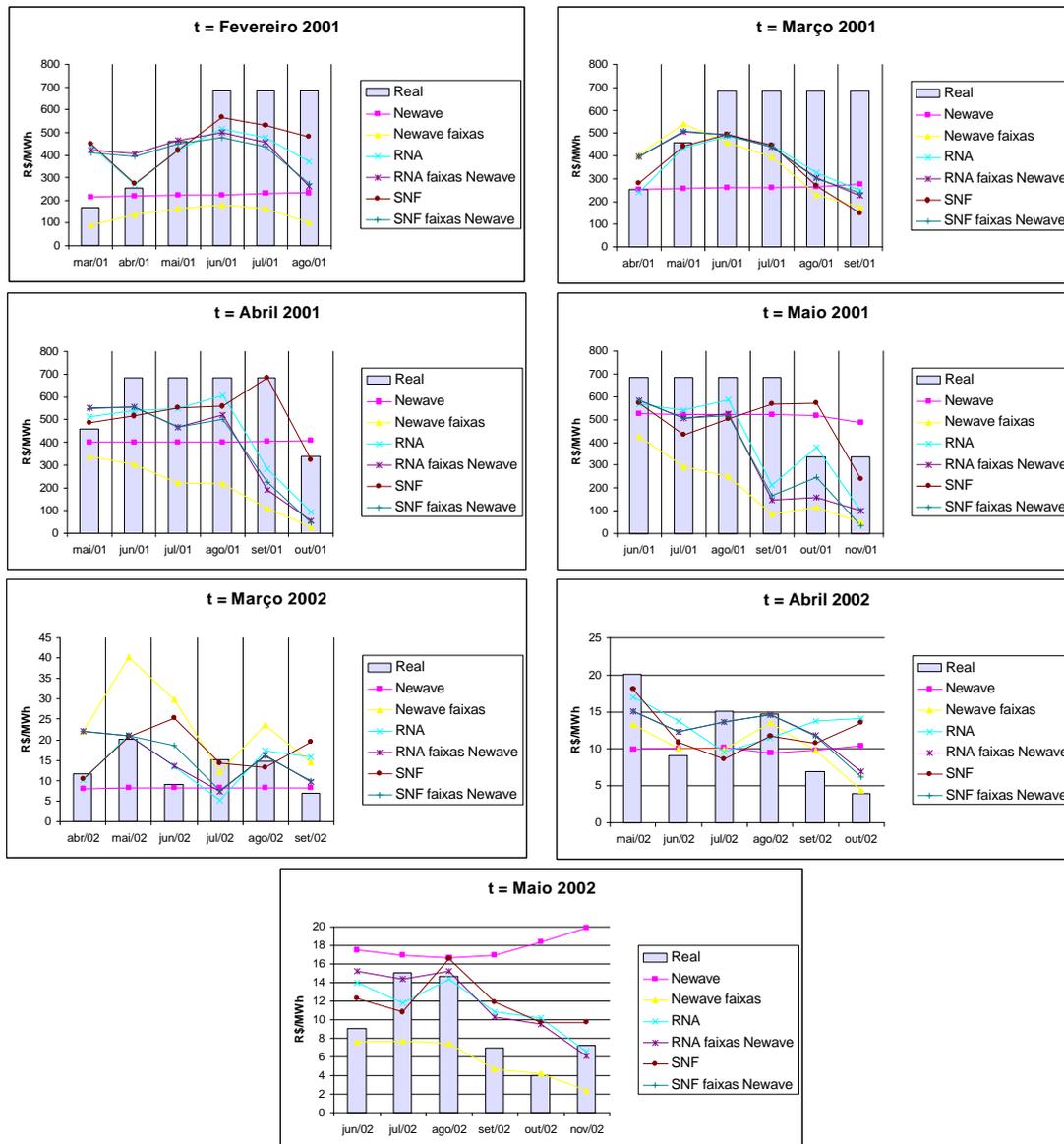


Figura 39. Comparação entre as previsões pontuais e os valores reais

Tabela 9. MAPE das previsões pontuais seis meses-à-frente

Mês T	Newave	RNA	SNF
fev/01	49.11	46.97	42.93
mar/01	48.33	31.70	36.20
abr/01	33.36	32.43	23.17
mai/01	32.21	34.08	32.74
mar/02	34.65	45.71	64.78
abr/02	55.07	79.14	64.35
mai/02	132.65	49.79	53.65
<i>Média</i>	<i>55.05</i>	<i>45.69</i>	<i>45.40</i>

