

APLICAÇÃO DO MODELO ARX PARA PREVISÃO DO CONSUMO INDUSTRIAL DE ENERGIA ELÉTRICA DO BRASIL

APPLICATION OF THE MODEL ARX TO FORECAST BRAZILIAN CONSUMPTION OF INDUSTRIAL ELECTRICITY

Fernando Alves de MOURA

Universidade de São Paulo - Fundação Instituto de Administração (ProCED – FIA) – SP - Brasil
f.a.moura@hotmail.com

Alessandra de Ávila MONTINI

Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade da Universidade de São Paulo – SP - Brasil
amontini@usp.br

Recebido em 02/2012 – Aprovado em 08/2012

Resumo

Neste trabalho estima-se um modelo de previsão do consumo industrial de energia brasileiro por meio do modelo ARX. Nesses modelos o consumo de energia pode ser estimado por meio de uma regressão linear múltipla considerando diversas variáveis macroeconômicas como variáveis explicativas. Os resíduos desse modelo são explicados por meio de um modelo de Box & Jenkins. Utiliza-se uma base de dados mensal no período entre Janeiro de 2003 e Setembro de 2010 para estimação dos coeficientes do modelo, e uma amostra de validação de Outubro de 2010 até Fevereiro de 2011. O modelo estimado atende aos pressupostos de normalidade, ausência de autocorrelação serial e ausência de heterocedasticidade condicionada dos resíduos. Obtém-se um ajuste de 1,09%, 185,54 e 93,98% nas estatísticas MAPE, RMSE e r^2 ajustado respectivamente. Os resultados confirmaram a viabilidade da utilização do modelo ARX para a previsão desta série na amostra de dados selecionada.

Palavras-Chave: Consumo comercial de energia elétrica - Previsão de demanda – Econometria - Modelo ARMAX

Abstract

In this paper we estimate a forecasting model of the Brazilian industrial energy consumption through the ARX model. In these models the energy consumption can be estimated by a multiple linear regression considering several macroeconomic variables as explanatory variables. The residues from this are explained by means of a model Box & Jenkins. We use a database monthly between January 2003 and September 2010 to estimate the coefficients of the model and a validation sample of October 2010 until February 2011. The estimated model meets the assumptions of normality, lack of absence of serial autocorrelation and conditional heteroscedasticity of the residuals. You get an adjustment of 1.09%, 185.54 and 93.98% in MAPE statistics, RMSE and Adjusted r2 respectively. The results confirmed the feasibility of using the ARX model for the prediction of this series in the sample of selected data.

Keywords: *Electric energy commercial consumption - Demand forecasting - Econometrics - ARMAX Model*

1 INTRODUÇÃO

Fonte de desenvolvimento econômico e social, a energia elétrica desempenha papel crítico na economia e no nível de bem estar da sociedade contemporânea. A existência de energia em abundância e a baixo custo, como havia no passado, são características cada vez menos prováveis para o futuro do setor. Tanto os meios de geração dessa, quanto suas próprias fontes de obtenção se encontram num dilema, questionando a viabilidade do atual modelo mundial fortemente baseado no consumo de combustíveis fósseis e demais recursos não renováveis.

O chamado ‘apagão’, ocorrido em 2001 e 2002, dois últimos anos do mandato do presidente Fernando Henrique Cardoso, chama atenção para o setor de energia elétrica na última década.

Importante vetor de desenvolvimento econômico e social, abalos na regularidade de distribuição energética podem gerar prejuízos econômicos e sociais de grande magnitude. Os problemas enfrentados com o ‘apagão’ de 2001-2002 foram suficientes para rever as taxas de crescimento do PIB, Produto Interno Bruto, em 2001 de 4,5% para 1,3%, ilustrando a relevância do setor (PÊGO e NETO, 2008).

Atribuições sobre os meios de geração da energia elétrica e seu racionamento à parte, é indiscutível a necessidade de um bom planejamento energético, em especial a previsão dos níveis de consumo de energia elétrica, e dimensionamento da capacidade produtiva para atender tal demanda, principalmente em um país com as taxas de crescimento econômico do Brasil que atingiu 6,1% de crescimento do PIB em 2007, 5,2% em 2008, e após a queda de 0,6% com a crise em 2009, obteve 7,5% de crescimento do PIB em 2010 (IBGE, 2011). Assegurar o fornecimento de energia elétrica é ponto base para manutenção desse ciclo de crescimento.

A EPE, Empresa de Pesquisa Energética, publica regularmente o Plano Decenal de Expansão de Energia. O documento apresenta possíveis cenários macroeconômicos para o Brasil e faz projeções da demanda energética nacional para cada cenário, evidenciando a organização do setor e suas perspectivas (BRASIL, 2010). O estudo do mercado de energia elétrica permite a tomada de uma série de decisões pelos agentes do sistema, como a determinação da tarifa cobrada dos consumidores finais, o planejamento do fluxo de caixa dos agentes do sistema (investimentos na matriz produtiva, forma de financiamento, entre outros), o controle de aspectos operacionais na geração e distribuição da eletricidade e o acompanhamento da distribuição temporal e espacial da energia elétrica (BRANCO, 2003).

Uma série de metodologias pode ser utilizada para prever o consumo energético. Destacam-se os modelos de projeção de tendência (AL-JANABI, 1979) modelos de vetores autorregressivos (ANDRADE e LOBÃO, 1997; SCHMIDT e LIMA, 2004), modelos de Box e Jenkins de séries temporais (PAO, 2009; SUMER *et al*, 2009), dentre outros. Dentre essas possíveis metodologias, observa-se que modelos causais com a inclusão de componentes de séries temporais têm apresentado bons resultados empíricos na previsão da demanda energética (ABREU e SANT'ANNA, 2009; CASTRO e MONTINI, 2010).

