

5

O Desafio: Atender às Necessidades Energéticas da Sociedade

5.1

Idéia Central

O Brasil apresenta fortes incertezas para o suprimento futuro de energia elétrica. Nos últimos anos, o desequilíbrio entre a oferta e a demanda, causado principalmente pela falta de planejamento, chegou a causar racionamento que afetou o crescimento econômico do país.

A falta de investimentos, de manutenção e de modernização desse serviço tem provocado um enorme impacto sobre as atividades econômicas.

O país é incapaz de manter um crescimento econômico sustentável sem que se expanda o volume e a qualidade dos investimentos no setor elétrico, afastando de vez o fantasma de um novo racionamento. Entretanto, para atender às necessidades energéticas, é preciso antes de tudo conhecê-las.

Este capítulo focaliza a previsão de demanda a longo prazo, para cada submercado do SIN. A dinâmica do mercado será modelada em função das variáveis que a explicam: em nossa experiência, a economia (aqui representada pelo PIB) e a temperatura.

A idéia é determinar a demanda através dos valores futuros do PIB nacional e da temperatura média em cada submercado. Este trabalho utilizará técnicas de Teoria de Análise Funcional [12], implementadas em um Modelo para a Previsão de Cargas e uma Plataforma Computacional para a Previsão a Curto, Médio e Longo Prazo [8] desenvolvida pela ENGENHO, cedida para o estudo a seguir.

5.2

O Produto Interno e o Espaço de Hilbert

Um Espaço de Hilbert é um espaço de vetores com um produto escalar que é completo como um espaço normalizado, satisfazendo:

- a) $(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = (\mathbf{y}, \mathbf{x})$;
- b) $(\alpha\mathbf{x} + \beta\mathbf{y}, \mathbf{z}) = \alpha(\mathbf{x}, \mathbf{z}) + \beta(\mathbf{y}, \mathbf{z})$;
- c) $(\mathbf{x}, \mathbf{x}) \geq 0$; $(\mathbf{x}, \mathbf{x}) = 0$ se e somente se $\mathbf{x} = \mathbf{0}$.

O produto interno (ou escalar) é um mapeamento de pares ordenados de vetores no espaço linear para o plano complexo. Esse mapeamento, cuja imagem é denotada por $(\mathbf{x}, \mathbf{y})$ em $\mathbf{C}$ satisfaz às propriedades acima.

A definição de produto interno induz a uma norma, que, por sua vez, induz a uma métrica. Portanto, o espaço com norma induzida pelo produto interno é um espaço métrico, com uma métrica particular embutida. Esse espaço é denominado Produto Interno e quando completo é um Espaço de Hilbert.

A idéia é achar variáveis explicativas que representem um Espaço de Hilbert contendo a série histórica de demanda de cada submercado do SIN. O processo de busca dessas bases é relativamente simples em sua concepção, resumindo-se em achar, para cada submercado, as séries de alta correlação com a demanda de carga e delas selecionar as mais adequadas à formação da respectiva base.

A partir dessa informação, calcula-se, para cada submercado, a projeção da série histórica a ser explicada (demanda de carga por submercado) na série histórica explicativa. Essa projeção representa a informação contida na variável explicativa, caracterizando a dependência linear com a demanda.

O resíduo, por construção, é ortogonal à série explicativa e, portanto, representa a informação não contida na variável explicativa utilizada.

O próximo passo é, iterativamente, encontrar uma nova variável explicativa capaz de explicar o resíduo, ou seja, a informação ainda não explicada, continuando o processo até que o resíduo final seja mínimo ou desprezível.

Para esse trabalho, esse processo está ilustrado por apenas duas variáveis explicativas (PIB nacional e temperatura média por submercado), consideradas as mais relevantes, isto é, as que possuem, em nosso conhecimento, alta correlação com a série histórica de demanda de carga. Considera-se que, através da utilização dessas duas variáveis, atingem-se níveis de resíduos razoáveis para os objetivos desta tese.

De posse da decomposição linear da demanda, é possível estimar os valores futuros da demanda tendo por base valores futuros do PIB e da temperatura média de cada submercado.

O processo descrito será aplicado para a previsão de demanda em cada submercado e está estruturado a seguir:

- Passo 1: projeção da série histórica de demanda do submercado na variável explicativa PIB nacional

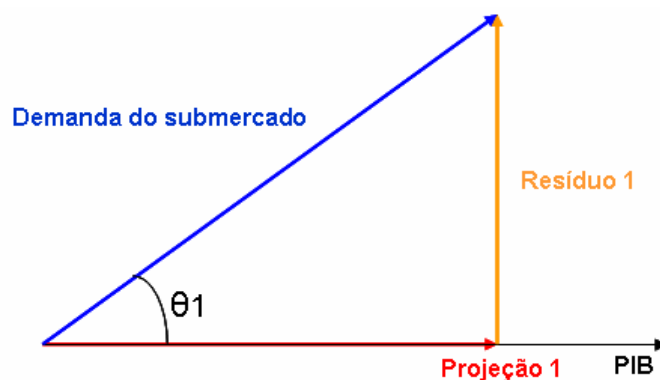


Figura 9 – Projeção da demanda do submercado na variável explicativa PIB nacional

É importante ressaltar que, para o cálculo da projeção, serão consideradas as variáveis com as médias retiradas para que não ocultem a forma de variação dos sinais envolvidos na correlação

$$\cos \theta_1 = \frac{(d(t), \text{PIB}(t))}{\|d(t)\| * \|\text{PIB}(t)\|}$$

$$p_1(t) = \underbrace{\|d(t)\| * \frac{(d(t), \text{PIB}(t))}{\|d(t)\| * \|\text{PIB}(t)\|}}_{\text{tamanho e sentido}} * \underbrace{\frac{\text{PIB}(t)}{\|\text{PIB}(t)\|}}_{\text{vetor unitário}} \quad (5.1)$$

$$r_1(t) = d(t) - p_1(t)$$

onde,

$p_1(t)$ projeção 1: projeção da demanda do submercado no PIB para o estágio t

$d(t)$ demanda do submercado para o estágio t

PIB(t)	PIB nacional para o estágio t
Θ_1	ângulo entre a demanda do submercado e o PIB nacional
$r_1(t)$	resíduo da projeção 1 para o estágio t

Dessa forma, pode-se escrever a demanda do submercado em função do PIB Nacional e do resíduo₁ da seguinte maneira:

$$d(t) = \|d(t)\| \cdot \cos \theta_1 \cdot \frac{PIB(t)}{\|PIB(t)\|} + r_1(t) \quad (5.2)$$

- Passo 2: projeção do resíduo da projeção do passo 1 na variável explicativa temperatura média do submercado

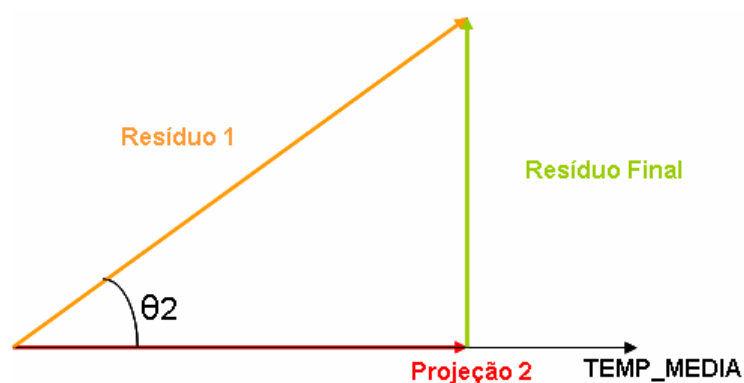


Figura 10 – Projeção do resíduo₁ na variável explicativa temperatura média do submercado

$$\cos \theta_2 = \frac{(r_1(t), T_M(t))}{\|r_1(t)\| \cdot \|T_M(t)\|}$$

$$p_2(t) = \underbrace{\|r_1(t)\| \cdot \frac{(r_1(t), T_M(t))}{\|r_1(t)\| \cdot \|T_M(t)\|}}_{\text{tamanho e sentido}} \cdot \underbrace{\frac{T_M(t)}{\|T_M(t)\|}}_{\text{vetor unitário}} \quad (5.3)$$

$$r_f(t) = r_1(t) - r_2(t)$$

Dessa forma, pode-se escrever o resíduo₁ em função da temperatura média do submercado e do resíduo final da seguinte maneira:

$$r_1(t) = \|r_1(t)\| * \cos \theta_2 * \frac{T_M(t)}{\|T_M(t)\|} + r_f(t) \quad (5.4)$$

onde o resíduo₁ ($e_1(t)$) é a informação contida na demanda de carga que não tem dependência linear com a variável explicativa PIB nacional.

Teoricamente, para que se determine o Espaço de Hilbert, que é um espaço métrico completo, o resíduo final da aproximação deveria ser nulo. Isto exigiria uma busca árdua de variáveis explicativas, com pequena contribuição à demanda total, até a completa explicação de toda a série de carga. Na prática, isso nem sempre é possível ou necessário. A questão das perdas comerciais, por exemplo, não é uma questão de simples análise. Para os fins dessa tese, a idéia é ilustrar esta metodologia, utilizando-se tão somente o PIB e a temperatura média, objetivando atingir um nível de resíduo adequadamente reduzido para satisfazer aos objetivos deste trabalho.

5.2

Caso Exemplo

Para esse estudo de caso, as séries históricas de demanda por submercados [15] utilizadas estão nas figuras a seguir, sendo as respectivas tabelas apresentadas no Anexo 1.