Tabela 10. Faixas de variação das variáveis CMO, ENA e EARM

Mês T	T+k	CMO	ENA	EARM
fev/01	mar/01	[100; 200]	[30000; 40000]	[50000; 60000]
	abr/01	[100; 300]	[20000; 40000]	[50000; 60000]
	mai/01	[100; 300]	[15000; 25000]	[35000; 60000]
	jun/01	[400; 680]	[8000; 20000]	[30000; 60000]
	jul/01	[400; 684]	[8000; 15000]	[25000; 45000]
	ago/01	[400; 684]	[8000; 15000]	[25000; 45000]
mar/01	abr/01	[100; 400]	[20000; 40000]	[50000; 60000]
	mai/01	[100; 500]	[15000; 25000]	[40000; 50000]
	jun/01	[400; 684]	[8000; 20000]	[30000; 50000]
	jul/01	[400; 684]	[8000; 15000]	[25000; 45000]
	ago/01	[400; 684]	[8000; 12000]	[25000; 40000]
	set/01	[400; 684]	[5000; 10000]	[15000; 40000]
abr/01	mai/01	[200; 500]	[15000; 25000]	[40000; 50000]
	jun/01	[400; 600]	[10000; 25000]	[30000; 45000]
	jul/01	[400; 684]	[6000; 15000]	[25000; 45000]
	ago/01	[400; 684]	[6000; 15000]	[15000; 25000]
	set/01	[400; 684]	[6000; 15000]	[15000; 25000]
	out/01	[400; 684]	[20000; 40000]	[35000; 55000]
mai/01	jun/01	[400; 600]	[8000; 20000]	[30000; 45000]
	jul/01	[400; 680]	[6000; 15000]	[25000; 45000]
	ago/01	[400; 684]	[6000; 15000]	[15000; 25000]
	set/01	[400; 684]	[6000; 15000]	[15000; 35000]
	out/01	[500; 684]	[6000; 35000]	[6000; 10000]
	nov/01	[300; 684]	[20000; 35000]	[15000; 35000]
mar/02	abr/02	[0; 30]	[20000; 30000]	[95000; 120000]
	mai/02	[0; 100]	[20000; 30000]	[95000; 120000]
	jun/02	[0; 100]	[10000; 35000]	[85000; 130000]
	jul/02	[0; 100]	[20000; 30000]	[95000; 120000]
	ago/02	[0; 100]	[10000; 15000]	[95000; 120000]
	set/02	[0; 100]	[10000; 20000]	[70000; 140000]
abr/02	mai/02	[0; 30]	[15000; 30000]	[95000; 120000]
	jun/02	[0; 40]	[15000; 30000]	[95000; 120000]
	jul/02	[0; 40]	[15000; 30000]	[80000; 100000]
	ago/02	[0; 40]	[10000; 25000]	[80000; 100000]
	set/02	[0; 50]	[10000; 15000]	[85000; 90000]
	out/02	[0; 50]	[10000; 25000]	[85000; 120000]
mai/02	jun/02	[0; 35]	[15000; 30000]	[95000; 120000]
	jul/02	[0; 35]	[10000; 25000]	[90000; 120000]
	ago/02	[0; 50]	[10000; 20000]	[80000; 100000]
	set/02	[0; 50]	[10000; 20000]	[80000; 100000]
	out/02	[0; 50]	[10000; 20000]	[80000; 100000]
	nov/02	[0; 50]	[10000; 40000]	[80000; 120000]

Pode-se melhorar os resultados dos modelos SNF e RNA apenas aumentando-se o número de cenários. Por exemplo, para o mês de abril de 2002,

aumentando-se o número de cenários de 9.261 (*default* nos estudos) para 29.791, consegue-se uma diminuição no índice dos SNF de 64,35% para 51,45%, isto é, mais de 20% de melhora do MAPE, abaixo inclusive do valor obtido pelo Newwave. Mudanças nas faixas de variação também levam a significativas quedas dessa estatística.

