

# Modelo não-linear de longo prazo para a potência requerida do sistema brasileiro de eletricidade

Miguel Afonso Sellitto †  
José Luis Duarte Ribeiro ‡  
Fabiano Petrillo \*

† Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas.  
Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo  
Brasil  
sellitto@unisisinos.br

‡ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção.  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre  
Brasil.  
ribeiro@producao.ufrgs.br

\*Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre  
Brasil  
fabiano@petrillo.com

---

## Abstract

The formerly closed Brazilian electrical energy market has been disclosed for investors and domestic consumers, which now have choices for their decisions concerning energy sales and purchasing, in long-term contracts. To establish minimal planning condition, suppliers need to forecast the required load in order to project and operate power plants. With the aid of a method that integrates non-linear regression and soft-system methodology, we depict a non-linear model for the gross total electric power requirement, counting on domestic activity, population and human developing index. A goodness-of-fit better than 96% was achieved. The final analysis focused on the strong contingency period occurred in Brazil in 2001.

## Resumo

O mercado brasileiro de energia elétrica abriu-se recentemente a investidores e consumidores, que agora têm opções de longo prazo para compra e venda de energia. Para que haja condições mínimas de planejamento neste mercado, é necessário um modelo de longo prazo capaz de prever as necessidades futuras de suprimento de energia elétrica. Por meio de um método que integra regressão não-linear múltipla com SSM (*soft system methodology*), foi proposto um modelo para o requisito de potência, calculado a partir do nível de atividade negocial brasileira, do total de população e de seu nível de desenvolvimento humano. O ajuste obtido pelo modelo foi superior a 96%. Uma análise

final focou no período de contingenciamento de oferta de energia ocorrido no Brasil em 2001, conhecido como apagão.

**Keywords:** electrical power, multiple nonlinear regression, multivariate data analysis, SSM, long-term load forecasting.

**Title:** Long-term non-linear model for the power requirement of the brazilian electricity system.

---

## 1 Introdução

A indústria brasileira de energia elétrica se caracteriza hoje pela livre concorrência na compra e venda de energia. No fim dos anos 1990, foi introduzida a competição entre produtores pelo mercado consumidor e a contratação de longo prazo para fornecimento de energia [Silva, 2001].

O processo de reforma do setor teve como objetivos finais assegurar os investimentos necessários para a expansão da oferta de energia e a viabilidade econômica do setor. Para tanto, era necessário otimizar o uso dos recursos disponíveis e garantir um fornecimento confiável de energia elétrica ao menor custo possível, satisfazendo clientes e prevenindo operações deficitárias, antes subsidiadas pelo estado brasileiro. Para atingir estes objetivos, foram adotados como princípios a competição em geração e comercialização para clientes livres e monopólios regulados em transmissão, distribuição e comercialização para clientes cativos, semelhantes aos princípios que orientaram o processo de reforma em outros países [Comitê de revitalização do modelo do setor elétrico, 2002]. A energia elétrica torna-se uma *commodity*, comercializada segundo leis de mercado e previsões de preço e consumo.

A taxa por unidade de tempo com que é requisitada a energia é o requisito de potência que o sistema deve oferecer. Como ainda não existe tecnologia viável de armazenagem, a energia requerida é produzida no ato do consumo, impossibilitando a produção antecipada quando os custos de produção estão mais baixos ou quando a demanda for menor. Diferentemente de outros produtos, a energia elétrica tem características que devem ser consideradas na previsão de demanda.

Um modo de fazer previsões de demanda de energia elétrica é reconhecer padrões de comportamento em séries históricas e prever o comportamento futuro. Outro modo é identificar fatores causais que afetam o comportamento e extrapolá-lo, segundo um modelo matemático. As previsões podem ser de curto e de longo prazo. No primeiro caso, prevê-se a demanda dos próximos dias e semanas, assegurando economicidade e segurança na operação cotidiana. No segundo caso, a previsão é para meses e anos, subsidiando o planejamento da expansão do sistema para os próximos períodos [Figueiredo *et al.*, 2005].

O objetivo deste artigo é apresentar um modelo matemático que possa descrever o quanto o mercado brasileiro de energia elétrica requisiou de potência no período 1996-2000 e projetar o requisito para períodos futuros. Trata-se de um modelo de longo prazo. Assume-se que o requisito de potência seja afetado por muitos e complexos fatores, de comportamento não-linear e causalidade recursiva.

Tal assunção justifica uma abordagem do tipo SSM (*soft-system methodology*) e o uso de árvores de realidade atual (ARA) para a estruturação da situação. A SSM não objetiva encontrar uma expressão única (*hard*) para um problema, mas busca um procedimento de investigação que possa ser replicado no espaço e no tempo e que possa chegar a um

modelo válido para um fenômeno específico. O que é sistêmico é o procedimento investigatório e não o modelo obtido [Checkland e Scholes, 1998]. Árvores de realidade, por sua vez, constroem e comunicam visões compartilhadas sobre uma situação não-linear e recursiva e são um passo intermediário em direção ao modelo [Dettmer, 1997]. Formou-se um grupo focado com especialistas e uma regressão não-linear múltipla foi proposta por observação da ARA.

Não é objetivo revisar modelos de previsão de demanda por energia elétrica. Citam-se apenas algumas incidências na literatura, surgidas mais notadamente em veículos de engenharia elétrica. Figueiredo *et al.* [2005] sugerem redes neurais para abordar o problema. Bunn [2000], Park *et al.* [1991] e Peng *et al.* [1992] usam técnicas de inteligência computacional, tais como redes neurais e neuro-fuzzy. Papalexopoulos e Hesterberg [1989], Hagan e Behr [1987] e Rahman e Hazim [1993] usam séries temporais e regressões, incluindo variáveis categóricas, para a previsão de curto prazo (palavra-chave: *short-term load forecasting*). Parlos *et al.*, [1996], Al-Saba e El-Amin [1999], Da, [2000] e Kandil *et al.* [2002] usam técnicas diversas de inteligência computacional, séries temporais e regressões multivariadas para previsão de médio e longo prazo (palavra-chave: *long-term load forecasting*). Caio e Berman [1998] apresentam modelos específicos, não-sistêmicos, usados por companhias de distribuição de energia brasileiras para previsão de demanda.

A contribuição essencial deste artigo é propor um procedimento recursivo para se chegar a uma expressão para o requisito de potência de longo prazo de um sistema elétrico. A expressão não-linear alcançada é válida para o caso do Brasil de 1996 a 2000, mas o procedimento pode ser usado em outros casos e produzir outras expressões. O restante do artigo está organizado em: considerações sobre modelos não-lineares, SSM e estruturação de problemas; metodologia de pesquisa; discussão e considerações finais.