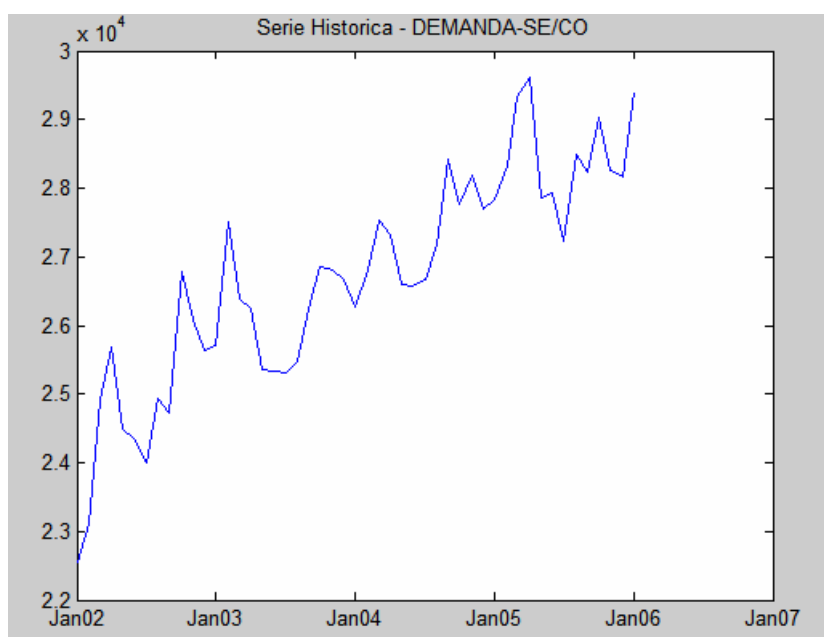


Figura 11 – Série Histórica – Demanda do Subsistema SE/CO (MWmês)

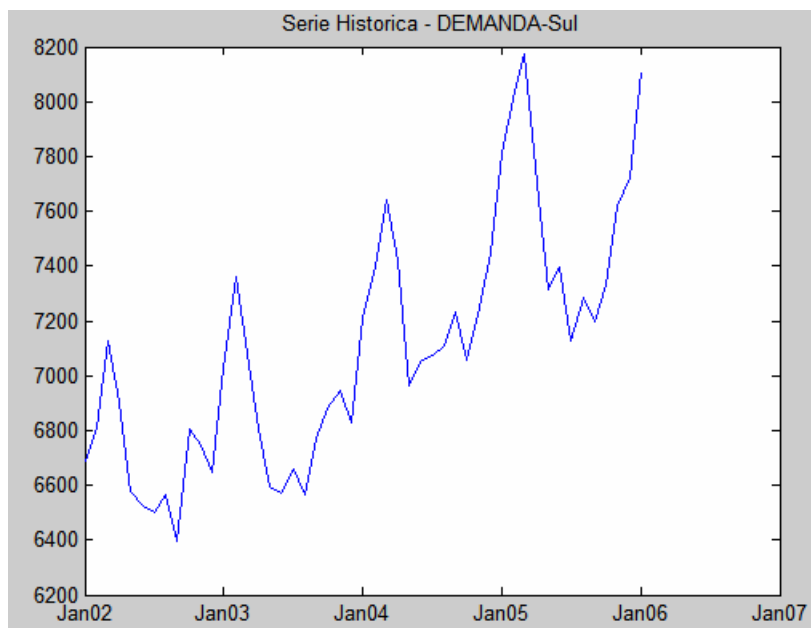


Figura 12 – Série Histórica – Demanda do Subsistema Sul (MWmês)

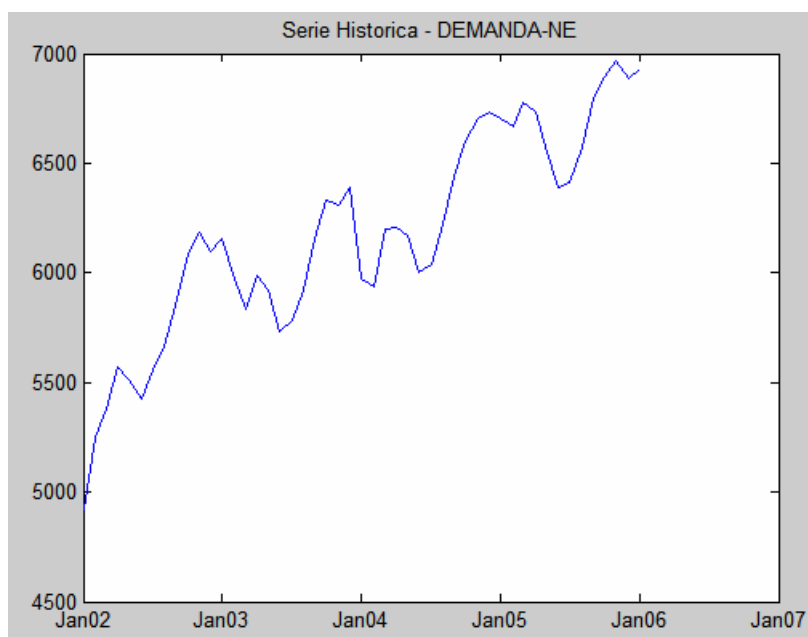


Figura 13 – Série Histórica – Demanda do Subsistema NE (MWmês)

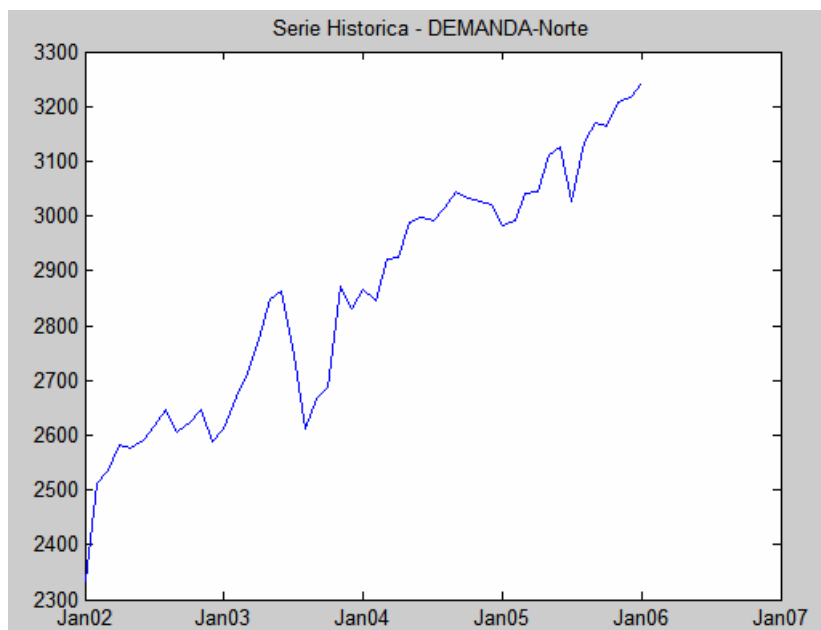


Figura 14 – Série Histórica – Demanda do Subsistema Norte (MWmês)

A série histórica do PIB [11] está descrita na Figura 15, sendo a respectiva tabela descrita no anexo 2:

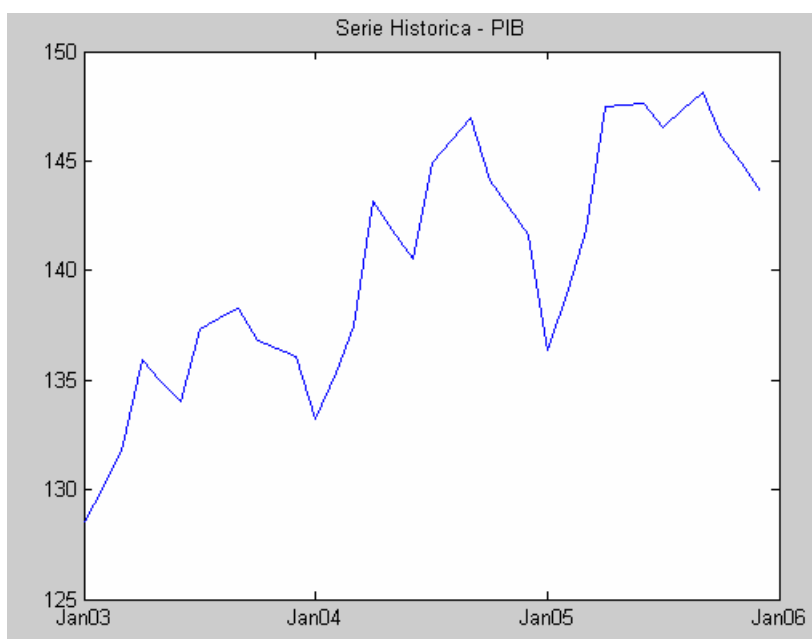


Figura 15 – Série Histórica – PIB

Por fim, as séries históricas de temperatura média por submercado estão aqui representadas pela média das temperaturas médias mensais das capitais [14] existentes em cada submercado. As respectivas tabelas estão descritas no anexo 3.

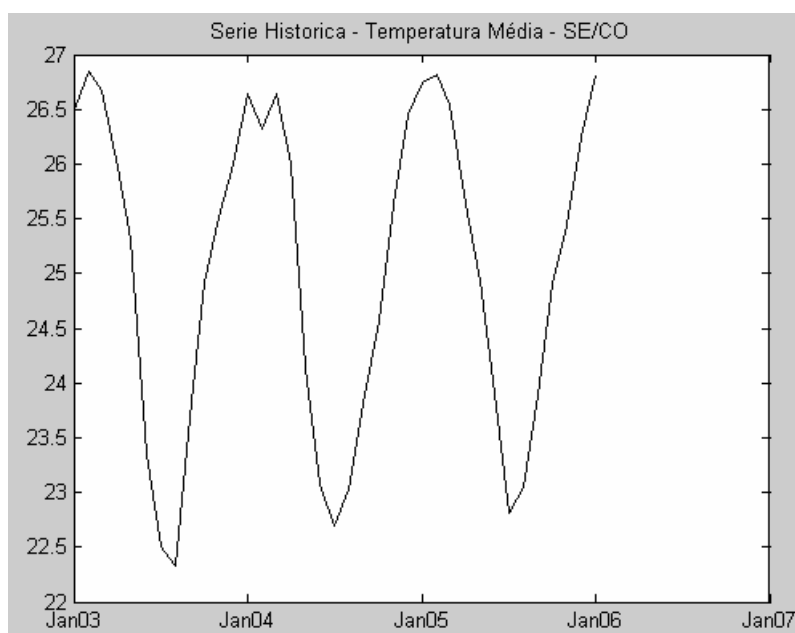


Figura 16 – Série Histórica – Temperatura Média do Subsistema SE/CO (°C)