Finalmente, na Figura 40, são mostradas as previsões do preço spot a partir de cada mês T para os meses T+k de junho a agosto de 2001 e de junho de 2002 a agosto de 2002; Deve-se notar que diferentemente dos estudos anteriores, fixam-se agora os meses T+k e varia-se o mês de referência T.

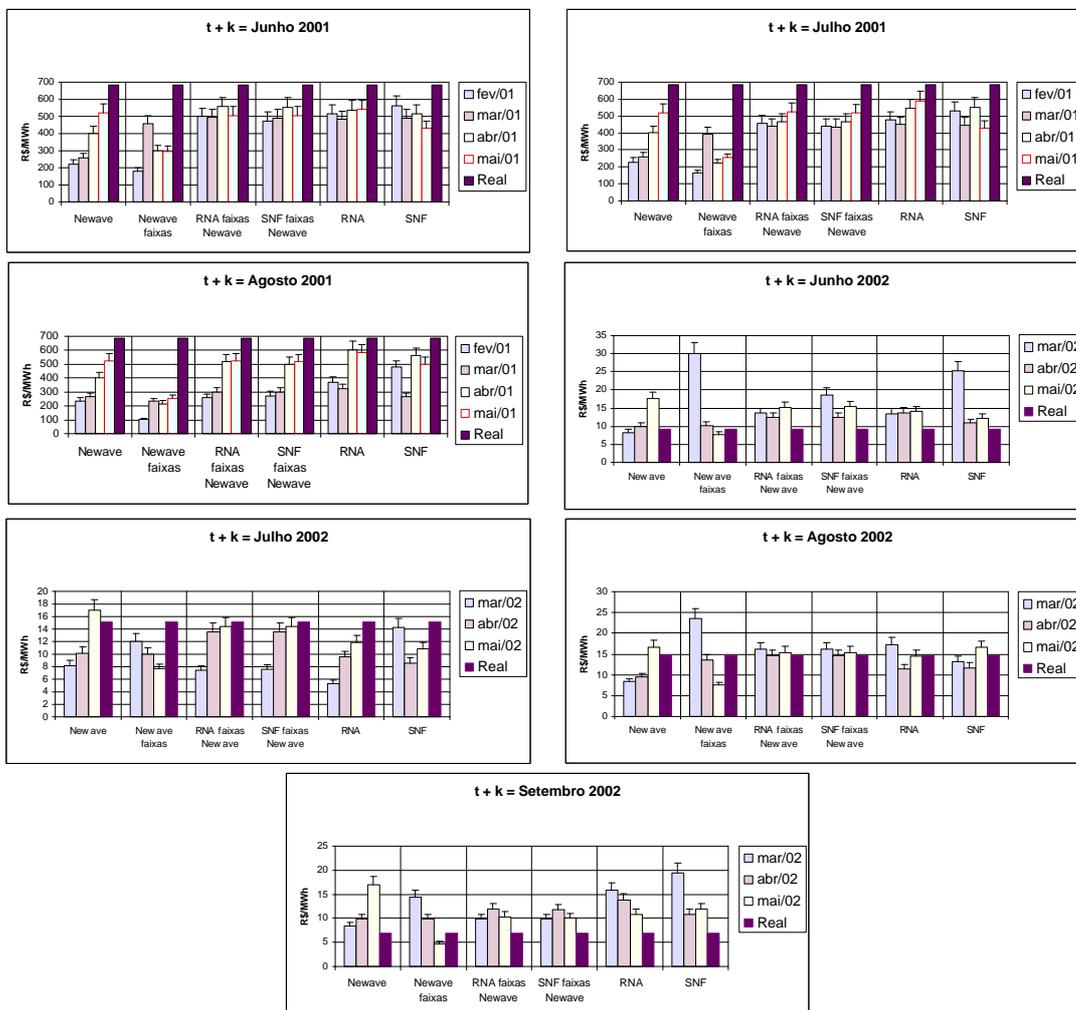


Figura 40. Comparações entre os modelos para diversos meses-àfrente

Pode-se verificar pela Figura 40 que os métodos obtiveram resultados semelhantes no período pós-acionamento, devido aos preços spot baixos praticados à época. No entanto, em todos os casos as estimativas do Newave

crecem com os meses, independentemente se o preço esteja subindo ou em queda.

