

4

Modelagem do Racionamento de Energia em 2001/2002

4.1

Introdução

O impacto do racionamento no consumo de energia elétrica no Brasil, em 2001, ocorreu de forma distinta entre as regiões do país e os ramos de atividades da economia, conforme apresentado nas seções a seguir.

Avaliando o mercado de energia elétrica do Brasil, no período de 1994 a 2006, fez-se uma comparação dos valores de 2001 a 2006 com uma previsão do consumo para este mesmo período, ignorando o efeito do racionamento. Essa projeção tem a função de sinalizar como seria a possível curva de carga caso não houvesse o racionamento no ano de 2001.

As comparações destas projeções com o efetivamente ocorrido foram realizadas de forma a tentar mensurar o efeito de curto e médio prazo do racionamento.

No médio prazo quando o consumo de energia real se encontra abaixo do valor projetado foi considerado neste trabalho que o sistema se tornou eficiente, pois após a recuperação do racionamento o sistema não voltou aos patamares iniciais. O termo eficiência foi relacionado exclusivamente à redução de energia levando-se em consideração as projeções construídas, no sentido que se houve diferença entre a energia real e as projeções é que o consumo foi direcionando com enfoque no combate ao desperdício.

Todas as projeções foram calculadas através do modelo de previsão Holt-Winters [8] [7], utilizando o programa computacional Forecast Pro for Windows – FPW, versão 3.00D. A série histórica da carga, considerada como entrada do programa foi referente aos anos de 1994 a 2000. As projeções foram mensais, a partir de janeiro de 2001 inclusive, e cinco anos à frente para diversas formas de segregações do mercado.

Através da comparação dos valores reais e previstos do consumo, pode-se modelar o comportamento da demanda diante de um racionamento e a sua posterior recuperação. Para isto foi utilizado o programa computacional MATLAB versão 7.1.0.246.

Os dados do mercado de energia de 1994 a 2003 foram retirados do Sistema Planis – ELETROBRÁS e de 2004 a 2006 foram extraídos dos relatórios mensais publicados pela EPE.

4.2 Mercado de Energia Total do Brasil

Primeiramente a análise foi feita para a carga total do país. No Gráfico 4.1 estão expostos os valores realizados no período de 1994 a 2006 e os valores previstos de 2001 a 2006 utilizando o programa computacional FPW empregando modelo de Holt-Winters ajustado a partir de dezembro de 2000. No Gráfico 4.2 está apresentada uma curva que representa a razão entre a carga realizada e a projeção obtida. De acordo com as informações do Gráfico 4.2, o país se tornou eficiente com relação a demanda de energia, pois apresentou uma redução média de aproximadamente 11% em relação a projeção feita. O consumo total do Brasil não se recuperou até os patamares previstos após o racionamento de 2001, tendo se aproximado, nos últimos 12 meses do ano de 2006, em cerca de 90% da projeção considerada.

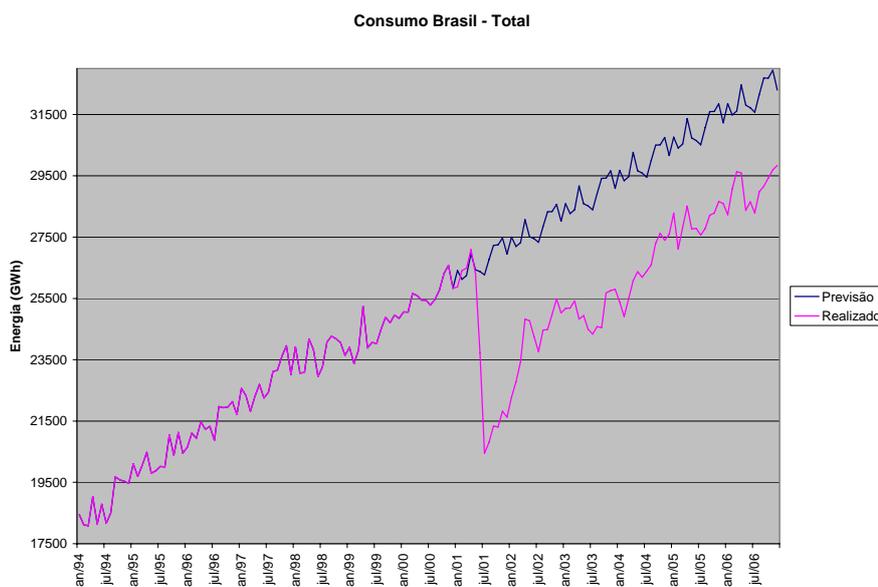


Gráfico 4.1 – Mercado do Brasil e Projeção



Gráfico 4.2 – Razão entre o Mercado de Energia do Brasil e a Projeção

4.3 Mercado de Energia Total do Brasil por Classes de Consumo

Com relação as classes específicas de consumo do país foram realizadas as mesmas previsões citadas anteriormente. As quatro classes consideradas são residencial, comercial, industrial e outras classes. Esta última compreende, entre outras, o setor rural, o poder público, a iluminação pública, o serviço público e o consumo próprio.

Conforme os gráficos 4.3, 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, o setor comercial apresentou uma maior eficiência, com uma redução média de 17% do valor previsto de janeiro de 2001 a dezembro de 2006, aproximando-se, nos últimos 6 meses da análise em aproximadamente 82% da projeção. Esse setor foi seguido pelo residencial com uma média de redução de 16,6%. A classe menos eficiente foi a industrial com aproximadamente 3% de redução média, ficando atrás das outras classes que apresentaram uma redução total média de 8%.