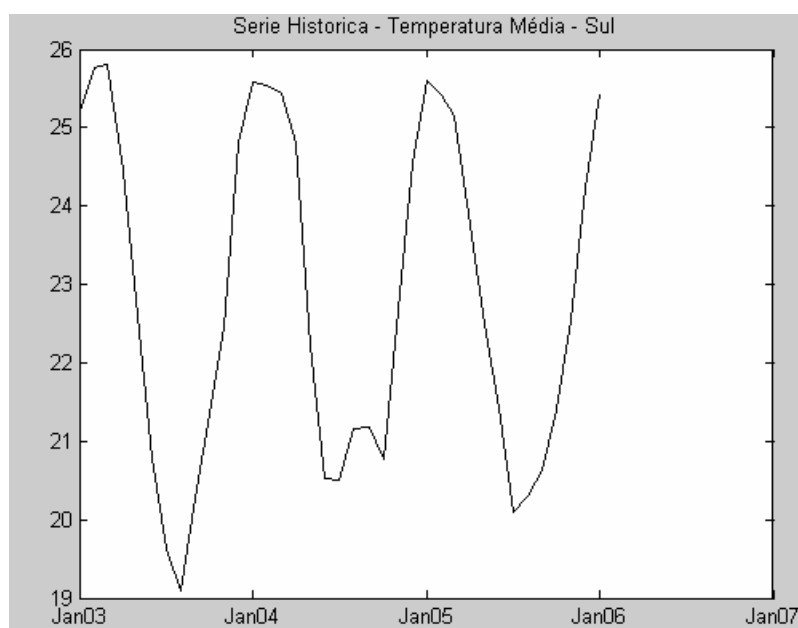


Figura 17 – Série Histórica – Temperatura Média do Subsistema Sul (°C)

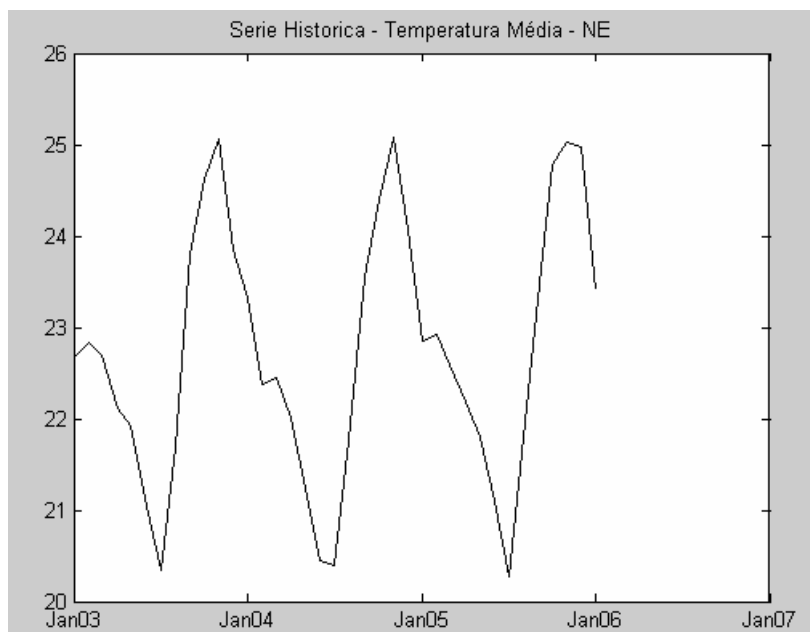


Figura 18 – Série Histórica – Temperatura Média do Subsistema NE (°C)

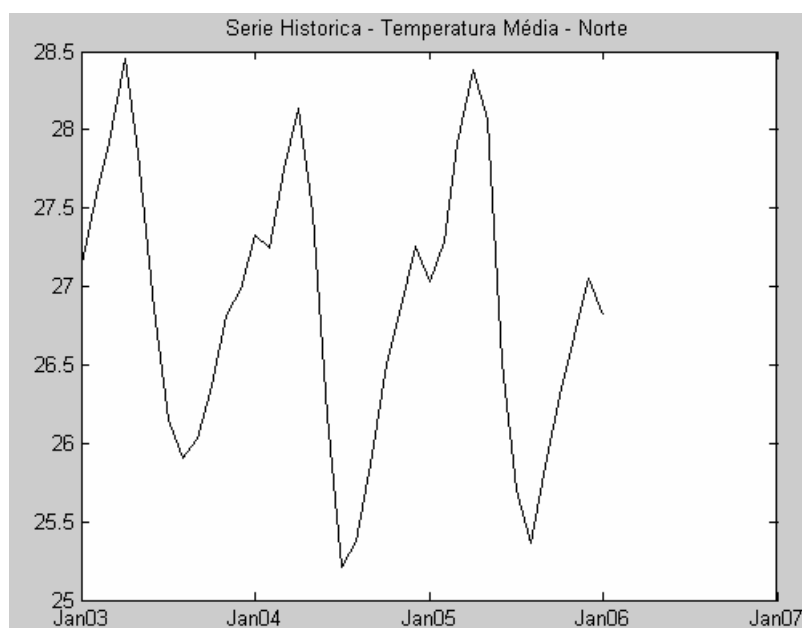


Figura 19 – Série Histórica – Temperatura Média do Subsistema Norte (°C)

É importante sublinhar que todas as séries históricas utilizadas neste estudo estão sendo consideradas a partir do ano de 2003. Isso porque, conforme já mencionado anteriormente, o país sofreu um forte racionamento de energia no anos de 2001 e 2002, causando abruptas mudanças no comportamento da demanda por energia elétrica a partir de então.

De posse das séries históricas é possível, agora, analisar as correlações entre as séries explicativas e as séries de demanda por submercados, e calcular as respectivas projeções em busca da explicação da demanda de cada submercado.

Subsistema Sudeste/Centro Oeste

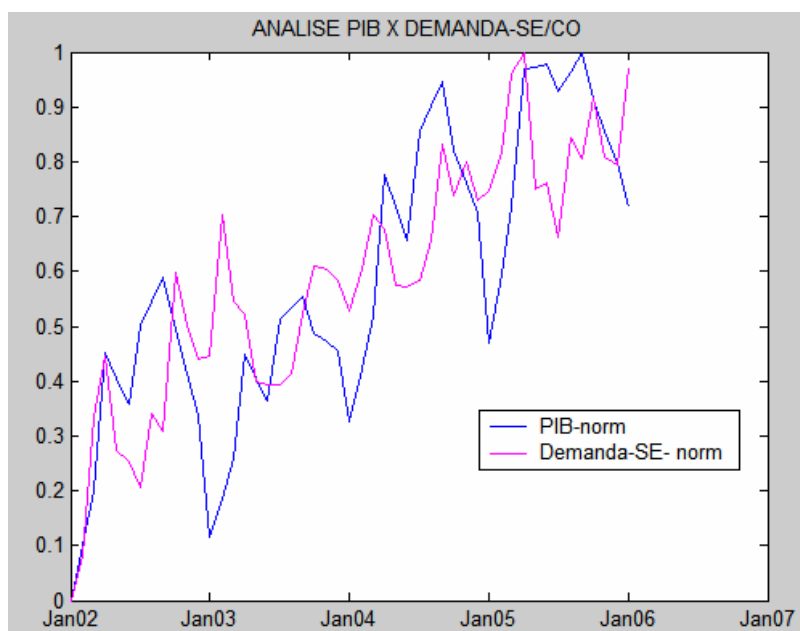


Figura 20 – Demanda histórica do submercado SE/CO normalizada x série histórica do PIB normalizada

Através da **Figura 20**, pode-se observar a alta correlação da série de demanda do submercado SE/CO com o PIB nacional.

Para confirmar o observado no gráfico acima, calcula-se a correlação entre as duas séries. O resultado foi uma correlação de 0.7299 com lag zero, o que indica que o PIB é uma excelente variável explicativa para o comportamento da demanda nesse submercado.

Dessa forma, pode-se lançar mão do cálculo da projeção da demanda do SE/CO na variável explicativa PIB nacional, segundo as equações (5.1).

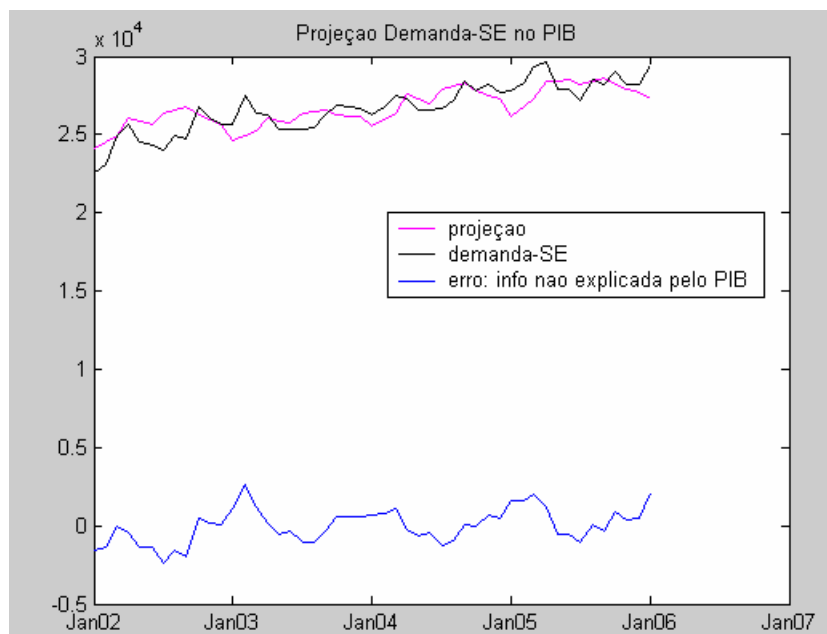


Figura 21 – Projeção da série histórica de demanda do SE/CO na variável explicativa PIB

Através da **Figura 21**, pode-se observar que o PIB pode explicar bastante o comportamento da demanda do SE/CO, uma vez que a projeção está bem próxima da série real da demanda, gerando um resíduo razoavelmente pequeno (por volta de 27%).