## 2 Considerações sobre modelos não-lineares

Em um problema não-linear, a relação teórica entre as variáveis de interesse assume a forma da equação 1, na qual  $\zeta_i$  são preditores,  $\theta_i$  são parâmetros e  $f$  é não-linear.

$$Y = f(\zeta_1, \zeta_2, \dots, \zeta_k; \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_p) + \varepsilon \quad (1)$$

Sejam  $n$  observações  $[Y_i, \zeta_{1i}, \zeta_{2i}, \dots, \zeta_{ki}]$ , para  $i = [1, 2, \dots, n]$ . A soma quadrática de erros para o modelo não-linear é dada pela equação 2, na qual os vetores  $\zeta$  e  $\theta$  são respectivamente as observações das variáveis preditoras e as estimativas dos parâmetros. Como  $Y_i$  e  $\zeta_i$  são observações fixas, a soma quadrática resulta uma função exclusiva de  $\theta$ . O vetor que minimiza esta soma, se os erros forem normais e independentes, é também a estimativa de máxima verossimilhança de  $\theta$ . Chega-se a esta estimativa derivando parcialmente a equação em relação a todos os  $\theta_i$  e igualando a zero, o que gera um sistema de equações normais. A solução destas equações fornece o vetor  $\theta = [\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n]$  que minimiza  $S(\theta)$  [Draper e Smith, 1981].

$$S(\theta) = \sum_{i=1}^n [Y_i - f(\zeta_i, \theta)]^2 \quad (2)$$

Exceção feita a alguns casos, não é possível resolver diretamente as equações normais. Podem ser necessários métodos iterativos de procura numérica direta. Os principais métodos têm formatos semelhantes: (i) estabelecem-se valores iniciais para as variáveis  $\theta$ ; (ii) gera-se a curva definida pelas variáveis iniciais e calcula-se a soma quadrática de resíduos; (iii) segundo um dado algoritmo capaz de diminuir a soma quadrática, modificam-se as variáveis; e (iv) aplica-se recursivamente o algoritmo até que duas sucessivas aplicações não apresentem melhoria significativa. Diferentes estimativas iniciais podem produzir diferentes resultados em diferentes números de iterações, o que torna desejável o uso de várias estimativas iniciais e observar o resultado e a velocidade de convergência [Mutolsky, 2001].

Diversos métodos surgem na literatura. O método de Gauss-Newton ou da linearização expande o modelo não-linear em uma série de Taylor, aproximando-o por um modelo linear. Estimam-se então os parâmetros  $\theta$  pelo método dos mínimos quadrados em iterações até que um critério de término seja atingido. Há ainda o método da descida mais íngreme e o método de Levenberg-Marquardt (LM), que combina os outros dois. Se está longe da convergência, LM comporta-se como descida mais íngreme; se está próximo, como Gauss-Newton. Já o método GRC (*generalized reduced gradient*) melhora uma solução inicial, explorando-a em várias direções, até que um critério encerre a exploração. Diferentes métodos podem chegar a resultados levemente diferentes [Draper e Smith, 1981; Mutolsky, 2001; Silva, 2004].

Os resultados da regressão não-linear são representativos se alguns pressupostos forem atendidos: (i) o modelo tem alguma justificativa, pois a regressão apenas ajusta parâmetros da equação escolhida, não tentando outras equações; (ii) os erros são normais, com variância constante, independentes em relação a  $Y$  e não-correlacionados entre si; (iii) a imprecisão na medição de  $Y$  é pequena perante sua variabilidade; (iv) o resultado apresentado faz sentido científico, ou seja, não há proporções maiores do que um, não há taxas de crescimento negativas ou não há limites fora do âmbito original dos dados; e (v) as estatísticas obtidas são aceitáveis. Além dos valores de melhor ajuste, uma análise de regressão não-linear deve oferecer um erro-padrão da estimativa, intervalos de confiança assintóticos dos parâmetros e o coeficiente de determinação  $R^2$ , que informa a fração da variância total explicada pelo modelo: quanto mais próximo a 1, melhor. Outros testes são o  $F$ , em formato de *anova*, o  $t$  aplicado aos erros-padrão e o valor- $p$ . Vale o princípio da parcimônia: um bom modelo mantém o compromisso entre o ajuste e o número de preditores [Draper e Smith, 1981].

Quanto à escolha do modelo, além de apresentar boas estatísticas de ajuste, este deve fazer sentido em uma base teórica de conhecimento. Neste artigo, foi usado um método de trabalho integrando duas bases de conhecimento, a regressão não-linear e a SSM (*soft-system methodology*), que produziu um modelo que faz sentido em relação a uma observação empírica da realidade.

### **3 SSM e estruturação de situações complexas de interesse**

A SSM inclui procedimentos cujos objetivos são obter conhecimento sobre uma situação de interesse e estruturá-la, segundo modelos mentais, de modo a gerar um modelo que possa ser útil em interpretações e intervenções modificadoras da realidade. A SSM pode estruturar situações de interesse e relações com o contexto, principalmente quando os agentes têm visões e interesses diversos sobre o tema. Pode ocorrer, também, que objetivos de agentes sejam incertos, múltiplos ou até mesmo conflitantes entre si.

Situações tratadas por SSM têm algumas características em comum. São intrincadas, não existe um modelo unificado e a situação é complexa, com interações e interferências

mútuas entre objetos do cenário e evolução temporal. A SSM admite múltiplas percepções sobre uma dada situação, e que estas se originam da diversidade de modelos mentais que analistas usam para interpretar a realidade. Pode ser usada para explorar a situação, identificar as partes interessadas e seus pontos de vista, modelar critérios de avaliação de desempenho e oferecer contrapontos a modelos quantitativos [Jackson, 1993; Wilson, 2001; Neves *et al.*, 2004].

Abordagens para situações complexas de interesse podem residir em um *continuum* que vai de *hard* a *soft*. Um critério que pode auxiliar a posicionar uma situação de interesse é o grau de concordância entre interessados sobre o que é a situação. Se não houver divergência alguma, como por exemplo, em equações, o problema é totalmente *hard*. Se toda parte interessada tiver uma interpretação diferente para o problema, este é totalmente *soft*.

Na extremidade *hard* do *continuum* pode ser aplicada a engenharia de sistemas (SE), que consiste em: (i) definir a situação de interesse; (ii) formular uma metodologia, composta de técnicas apropriadas; (iii) usar as técnicas para encontrar soluções possíveis iterativamente com (iii); (iv) selecionar uma das soluções possíveis; e (v) implementá-la e medir os resultados [Wilson, 2001]. Na extremidade *soft* pode ser aplicada a SSM: (i) definir a situação de interesse; (ii) expressar a situação por um modo comunicável, tal como diagramas; (iii) selecionar conceitos e objetos que possam ser relevantes para o diagrama; (iv) montar os conceitos e objetos em uma estrutura intelectual coerente; (v) usar a estrutura para explorar a situação iterativamente com (iii) e (iv); (vi) definir mudanças; e (vii) implementá-las e verificar os resultados [Checkland e Scholes, 1998]. No caso da SE, as técnicas utilizadas no passo iii contém tanto os conceitos quanto a estrutura usados no problema, e são unicamente definidos. Na SSM, conceitos (passo iii) e estrutura (passo v) são separados e podem requerer iteratividade durante o aprendizado ou até que se chegue a uma definição.

A SSM é ilustrada na Figura 1. Nas etapas 1 e 2, há esforço para construir uma representação o mais rica possível, não do problema, mas da situação na qual este é percebido como um problema. A etapa 3 inclui expressar conceitos subjacentes ao problema, as definições de raiz, que poderão ser influentes na evolução de objetos que afetam o resultado do mesmo. Na etapa 4, constrói-se em linguagem humana o modelo conceitual, que pode usar lógica formal ou outra qualquer base conceitual de pensamento sistêmico, tal como a dinâmica dos sistemas ou as árvores de realidade. Na etapa 5, compara-se o modelo conceitual com a realidade. O modelo serve como guia de debate e poderá haver iterações, caso haja aprendizado significativo na comparação com o real. Na etapa 6, escolhem-se ações desejáveis e factíveis transformadoras da realidade, para, na etapa final, implementar estas ações. Os resultados devem ser medidos, realimentando o processo [Checkland e Scholes, 1998].