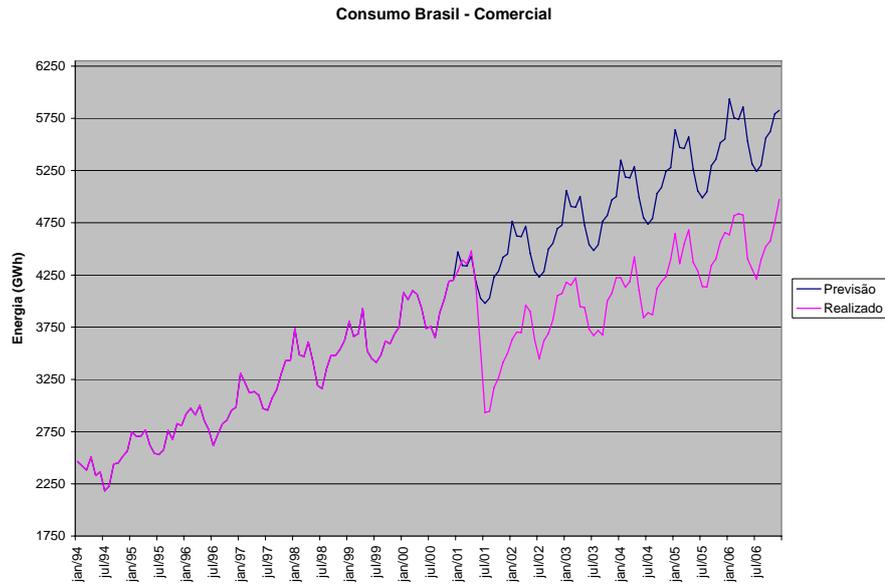


Gráfico 4.3 – Carga do Setor Comercial do Brasil e Projeção

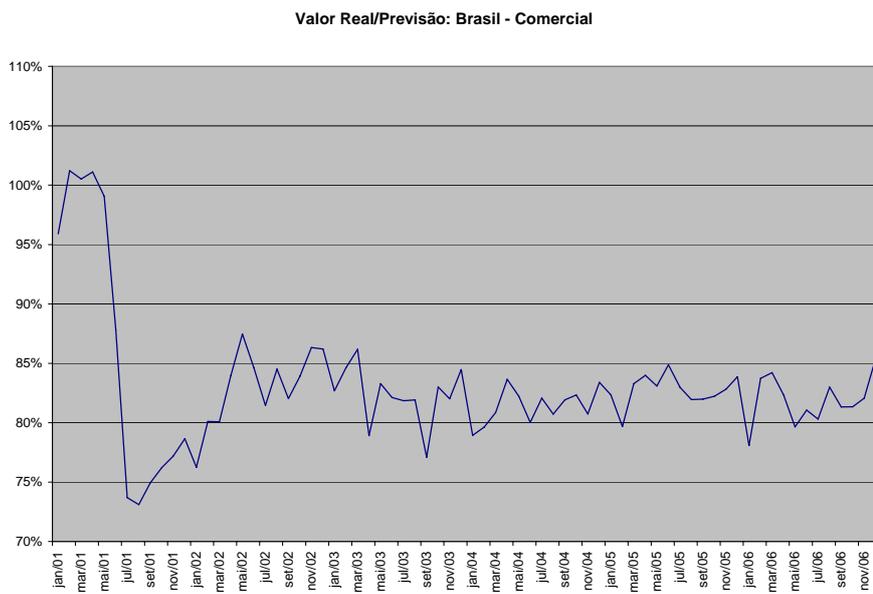


Gráfico 4.4 – Razão entre a Carga do Setor Comercial do Brasil e Projeção

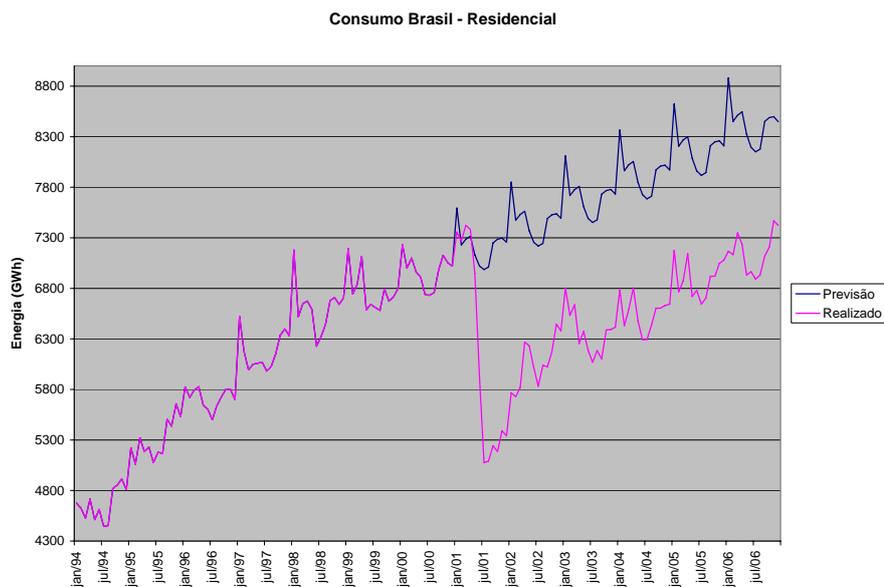


Gráfico 4.5 – Carga do Setor Residencial do Brasil e Projeção

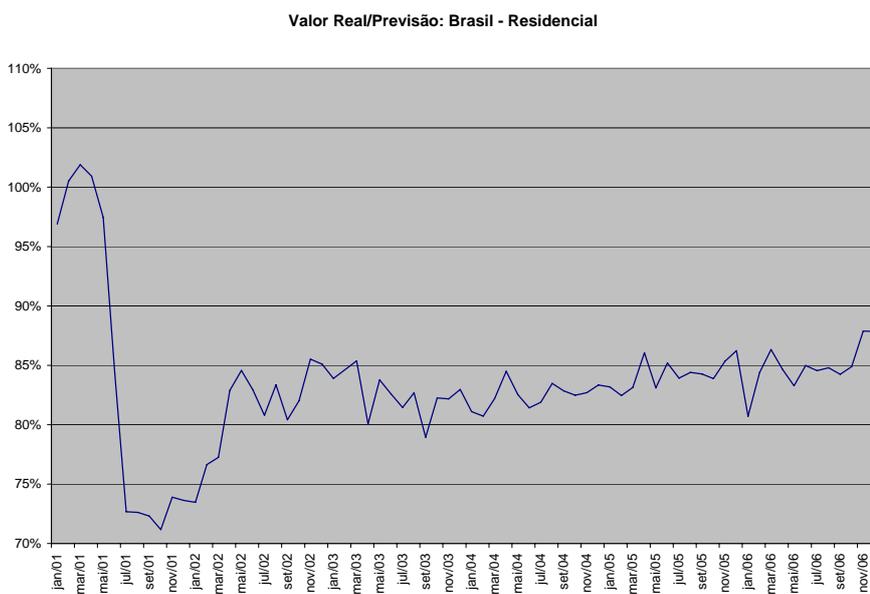


Gráfico 4.6 – Razão entre a Carga do Setor Residencial do Brasil e Projeção

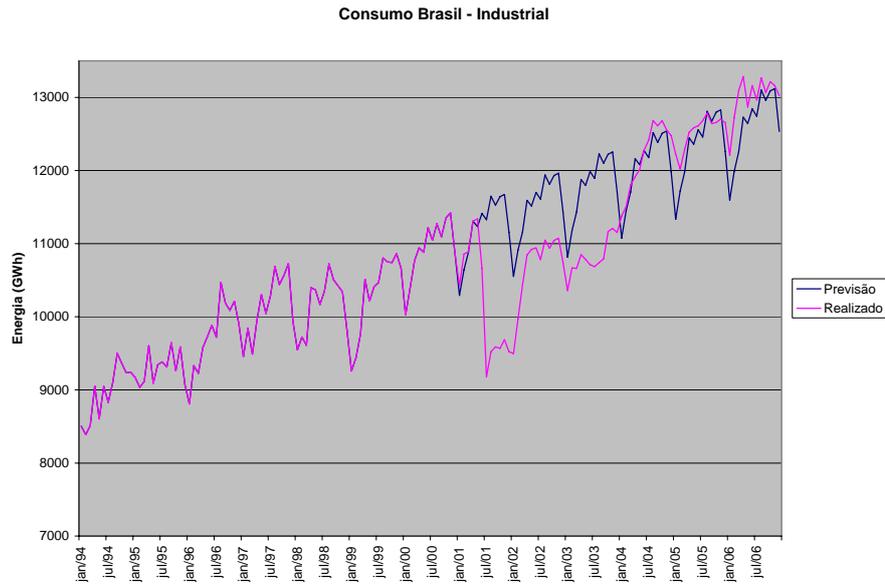


Gráfico 4.7 – Carga do Setor Industrial do Brasil e Projeção

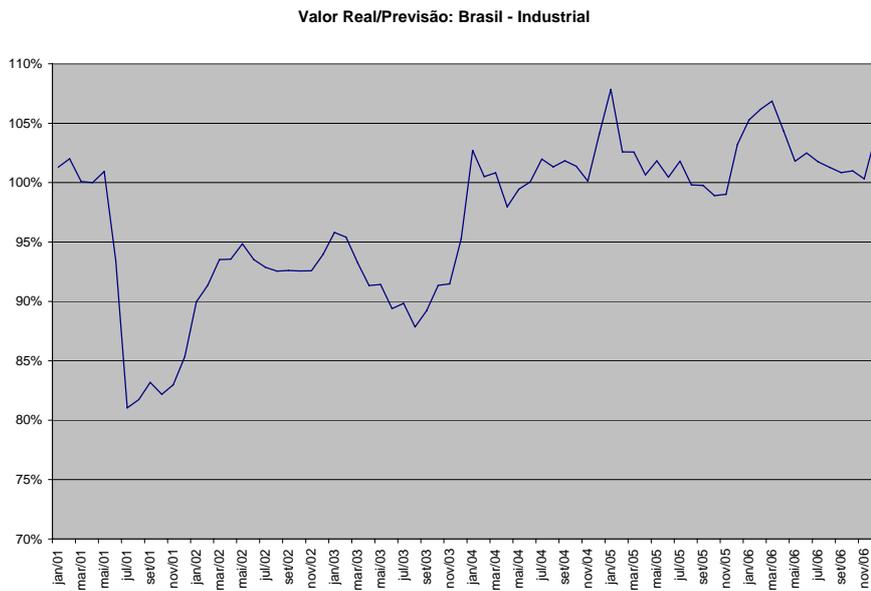


Gráfico 4.8 – Razão entre a Carga do Setor Industrial do Brasil e Projeção

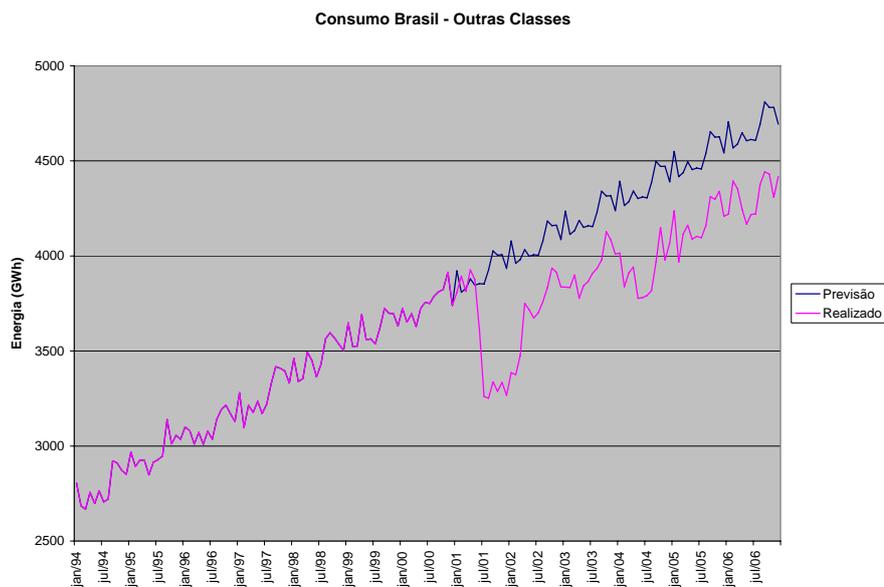


Gráfico 4.9 – Carga das Outras Classes do Brasil e Projeção

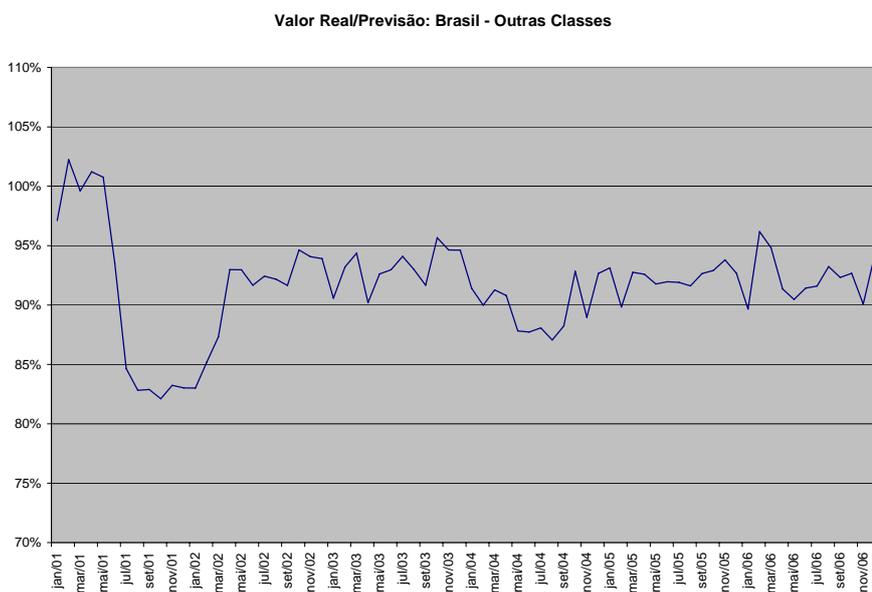
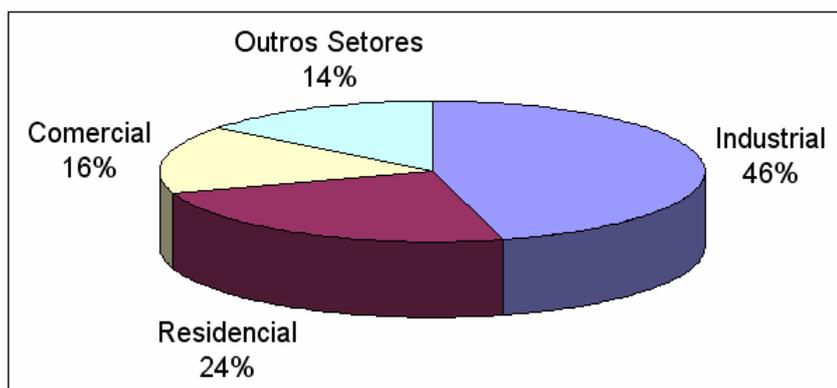


Gráfico 4.10 – Razão entre a Carga das Outras Classes do Brasil e Projeção

Segundo o Boletim Mensal da Empresa de Pesquisa Energética – EPE, com base no mês de dezembro de 2007, o consumo do Brasil está composto setorialmente como mostrado no Gráfico 4.11. A maior parcela do consumo de energia pertence à classe industrial e foi justamente esta a classe menos eficiente,