O próximo passo é tentar explicar esse resíduo através da série histórica de temperatura. Na **Figura 22**, podemos observar o comportamento de ambas as séries:

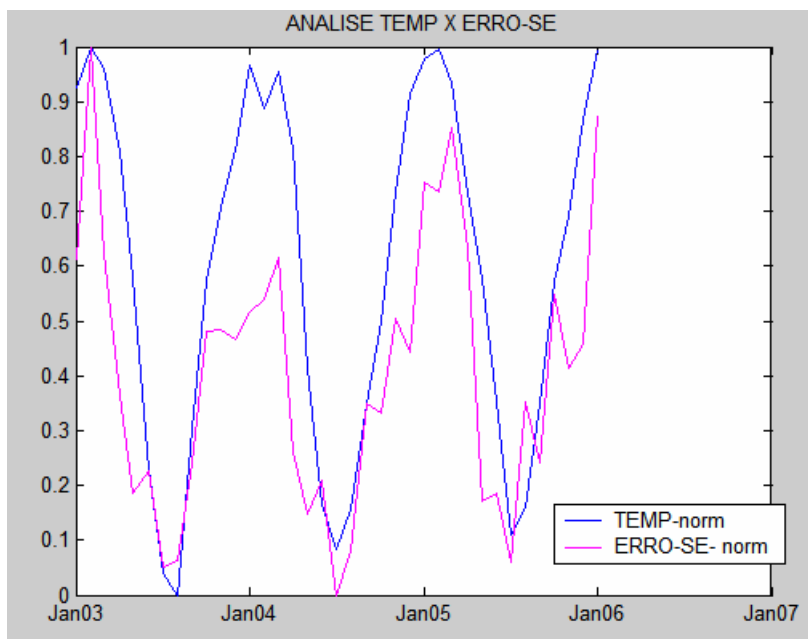


Figura 22 – Resíduo da projeção da série histórica de demanda do SE/CO na variável explicativa PIB – normalizado x série histórica de Temperatura média mensal – normalizada

Através da **Figura 22**, pode-se observar que a temperatura média do submercado pode explicar o resíduo 1. A correlação entre as séries é: 0.8422, lag zero. Portanto, calculando-se a projeção do resíduo 1 na variável explicativa Temperatura Média do SE/CO, segundo as equações (5.3), obtém-se:

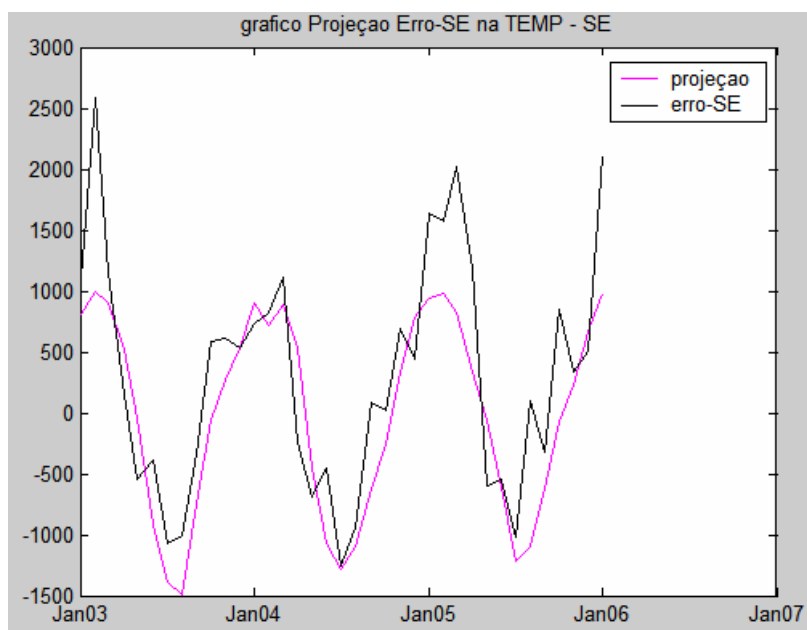


Figura 23 – Projeção do resíduo 1 na variável explicativa temperatura média – SE/CO

Através da **Figura 23**, pode-se observar que a temperatura média pode explicar parte da informação (cerca de 84%) não explicada pelo PIB, uma vez que a projeção está próxima da série do resíduo 1.

Essa conclusão se torna mais evidente na **Figura 24**:

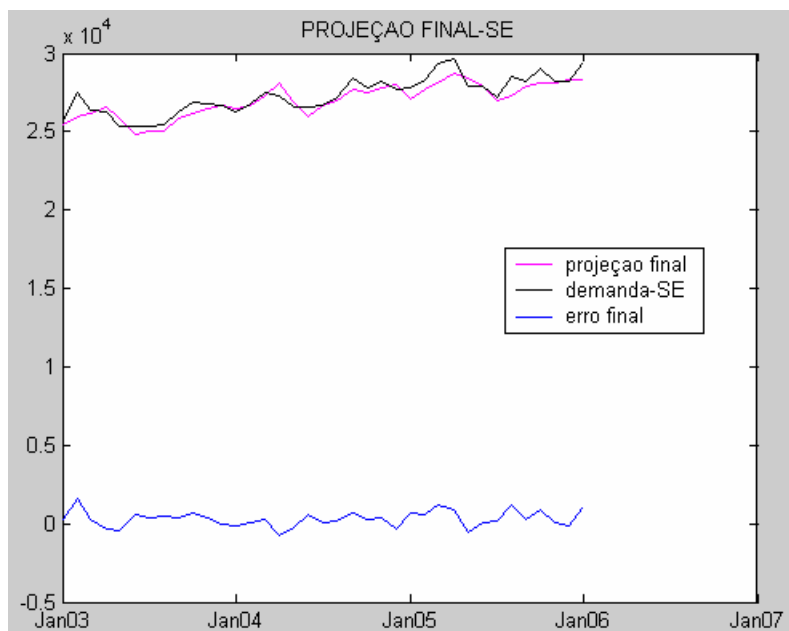


Figura 24 – Projeção final da demanda do SE/CO

Para os objetivos dessa tese, os resíduos atingidos através da decomposição da demanda do submercado SE/CO em função do PIB e da temperatura média foram considerados satisfatórios.

Dessa forma, pode-se, através da equação (5.5), escrever a demanda do Sudeste/Centro-Oeste em função destas variáveis atingindo-se níveis de resíduos aceitáveis.

$$d(t) = 0.73 * \| d(t) \| * \frac{PIB(t)}{\| PIB(t) \|} + 0.84 \| \text{resíduo}_1 \| * \frac{T_M}{\| T_M \|} \quad (5.5)$$

O processo descrito é repetido para cada um dos demais submercados, a fim de encontrar as respectivas equações de demanda em função do PIB brasileiro e da temperatura média do submercado.

Subsistema Sul

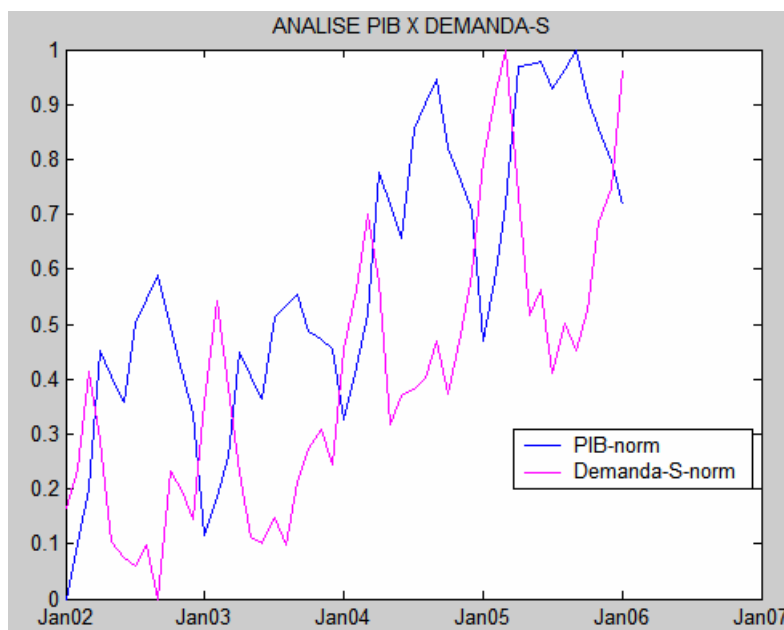


Figura 25 – Demanda histórica do submercado S normalizada x série histórica do PIB normalizada

Através da **Figura 25**, pode-se observar a alta correlação da série de demanda do submercado S com o PIB nacional.

Para confirmar o observado no gráfico acima, calcula-se a correlação entre as duas séries. O resultado foi uma correlação de **0.4224**, com lag zero, o que indica que o PIB é uma variável explicativa para o comportamento da demanda nesse submercado.

Dessa forma, pode-se lançar mão do cálculo da projeção da demanda do S na variável explicativa PIB nacional, de acordo com a equação (5.1).

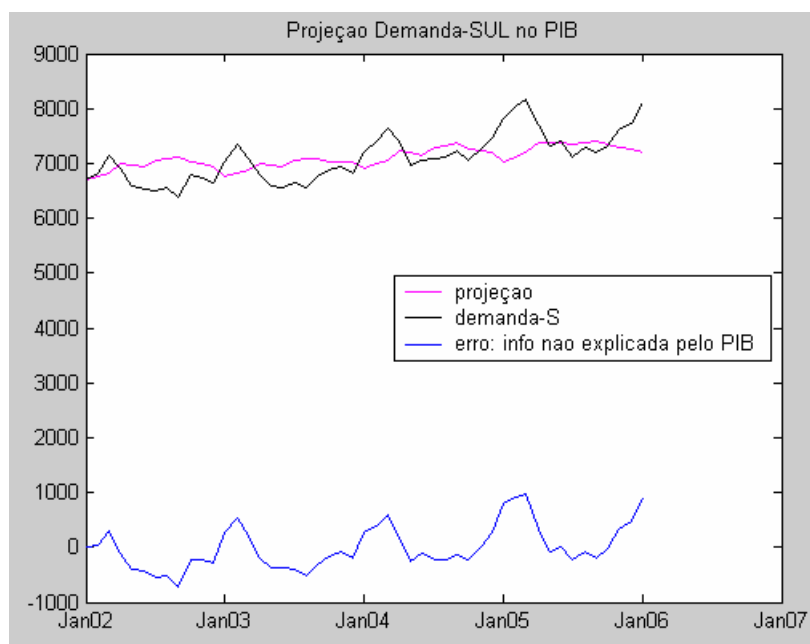


Figura 26 – Projeção da série histórica de demanda do S na variável explicativa PIB

Através da **Figura 26**, pode-se observar que o PIB pode explicar bastante o comportamento da demanda do S, uma vez que a projeção está bem próxima da série real da demanda, gerando um resíduo razoavelmente pequeno.