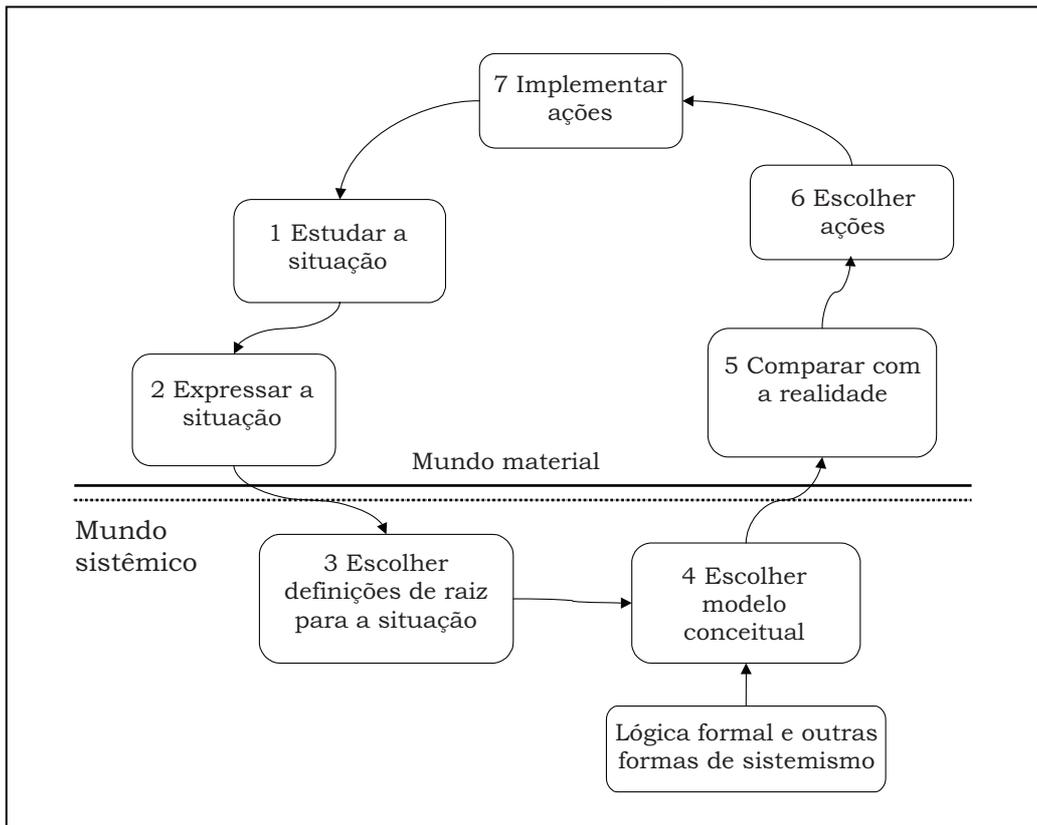


Figura 1: Etapas da SSM [Checkland e Scholes, 1998]

No esquema metodológico da figura, é admitida na etapa 4 a presença de outras formas de estruturação sistêmica do pensamento. Várias formas são apresentadas na literatura.

Uma delas são os mapas cognitivos [Eden, 1988; Ensslin *et al.*, 2001]. Mapas cognitivos são construções gráficas formadas por nós e setas, nas quais os nós representam pontos de vista expressos por frases afirmativas e, se necessário, contrastada pelo seu contraditório, para reforçar a multiplicidade de visões. Nós são ligados por setas, que indicam como pontos de vista são influenciados ou têm implicações em outros pontos de vista. Os mapas cognitivos são um passo intermediário em direção aos pontos de vista fundamentais, os critérios de sucesso contra os quais a situação problemática pode ser julgada [Belton *et al.*, 1997, Bana e Costa *et al.*, 1999].

Outra forma de estruturação sistêmica são as ARA, ou árvores da realidade atual (no original *CRT – Current Reality Tree*). A ARA é uma das ferramentas de análise sistêmica que compõem os processos de raciocínio da TOC, os *TP (thinking processes)*, cujo objetivo é oferecer uma abordagem sistêmica que explicita nexos causais e explique as relações suficientes e necessárias entre fenômenos observados em situações complexas de interesse, explorando a capacidade de aprendizado de analistas. As outras são: árvore da realidade futura (ARF); diagrama de dispersão de nuvem (DDN); árvore de pré-requisitos (APR); e árvore de transição (AT). A ARA define o que mudar, a ARF define para o que mudar, o DDN explicita o pressuposto errôneo que precisa ser mudado, a AT define os passos para mudar e a APR descreve o que superar para mudar [Kendall, 1998].

O objetivo da ARA é representar lógica e claramente as relações efeito-causa-efeito válidas em uma situação complexa de interesse, geralmente multifacetada e sem

consenso. Definida a situação e listados efeitos observados, estes são conectados em relações de precedência-conseqüência. Aplicam-se ressalvas legítimas, que refinam e depuram a ARA, conduzindo a uma forma final realimentada, que pode, inclusive, não ter entes sem precedências, ou seja, uma situação que é causa de si mesma [Sellitto, 2005]. Para validar relações de causalidade, é preciso descobrir qual o pressuposto que a explica, o nexos causal. Havendo um candidato a pressuposto, aplicam-se os seguintes testes: (i) para que exista [efeito] é necessário que exista [causa], porque existe [pressuposto]; e (ii) a não ser que exista [causa] não existirá [efeito], porque existe [pressuposto] [Goldratt, 1990; Sheinkopf, 1999]. Uma diferença entre ARA e diagrama sistêmico é que aquela preocupa-se apenas com aspectos qualitativos da relação de causalidade (existe ou não), não considerando distribuições ou correlações entre variáveis nem se a influência é positiva ou negativa. A forma qualitativa torna a ARA mais fácil de ser usada em abordagens iniciais, exploratórias da situação.

Técnicas para a construção e validação da ARA são apresentadas em Sheinkopf [1999]. Uma aplicação da ARA em gestão de serviços de saúde pública, uma modelagem de sistemas interorganizacionais complexos, com causalidades circulares e recursivas, é apresentada em Sellitto [2005]. Em Morgan [1996], o fenômeno da inflação e suas recursividades também é ilustrado, embora o autor não mencione a expressão ARA.

## 4 A pesquisa

O objetivo deste artigo foi obter um modelo matemático capaz de descrever a potência requerida pelo mercado consumidor brasileiro de energia elétrica entre 1996 e 2000. Potência requerida é diferente de potência demandada. A potência requerida é a potência realmente usada; potência demandada é aquela que os consumidores acreditam que vão usar e contratam, podendo não ser usada na integralidade. A potência elétrica não é um produto que o produtor entrega ao consumidor. O consumidor vai requerendo à medida que vai conectando equipamentos elétricos na rede de alimentação, até um limite físico.