Além disso, o Newave não conseguiu captar os preços spot elevados no período pré-acionamento com alguns meses de antecedência, como se pode verificar, e.g., nas estimativas feitas em  $T$ =fevereiro, março e abril de 2001 para  $T+k$  com  $k$ =junho, julho e agosto de 2001, ao contrário dos SNF e do modelo de redes neurais que conseguiram prever uma subida considerável nos preços com seis meses de antecedência.

Na Figura 41 são mostradas as previsões pontuais (médias das distribuições simuladas) via SNF com intervalos definidos pelos percentis 5% e 95%. Comparando-as com os valores do Newave, verifica-se que os intervalos obtidos aqui são bem mais “justos” do que os do Newave, sendo que os mesmos incluem todos os valores reais no período pós-acionamento. Observe-se, porém, que no período pré-acionamento, especialmente em fevereiro e março de 2001, os intervalos definidos pelos percentis das distribuições não incluíram os valores reais, que, aliás, foram definidos como sendo o custo de déficit.

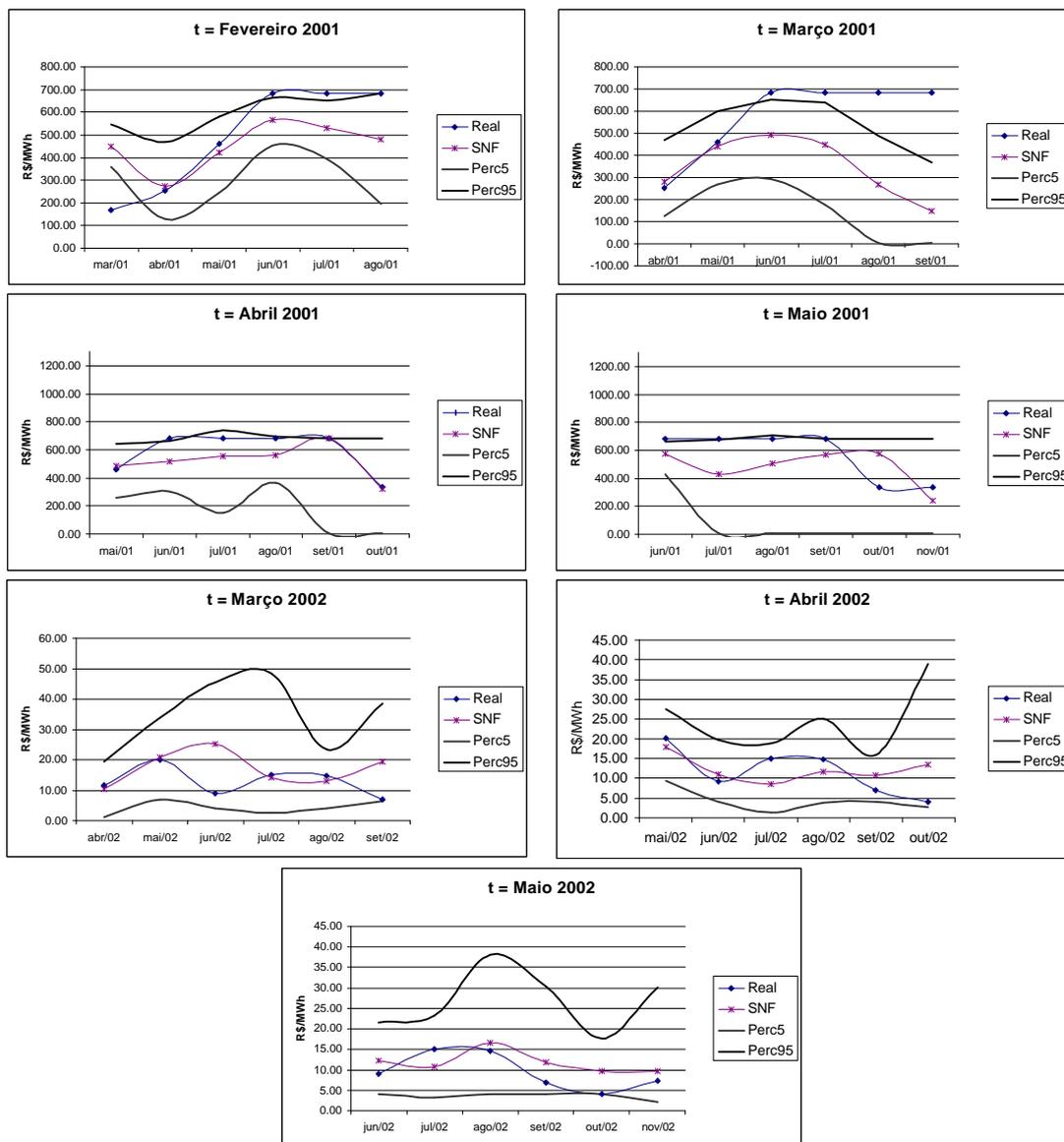


Figura 41. Estimativas de preço via SNF com intervalos (perc. 5% e 95%)

A Tabela 11 mostra os valores estimados (previsões pontuais) do preço spot com a aplicação do SNF  $k$ -meses-à-frente, com  $k = 1, \dots, 6$ . Traz também os erros percentuais e MAPE. Comparando-os com os resultados do Newave, nota-se que os desvios e o MAPE médio são, em geral, menores com a metodologia proposta, embora se possa encontrar também valores exorbitantes para os erros percentuais e MAPE (e.g., em maio de 2001 para  $k = 4, 5$  e  $6$ ).