O próximo passo é tentar explicar esse resíduo através da série histórica de temperatura. Na **Figura 27** podemos observar o comportamento de ambas as séries:

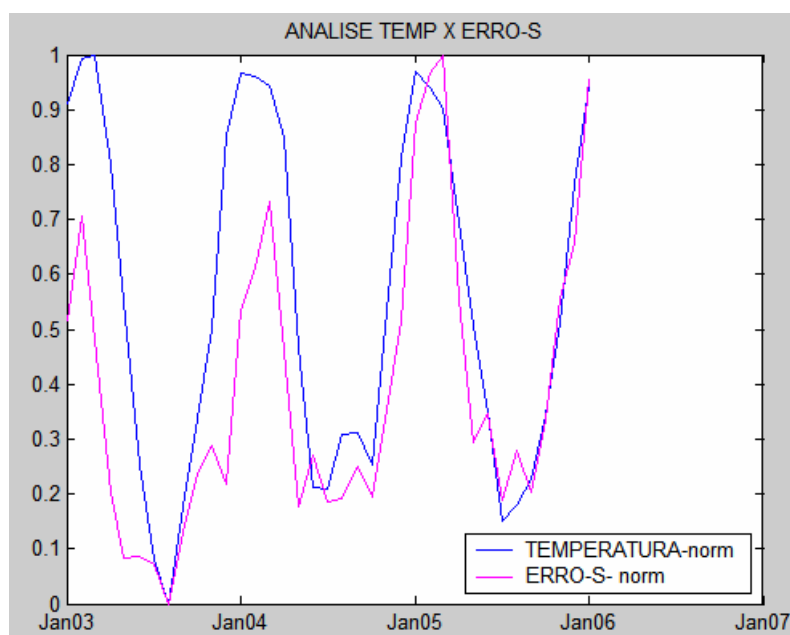


Figura 27 – Resíduo da projeção da série histórica de demanda do S na variável explicativa PIB – normalizado x série histórica de Temperatura média mensal - normalizada

Na **Figura 27**, pode-se observar que a temperatura média do submercado pode explicar o resíduo 1. A correlação entre as séries é: **0.7881**, lag zero. Portanto, calculando-se a projeção do resíduo 1 na variável explicativa Temperatura Média do Sul, segundo as equações (5.3), obtém-se:

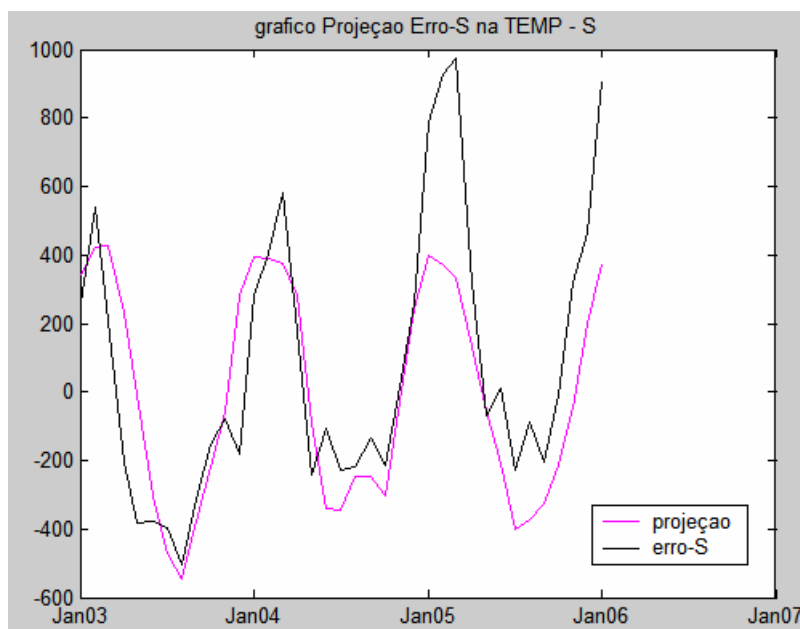


Figura 28 - Projeção do resíduo 1 na variável explicativa temperatura média – Sul

Através da **Figura 28**, pode-se observar que a temperatura média explica parte da informação (cerca de 79%) não explicada pelo PIB, uma vez que a projeção está razoavelmente próxima da série do resíduo 1.

Essa conclusão se torna mais evidente na **Figura 29**:

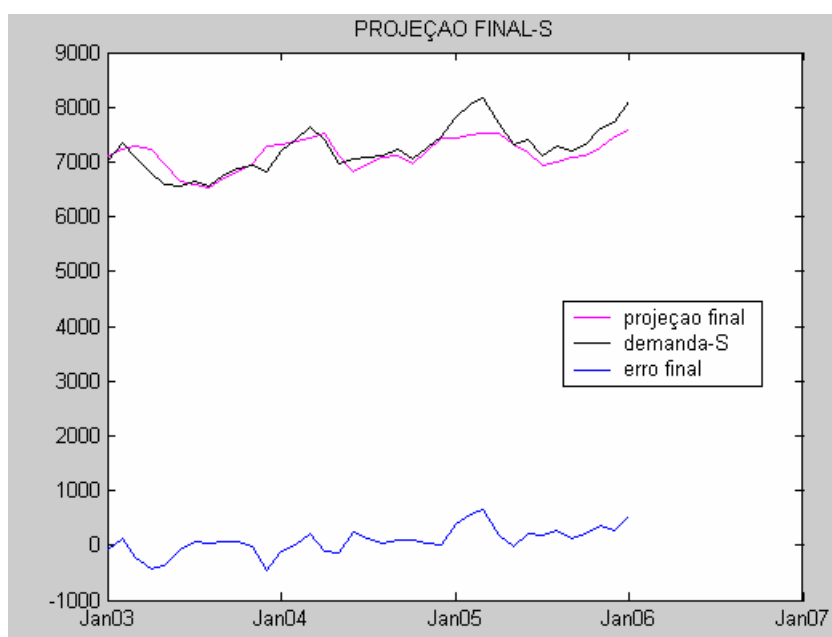


Figura 29 – Projeção final da demanda do Sul

Para os objetivos dessa tese, os resíduos atingidos através da decomposição da demanda do submercado Sul em função do PIB e da temperatura média foram considerados satisfatórios.

Dessa forma, pode-se, através da equação (5.6), escrever a demanda do submercado Sul em função destas variáveis atingindo-se níveis de resíduos aceitáveis.

(5.6)

$$d(t) = 0.42 * \frac{PIB(t)}{\|PIB(t)\|} + 0.79 * \frac{T_M}{\|T_M\|}$$

Subsistema Nordeste

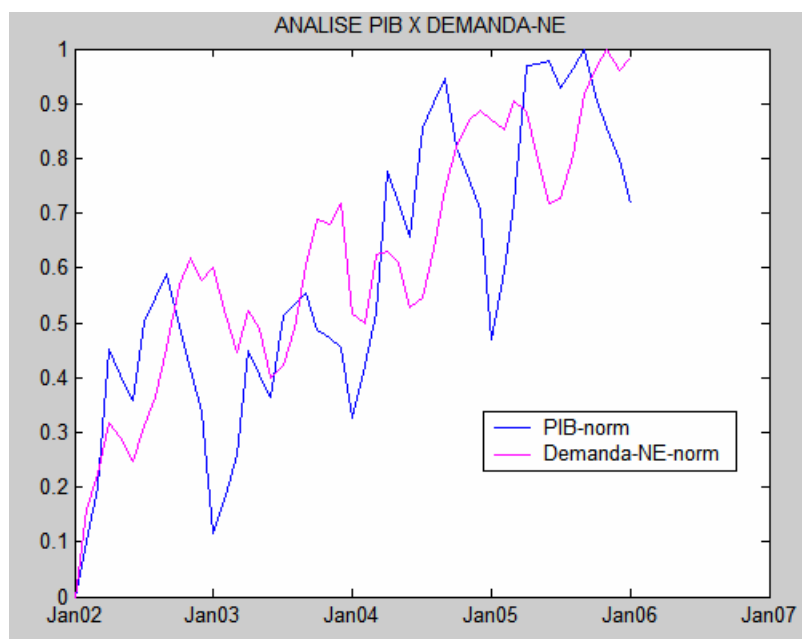


Figura 30 – Demanda histórica do submercado NE normalizada x série histórica do PIB normalizada

Através da **Figura 30**, pode-se observar a alta correlação da série de demanda do submercado NE com o PIB nacional.

Para confirmar o observado no gráfico acima, calcula-se a correlação entre as duas séries. O resultado foi uma correlação de **0.7244** com lag zero, o que indica que o PIB é uma excelente variável explicativa para o comportamento da demanda nesse submercado.

Dessa forma, pode-se lançar mão do cálculo da projeção da demanda do NE na variável explicativa PIB nacional, de acordo com a equação (5.1).

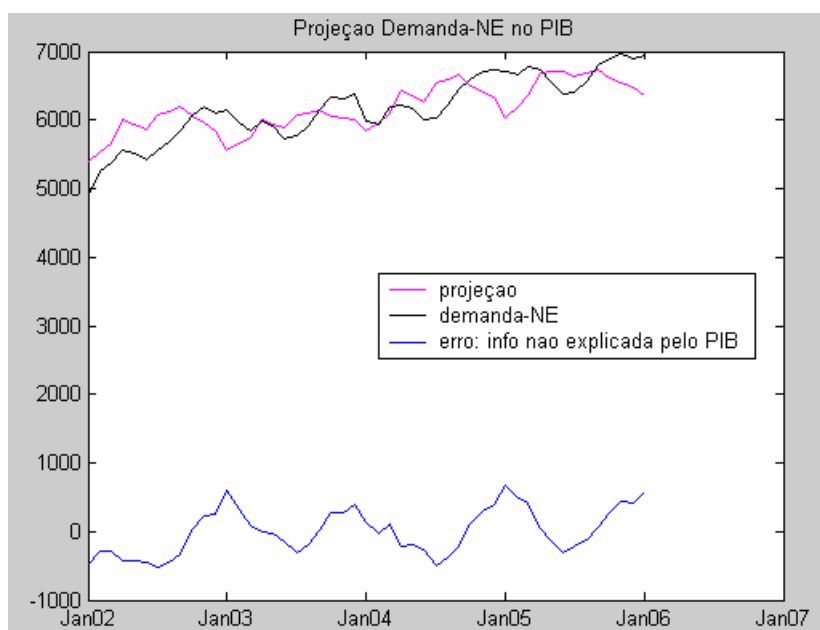


Figura 31 – Projeção da série histórica de demanda do NE na variável explicativa PIB

Através da **Figura 31**, pode-se observar que o PIB pode explicar bastante o comportamento da demanda do NE, uma vez que a projeção está bem próxima da série real da demanda, gerando um resíduo razoavelmente pequeno.