Como em Neves *et al.* [2004], foi útil o uso de uma metodologia de estruturação de problema, para aprendizado e ganho de visão compartilhada sobre os múltiplos interesses em questão. Como em Bana e Costa *et al.* [1999], a primeira parte da pesquisa foi dedicada a estruturar e enquadrar o problema em um processo construtivista de aprendizado, que ofereceu uma representação compartilhada da situação. Em Bana e Costa *et al.* [1999], o método estruturante foi o mapeamento cognitivo e os pontos de vista fundamentais. Nesta pesquisa, foi a ARA dos processos de pensamento da TOC.

O método de trabalho foi: (1) formulação, em sessões de grupo focado de especialistas com múltiplas visões e interesses, de um modelo qualitativo sistêmico que represente a complexidade subjacente ao fenômeno; (2) identificação no modelo de uma estrutura central que possa ser apreendida por indicadores; (3) obtenção de dados no tempo para os indicadores; (4) buscar um modelo de regressão que descreva os dados; e (5) testar o modelo e discutir a aplicação, inclusive com projeções sobre o que sucedeu ao contingenciamento devido à escassez na geração, o apagão de 2001. A teoria de grupos focados e o método empregado na sessão são apresentados em Ribeiro e Newmann, [2003]. O que foi feito corresponde às etapas de 1 a 5 da Figura 1. A seguir, descrevem-se os resultados.

### 4.1 O modelo

As sessões de grupo focado foram conduzidas por dois pesquisadores. Compuseram o grupo um especialista de agência reguladora de energia elétrica, cujo interesse é conhecer



A ARA, válida apenas para o caso em estudo, permitiu que se construísse uma visão compartilhada entre as partes interessadas no tema, algumas delas com objetivos conflitantes. Se o mesmo estudo for feito por outros especialistas ou em outro espaço ou tempo, é possível que se chegue a outra ARA. A ARA atende o requerido na revisão: que um modelo de regressão não-linear deve possuir justificativa.

O lado direito da ARA descreve os aspectos sociais do fenômeno, apreendidos por três construtos latentes: a renda, a educação e a longevidade. Estes construtos participam do IDH, o índice de desenvolvimento humano, criado pela ONU para servir como realimentação do processo de desenvolvimento social mundial. O IDH é calculado segundo pesos dados aos construtos e respectivos indicadores, a renda *per capita*, a taxa de analfabetismo, os anos de estudo e a expectativa de vida ao nascer. Para o cálculo do valor dos construtos, subtrai-se do valor observado para o indicador um valor de base, pré-definido e equivalente a zero. O resultado é dividido pela diferença entre os valores máximo e mínimo pré-estabelecidos, resultando um valor entre 0 e 1. Quanto mais próximo de 1, melhor o IDH [Bezerra e Diwan, 2001]. As implicações do uso do IDH podem ser acessadas em [UNDP, 2002].

O lado esquerdo da ARA descreve o fenômeno econômico, apreendido pela atividade geral do mercado, o que remete a indicadores de atividade econômica. Antes de definir o indicador econômico, testaram-se as correlações entre as observações do requisito de potência com os PIB's geral e industrial, brutos e dessazonalizados, e com a produção industrial bruta. Também testaram-se as correlações do requisito de potência com as populações rural, urbana e total. As maiores correlações positivas foram com a população total e o PIB geral dessazonalizado, escolhendo-se estes indicadores para o modelo.

O Quadro 1 resume as informações. Não há informações mensais do requisito de potência antes de 1996, só anuais. Como as freqüências dos indicadores são diferentes, optou-se por uma freqüência trimestral. As Tabelas 1 e 2 apresentam as vinte observações e suas correlações. Destaque-se a correlação unitária entre IDH e população. Observações posteriores a 2000 foram excluídas no modelo devido à irregularidade que foi introduzida pelo contingenciamento de energia imposto pelo estado brasileiro em 2001, o apagão, que será discutido mais a frente. Mesmo que vinte observações sejam poucas para uma conclusão robusta, reforça-se que esta é uma contribuição metodológica, podendo e devendo ser aplicada em situações com mais dados consolidados.

Quadro 1: Resumo da variável e dos indicadores

resposta e indicadores	fonte	coleta e forma de uso no modelo
potência elétrica	ONS [2005]	medido mensalmente desde 1996/1, apresenta a média de consumo dos meses do trimestre em MW
PIB geral dessazonalizado	IBGE [2002]	medido trimestralmente desde 1990/1, soma os PIB's rural, industrial e de serviços dessazonalizados e referenciados ao ano 2.000
população total	IBGE [2002]	medido por censo de 10 em 10 anos, desde 1970, mais 1996, nos demais anos e trimestres interpolado
índice de desenvolvimento humano IDH	UNDP [2002]	mede a longevidade, a educação e o consumo de cinco em cinco anos, desde 1975 mais 1999, interpolado nos demais anos e trimestres

Tabela 1: Observações para o modelo da regressão

trimestre	potência MW médio	PIB geral R\$ dessaz equivalente a 2000	população total, milhões	IDH de 0 a 1, bom = 1
1996/1	34.370	245,51	155,773	0,731
1996/2	34.060	248,93	156,409	0,733
1996/3	34.590	249,86	157,060	0,734
1996/4	35.330	254,55	157,727	0,735
1997/1	36.336	255,82	158,408	0,736
1997/2	35.917	258,31	159,105	0,737
1997/3	36.960	259,62	159,817	0,738
1997/4	37.640	257,78	160,545	0,739
1998/1	38.523	257,38	161,287	0,740
1998/2	37.872	261,16	162,045	0,741
1998/3	38.413	259,85	162,818	0,742
1998/4	37.819	254,50	163,606	0,744
1999/1	39.137	256,00	164,409	0,745
1999/2	38.722	259,80	165,228	0,746
1999/3	39.300	260,69	166,061	0,747
1999/4	39.573	264,78	166,910	0,748
2000/1	40.650	268,91	167,774	0,749
2000/2	40.639	269,95	168,654	0,750
2000/3	40.719	272,44	169,548	0,751
2000/4	42.003	275,40	170,458	0,752

Tabela 2: Correlações entre os indicadores do modelo

	potência	PIB	população
PIB	0,91		
população	0,97	0,90	
IDH	0,98	0,90	1,00

Na ARA, PIB e população surgem em ramos paralelos, sugerindo adição. IDH e população surgem em ramo serial, sugerindo multiplicação na qual o IDH pondera a população. Exigiu-se que a soma de  $\theta_1$  e  $\theta_2$  fosse igual a um para evidenciar a contribuição de cada parcela. Sugere-se então, especulativamente, a equação 3, composta por uma parcela econômica, ligada ao PIB e uma parcela social, ligada à população e ponderada pelo IDH. Um fator de escala  $\theta_1$  foi incluído.

$$Y = \theta_0 \cdot [\theta_1 \cdot (PIB)^{\theta_{11}} + \theta_2 \cdot (POPULAÇÃO)^{\theta_{22}} \cdot (IDH)] \quad (3)$$

## 4.2 Ajuste ao modelo

Antes de ajustar-se o modelo da equação 3 aos dados da Tabela 1, foram feitas adequações que se mostraram úteis. Preferiu-se usar para o PIB e para a população valores normalizados em relação às observações de 2000/1 ( $POP/POP$  2000). O IDH não foi modificado. Como existe um elo entre os aumentos da renda e da atividade comercial,

que aumentam o requisito de potência, suspeitou-se de uma defasagem entre as séries temporais do PIB e da observação. Testaram-se diversas defasagens e a que apresentou maior correlação foi ( $PIB_{-2}/PIB\ 2000$ ), ou seja, correlacionando a potência atual com o PIB de dois trimestres atrás.