Com base no exposto à cima, o objetivo deste trabalho é projetar o consumo industrial de energia elétrica brasileira por meio do modelo ARX. Esses modelos têm a característica de estimar a série de interesse com base em variáveis exógenas e captar suas componentes de tendência e sazonais, fato de extrema utilidade para o estudo de séries com padrão cíclico como o consumo residencial de energia elétrica no Brasil.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Estudos prévios

No Brasil, o trabalho de Modiano (1984) é considerado um dos primeiros a tratar da questão de previsão da demanda energética dentro da área de estudos da Econometria. Em sua pesquisa foram mensuradas e quantificadas as elasticidades renda e preço do consumo de energia elétrica no Brasil. Estudos posteriores, como Andrade e Lobão (1997) e Schmidt e Lima (2004), agregam novas variáveis e fazem uso de diferentes modelos estatísticos, mas, de forma geral, os temas elasticidade-renda e elasticidade-preço da demanda de energia elétrica se mantêm

recorrentes nos estudos do comportamento da demanda.

Além dos fatores preço e renda, existem outras variáveis que são incluídas nos modelos existentes na literatura, como, por exemplo, o estoque de bens que demanda energia elétrica em seu funcionamento, como eletrodomésticos. Essa variável seria um grande influenciador na quantidade de energia consumida do setor residencial, ao passo que o estoque de bens eletrônicos relacionados ao setor de serviços (equipamentos e maquinário) seria um grande influenciador na quantidade de energia consumida do setor comercial (SCHMIDT e LIMA, 2004). Pode-se dizer de forma abrangente que a demanda por energia elétrica é função de um conjunto de variáveis independentes e de um erro aleatório, e que seria possível estimar os parâmetros dessa função com base em diferentes metodologias (ANDRADE e LOBÃO, 1997).

Um caminho alternativo, mas não necessariamente excludente ao estudo causal da demanda por energia elétrica é a análise dessa variável apenas com base em seus valores passados, ou seja, utilizar a própria série para prever seu comportamento futuro. Com essa ideia são feitas análises de séries temporais, avaliando componentes da demanda como sua tendência, sazonalidade e ciclos, que podem exibir um padrão identificável ao longo do tempo. Dentro dessa classe, uma das principais metodologias adotadas são os modelos de Box & Jenkins, também chamados de modelos ARIMA, Autorregressivos Integrados de Médias Móveis, (BOX e JENKINS, 1976) e suas variações. Nessa abordagem são feitas suposições sobre o comportamento da série que permitem análises com bom nível de ajuste. Os estudos com base em metodologias de séries temporais apresentam resultados empíricos satisfatórios, entretanto têm a desvantagem de oferecerem interpretações dos

resultados restritas ao comportamento da série em estudo, desconsiderando a influência que outras variáveis teriam sobre esta (PAO, 2009; SUMER, 2009).

Dentre os métodos possíveis de modelagem da demanda energética, estudos que fazem uso de modelos de regressão linear múltipla e ajustam os resíduos por meio de modelos de Box & Jenkins têm demonstrado bons resultados empíricos. Modelos ARX, Autorregressivos com Variáveis Exógenas (PILLI-SIHVOLA *et al*, 2010; CASTRO e MONTINI, 2010) e ARMAX, Autorregressivos de Médias Móveis com Variáveis Exógenas (PAO, 2006; BAKHAT e ROSELLO, 2011) apresentam a característica de estimar o consumo energético com base em variáveis explicativas e modelar os resíduos do modelo por meio de séries temporais. Tais modelos seriam de aplicação relevante devido a captarem a influência de variáveis macroeconômicas no consumo energético e aos padrões de comportamento da série ao longo do tempo.

Pao (2006) modela o consumo de energia elétrica para o período de Janeiro de 1990 até Dezembro de 2002 para Taiwan a partir de quatro metodologias distintas: redes neurais artificiais; regressão linear múltipla; modelos ARMA e modelos ARMAX; Abreu e Sant'anna (2009) estimam o consumo de energia elétrica no Brasil por classes. São ajustados modelos para as classes de consumo residencial, comercial e industrial, com dados mensais do período entre os anos 2003 e 2008 a partir de regressões lineares múltiplas. A partir dos resultados obtidos na regressão, é adicionado um termo autorregressivo de ordem 1, AR(1), para melhorar o ajuste do modelo; Castro e Montini (2010) estimam o consumo residencial de energia elétrica através de um modelo ARX. O consumo é estimado em função da tarifa da energia elétrica, do rendimento mensal habitual médio de regiões

metropolitanas e do índice de preços de bens duráveis. As variáveis preditoras e a variável predita são incluídas em até 4 unidades de tempo defasadas. São utilizadas observações mensais de Janeiro de 2003 a Dezembro de 2009 para construção dos modelos. Os autores realizam previsões para os meses de Janeiro e Fevereiro de 2010; Pili-Sihvola *et al* (2010) abordam a questão das mudanças climáticas e seus impactos no consumo de energia elétrica. Os autores examinam o impacto que o aquecimento climático gradual tem exercido em países selecionados no norte e sul da Europa e posteriormente calculam os custos que deveriam ser repassados aos consumidores em decorrência das transferências financeiras feitas no mercado de créditos de carbono. Os coeficientes estimados no modelo ARX com dados mensais de 1985 até 2008 são utilizados para calcular os impactos que mudanças de temperatura nos períodos de 2008 a 2050 terão no consumo de energia elétrica, fornecendo previsões para os cinco países tomados como amostra (Finlândia, Alemanha, Holanda, França e Espanha); Bakhat e Rosello (2011) estimam o consumo de energia elétrica para as Ilhas Baleares entre Janeiro de 2005 e Setembro de 2009. O foco dos autores é identificar o peso que a atividade turística exerce sobre a demanda de energia elétrica. Os autores concluem que o setor turístico não pode ser considerado um setor intensivo na utilização desse recurso. É aplicado um modelo ARMA de séries temporais com a inclusão das variáveis exógenas: índice de temperatura, número de habitantes, número de turistas e variáveis *dummy* para os dias da semana e para os meses analisados. Os resultados da pesquisa apontam que o consumo de energia elétrica é mais sensível a aumentos no número de habitantes do que no número de turistas. O Quadro 1 apresenta um resumo de alguns estudos sobre previsão da demanda energética.