O próximo passo é tentar explicar esse resíduo através da série histórica de temperatura. Na **Figura 32**, podemos observar o comportamento de ambas as séries:

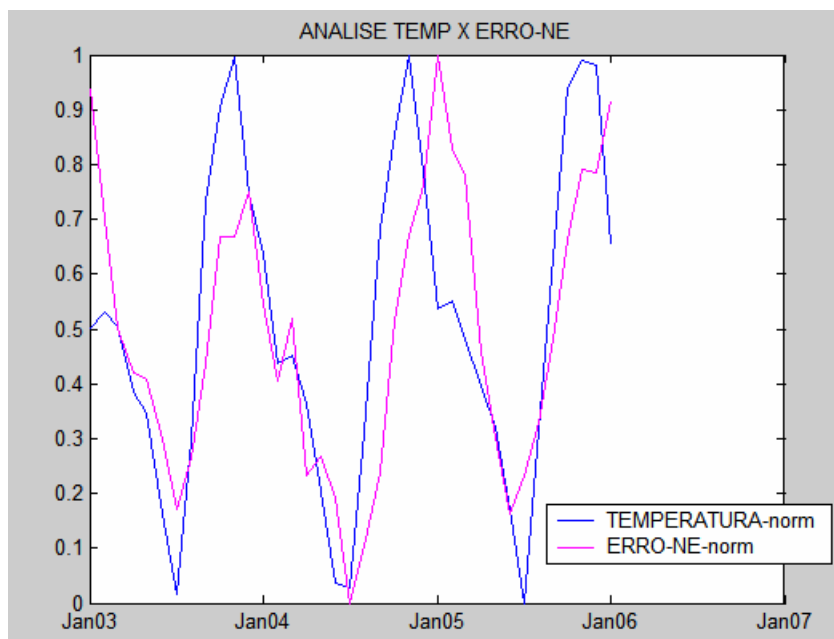


Figura 32 – Resíduo da projeção da série histórica de demanda do NE na variável explicativa PIB – normalizado x série histórica de Temperatura média mensal - normalizada

Na **Figura 32**, pode-se observar que a temperatura média do submercado pode explicar o resíduo 1. A correlação entre as séries é: **0.7000**, lag zero. Portanto, calculando-se a projeção do resíduo 1 na variável explicativa Temperatura Média do NE, segundo as equações (5.3), obtém-se:

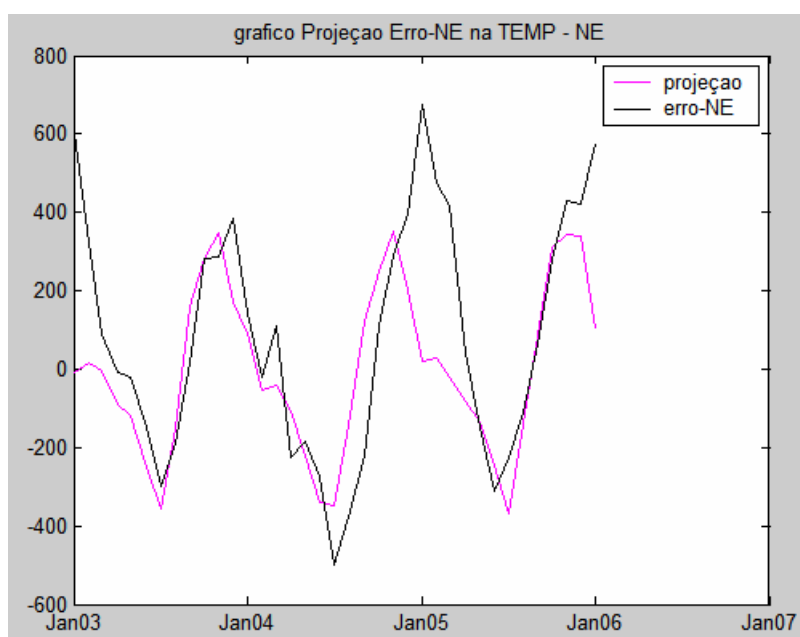


Figura 33 – Projeção do resíduo 1 na variável explicativa temperatura média – NE

Através da **33**, pode-se observar que a temperatura média explica parte da informação (70%) não explicada pelo PIB, uma vez que a projeção está razoavelmente próxima da série do resíduo 1.

Essa conclusão se torna mais evidente na **Figura 34**:

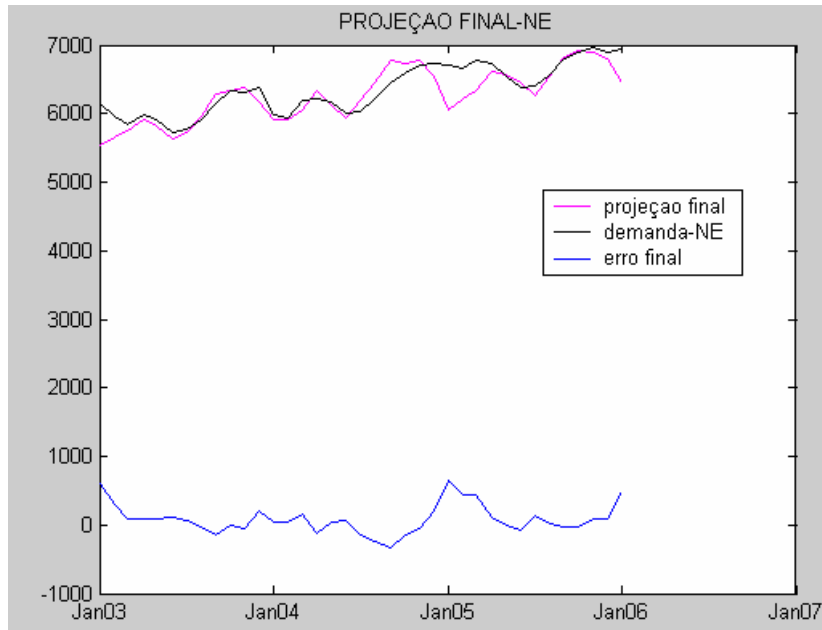


Figura 34 – Projeção final da demanda do NE

Para os objetivos dessa tese, os resíduos atingidos através da decomposição da demanda do submercado NE em função do PIB e da temperatura média foram considerados satisfatórios.

Dessa forma, pode-se, através da equação (5.7), escrever a demanda do submercado NE em função destas variáveis atingindo-se níveis aceitáveis.

$$d(t) = 0.72 * \frac{d(t) \parallel}{\parallel \text{PIB}(t) \parallel} * \frac{\text{PIB}(t)}{\parallel \text{PIB}(t) \parallel} + 0.70 \parallel \text{resíduo}_1 \parallel * \frac{T_{-M}}{\parallel T_{-M} \parallel} \quad (5.7)$$

Subsistema Norte

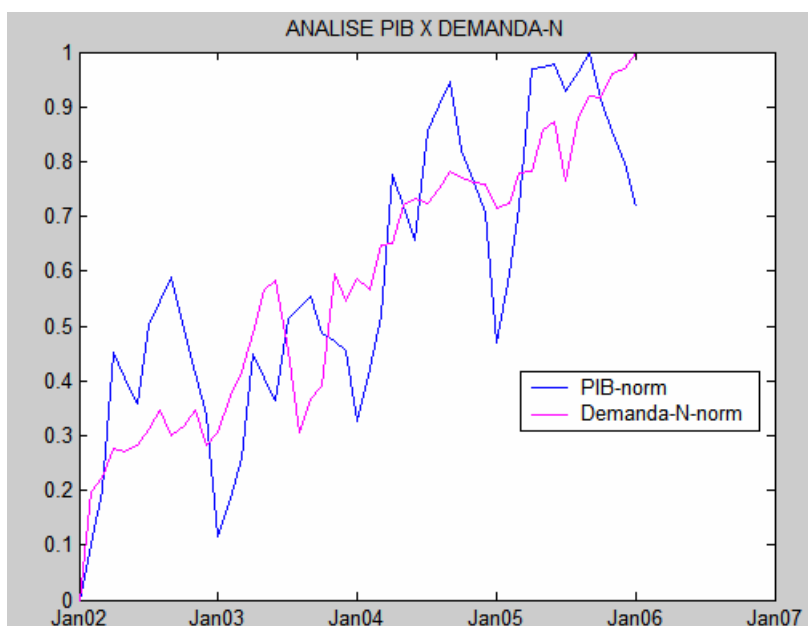


Figura 35 – Demanda histórica do submercado N normalizada x série histórica do PIB normalizada

Através da **Figura 35**, pode-se observar a alta correlação da série de demanda do submercado N com o PIB nacional.

Para confirmar o observado no gráfico acima, calcula-se a correlação entre as duas séries. O resultado foi uma correlação de **0.8327** com lag zero, o que indica que o PIB é uma excelente variável explicativa para o comportamento da demanda nesse submercado.

Dessa forma, pode-se lançar mão do cálculo da projeção da demanda do N na variável explicativa PIB nacional, de acordo com a equação (5.1).

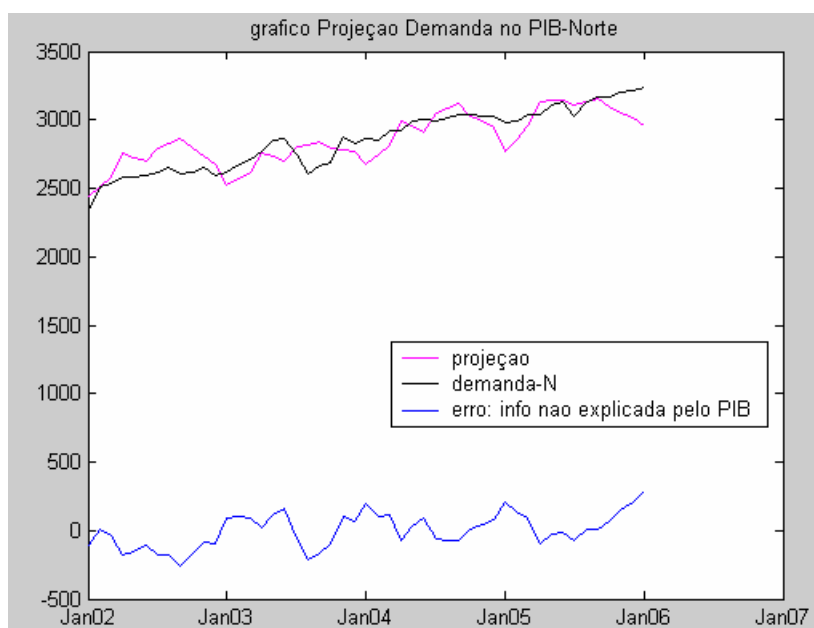


Figura 36 – Projeção da série histórica de demanda do N na variável explicativa PIB

Através da **Figura 36**, pode-se observar que o PIB pode explicar bastante o comportamento da demanda do N, uma vez que a projeção está bem próxima da série real da demanda, gerando um resíduo razoavelmente pequeno.