Para o ajuste, foram usados dois recursos computacionais, a rotina *solver* do *software* Excel® e a rotina *non-linear regression* do *software* SPSS®. A rotina *solver* usa o algoritmo GRC e o SPSS® usa o método L-M. O *solver* foi configurado para minimizar o erro-padrão da estimativa. Testaram-se alguns conjuntos de soluções iniciais. A Tabela 3 apresenta os melhores resultados com cada recurso. Foram calculados  $R^2$ , intervalos de confiança, o erro-padrão da estimativa e o viés. Como o  $R^2$  do modelo do *solver* foi um pouco melhor, segue-se este modelo. Como antecipado na revisão, os métodos chegaram a pequenas diferenças de resultados. Foi tentado um expoente para IDH. O valor ótimo foi 1,001 e não houve melhoria no  $R^2$ . Por parcimônia, excluiu-se o expoente do modelo.

Tabela 3: Modelo não-linear para o requisito de potência do mercado brasileiro [1996-2000]

Modelo produzido pelo <i>solver</i>	Potência (MW médio) = 52000. [0,1. $[(PIB_{-2}/PIB\ 2000)^{2,61}] + 0,9. [(POP/POP\ 2000)^{1,71}. IDH]$ $R^2 = 0,96470$
Modelo produzido pelo SPSS	Potência (MW médio) = 51849. [0,108 . $[(PIB_{-2}/PIB\ 2000)^{2,46}] + 0,892 . [(POP/POP\ 2000)^{1,72}. IDH]$ $R^2 = 0,96395$
Intervalos de confiança assintóticos	IC 95% $\theta_0 = [31.713; 71.984]$ ; IC 95% $\theta_{11} = [-25,4; 30,3]$ ; IC 95% $\theta_{22} = [-2,049; 5,502]$ ;
erro-padrão da estimativa	454,7 MW médios
viés da estimativa	1,00 (nenhum viés)

A adequação do modelo é verificada pela significância da regressão e por inspeção de resíduos. A regressão é significativa se a variável dependente se relacionar de modo significativo com as variáveis dependentes. Um modo de testar esta significância é calculando a proporção entre a variância dos dados explicada e a não explicada pela regressão. Dados os diversos graus de liberdade, uma proporção entre variâncias segue uma distribuição  $F$ . O teste é definido em termos de  $F_{teste} = [variância\ explicada/variância\ não\ explicada]$  e  $F_{critico}$ , obtido de uma distribuição  $F$  com nível de confiança  $\alpha$  e  $(k-1)$  e  $(n-k)$  graus de liberdade. Se  $F_{teste} > F_{critico}$ , a variância explicada é maior do que a não explicada, caracterizando, com confiabilidade  $(1-\alpha)$ , que a regressão é significativa, rejeitando-se  $H_0: R^2 = 0$  [Corrar et al., 2004].

O teste é apresentado sob a forma de *anova* na Tabela 4. A regressão se vale de quatro parâmetros independentes ( $\theta_0, \theta_1, \theta_{11}$  e  $\theta_{22}, \theta_2$  não é independente), logo os preditos têm quatro graus de liberdade ( $gl$ ). Como os graus de liberdade totais são 19 (vinte observações menos uma), tem-se  $[gl = 15]$  para os resíduos. As somas e as médias quadráticas das parcelas referentes à estimativa e aos resíduos produzem  $F_{teste} > F_{critico}$ , o que caracteriza a significância da regressão. O valor- $p$ , próximo a zero, é a probabilidade de que se tenha chegado ao resultado por acaso, a regressão não seja significativa e  $R^2$  não seja diferente de zero.

Tabela 4: Anova para o modelo

<i>Anova</i>	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F teste</i>	<i>F crítico</i>	<i>Valor-p</i>
Predito	4	9,6 E+07	2,4 E+07	102	3,06	1,09 E-10
Resíduo	15	3,5 E+06	2,3 E+05			
Total	19					

Passa-se à análise dos resíduos. Os fundamentos teóricos e os detalhes de cálculos são encontrados em Hair *et al.*, 1998; Milone e Angelini, 1995 e Werkema e Aguiar, 1996.

A Tabela 5 apresenta uma análise sumária dos valores preditos e dos resíduos, informando que as observações extremas dos resíduos padronizados e de Student distam cerca de dois desvios-padrão dos centros das respectivas distribuições. Também informa que a menor significância de uma distância  $D^2$  de Mahalanobis é maior do que 1% e que a maior distância de Cook é menor do que o valor limite mais conservador  $[4/(20-3-1)] = 0,25$ . Com isto descarta-se a presença de dados atípicos (que deveriam ser retirados da amostra). Em seguida, verificam-se quatro suposições acerca dos resíduos: (i) a normalidade; (ii) a independência em relação aos preditos; (iii) a autocorrelação; e (iv) a homocedasticidade da amostra. A primeira verificação é feita na Figura 3, o gráfico de dispersão de resíduos e preditos. O  $R^2$  próximo a zero e o formato aleatório evidenciam a independência dos resíduos em relação aos preditos. A segunda verificação é apresentada na Tabela 6, na qual dois testes da qualidade do ajuste não rejeitam a hipótese de que os resíduos seguem uma distribuição normal. A terceira verificação é feita pelo teste de Durbin-Watson, apresentado na Tabela 7. Finalmente, a homocedasticidade é verificada pelo método de Pesaran-Pesaran, que faz uma regressão entre os resíduos quadráticos e os preditos: se a regressão não for significativa, há a homocedasticidade. A Tabela 8 apresenta valor- $p > 5\%$ , que indica que a regressão não é significativa, confirmando a homocedasticidade.

Tabela 5: Análise de preditos e resíduos

	mínimo	máximo	média	desvio-padrão
valor predito	34.590	42.074	37.982	2.244
resíduo	-822	796	0,89	430
resíduo padronizado	-1,91 (obs. 11)	1,85 (obs. 10)	0,00	1,00
resíduo de Student	-2,08 (obs. 11)	2,00 (obs. 10)	0,01	1,05
significância de $D^2$	0,16 (obs. 20)	-	-	-
distância de Cook ( $D_i$ )	-	0,201 (obs. 9)	-	-

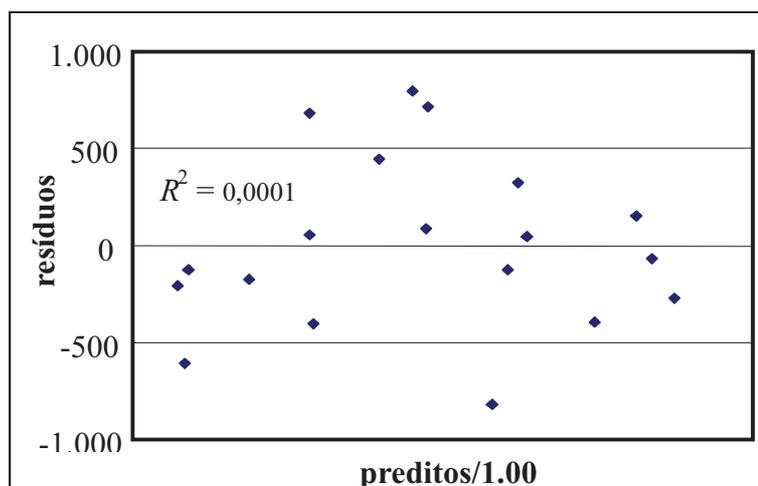
Figura 2: Dispersão (valores preditos X resíduos) e  $R^2$ 