segundo o conceito deste trabalho, na análise da razão entre a carga real e a projeção. Esse setor é o que apresentará menos dificuldade para diminuir a carga na eventualidade de um novo racionamento de energia, pois como foi o que apresentou menor redução na demanda, poderá racionar mais que os outros. Desta forma, o setor que reduziu o consumo de energia e continuou diminuindo apresentará mais dificuldade para racionar num futuro, caso seja necessário.



Fonte: Estatística e Análise do Mercado de Energia Elétrica - Boletim Mensal (Mês Base: Dezembro 2007)

Gráfico 4.11 - Consumo de Energia no Brasil por Segmentos de Consumo

4.4 Mercado de Energia por Regiões do Brasil

Foram feitas as mesmas projeções e análises para as regiões geográficas do país e observa-se que a região Sudeste se tornou a mais eficiente após o racionamento de 2001. Essa região reduziu cerca de 12% da previsão no período de 2001 a 2006. Em seguida se encontram o Sul com aproximadamente 8%, o Nordeste com 7% e o Centro-Oeste com 6%. A região Sul apresentou uma boa eficiência mesmo não participando do racionamento, pois a bacia do rio Iguaçu apresentou afluências perto da média histórica. Por último a região Norte é apontada como a menos eficiente, pois apresentou um valor de demanda maior que a previsão para o mesmo período. Os valores do Norte atingiram em média 104% da previsão.