O próximo passo é tentar explicar esse resíduo através da série histórica de temperatura. Na **Figura 37**, podemos observar o comportamento de ambas as séries:

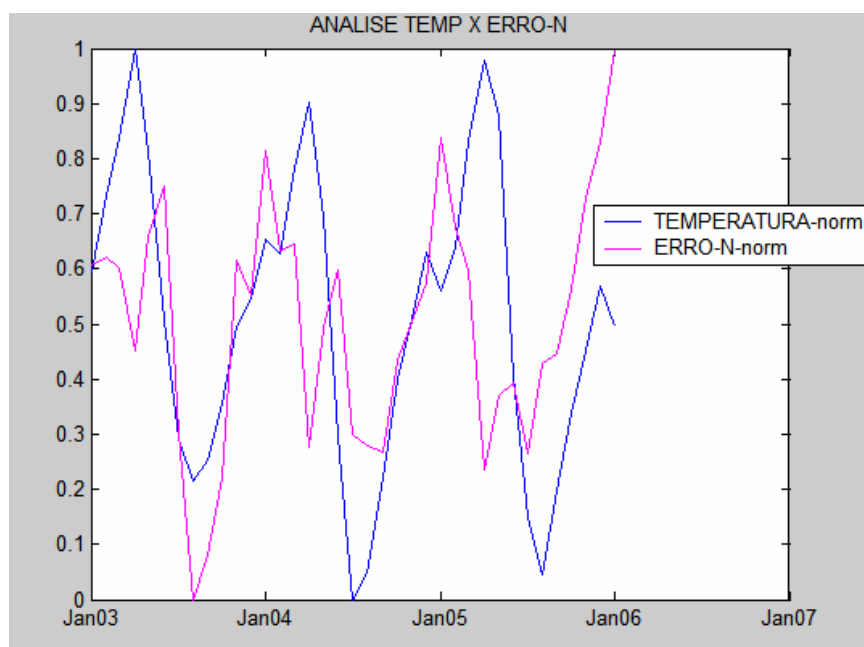


Figura 37 – Resíduo da projeção da série histórica de demanda do N na variável explicativa PIB – normalizado x série histórica de Temperatura média mensal - normalizada

Na **Figura 38**, pode-se observar que a temperatura média do submercado pode explicar o resíduo 1. A correlação entre as séries é: **0.3466**, lag zero. Portanto, calculando-se a projeção do resíduo 1 na variável explicativa Temperatura Média do N, segundo as equações (5.3), obtém-se:

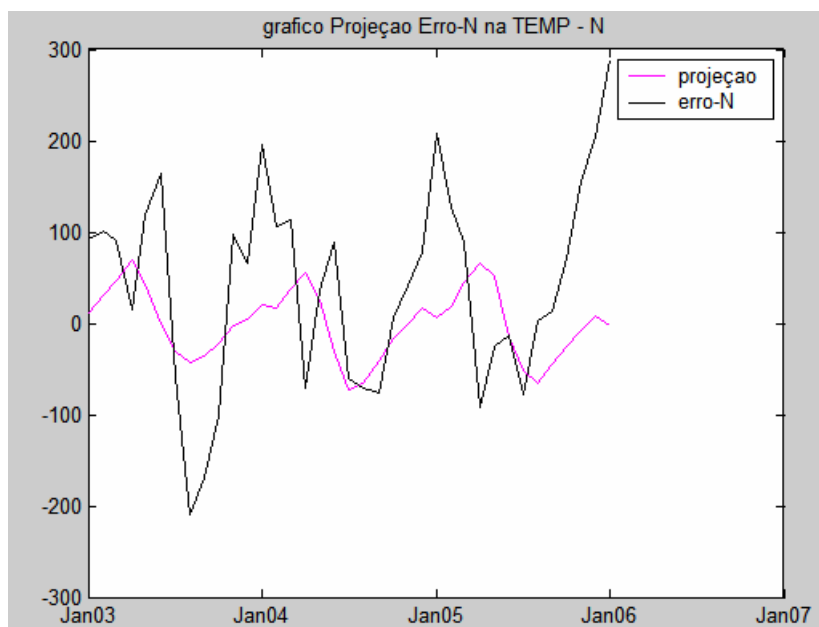


Figura 38 – Projeção do resíduo 1 na variável explicativa temperatura média – N

Através da **Figura 39**, pode-se observar que a temperatura média explica parte da informação (cerca de 33%) não explicada pelo PIB, uma vez que a projeção está razoavelmente próxima da série do resíduo 1.

Essa conclusão se torna mais evidente na **Figura 40**:

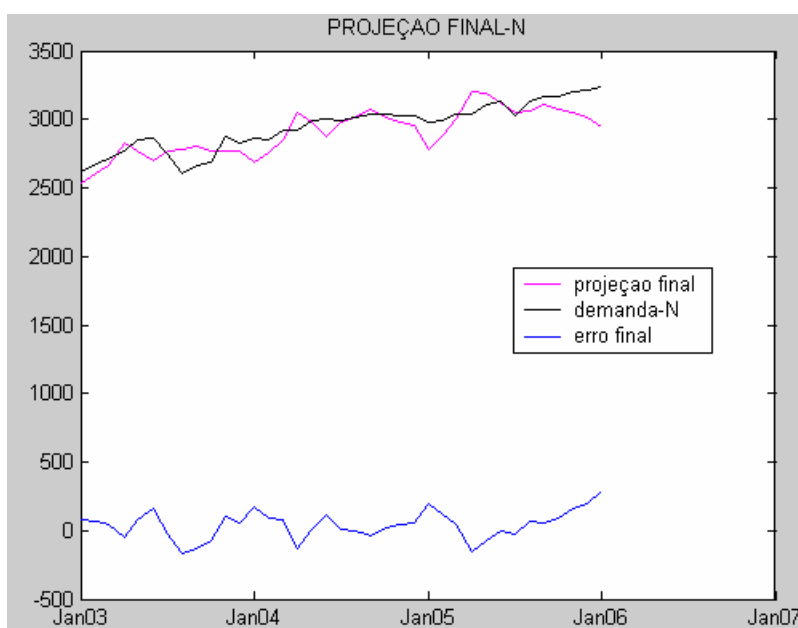


Figura 39 – Projeção final da demanda do N

Para os objetivos dessa tese, os resíduos atingidos através da decomposição da demanda do submercado N em função do PIB e da temperatura média foram considerados satisfatórios.

Dessa forma, pode-se, através da equação (5.8), escrever a demanda do submercado N em função destas variáveis atingindo-se níveis de resíduos bem pequenos.

$$d(t) = 0.83 * \frac{d(t)}{\|d(t)\|} * \frac{PIB(t)}{\|PIB(t)\|} + 0.35 * \frac{\text{resíduo}_1}{\|\text{resíduo}_1\|} * \frac{T_M}{\|T_M\|} \quad (5.8)$$

É importante ressaltar que, nesta análise, não fica claro se a relação da demanda de cada subsistema é com a temperatura ou se esta relação está representando apenas a sazonalidade presente em ambas as séries.

O objetivo é prever a demanda por submercado para um horizonte de 60 meses (prazo praticado pelo setor). Mais precisamente o estudo simula o planejamento feito para fevereiro de 2006 até janeiro de 2011.

Portanto, é preciso determinar os valores futuros para as variáveis explicativas PIB e temperatura média (somente para o subsistema Nordeste), para o respectivo período de estudo.

De posse desses valores, é possível prever as demandas através das equações (5.5) a (5.8).

Com base em estudos macroeconômicos, definiram-se três possíveis trajetórias compatíveis para o comportamento do PIB brasileiro: trajetória de referência, trajetória otimista (crescimento alto) e trajetória pessimista (crescimento baixo)[10].

Tabela 1 – Cenários para o crescimento do PIB

ano	cenário 1 – REF	cenário 2 - Alto	cenário 3 - Baixo
2006	4,0%	4,5%	3,0%
2007	4,0%	4,5%	3,0%
2008	4,0%	4,5%	3,0%
2009	4,0%	4,5%	3,0%
2010	4,0%	4,5%	3,0%
2011	4,0%	4,5%	3,0%

Para a projeção mensal do PIB brasileiro foi mantida a mesma sazonalidade ocorrida no ano de 2005. A Figura 40 mostra as projeções referentes a cada cenário de crescimento, apresentadas em forma de tabela no anexo 4.

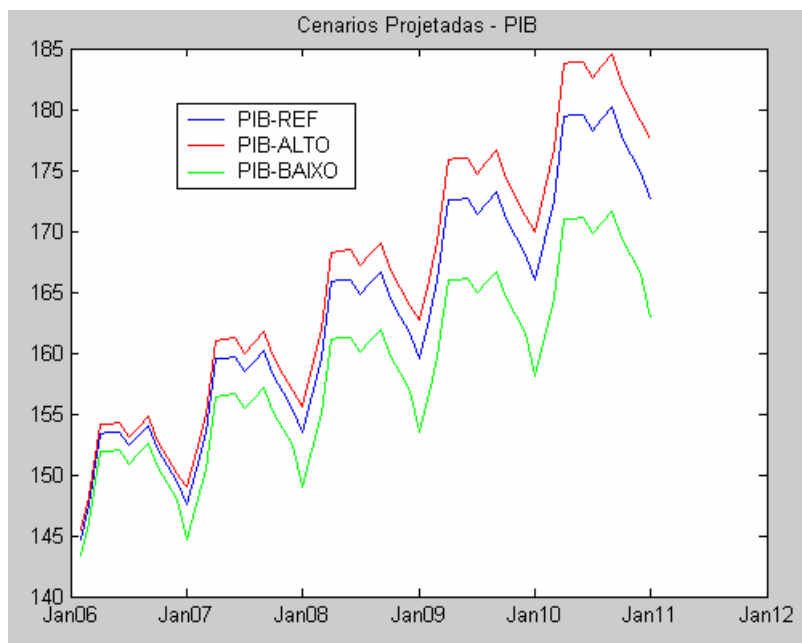


Figura 40 – Cenários projetados – PIB

Como não se dispõe de um modelo confiável capaz de prever a temperatura média mensal para o horizonte de interesse, considera-se que a temperatura média mensal, em cada submercado, será igual à média mensal ocorrida nos últimos dois anos.