Quadro 1 - Resumo de alguns estudos sobre previsão da demanda energética

Estudo	Frequência dos dados	Período	Região de estudo	Variáveis preditas	Variáveis predictoras	Modelo ajustado
Modiano (1984)	Anual	1963-1981	Brasil	consumo de energia elétrica: residencial; industrial; e comercial	tarifa; PIB	Regressão linear múltipla
Andrade e Lobão (1997)	Anual	1963-1995	Brasil	consumo residencial de energia elétrica	tarifa; preço dos eletrodomésticos; PIB	Vetor auto regressivo
Pao (2006)	Mensal	1990(1)-2002(12)	Taiwan	consumo de energia elétrica	renda; tamanho da população; PIB; índice de preços ao consumidor; temperatura média;	Redes neurais; regressão linear múltipla; ARMA; ARMAX
Pao (2009)	Anual	1980-2007	Taiwan	consumo de energia elétrica	PIB	Vetor auto regressivo; SARIMA
Sumer <i>et al</i> (2009)	Mensal	1997(1)-2005(12)	EUA	consumo de energia elétrica	valores defasados da série	ARIMA; SARIMA
Pilli-Sihvola <i>et al</i> (2010)	Mensal	1985(1)-2008(11)	Finlândia; Alemanha; Holanda; França; Espanha	consumo de energia elétrica	índice de temperatura; dummies para cada mês	ARX
Castro e Montini (2010)	Mensal	2003(1)-2009(12)	Brasil	consumo residencial de energia elétrica	tarifa; rendimento real de pessoas, 10 anos ou mais, ocupadas, regiões metropolitanas; IPA-EP - Bens de consumo duráveis	ARX
Bakhat e Rossello (2011)	Diário	1995(1)-2007(9)	Ilhas Baleares	consumo de energia elétrica	índice para temperatura; número de habitantes; número de turistas; variáveis dummy para os dias da semana e para o mês em análise	AR; ARMAX; SAR; GARCH

2.2. Modelo teórico

Para Schmidt e Lima (2004), devido à demanda por eletricidade ser derivada das necessidades do indivíduo fazer um aparelho elétrico ou máquina funcionar, o consumo industrial de energia elétrica pode ser interpretado como fator participante de processos ou atividades produtoras de bens. Assim, a demanda industrial por energia elétrica poderia ser explicada como um problema de minimização de custos, sujeito a um determinado nível de produção.

Algumas premissas são utilizadas para elaborar seu modelo de consumo de energia elétrica: (a) Para agentes consumidores já ligados à rede de distribuição, assume-se que a total quantidade de energia elétrica demandada é fornecida de forma efetiva. Em outros termos, assume-se que, de forma geral ou para grande parte dos consumidores, admite-se que não existem problemas relacionados à demanda reprimida e que a oferta do setor é infinitamente elástica. Atendendo a essa premissa, pode-se utilizar a quantidade de energia elétrica consumida como uma aproximação adequada para a quantidade demandada; (b) O comportamento da demanda ao longo do tempo seria influenciado por variáveis macroeconômicas que estão relacionadas positivamente ou negativamente ao consumo energético, de modo que um modelo causal geral para estimar a demanda de energia pode ser estimado pela Expressão (1):

$$D = f(P, Y, L), \quad (1)$$

em que,

D é a demanda industrial de energia elétrica;

P é o preço da energia elétrica;

Y é a renda do setor industrial;

L é o estoque de bens complementares.

Espera-se que o consumo industrial de energia elétrica apresente relação inversa ao preço de aquisição, ou seja, à tarifa praticada pelas concessionárias. Esta relação é similar a outras funções preço e demanda. Quanto maior o valor da tarifa cobrada pelas concessionárias, menor será o consumo de energia elétrica. De forma oposta, espera-se que o consumo de energia elétrica apresente relação direta com a renda do setor industrial, similar a outras funções renda e demanda em geral. Quanto maior o valor da renda do setor, maior será o consumo de energia elétrica. Diferentemente da tarifa, a renda pode ser estimada a partir de diferentes estatísticas, como PIB do setor industrial, volume de produção, volume de faturamento, dentre outras. Estas estatísticas são adotadas como *proxies* da renda do setor industrial de energia elétrica.

Consideram-se bens complementares ao consumo de energia elétrica aqueles que a demandam para seu funcionamento. De forma similar a outras funções de demanda de bens complementares, a demanda de energia elétrica apresenta relação direta com o estoque desses bens. No caso do consumo comercial de energia elétrica, a variável mais utilizada nessa categoria é o estoque de máquinas e equipamentos de determinada localidade. Quanto maior o estoque desses produtos, maior será o consumo de energia elétrica. De modo genérico, quanto mais maquinário existe, mais energia é demandada para operação do setor industrial.

2.3. Modelo ARX

É possível estimar o consumo de energia elétrica com base em modelos de regressão linear múltipla. Esta metodologia é amplamente difundida em várias áreas de conhecimento, e consiste em estimar uma variável endógena Y_t por meio de algumas variáveis exógenas X_{it} , que podem ou não estar defasadas no tempo. Caso o número de defasagens de cada variável esteja

especificado, diz-se que é formado um *modelo de defasagem distribuída finita* (GUJARATI, 2006). A Expressão (2) mostra um exemplo de modelo de defasagem distribuída finita:

$$Y_t = \alpha + \beta_0 X_t + \beta_1 X_{t-1} + \beta_2 X_{t-2} + \dots + \beta_k X_{t-k} + \varepsilon_t,$$

em que $\alpha, \beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ são parâmetros do modelo;

ε_t é uma variável aleatória de distribuição normal com média zero e variância constante.