Tabela 11. Estatísticas das previsões do preço spot com SNF (9.261 cenários)

Mês de Referência	Previsões 6-meses-à-frente					
Mês T	T+1	T+2	T+3	T+4	T+5	T+6
Fevereiro 2001	449.94 (61.74) {171.05} [171.05]	273.17 (112.32) {8.31} [38.18]	420.92 (103.69) {-8.48} [19.33]	564.60 (71.20) {-17.46} [18.23]	531.91 (88.83) {-22.24} [23.30]	478.44 (197.84) {-30.05} [36.64]
Março 2001	279.93 (108.41) {11.00} [36.21]	441.96 (104.76) {-3.90} [19.29]	491.39 (110.95) {-28.16} [28.19]	446.70 (141.57) {-34.69} [34.72]	266.13 (146.56) {-61.09} [61.09]	147.90 (126.64) {-78.38} [78.38]
Abril 2001	486.11 (120.39) {5.70} [22.89]	515.86 (115.46) {-24.58} [24.59]	552.68 (172.23) {-19.20} [21.16]	561.04 (103.50) {-17.98} [18.30]	1145.29 (1638.20) {67.44} [161.55]	322.15 (1454.77) {-4.12} [182.97]
Mai 2001	572.14 (77.99) {-16.35} [16.35]	431.33 (221.83) {-36.94} [37.02]	502.10 (200.98) {-26.59} [27.43]	568.23 (1558.93) {-16.93} [138.75]	572.75 (603.50) {70.46} [146.02]	238.01 (876.80) {-29.16} [137.17]
Março 2002	10.33 (5.89) {-11.22} [44.57]	20.75 (8.13) {3.30} [33.23]	25.35 (17.53) {178.90} [188.96]	14.23 (15.39) {-5.69} [76.89]	13.19 (6.60) {-10.36} [37.72]	19.49 (11.74) {179.18} [182.28]
Abril 2002	18.01 (5.62) {-10.34} [24.83]	10.90 (5.24) {19.88} [51.25]	8.60 (5.69) {-42.99} [49.35]	11.68 (7.58) {-20.60} [48.43]	10.80 (3.87) {54.77} [70.57]	13.50 (11.71) {237.49} [244.90]
Mai 2002	12.24 (5.48) {34.70} [56.50]	10.82 (6.75) {-28.28} [45.86]	16.58 (11.22) {12.69} [55.47]	11.88 (8.26) {70.14} [96.43]	9.72 (4.95) {142.90} [147.09]	9.68 (9.80) {33.21} [88.98]
<b>MAPE Médio</b>	<b>53.20</b>	<b>35.63</b>	<b>55.70</b>	<b>61.68</b>	<b>92.48</b>	<b>135.90</b>