As temperaturas médias utilizadas para a previsão de demanda encontram-se em tabelas no anexo 5 e estão representadas a seguir:

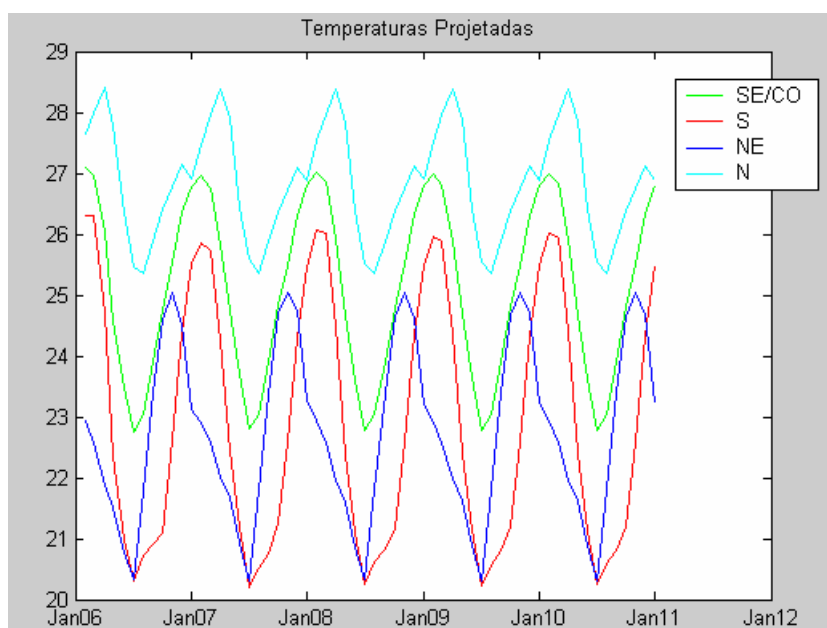


Figura 41 – Projeção da Temperatura Média por Subsistema (°C)

Agora, de posse das equações (5.5) à (5.8), dos três cenários para o PIB e dos valores futuros da temperatura mensal média por submercado, pode-se gerar três possíveis futuros cenários para a demanda de carga elétrica em cada subsistema do SIN.

No gráfico seguinte, pode-se observar o comportamento de cada cenário projetado para a demanda de energia no subsistema SE/CO:

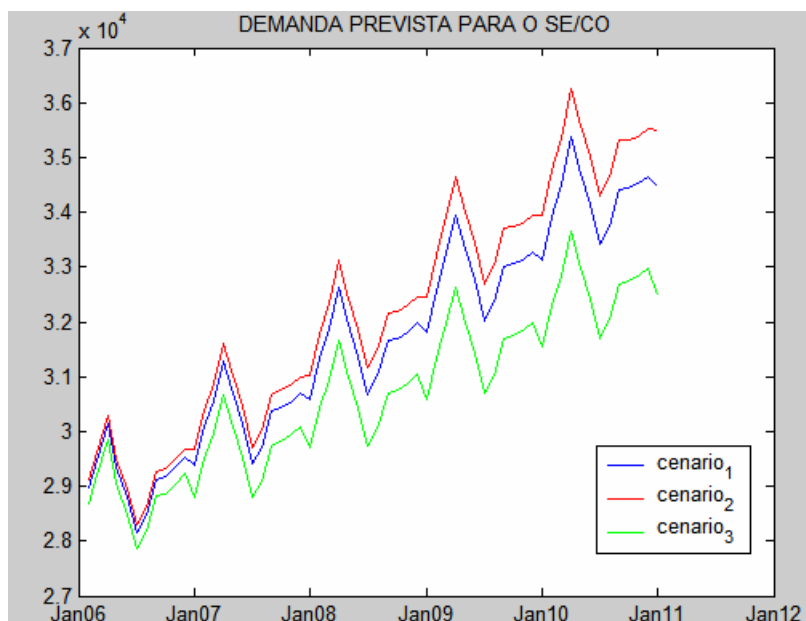


Figura 42 – Cenários futuros para a demanda no subsistema SE/CO (MWmês)

Na figura abaixo, pode-se observar o comportamento de cada cenário projetado para a demanda de energia no subsistema Sul:

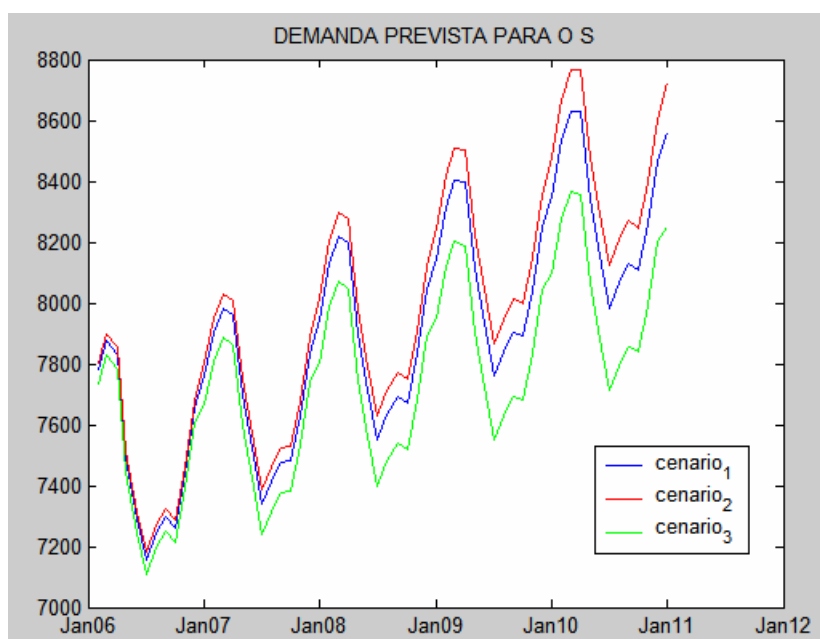


Figura 43 – Cenários futuros para a demanda no subsistema Sul (MWmês)

Por sua vez, pode-se observar o comportamento de cada cenário projetado para a demanda de energia no subsistema NE, através da **Figura 43**.

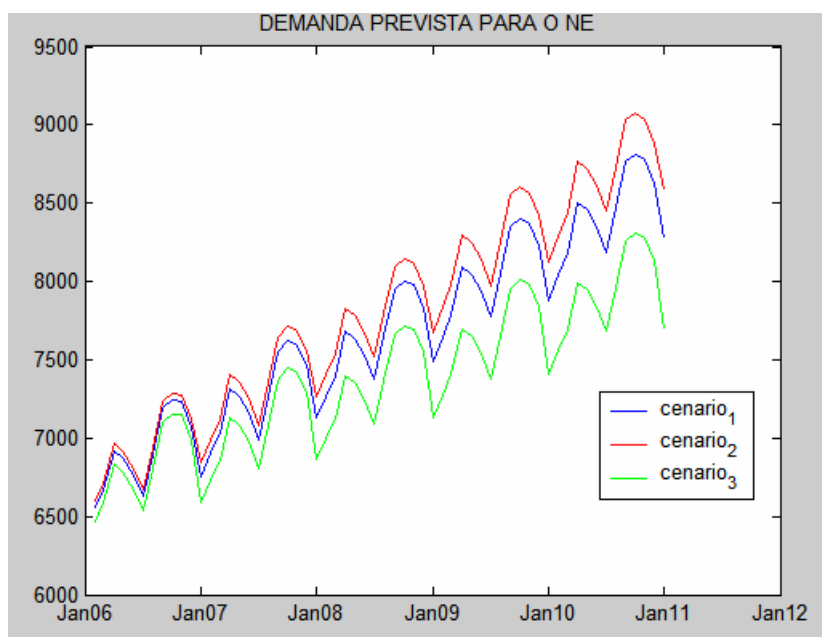


Figura 44 – Cenários futuros para a demanda no subsistema NE (MWh/mês)

Finalmente, pode-se observar o comportamento de cada cenário projetado para a demanda de energia no subsistema N:

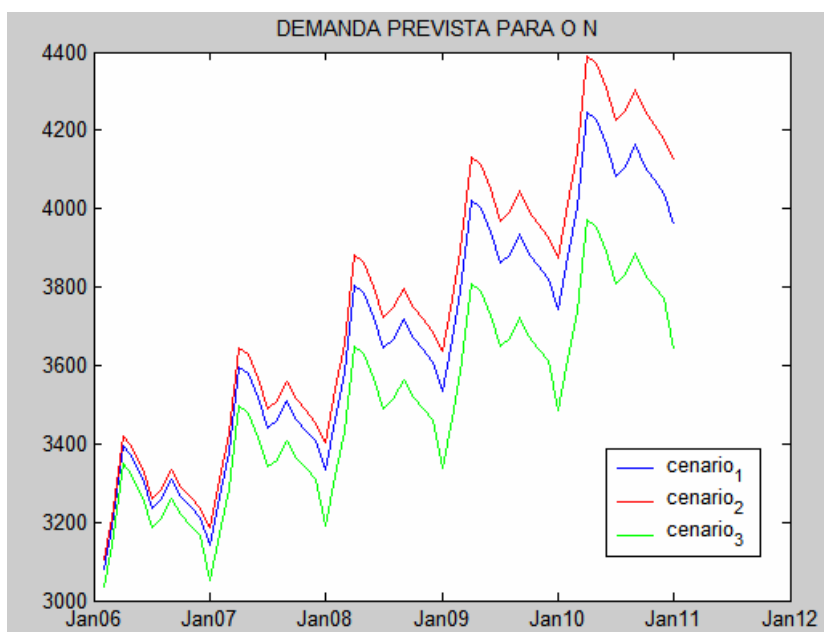


Figura 45 – Cenários futuros para a demanda no subsistema N (MWh/mês)

É importante dizer que esses cenários de demanda que foram gerados serão de extrema valia para a determinação dos custos de energia.