Utilizam-se tais modelos quando se acredita que a reação de Y_t no instante t não é explicada somente pelas variações das variáveis independentes no tempo t , mas também por seus valores defasados k unidades de tempo. O método mais comum de estimação desse modelo é o método de Mínimos Quadrados Ordinários (MQO).

Para algumas séries o resíduo resultante do modelo ajustado na Expressão (2) apresenta autocorrelação. Uma maneira de lidar com essa situação seria modelar os resíduos desse modelo através da metodologia de Box & Jenkins de séries temporais (SHUMWAY e STOFFER, 2006). Dessa forma, tem-se o ajuste da regressão linear múltipla com os resíduos modelados pelos modelos ARMA. Os modelos resultantes podem ser ARX, ARMAX, MAX, SARX ou SARMAX dependendo da distribuição dos resíduos.

A análise de séries temporais segundo o método de Box & Jenkins tem por objetivo principal a realização de previsões. Valores futuros da série podem ser previstos com base na exploração da correlação temporal existente entre os valores exibidos pela série. A relação temporal desenvolvida por Box e Jenkins é representada formalmente por um conjunto de processos

estocásticos genericamente denominados modelos ARMA (BOX e JENKINS, 1976).

O modelo mais simples que pode ser ajustado aos dados desta amostra é um modelo autorregressivo com a inclusão de variáveis exógenas (ARX). Uma série temporal Y_t segue um modelo ARX quando puder ser explicada pela expressão (SHUMWAY e STOFFER, 2006):

$$Y_t = \sum_{j=1}^p \phi_j Y_{t-j} + \beta X_{wt}^t + \varepsilon_t,$$

em que

Y_t é a variável endógena no tempo t ;

$X_{wt}^t = (X_{1t}, X_{1t-1}, \dots, X_{1t-n_1}, \dots, X_{wt}, X_{wt-1}, \dots, X_{wt-n_w})$ é o vetor de variáveis exógenas explicativas;

Y_{t-j} é a variável endógena com p defasagens no tempo;

$\beta = (\beta_{1t}, \beta_{1t-1}, \dots, \beta_{1t-n_1}, \dots, \beta_{wt}, \beta_{wt-1}, \dots, \beta_{wt-n_w})$ é o vetor dos coeficientes das variáveis exógenas;

$\sum_{j=1}^p \phi_j Y_{t-j}$ é a componente autoregressiva do modelo;

w é o número de variáveis exógenas;

n_w é o número de defasagens da w -ésima variável exógena;

ε_t é um ruído branco.

A Expressão (3) pode ser reescrita na forma:

$$Y_t = \sum_{l=1}^p \Phi_l Y_{t-l} + \sum_{j=1}^p \phi_j Y_{t-j} + \beta_{1t} X_{1t} + \beta_{1t-1} X_{1t-1} + \dots + \beta_{1t-n_1} X_{1t-n_1} + \beta_{2t} X_{2t} + \beta_{2t-1} X_{2t-1} + \dots + \beta_{2t-n_2} X_{2t-n_2} + \dots + \beta_{wt} X_{wt} + \beta_{wt-1} X_{wt-1} + \dots + \beta_{wt-n_w} X_{wt-n_w} + \varepsilon_t.$$

3 METODOLOGIA

No presente trabalho é analisada a série de consumo comercial mensal de energia elétrica para o Brasil para o setor industrial. Compreende-se o período de Janeiro de 2003 a Setembro de 2010, num total de 93 observações. Os dados são disponibilizados pelo SIESE, Sistema de Informações Empresariais do Setor de Energia Elétrica, e pela ELETROBRÁS - Centrais elétricas brasileiras S.A. e podem ser consultados pelo portal www.ipeadata.gov.br. Optou-se por uma janela de tempo que não incluísse observações antes de 2003 devido aos efeitos do racionamento de energia.

Quanto às séries das variáveis exógenas, estas foram escolhidas baseadas em estudos anteriores no Brasil que estimaram o consumo energético, e adequadas como *proxies* dos fatores que influenciam o consumo energético como retratado no referencial teórico. Procurou-se atender aos principais fatores determinantes do consumo de energia elétrica passíveis de aplicação para o país. Quadro 2 apresenta as variáveis utilizadas para modelagem do consumo residencial de energia elétrica.

O roteiro básico para estimação dos modelos neste trabalho envolve os seguintes passos:

a) Identifica-se possíveis relações entre as

variáveis endógena e exógenas por meio de análise gráfica e verificação de correlação linear entre a variável endógena e as variáveis exógenas em nível e em pelo menos quatro de suas defasagens;

b) Estima-se um modelo de regressão linear múltipla com todas as variáveis exógenas e suas defasagens em até quatro unidades de tempo;

c) A partir do modelo obtido, faz-se sua redução gradativa pelo método *backward* (nível descritivo de 0,10) até se chegar a um modelo mais parcimonioso;

d) Analisam-se os correlogramas das funções de autocorrelação e autocorrelação parcial para modelagem dos resíduos do modelo por meio de modelos de Box & Jenkins. Escolhe-se o melhor modelo para diversas tentativas;

e) Verificam-se as hipóteses de ausência de autocorrelação serial, normalidade e ausência de heterocedasticidade dos resíduos do modelo;

f) Calculam-se uma medida de ajuste aos dados (r^2 ajustado) em observações incluídas na estimação do modelo, e duas medidas de acurácia das previsões (MAPE e RMSE) em observações não incluídas na estimação do modelo (amostra de verificação).