Tabela 6: Ajuste à normalidade dos resíduos

	teste KS	qui-quadrado	conclusão
Nível de significância para os resíduos	0,2331	0,2295	não rejeitar

Tabela 7: Teste de autocorrelação dos resíduos [20]

estatística DW calculada	limite inferior da área permitida	limite superior da área permitida	conclusão
2,127	1,828	2,172	não há autocorrelação

Tabela 8: Teste da homocedasticidade

Anova	gl	SQ	MQ	F teste	F crítico	Valor-p
Regressão	1	2,89 E+10	2,89 E+10	0,55	4,41	0,47
Resíduo	18	9,45 E+11	5,25 E+10			
Total	19	9,74 E+11				

## 5. Discussão

Inicia-se a discussão pela consistência do modelo que deu origem à regressão. Apesar do modelo apresentar elos de realimentação, foi possível identificar duas vertentes que contribuem para o requisito de potência elétrica do mercado brasileiro.

Uma vertente parece representar um fenômeno econômico e foi mais bem representado pelo indicador de atividade econômica, o PIB geral dessazonalizado. Outra vertente parece representar um fenômeno social, representado pela multiplicação do IDH

pela população total. A respeito deste fator multiplicativo, argumenta-se que o IDH pode ser considerado como uma densidade de requisito de potência: um cidadão que apresenta um alto IDH requer em média mais potência elétrica em sua residência do que um cidadão que possui IDH baixo. O requisito final de potência surge da multiplicação da densidade do requisito, o IDH, pela massa populacional, a população total. Como a observação inicial é diferente de zero, agregou-se um fator de escala. Retirou-se um grau de liberdade ao manter a soma dos dois fatores igual a um, permitindo que se verifique o percentual de contribuição de cada vertente.

Para cada uma das vinte observações, foi calculado o valor de cada parcela e verificada a relação entre as somas das parcelas. A análise indicou que o fenômeno social influencia 6,6 vezes mais do que o fenômeno econômico nas variações observadas no requisito de potência do mercado brasileiro. É possível que um programa institucional de racionalização do consumo de energia elétrica deva atentar mais ao fenômeno social do que ao econômico, ao menos aquele medido pelo PIB.

Considerando os elementos que formam o IDH, atenção pode ser dada aos entes: *aumenta o bem-estar nas moradias; aumenta a educação e a informação das pessoas; e aumenta a longevidade da população*. Os dois primeiros podem estar correlacionados. O aumento do bem-estar, da educação e da informação pode ser explicado pelo avanço do acesso a bens tecnológicos por que a sociedade brasileira tem passado desde 1994, com o fim do processo inflacionário. Na prática, o bem-estar resulta em maior consumo doméstico de energia, pela aquisição de eletrodomésticos e outras facilidades para as residências. Com mais eletrodomésticos, aumenta a educação e a informação. O terceiro ente também pode estar correlacionado aos dois primeiros, pois bem-estar e informação se relacionam com prevenção de doenças e de hábitos danosos à saúde que, aliados a políticas de saneamento e ao avanço da medicina, resulta em maior longevidade da população. A combinação de famílias que consomem mais energia e pessoas que vivem mais resulta em acréscimo por causas sociais no requisito de potência mais do que proporcional ao por aumento da atividade econômica.

Dado que avanços sociais são desejáveis e devem ser estimulados, uma política para contingenciar o aumento do requisito de potência poderia focar na racionalização do consumo de eletrodomésticos, por estímulo a projetos mais eficientes. Outra ação poderia estimular o uso mais eficiente de energia nas residências, ou por campanhas de conscientização para uso racional, ou por políticas de tarifas diferenciadas por horário ou faixa de consumo, como as que já existem para o setor industrial. Por fim, o desenvolvimento de medidores residenciais de energia mais inteligentes, que denunciasses e coibisses fraudes, também poderiam desestimular consumos irregulares verificados em áreas de difícil controle. Caso tais medidas, ou equivalentes, não sejam cogitadas, sobra, para evitar um novo apagão, o aumento da capacidade instalada, o que, além de demandar recursos, demanda tempo de maturação e não contribui para uma evolução social em direção à eficiência e uso racional da energia.

Quanto à qualidade do modelo, a regressão apresenta um coeficiente de determinação  $R^2$  próximo a 1: menos de 4% da variação nas observações não é explicada pelo modelo. O erro-padrão da estimativa, calculado para dezesseis graus de liberdade, representa menos de 1% do fator de escala. O valor- $p$  do teste  $F$  é próximo a zero. Com base nessas evidências, é possível considerar significativa a regressão. Para verificar se as premissas do modelo são cumpridas, inspecionam-se os resíduos. O ajuste dos resíduos à distribuição normal, verificada pelos testes do qui-quadrado e KS, é satisfatória a um nível de confiança superior a 95%. A normalidade dos resíduos é confirmada pelo gráfico de dispersão [valores preditos X resíduos], cujo  $R^2$  é praticamente nulo. Tanto os resíduos padronizados como os resíduos de Student se mantiveram em uma faixa de  $\pm 2$ , o teste de Durbin-Watson foi positivo e o teste de Pesaran-Pesaran evidenciou que se trata de uma amostra de variância constante.

Pelos resultados dos testes, é possível concluir que os pressupostos exigidos pelo modelo foram atendidos. A Figura 4 apresenta uma comparação entre os valores observados e os valores preditos ao longo de vinte trimestres, na qual verifica-se que apenas algumas observações centrais se desviaram um pouco mais dos valores preditos.