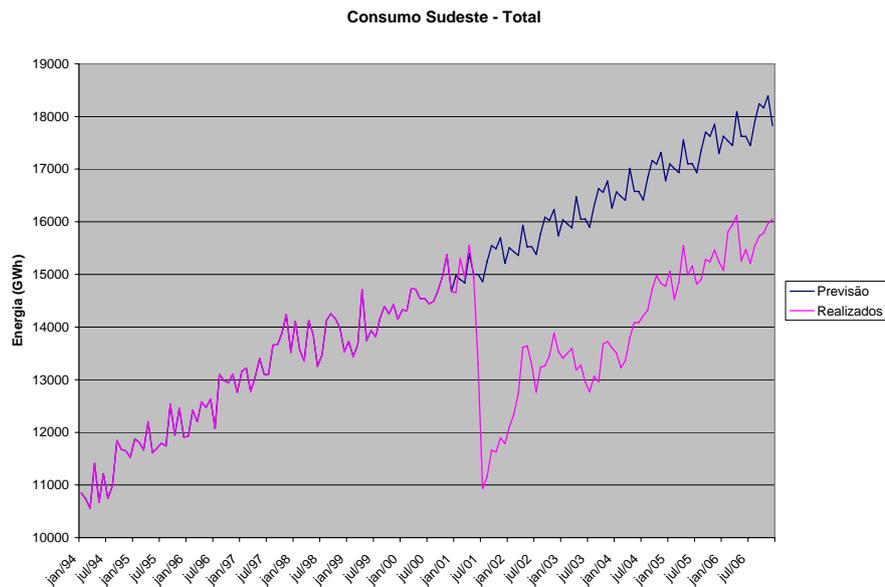


Gráfico 4.12 - Carga da Região Sudeste e Projeção

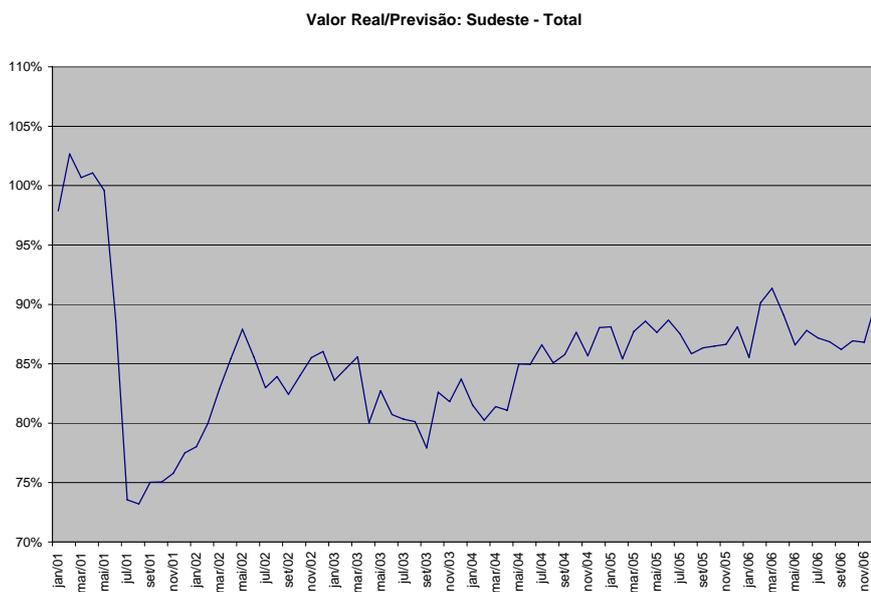


Gráfico 4.13 - Razão entre a Carga da Região Sudeste e Projeção

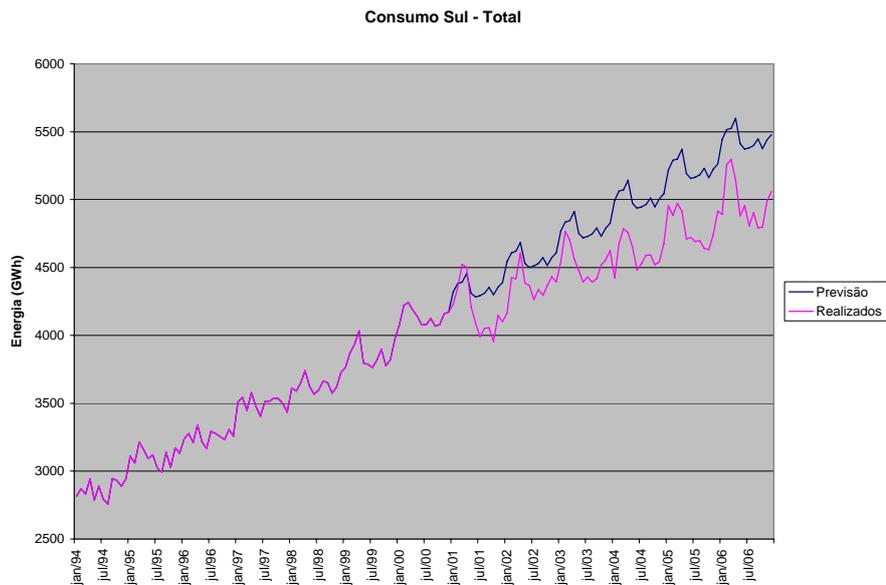


Gráfico 4.14 - Carga da Região Sul e Projeção

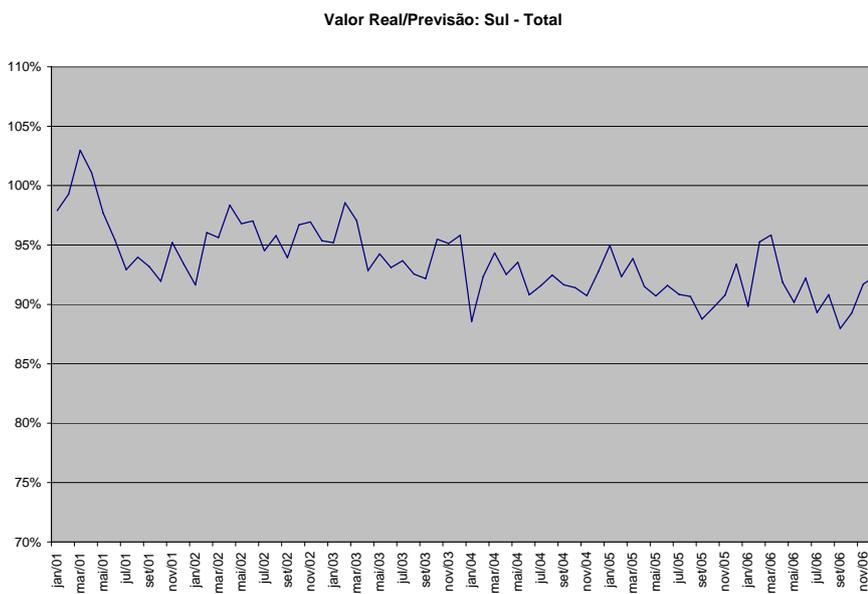


Gráfico 4.15 - Razão entre a Carga da Região Sul e Projeção

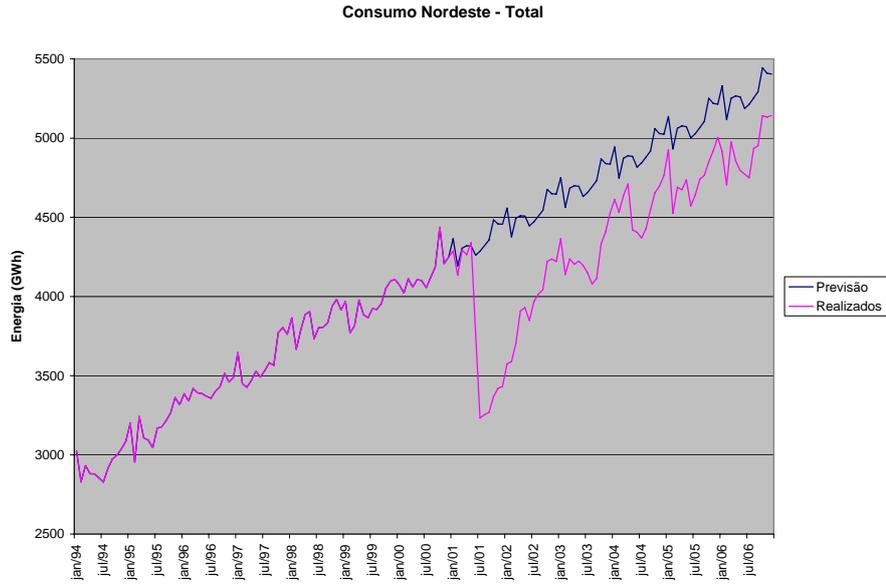


Gráfico 4.16 - Carga da Região Nordeste e Projeção

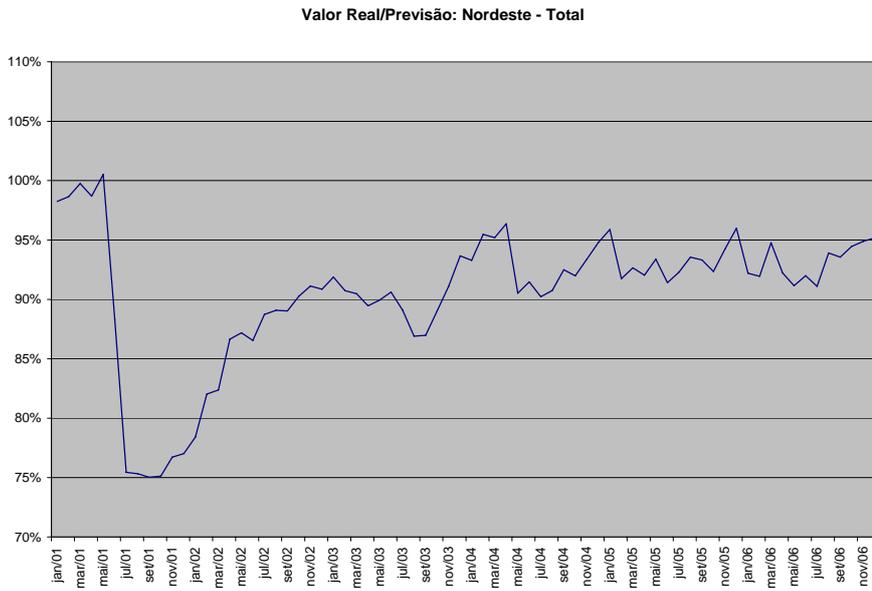


Gráfico 4.17 - Razão entre a Carga da Região Nordeste e Projeção

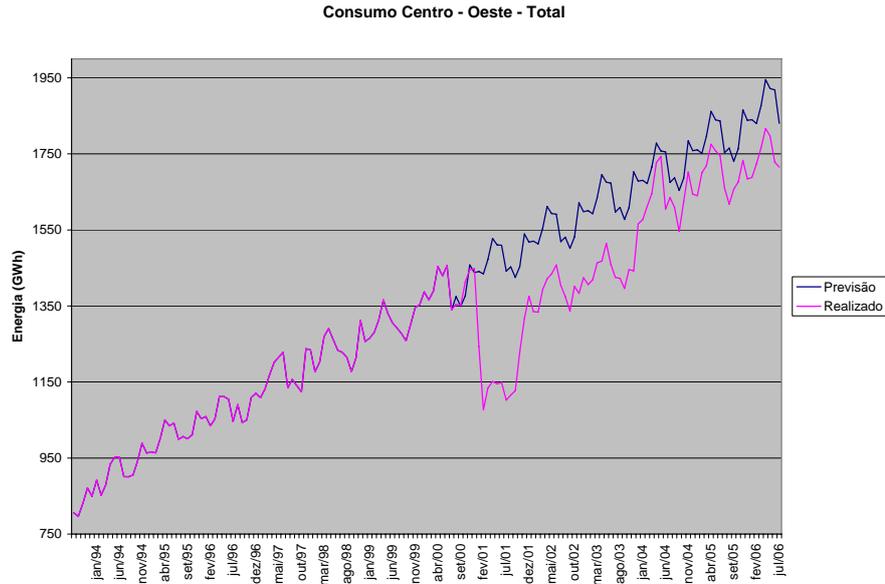


Gráfico 4.18 - Carga da Região Centro-Oeste e Projeção

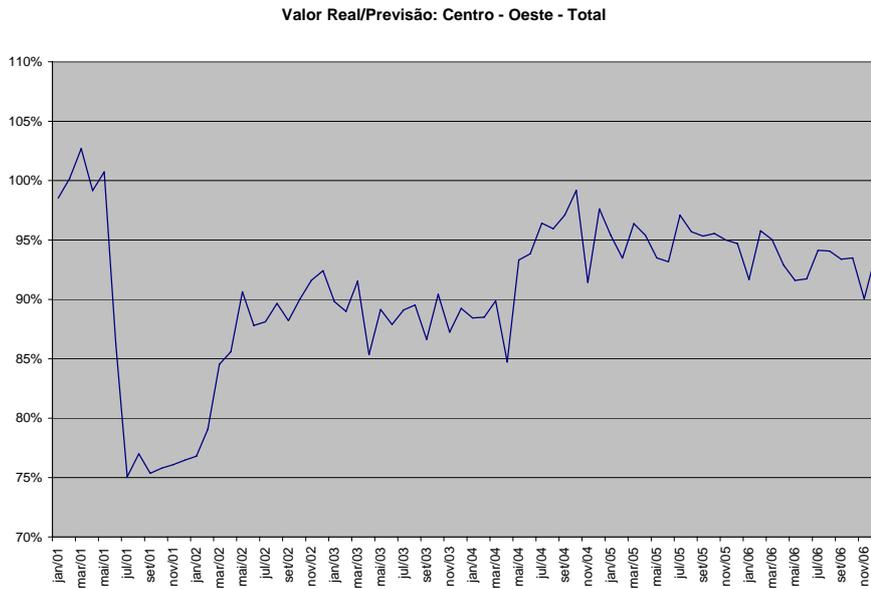


Gráfico 4.19 - Razão entre a Carga da Região Centro-Oeste e Projeção

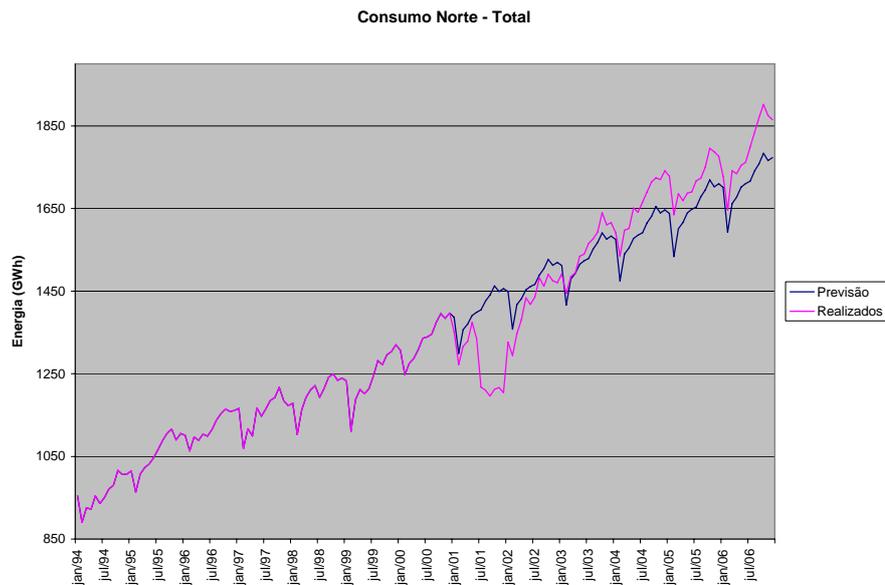


Gráfico 4.20 - Carga da Região Norte e Projeção

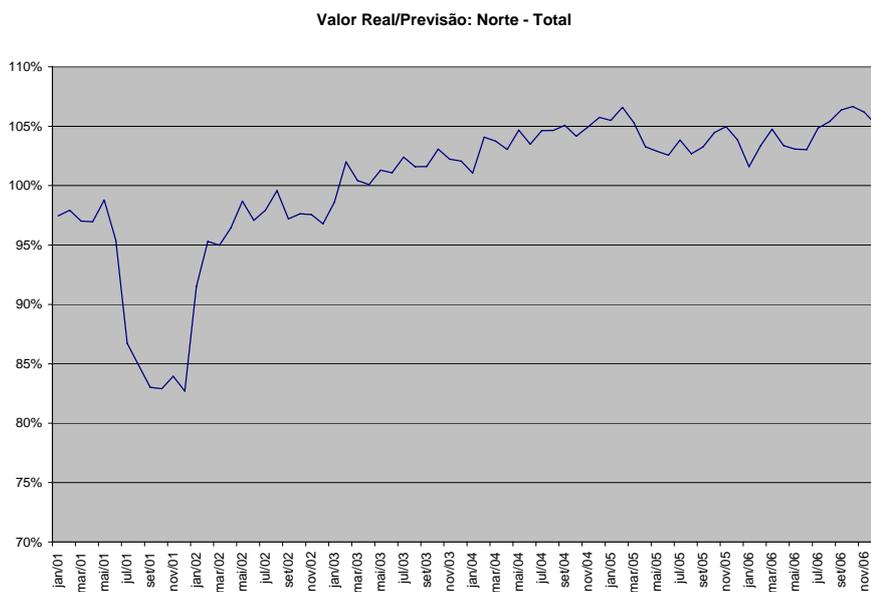


Gráfico 4.21 - Razão entre a Carga da Região Norte e Projeção

4.5

Mercado de Energia por Regiões do Brasil e Classes de Consumo

Seguindo os mesmos procedimentos anteriores, nas regiões Sudeste e Nordeste a classe mais eficiente é a comercial e no Sul, Centro-Oeste e Norte é a