Os modelos estimados utilizam dados de Janeiro de 2003 a Setembro de 2009. Os valores de

Quadro 2 - Variáveis utilizadas: consumo residencial de energia elétrica

Variável	Código	Proxy	Unidade	Fonte*
Consumo industrial de energia elétrica	Consumol	Demanda	GWh	Boletim SIESE – ELETROBRÁS
Faturamento real da indústria	YI	Renda	R\$	CNI
Produção industrial de bens intermediários	LI	Estoque de bens complementares	Quantum	IBGE/PIM
Preço do barril de petróleo	SI	Preço de bens substitutos	US\$/barril	FMI

Fonte: IPEADATA (2010). * SIESE – Sistema de Informações Empresariais do Setor de Energia Elétrica; ELETROBRÁS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.; ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica; IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística; PIM – Pesquisa Industrial Mensal; FMI – Fundo Monetário Internacional.

Outubro de 2009 a Fevereiro de 2011 são deixados de fora da amostra para permitir a comparação com os valores previstos pelos modelos. As previsões são feitas com base no procedimento dinâmico. A análise dos resíduos é feita por meio dos testes de Jarque-Bera, Breusch-Godfrey e White. A análise das previsões é feita através de inspeção gráfica entre valores observados e previstos e por meio das medidas de acurácia MAPE e RMSE.

4 RESULTADOS

O consumo de energia elétrica do setor industrial ao longo do tempo é apresentado no Gráfico 1. No eixo vertical a variável Consumol registra a quantidade mensal de Gigawatts consumidos, segundo dados apresentados pelo boletim SIESE. A série contém 98 pontos mensais - Janeiro de 2003 a Fevereiro de 2011 – dos quais se utilizaram os 93 primeiros para ajustar o modelo e os 5 restantes foram utilizados para verificar a qualidade do modelo.

A inspeção visual do Gráfico 1 revela uma tendência de crescimento no consumo industrial de energia elétrica. A série mostra uma variabilidade não constante ao longo do tempo.

Nota-se também que há indícios de sazonalidade na série com vales nos meses de Janeiro quando a produção industrial e conseqüentemente o consumo energético do setor caem drasticamente. Nota-se o efeito da crise mundial que atingiu o consumo de energia industrial brasileiro no final de 2008.

A análise dos gráficos de dispersão entre a variável predita Consumol e as variáveis predictoras: faturamento real da indústria (YI), produção industrial de bens intermediários (LI) e preço do barril de petróleo (SI) (Gráfico 2, Gráfico 3 e Gráfico 4) indica que as variáveis independentes YI, LI e SI apresentam relação com a variável dependente.

A Tabela 1 apresenta os coeficientes de correlação linear de Pearson entre a variável Consumol e essas variáveis em nível e em até quatro unidades de tempo defasadas. A variável SI, não apresenta alterações em seu coeficiente de correlação com a variável Consumol para diferentes defasagens de tempo. As variáveis YI e LI apresentam diminuições em seus coeficientes de correlação com a variável Consumol conforme aumentam as defasagens de tempo.

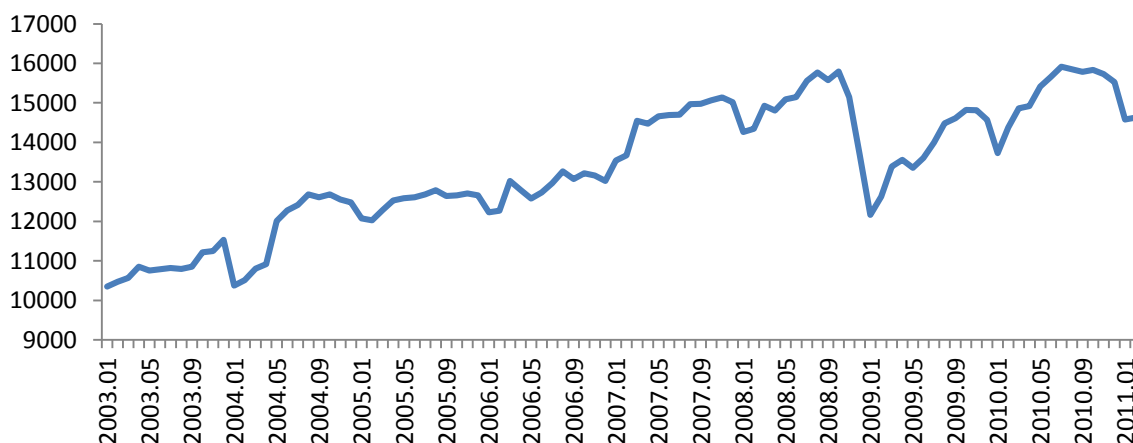


Gráfico 1 - Consumo industrial de energia elétrica (Consumo I)

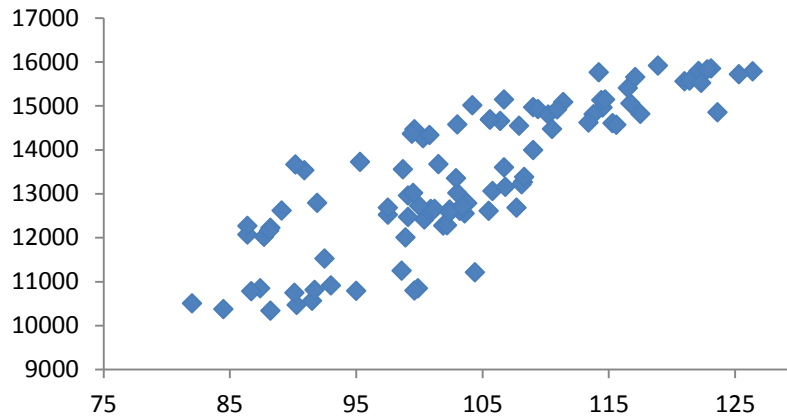


Gráfico 2 - Consumo industrial de energia elétrica (ConsumoI) versus faturamento real da indústria (YI)