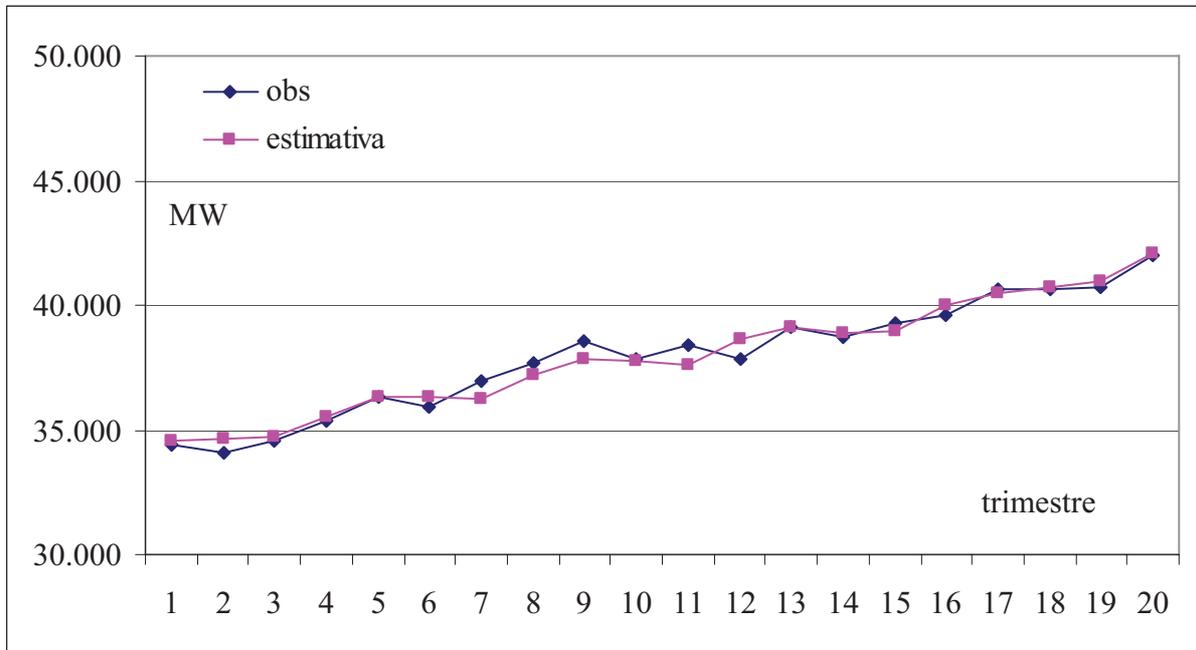


Figura 3: Comparação entre observações e predições

Uma observação é pertinente quanto ao universo de dados. Embora houvesse dados de janeiro de 1996 a novembro de 2005, julgou-se prudente usar apenas as observações entre 1996 e 2000 (não há informações mensais anteriores a 1996). Tomou-se esta decisão em virtude da descontinuidade observada a partir de março de 2001, o apagão. A descontinuidade foi tamanha que um modelo que tentasse explicá-la faria tantas concessões que se tornaria de pouca valia no restante do período (um polinômio de quarto grau explicou apenas 60% das variações). Metodologicamente também se perderia a oportunidade de se chegar a um modelo replicável caso se insistisse em explicar a totalidade dos dados.

Na Figura 5, observam-se séries temporais e retas médias que descrevem o requisito de potência elétrica do mercado brasileiro de janeiro de 1996 ( $x = 1$ ) a março de 2001 e de fevereiro de 2002 a novembro de 2005 ( $x = 119$ ). Na Figura 6, observa-se o comportamento anual complexo, nos últimos vinte anos. Observa-se que, após quatro anos, o mercado ainda não voltou ao ritmo de consumo anterior, assumindo até agora um comportamento mais econômico. Os coeficientes angulares das retas (132 e 159) são próximos e podem sugerir que o crescimento natural do requisito tenha sido retomado. Se confirmada a mudança, esta pode ser atribuída a um novo comportamento do consumidor e ao lançamento por fabricantes de equipamentos mais eficientes. Integrando-se a diferença entre as retas médias das séries temporais de potência chega-se a uma estimativa de mais de 130.000 GWh de energia poupados entre fevereiro de 2003 e novembro de 2005.

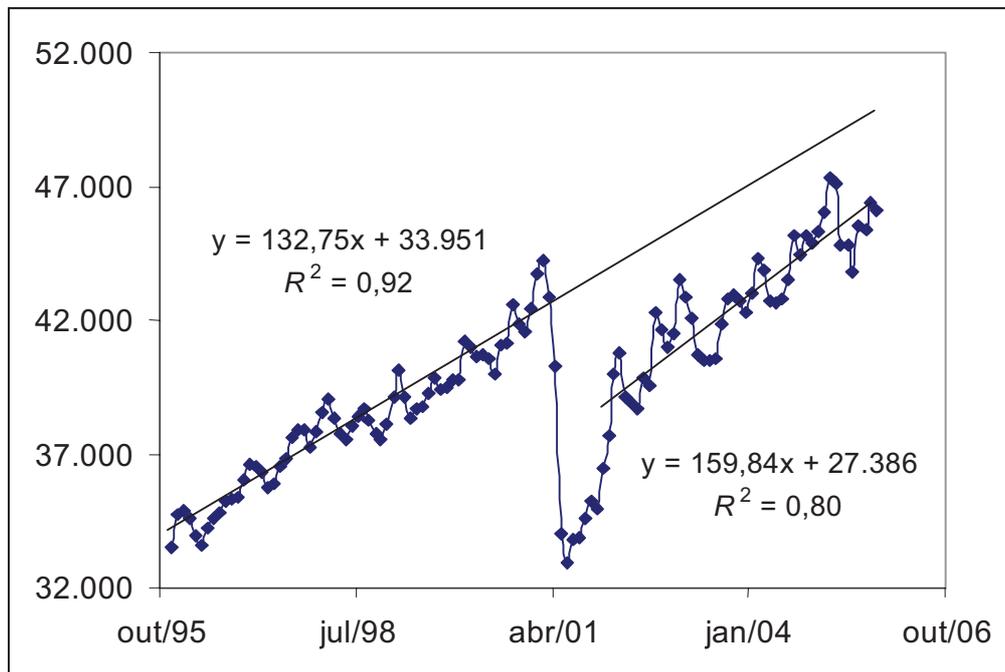


Figura 4: Séries temporais antes e depois do apagão [ONS, 2005]

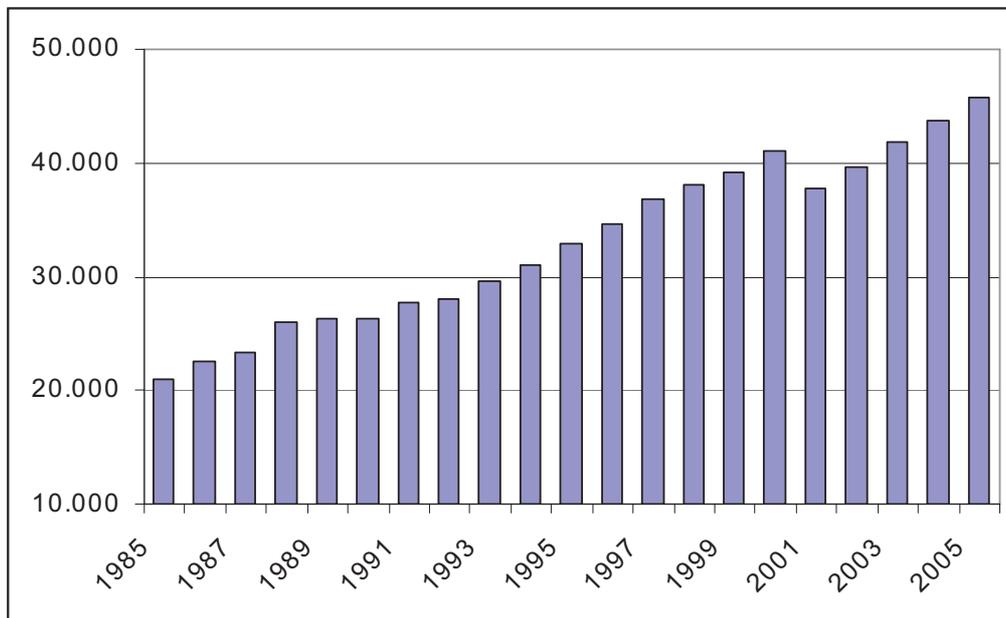


Figura 5: Comportamento anual da potência média, de 1985 a 2005 [ONS, 2005]

A seguir se discutem aspectos do método de pesquisa e do avanço que se pode esperar. A maior contribuição que esta pesquisa talvez possa trazer parece ser metodológica, pois

pode servir como sugestão para pesquisas equivalentes tanto na área da energia elétrica de regiões brasileiras ou de outras nações, como para outras formas de consumo energético.