Residencial. Já a classe industrial é a menos eficiente em todas as regiões, exceto na região Nordeste que são as outras classes. Essas informações podem ser conferidas na Tabela 4.1, assim como os seus respectivos percentuais de redução.

Tabela 4.1 – Setores Eficientes por Região Geográfica

Região	Setor mais Eficiente e Redução média Total		Setor menos Eficiente e Redução média Total	
	Norte	Residencial	17%	Industrial
Nordeste	Comercial	20%	Outras Classes	100%(*)
Centro-Oeste	Residencial	17%	Industrial	108%(*)
Sudeste	Comercial	20%	Industrial	7%
Sul	Residencial	14%	Industrial	1%

(*) Esses setores apresentaram consumos médios reais maiores que os projetados.

4.6 Mercado de Energia por Submercados

O Sistema Interligado Nacional – SIN apresenta quatro submercados que correspondem as regiões demográficas, exceto pelo Sudeste que engloba as regiões Sudeste e Centro-Oeste. Portanto, os valores dos Gráficos 4.14, 4.15, 4.16, 4.17, 4.20 e 4.21, também correspondem, respectivamente, aos submercados Sul, Nordeste e Norte. Os Gráficos 4.22 e 4.23 representam as mesmas projeções e análises para o submercado sudeste.