Legenda: Estimativa SNF (Desvio padrão) {Erro percentual} [MAPE dos cenários]

Utilizando as mesmas faixas de variação definidas na Tabela 10, a Figura 42 mostra os resultados a partir de um modelo de redes neurais artificiais (RNA) do tipo *feedforward backpropagation*, 3x5x1 (Figura 26).

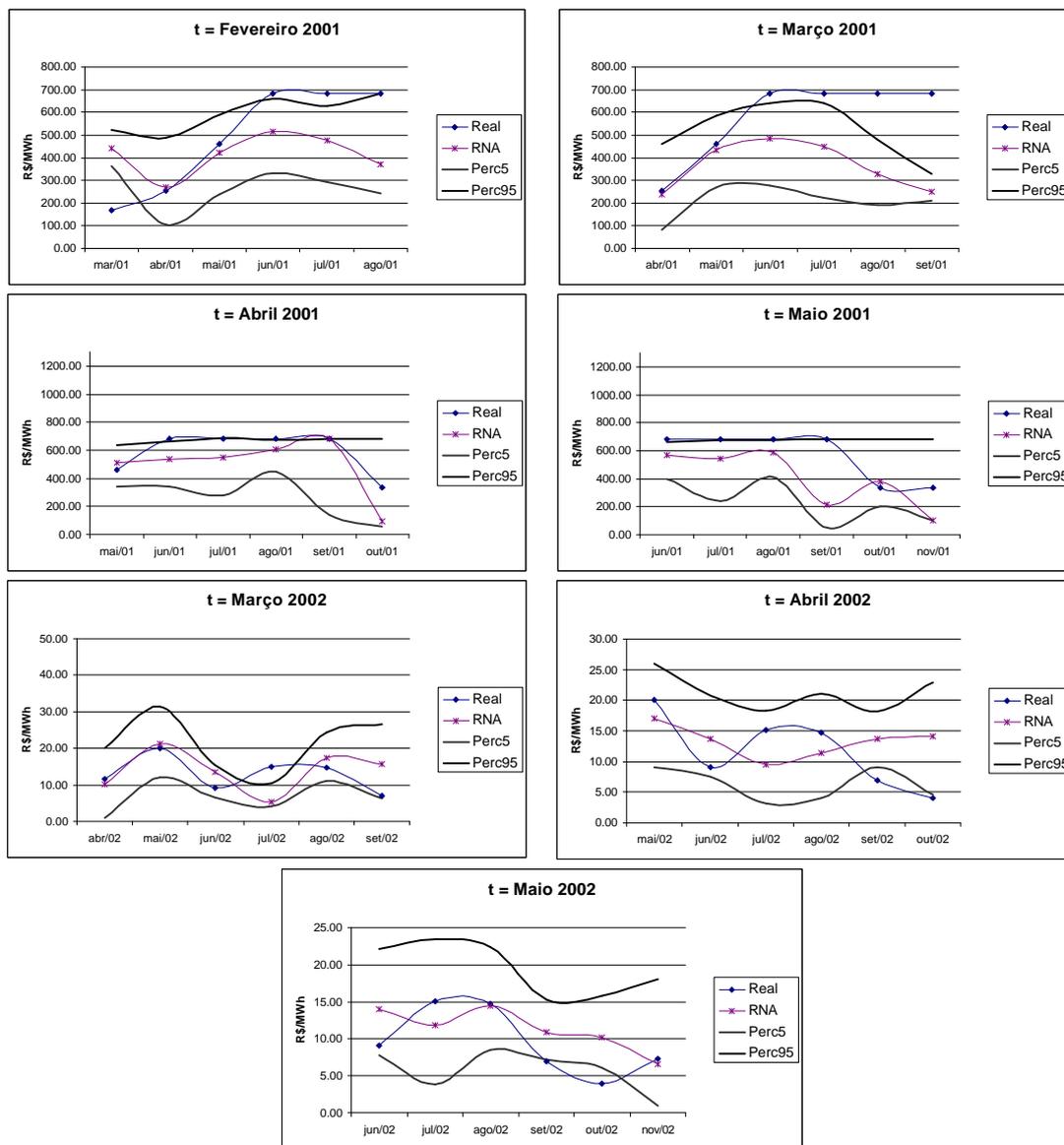


Figura 42. Estimativas de preço via RNA com intervalos (perc. 5% e 95%)