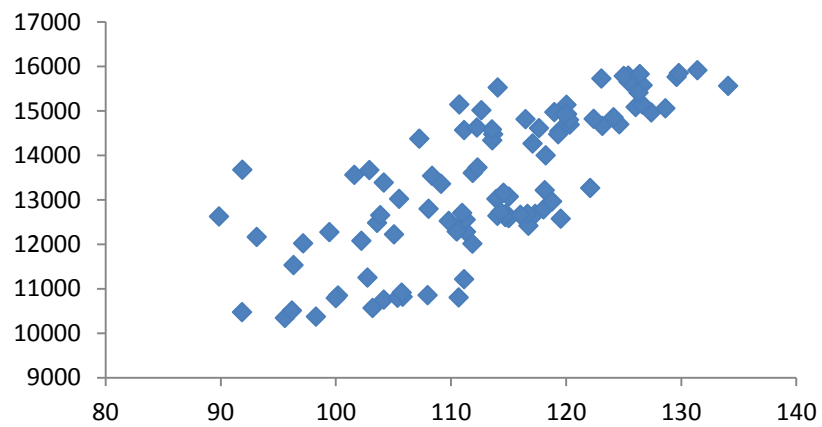


Gráfico 3 - Consumo industrial de energia elétrica (ConsumoI) versus produção industrial de bens intermediários (LI)

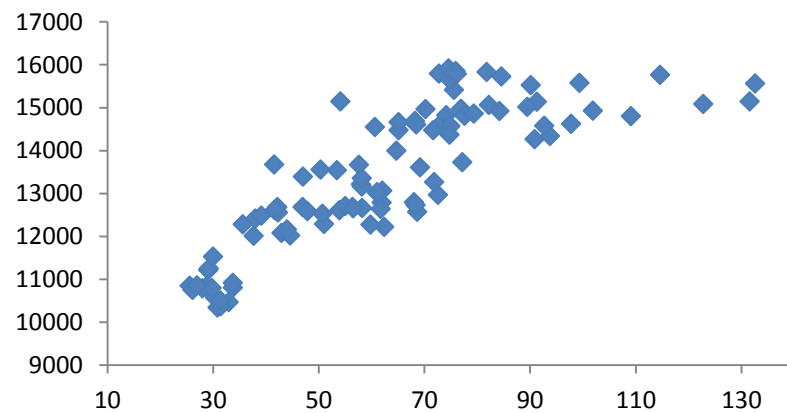


Gráfico 4 - Consumo industrial de energia elétrica (ConsumoI) versus preço do barril de petróleo (SI)

Tabela 1 - Coeficientes de correlação linear entre Consumol e suas variáveis predictoras defasadas

	t-0	t-1	t-2	t-3	t-4
YI	0,81	0,77	0,70	0,63	0,57
LI	0,72	0,74	0,71	0,63	0,56
SI	0,82	0,84	0,83	0,80	0,76

O consumo de energia elétrica do setor industrial foi modelado por meio de um modelo de regressão linear múltipla com o uso das variáveis independentes YI, LI e SI e suas defasagens em até 4 unidades de tempo, ou seja, YI_{t-1} , YI_{t-2} , YI_{t-3} ,

YI_{t-4} , LI_{t-1} , ... , SI_{t-2} , SI_{t-3} e SI_{t-4} . Foram retiradas pelo método *backward* variáveis com níveis descritivos maiores que 0,1. As variáveis mantidas ao final do método são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 - Coeficientes, erro padrão, estatística t e nível descritivo (p-valor) para o modelo para Consumol ao final do método *backward*

Variável	Coeficiente	Erro padrão	Estatística-t	p-valor
YI_{t-2}	26,53	13,29	2,00	0,05
YI_{t-3}	54,46	18,76	2,90	0,00
YI_{t-4}	29,06	11,16	2,60	0,01
LI	38,65	12,85	3,01	0,00
LI_{t-1}	53,84	18,19	2,96	0,00
LI_{t-3}	-74,16	21,05	-3,52	0,00

O coeficiente de determinação linear obtido é de 73,47%. Observa-se pela estatística Durbin-Watson (0,29) que o modelo apresenta indícios de autocorrelação serial dos resíduos. De acordo com o teste de Dickey-Fuller aumentado (ADF), rejeita-se a hipótese nula que os resíduos desse modelo são não-estacionários (estatística de teste: -4,073; valor crítico a um nível de 5% de significância: -3,462). Após a análise do correlograma dos resíduos, apresentado na Figura 1, nota-se que é possível o ajuste de um modelo

ARMA aos resíduos. Dessa forma houve a adição dos termos AR(1) e AR(12) ao modelo.

Após inclusão dos termos AR, tem-se o seguinte modelo final para a variável dependente Consumol, apresentado na Tabela 3.

O modelo final para o consumo industrial apresenta um coeficiente de determinação linear de 93,98%. A análise da estatística Durbin-Watson (1,64), e o correlograma do resíduos (apresentado na Figura 8) indicam ausência de autocorrelação serial dos resíduos.

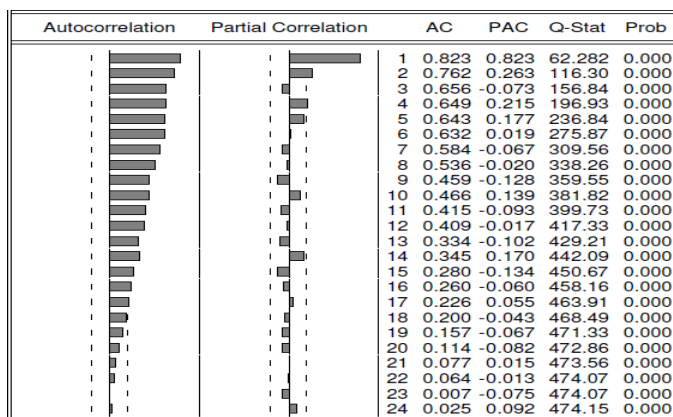


Figura 1 - Correlograma dos resíduos (Consumol) ao final do método *backward*

Tabela 3 - Coeficientes, erro padrão, estatística t e nível descritivo (p-valor) para o modelo final para Consumol