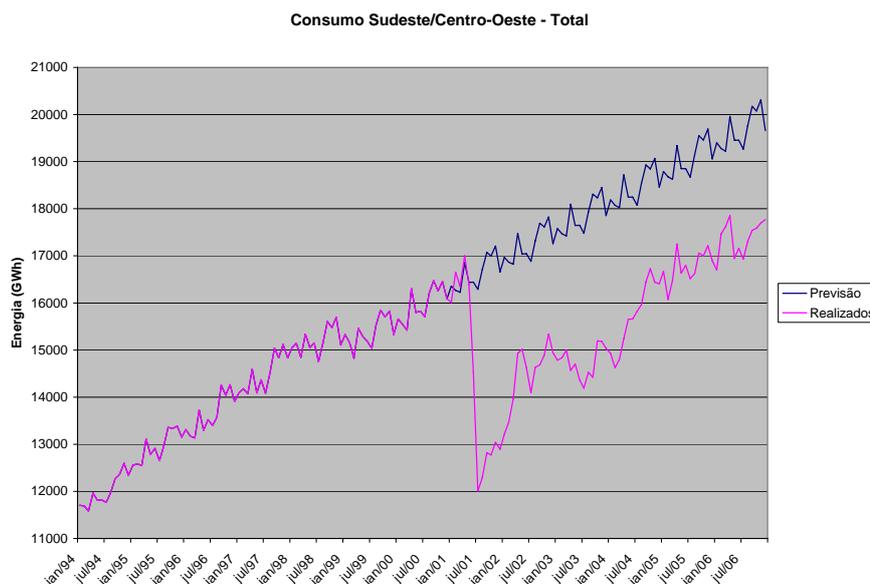


Gráfico 4.22 - Carga do Submercado Sudeste e Projeção

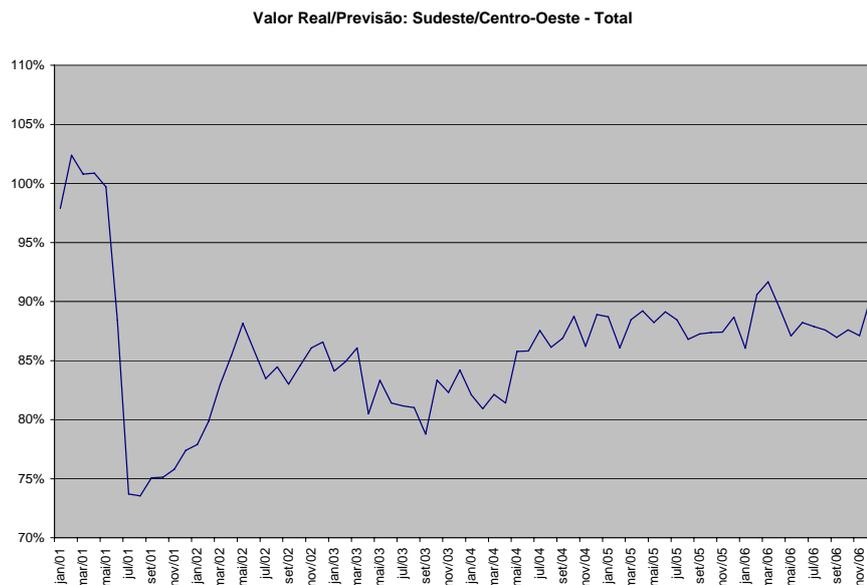


Gráfico 4.23 - Razão entre a Carga do Submercado Sudeste e Projeção

4.7 Modelagem das Curvas Características do Consumo dos Submercados

Através do comportamento da razão entre a carga verificada e a projeção obtida por meio de modelos autoprotetivos foi encontrada a curva que melhor se ajusta por submercado. Estas curvas ajustadas procuram modelar a evolução desta razão ao longo do tempo. A modelagem foi realizada através do programa computacional MATLAB versão 7.1.0.246. Para isto foi utilizada a função Curve Fitting Tool presente no toolbox do MATLAB [13]. O critério de seleção da curva combina a parcimônia do modelo e a qualidade do ajuste. Para todos submercados foram testados polinômios de graus 2 a 8, splines cúbicos, soma de senos e de funções Gaussianas, segundo [1] e [2].

Para o submercado sudeste foram utilizados os pontos do Gráfico 4.23 e foram divididos em duas regiões para a melhor escolha da curva de ajuste. A parte decrescente correspondente aos doze primeiros meses e a parte crescente é a partir de janeiro de 2002. Ambas as regiões podem ser visualizadas no Gráfico 4.24.

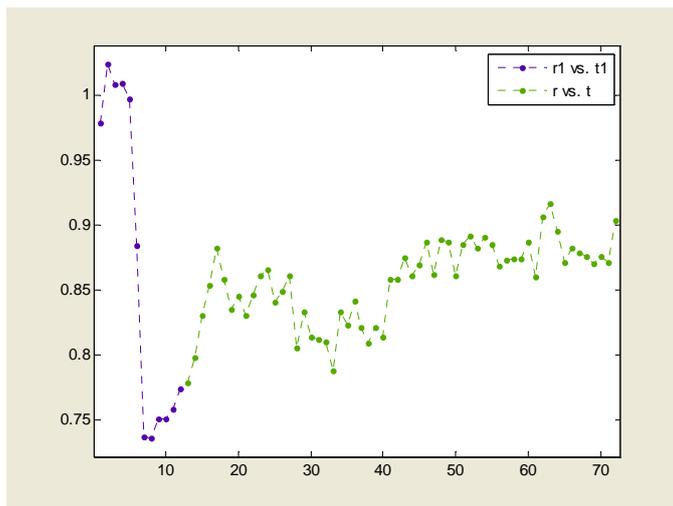


Gráfico 4.24 – Submercado Sudeste - Razão entre a Carga e a Projeção

A região decrescente se ajustou melhor a uma soma de quatro funções Gaussianas. A equação 4.1 corresponde a função de ajuste considerada na primeira região. O tempo (t) é expresso em meses, o R^2 ajustado, que indica o quanto a regressão encontrada se ajustou aos pontos reais penalizado pelo número de parâmetros, foi de 98,61% e o RMSE da regressão, que é a raiz do erro quadrático médio, foi de 0,01489. O Gráfico 4.25 apresenta a curva ajustada para a primeira região.

$$f(t) = 0.5024 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-1.601}{3.12}\right)^2\right) + 0.2133 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-5.048}{1.426}\right)^2\right) + 0.7711 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-12.56}{17.29}\right)^2\right) \quad (4.1)$$

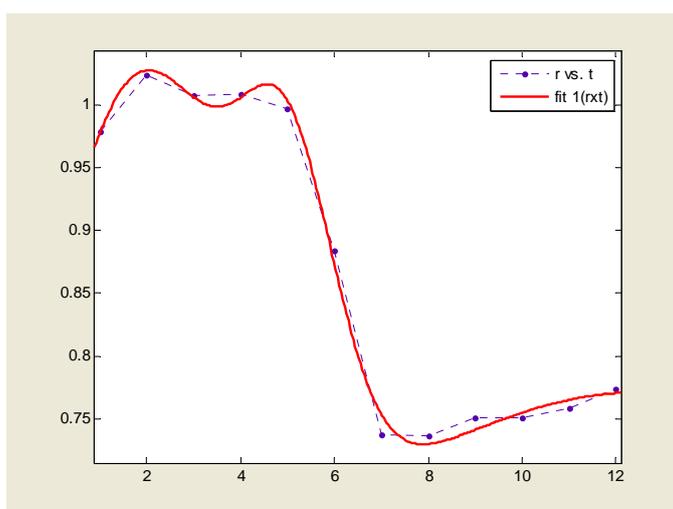


Gráfico 4.25 – Curva ajustada para região decrescente do submercado Sudeste

Já na região crescente se ajustou melhor uma soma de sete funções Gaussianas. A equação 4.2 corresponde a função de ajuste considerada na segunda região. O tempo (t) é expresso em meses, o R^2 ajustado foi de 81,47% e o RMSE da regressão foi 0,01344. O Gráfico 4.26 apresenta a curva ajustada na segunda região.

$$f(t) = 0.05149 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-62.9}{1.203}\right)^2\right) + 0.8081 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-44.76}{30.61}\right)^2\right) + 0.4421 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-13.77}{6.485}\right)^2\right) + 0.3023 \cdot \exp\left(-\left(\frac{x-23.65}{8.182}\right)^2\right) + 0.04588 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-35.31}{1.937}\right)^2\right) + 0.9006 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-93.47}{29.2}\right)^2\right) + 0.0221 \cdot \exp\left(-\left(\frac{t-42.27}{1.588}\right)^2\right) \quad (4.2)$$

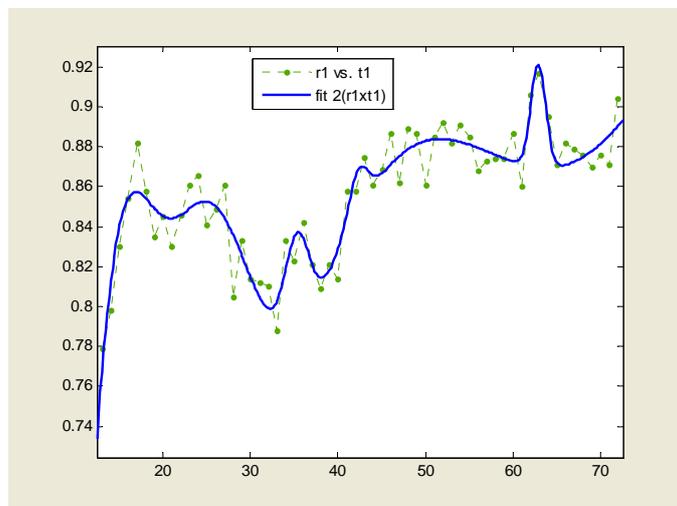


Gráfico 4.26 – Curva ajustada para região crescente do submercado Sudeste

O Gráfico 4.27 apresenta as duas curvas ajustadas aos pontos correspondentes a razão entre o mercado real e a projeção.