Ainda com relação à Figura 42, observe-se que os intervalos definidos pelos percentis são menores nos modelos de RNA do que nos SNF, embora mais valores reais do preço estejam fora dos intervalos de confiança.

A Tabela 12 mostra os valores estimados do preço com a aplicação das RNA  $k$ -meses-à-frente, com  $k = 1, \dots, 6$ , bem como os erros percentuais e MAPE. Comparando os resultados com os do SNF e do Newave, nota-se que os desvios e os MAPE são, em geral, menores, e são encontrados menos valores exorbitantes. Assim, as estatísticas de comparação são, em geral, melhores nos modelos de RNA, mas suas previsões pontuais podem eventualmente cair fora do intervalo de confiança, o que não ocorre com o Newave e os sistemas neuro-fuzzy.

Tabela 12. Estatísticas das previsões do preço spot com RNA (9.261 cenários)

Mês de Referência	Previsões 6-meses-à-frente					
Mês T	T+1	T+2	T+3	T+4	T+5	T+6
Fevereiro 2001	442.61 (50.91) {166.63} [166.63]	267.53 (125.69) {6.08} [42.70]	421.28 (107.19) {-8.40} [20.32]	516.51 (101.51) {-24.49} [24.49]	476.48 (102.28) {-30.34} [30.34]	370.29 (83.25) {-45.86} [45.86]
Março 2001	239.27 (126.98) {-5.13} [44.62]	434.15 (100.25) {-5.60} [18.93]	483.73 (111.09) {-29.28} [29.28]	448.42 (132.74) {-34.44} [34.44]	326.77 (88.68) {-52.23} [52.23]	249.61 (35.53) {-63.51} [63.51]
Abril 2001	513.09 (92.38) {11.56} [19.92]	539.16 (100.05) {-21.17} [21.17]	547.00 (129.59) {-20.03} [20.12]	603.96 (72.49) {-11.70} [11.70]	285.31 (101.50) {-58.29} [58.29]	94.74 (37.70) {-71.80} [71.80]
Mai 2001	568.14 (83.61) {-16.94} [16.94]	540.30 (140.75) {-21.01} [21.01]	586.22 (83.47) {-14.30} [14.30]	212.79 (156.63) {-68.89} [68.89]	380.20 (121.61) {13.16} [30.08]	100.07 (0.00) {-70.22} [70.22]
Março 2002	10.25 (6.35) {-11.90} [48.06]	21.14 (5.88) {5.21} [24.54]	13.50 (3.13) {48.50} [54.92]	5.29 (2.25) {-64.97} [64.97]	17.30 (3.98) {17.57} [25.47]	15.78 (6.06) {126.08} [129.12]
Abril 2002	17.04 (5.11) {-15.18} [24.72]	13.73 (4.00) {51.07} [55.04]	9.52 (4.82) {-36.92} [42.21]	11.44 (5.28) {-22.20} [35.97]	13.77 (2.74) {97.28} [97.28]	14.09 (5.96) {252.17} [252.62]
Mai 2002	14.03 (4.34) {54.35} [57.63]	11.80 (6.26) {-21.79} [40.54]	14.42 (4.32) {-1.96} [24.55]	10.88 (2.45) {55.91} [56.44]	10.22 (3.01) {155.50} [155.50]	6.60 (5.67) {-9.23} [66.14]
<b>MAPE Médio</b>	<b>54.07</b>	<b>31.99</b>	<b>29.39</b>	<b>42.41</b>	<b>64.17</b>	<b>99.90</b>

Legenda: Estimativa RNA (Desvio padrão) {Erro percentual} [MAPE dos cenários]