O método empregado parece ter sido consistente, fácil de implementar e não suscitou dúvidas quando da sua aplicação. Os softwares foram de fácil aplicação, não exigindo investimentos adicionais em softwares especialistas e chegaram a resultados consistentes com as limitações da teoria atual, se bem que não se conseguiu tratar da estocasticidade dos regressores. Quanto ao avanço no assunto, entende-se que o ajuste obtido é satisfatório e o número de variáveis preditoras é baixo, o que atende premissas de precisão e de facilidade operacional. O resultado final parece ser eficaz na previsão de longo prazo (um ano ou mais) do requisito de potência do mercado brasileiro. Os preditores empregados apresentam um movimento lento, perceptível no longo prazo, coerente com o movimento da resposta, sempre crescente. Como não era objetivo de pesquisa a obtenção de um modelo para o curto prazo, não há necessidade de indicadores que apreendam variações imediatas, tais como as ligadas ao clima.

Uma última discussão acerca dos indicadores utilizados é possível, ao se compararem os mesmos com os indicadores usados em Iwamiya e Kermanshahi [2004], que relatam o uso de redes neurais para a previsão de longo prazo para o mercado japonês. Os pesquisadores usaram como fatores de aprendizado da rede: (1) o produto nacional bruto; (2) o produto interno bruto (para o Japão exportador, são muito diferentes); (3) população total; (4) número de domicílios; (5) número de equipamentos de ar condicionados; (6) total de poluição por CO<sub>2</sub>; (7) índice de produção industrial; (8) preço de óleo combustível; (9) consumo total de energia, incluindo todas as fontes; e (10) preço da eletricidade. Treinada previamente e alimentada com os dados do ano  $T$ , a rede oferece a previsão para os anos  $[T + i]$ . Obviamente, quanto maior  $i$ , menor a confiabilidade da previsão. Observa-se que os fatores de treinamento guardam relação com os indicadores ora empregados, exceção feita a (6), (8) e (9), haja vista a dependência do Brasil da energia hídrica, o que torna o uso de óleo quase irrelevante. Os fatores (1), (2) e (7) se relacionam ao PIB; (3) e (4) se relacionam com a população total; e (5) e (10) se relacionam principalmente com o IDH, havendo multicolinearidade entre fatores. Os pesquisadores apontam um erro de 3% para o método e comentam que até 10% de erro seria aceitável em previsões de longo prazo para o mercado japonês.

O procedimento ora proposto também pode se valer de estimativas para o período  $T$  dos indicadores, fornecidas por ONS, IBGE e Banco Central do Brasil, e projetar o requisito de potência para os períodos  $[T + i]$ . À medida que novas observações vão surgindo, estas são incorporadas ao procedimento que, de modo recursivo, recalcula e robustece o modelo. Recorde-se que o modelo por regressão não-linear por ora atingiu um  $R^2$  de 96,5%.

## 6. Conclusões

Por meio de uma abordagem que conectou SSM e regressão não-linear, chegou-se a um modelo para o requisito de potência do mercado elétrico brasileiro entre 1995 e 2001. O modelo a que se chegou faz mais do que apresentar boas estatísticas de teste: é calcado em um desenvolvimento qualitativo, que considerou visões e interesses conflitantes e gerou uma figura compartilhada por especialistas no tema.

O desenvolvimento do modelo tomou um tempo mais longo do que o previsto, devido às possibilidades de teste oferecidas pela teoria sobre a regressão múltipla. Para novas aplicações, pode-se agregar variantes no procedimento, tais como o teste do modelo a subconjuntos da amostra original e calcular a variabilidade dos parâmetros da regressão.

O ajuste, a facilidade de obtenção dos dados, a operacionalização dos cálculos e a parcimônia de preditores obtidos sugerem que é possível desenvolver um modelo não-linear de regressão múltipla que descreva o requisito de potência elétrica de um sistema consumidor. Ressalve-se que esta aplicação contou com um número baixo de observações e, por conseqüência, de graus de liberdade para o cálculo dos preditores, devendo-se destacar os aspectos metodológicos ora propostos.

A regressão múltipla não é a única técnica multivariada cabível ao caso. Outros pesquisadores têm usado redes neurais e lógica neuro-fuzzy. A modelagem por equações estruturadas (*SEM*) também pode ser aplicada, o que oferece um aspecto que a regressão múltipla não oferece: a possibilidade de a mesma variável ser ora resposta, ora preditor, em circularidade, o que foi observado no modelo deste trabalho. No entanto, a modelagem por equações estruturadas não parece ser indicada para o estágio atual da aplicação, pela pouca quantidade de dados por ora disponíveis.

Sugere-se como continuidade a inserção de mais aspectos sociais na análise. Pode-se inserir no modelo atual mais fatos, tais como a circularidade entre a população e a qualidade de vida, uma vez que se observa a tendência de redução no ritmo de aumento populacional em sociedades que aumentaram sua qualidade de vida. Finalmente sugere-se uma investigação comparada das facilidades oferecidas e da nomenclatura empregada pelos diversos softwares disponíveis para operacionalização da regressão múltipla, e eventual escolha de um deles para replicar o experimento, o que permitirá sobrepujar a limitação ora vigente de não se tratarem os regressores como parâmetros estocásticos.

Cabe uma última consideração. Não era objetivo de pesquisa investigar as conseqüências do apagão. No entanto chamou a atenção o efeito que este exerceu no mercado consumidor. Após a liberação, mesmo que a taxa de crescimento tenha voltado a um valor próximo do inicial, o nível de consumo ainda não voltou aos níveis que se deveriam esperar se o padrão de consumo anterior fosse mantido. Não foi feita uma investigação específica, mas é possível que um aprendizado tenha se dado quanto à conservação de energia. Trata-se de um assunto com desdobramentos sociais, haja vista as implicações econômicas e ambientais que daí decorrem. A redução do investimento na ampliação do sistema pode ser direcionada a outros campos sociais e a redução do consumo implica redução no uso do manancial hídrico e na agressão ambiental decorrente

## 7. Referências

- Al-Saba, T.; El-Amin, I. [1999] Artificial neural networks as applied to long-term demand forecasting. *Artificial Intelligence in Engineering*. Vol. 13, No 2, pp. 189-197.
- Bana e Costa, C.; Ensslin, L.; Correa, E.; Vansnick, J. [1999] Decision Support Systems in action: Integrated application in a multicriteria decision aid process. *European Journal of Operational Research*, Vol. 113, No 2, pp. 315-335.
- Belton, V.; Ackerman, F.; Sheperd, I. [1997] Integrated support from problem structuring through to alternative evaluation using COPE and V.I.S.A. *Journal of Multiple Criteria Decision Analysis*. Vol. 6, No 3, pp. 115-130.
- Bezerra, E.; Diwan, J. [2001] Uso de DEA como alternativa ao IDH na mensuração do desenvolvimento humano nos maiores municípios brasileiros, *Anais do XXXIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, SOBRAPO*, Campos do Jordão.
- Bunn, D. [2000] Forecasting loads and prices in competitive power markets. *Proceedings of the IEEE*, Vol. 88, No 2, pp. 163-169.