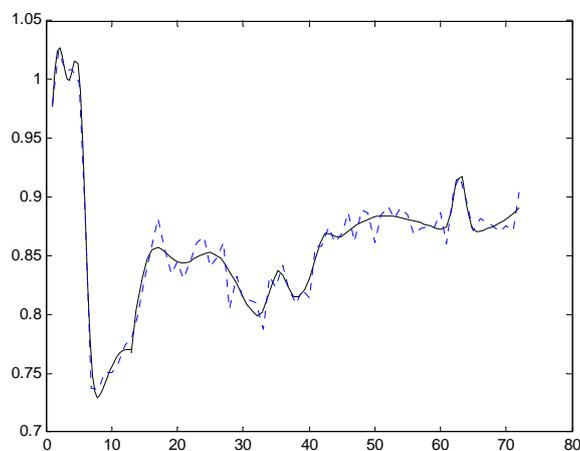


Gráfico 4.27 – Curva ajustada e Razão no submercado Sudeste

Para o submercado sul foram utilizados os pontos do Gráfico 4.15 e a curva que melhor se ajustou aos pontos foi uma soma de seis funções Gaussianas. O Gráfico 4.28 apresenta o comportamento da razão e a curva que melhor se ajustou. A equação 4.3 apresenta a equação da curva ajustada. O tempo (t) é expresso em meses, o R^2 ajustado foi de 76,5% e o RMSE da regressão foi 0,01653.

$$f(t) = 0.1485 * \exp(-((t-2.588)/3.377)^2) + 0.9635 * \exp(-((t-20.48)/55.92)^2) + 0.2126 * \exp(-((t-62.78)/5.668)^2) + 0.2128 * \exp(-((t-52.54)/8.568)^2) + 0.0485 * \exp(-((t-39.44)/6.305)^2) + 0.6052 * \exp(-((t-77.18)/11.62)^2) \quad (4.3)$$

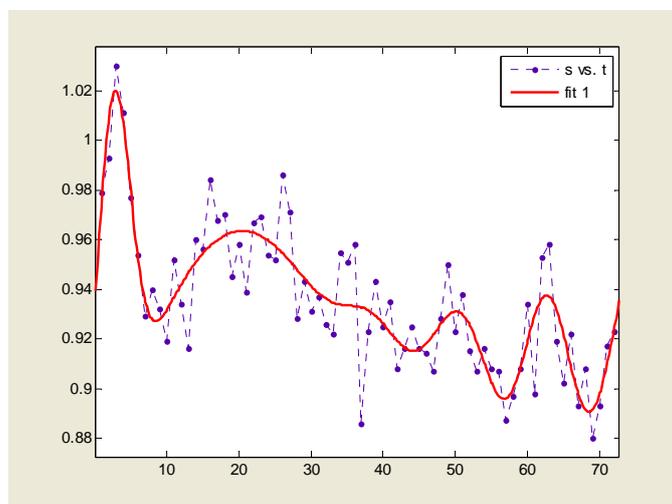


Gráfico 4.28 - Curva ajustada e Razão no submercado Sul

Para o submercado nordeste foram utilizados os pontos do Gráfico 4.17 e foram divididos em duas regiões para a melhor escolha da curva de ajuste. A parte decrescente correspondente aos dez primeiros meses e a parte crescente é a partir de novembro de 2001. Ambas as regiões podem ser visualizadas no Gráfico 4.29.

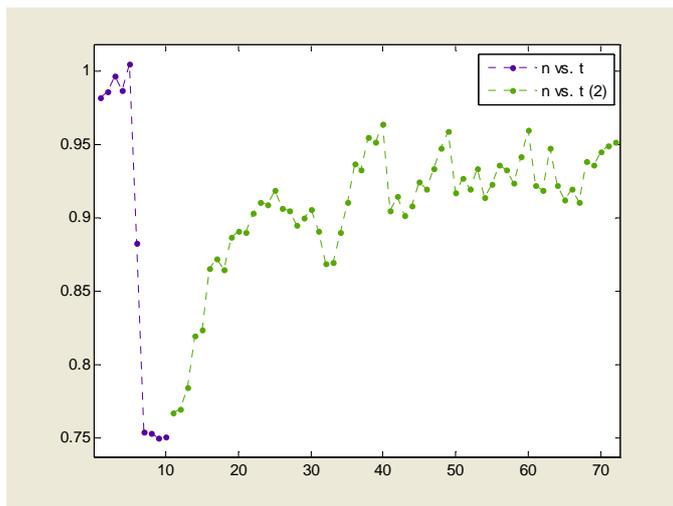


Gráfico 4.29 – Submercado Nordeste - Razão entre a Carga e a Projeção

A região decrescente se ajustou melhor a uma soma de três funções Gaussianas. A equação 4.4 corresponde a função de ajuste considerada na primeira região. O tempo (t) é expresso em meses, o R^2 ajustado foi de 96,54% e o RMSE da regressão foi 0,02217. O Gráfico 4.30 apresenta a curva ajustada.

$$f(t) = 0.1362 \cdot \exp(-((t-5.152)/1.134)^2) + 0.998 \cdot \exp(-((t-2.086)/7.539)^2) + 0.4361 \cdot \exp(-((t-10.62)/2.99)^2) \quad (4.4)$$

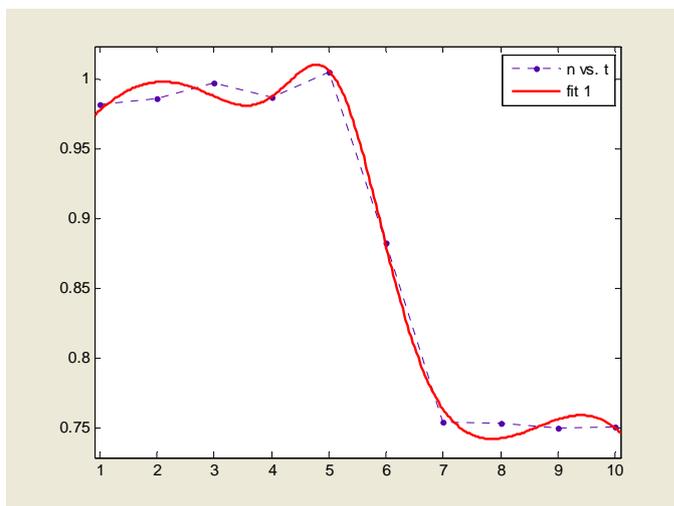


Gráfico 4.30 – Curva ajustada para região decrescente do submercado Nordeste

Já a região crescente se ajustou melhor a uma soma de quatro funções Gaussianas. A equação 4.5 corresponde a função de ajuste considerada na segunda

região. O tempo (t) é em meses, o R^2 ajustado foi de 90,62% e o RMSE da regressão foi 0,01297. O Gráfico 4.31 apresenta a curva ajustada.

$$f(t) = 0.07553 * \exp(-((t - 38.05)/2.954)^2) + 132.5 * \exp(-((t - 1612)/692.2)^2) + 0.2217 * \exp(-((t - 21.07)/13.51)^2) + 0.1191 * \exp(-((t - 47.07)/14.69)^2) \quad (4.5)$$

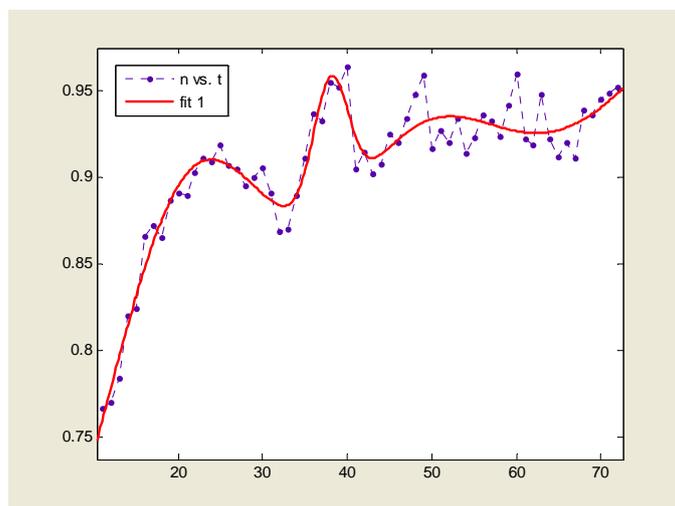


Gráfico 4.31 – Curva ajustada para região crescente do submercado Nordeste

O Gráfico 4.32 apresenta as duas curvas ajustadas aos pontos correspondentes a razão entre o mercado real e a projeção.