Variável	Coeficiente	Erro padrão	Estatística-t	p-valor
Y_{t-2}	14,12	4,73	2,99	0,00
Y_{t-3}	25,37	7,42	3,42	0,00
Y_{t-4}	15,58	4,40	3,54	0,00
LI	51,36	5,15	9,98	0,00
L_{t-1}	50,60	6,39	7,92	0,00
L_{t-3}	-28,60	9,98	-2,87	0,01
AR(1)	0,69	0,08	9,16	0,00
AR(12)	0,17	0,06	2,78	0,01

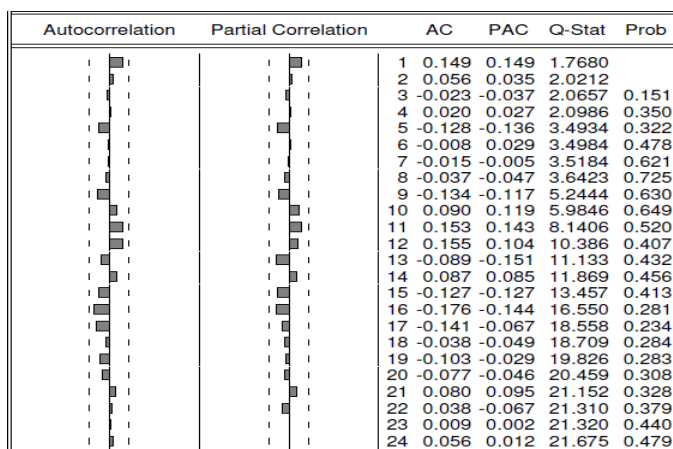


Figura 2 - Correlograma dos resíduos para o modelo final de Consumol

O Gráfico 5 apresenta o histograma dos resíduos. Nota-se que os resíduos parecem oriundos de uma distribuição normal. O teste Jarque-Bera apresentou um nível descritivo de 0,590 sugerindo que há evidência de que os resíduos são oriundos da distribuição normal. O teste de Breuch-Godfrey indica que não há evidências que os resíduos do modelo apresentam autocorrelação serial (nível descritivo do teste de 0,2132). O teste de White (nível descritivo de 0,834) indica ausência de indícios de heterocedasticidade dos resíduos.

O Gráfico 6 apresenta valores projetados e seus respectivos intervalos com 95% de confiança para o consumo industrial com base na previsão dinâmica para o período de Outubro de 2010 a

Fevereiro de 2011. Visualmente há indicação de que as previsões acompanharam relativamente as oscilações da série. Observa-se que, mesmo com os efeitos de queda no consumo energético do setor industrial causados pela crise financeira do final de 2008, o modelo acompanha a série ao longo do tempo. Os valores reais para os cinco meses selecionados de validação estão dentro dos limites inferior e superior de previsão. Obteve-se um valor de 1,09% para o MAPE e 185,54 para o RMSE.

A Tabela 4 apresenta os valores reais, projetados e o intervalo com 95% de confiança para o consumo industrial de energia. Nota-se que os valores reais estão dentro do intervalo de confiança.

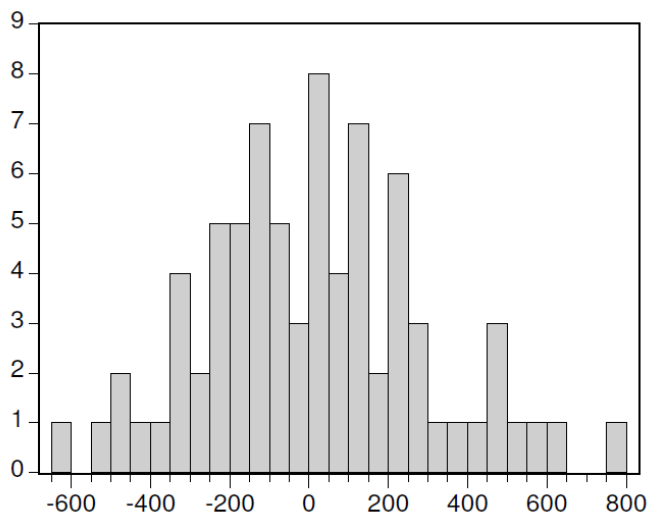


Gráfico 5 - Histograma dos resíduos do modelo final para ConsumoI

Tabela 4 - Valores reais e projetados de ConsumoI para a amostra de validação

Mês	Consumo industrial real	Consumo industrial projetado	Limite inferior	Limite superior
2010.10	15832	15573,1	14656,7	16489,6
2010.11	15726	15702,2	14790,1	16614,2
2010.12	15523	15308,7	14392,1	16225,3
2011.01	14581	14786,1	13868,7	15703,4
2011.02	14627	14755,7	13845,1	15666,4