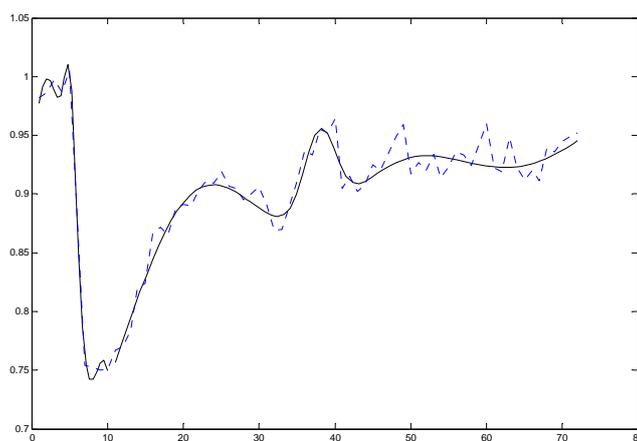


Gráfico 4.32 - Curva ajustada e Razão no submercado Nordeste

Para o submercado norte foram utilizados os pontos do Gráfico 4.21 e foram divididos em duas regiões para a melhor escolha da curva de ajuste. A parte decrescente corresponde aos quatorze primeiros meses e a parte crescente é a partir de março de 2002. Ambas as regiões podem ser visualizadas no Gráfico 4.33.

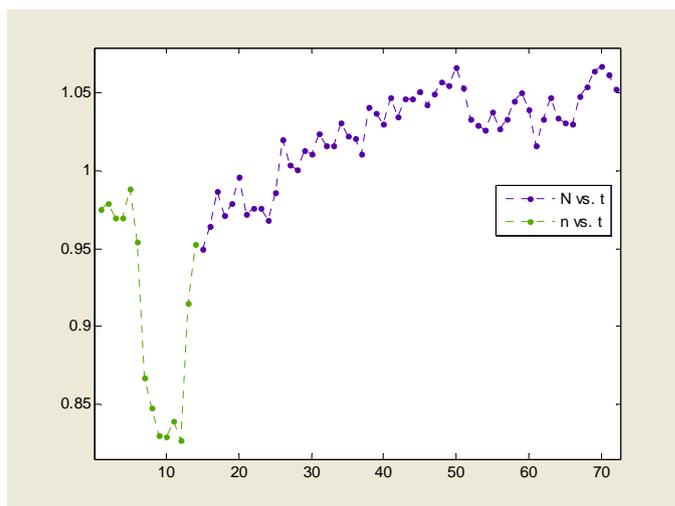


Gráfico 4.33 – Submercado Norte - Razão entre a Carga e a Projeção

A região decrescente se ajustou melhor um polinômio de 4º grau. A equação 4.6 corresponde a função de ajuste considerada na primeira região. O tempo (t) é expresso em meses, o R^2 ajustado foi de 89,89% e o RMSE da regressão foi 0,02099. O Gráfico 4.34 apresenta a curva ajustada.

$$f(t) = (-1.706e-005)*t^5 + 0.0006407*t^4 + (-0.008004)*t^3 + 0.03785*t^2 + (-0.06809)*t + 1.013 \quad (4.6)$$

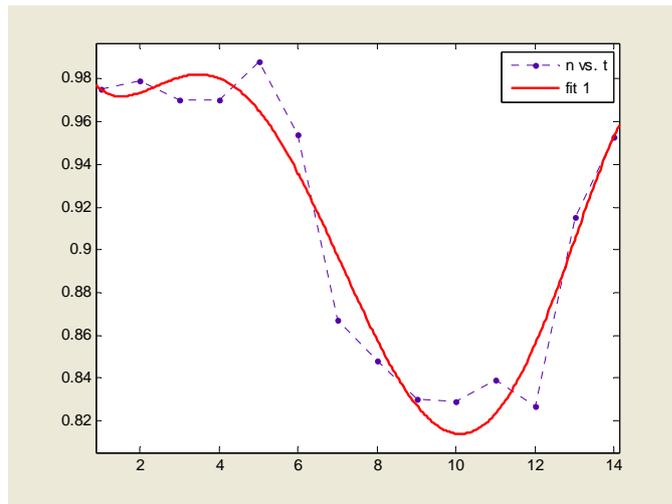


Gráfico 4.34 – Curva ajustada para região decrescente do submercado Norte

Já a região crescente se ajustou melhor a uma soma de cinco funções Gaussianas. A equação 4.7 corresponde a função de ajuste considerada na segunda região. O tempo (t) é em meses, o R^2 ajustado foi de 88,5% e o RMSE da regressão foi 0,009811. O Gráfico 4.35 apresenta a curva ajustada.

$$f(t) = 1.741 * \exp(-((t-373.3)/428.7)^2) + 0.08493 * \exp(-((t-40.66)/14.04)^2) + 0.06336 * \exp(-((t-27.09)/6.629)^2) + 0.09448 * \exp(-((t-17.13)/4.942)^2) + 0.02319 * \exp(-((t-49.65)/1.674)^2) \quad (4.7)$$

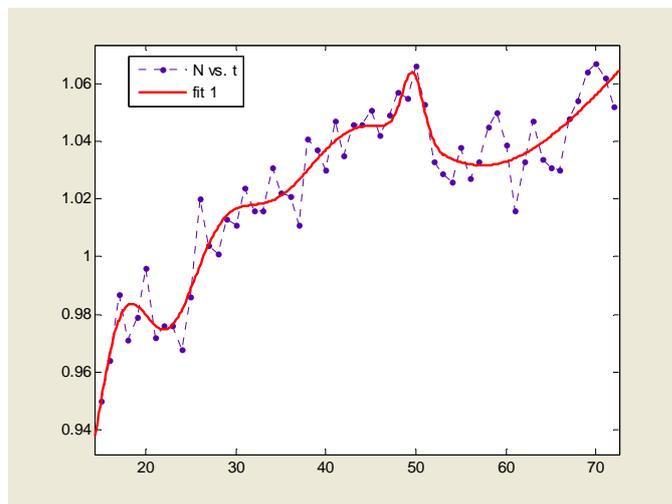


Gráfico 4.35 – Curva ajustada para região crescente do submercado Norte

O Gráfico 4.36 apresenta as duas curvas ajustadas aos pontos correspondentes a razão entre o mercado real e a projeção.

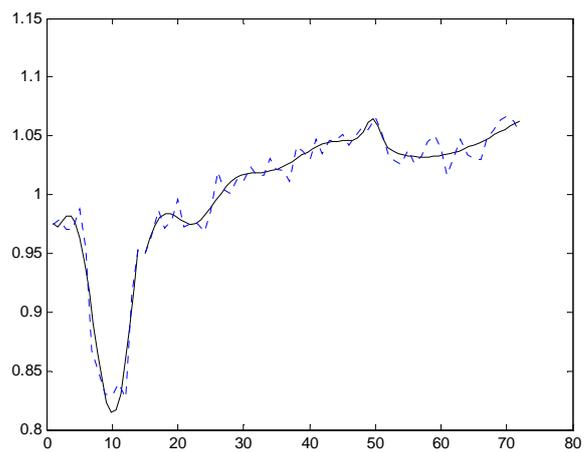


Gráfico 4.36 - Curva ajustada e Razão no submercado Norte