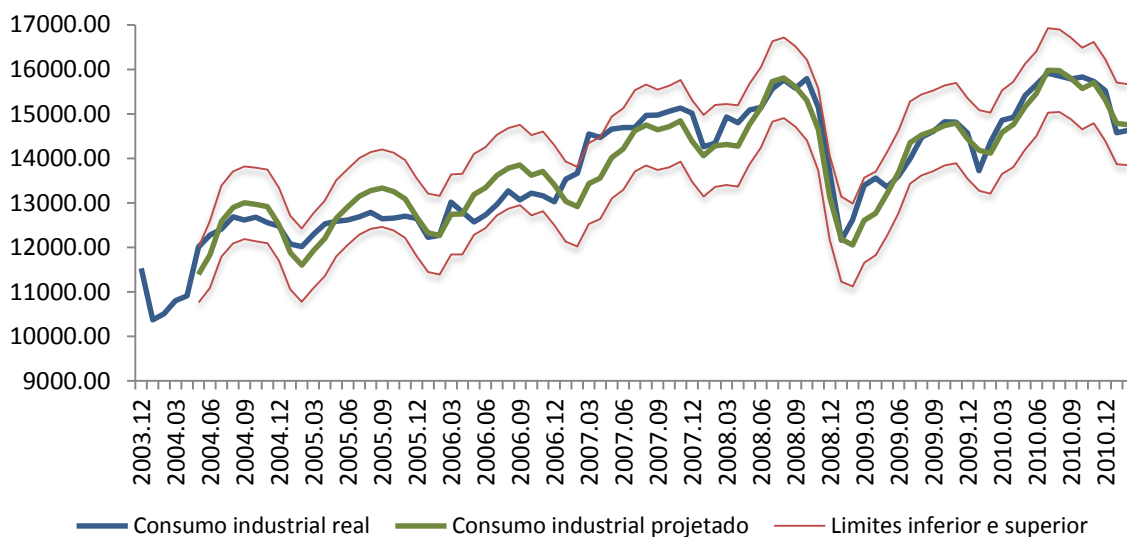


Gráfico 6 - Valores reais e projetados de Consumo¹

5 CONCLUSÃO

A previsão da demanda de energia elétrica nacional para o setor industrial pode ser feita com base na metodologia de Box & Jenkins com a inclusão de variáveis exógenas, gerando bons resultados empíricos em termos de acurácia e adequação aos pressupostos do modelo geral. A viabilidade dos modelos ARMAX pode ser considerada em termos de adequação dos modelos estimados à premissa do modelo geral e, em termos da acurácia das previsões geradas para a amostra de dados escolhida, estes apresentam indícios de ser uma boa aplicação empírica no caso do consumo de energia elétrica no Brasil. Todos os valores observados encontram-se dentro dos limites inferior e superior das previsões para os meses da amostra de validação (Outubro de 2010 à Fevereiro de 2011).

Mostrou-se viável a utilização de variáveis macroeconômicas como variáveis predictoras do consumo industrial de energia elétrica, sendo

encontrados resultados satisfatórios. Encontrou-se uma boa acurácia nos modelos de acordo com as medidas r^2 ajustado (valor foi superior a 90%), MAPE e RMSE.

Por fim, sugere-se para estudos seguintes a avaliação do fator relativo às condições climáticas sobre o consumo energético, e possíveis redimensionamentos sobre a base geográfica da amostra, reduzindo sua abrangência ao nível de municípios ou ao nível de cobertura de algum agente do setor, como por exemplo a empresa ELETROPAULO no estado de São Paulo, ou ENERSUL no estado do Mato Grosso do Sul.

REFERÊNCIAS

- ABREU, M. F. S.; SANT'ANNA, A. P. Estimativa do consumo de energia elétrica no Brasil por classes. Relatórios de pesquisa em engenharia de produção. v.9, n.5, 2009.
- AL-JANABI, A. Estimatin energy demand in OPEC coutries. Energy economics. April, 1979.

ANDRADE, T.; LOBÃO, W. Elasticidade-renda e preço da demanda residencial de energia elétrica no Brasil. Texto para discussão. Rio de Janeiro: IPEA, n. 489, 1997.

BAKHAT, M.; ROSSELLÓ, J. Estimation of tourism-induced electricity consumption: the case study of Balearics Islands, Spain. *Energy economics*. (2011) doi: 10.1016/j.eneco. 2010.12.09.

BOX, G. E. P.; JENKINS, G. M. Time series analysis forecasting and control. San Francisco: Holden-day, 1976.

BRANCO, A. C. G. O. C. Projeção de demanda de energia elétrica. Salvador, 2003. Dissertação (Mestrado em regulação da indústria de energia). Universidade Salvador – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Salvador UNIFACS. 2003.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Plano decenal de expansão de energia 2019. Brasília: MME/EPE, 2010

CASTRO, J. B.; MONTINI, A. A. Previsão do consumo residencial de energia elétrica no Brasil: aplicação do modelo ARX. *Future studies research*. v. 2, n. 2, pg. 03-16, 2010.

GUJARATI, D. N. Econometria básica. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Contas nacionais trimestrais. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/servidor_arquivos_est/>. Último acesso em Junho de 2011.

MODIANO, E. M. Elasticidade renda e preços da demanda de Energia elétrica no Brasil. Texto para discussão, n.68. Rio de Janeiro: Departamento de Economia da PUC, 1984.

PAO, H-T. Comparing linear and nonlinear forecasts for Taiwan's electricity consumption. *Energy*. v.31, p.2129-2141, 2006.

PAO, H-T. Forecast of electricity consumption and economic growth in Taiwan by state space modeling. *Energy*. v. 34, pg. 1779-1791, 2009.

PÊGO, B.; NETO, C. A. S. C. O PAC e o setor elétrico: desafios para o abastecimento do

mercado brasileiro (2007-2010). Texto para discussão. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, n. 1239, 2008.

PILLI-SIHVOLA, K.; AATOLA, P.; OLLIKAINEN, M.; TUOMENVITA, H. Climate change and electricity consumption – witnessing increasing or decreasing use cost? *Energy policy*. v.38, p.2409-2419, 2010.

SCHMIDT, C. A. J.; LIMA, M. A. M. A demanda por energia elétrica no Brasil. *Revista brasileira de economia*. v. 58, n. 1, p. 67-98, 2004.

SHUMWAY, R. H.; STOFFER, D. S. Time series analysis and its applications with R examples. Springer: New York, 2006.

SUMER, K. K.; GOKTAS, O.; HEPSAG, A. The application of seasonal latent variable in forecasting electricity demand as an alternative method. *Energy policy*. v. 37, pg. 1317-1322, 2009.