



Paula Medina Maçaira

Modelagem e previsão das séries de consumo de energia elétrica no Brasil com métodos de suavização exponencial de Pegels e abordagem *bottom up* por uso final

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza
Co-orientador: Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira

Rio de Janeiro
Fevereiro de 2015



Paula Medina Maçaira

Modelagem e previsão das séries de consumo de energia elétrica no Brasil com métodos de suavização exponencial de Pegels e abordagem *bottom up* por uso final

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Reinaldo Castro Souza

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Fernando Luiz Cyrino Oliveira

Co-orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Profa. Mônica Barros

ENCE

Prof. José Francisco Moreira Pessanha

UERJ

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 23 de fevereiro de 2015

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da Universidade, do autor e do orientador.

Paula Medina Maçaira

Graduou-se em Estatística pela Escola Nacional de Ciências Estatísticas em 2012. Durante o Mestrado na PUC-Rio atuou em projetos de P&D no mercado de energia elétrica.

Ficha Catalográfica

Maçaira, Paula Medina

Modelagem e previsão das séries de consumo de energia elétrica no Brasil com métodos de suavização exponencial de Pegels e abordagem bottom up por uso final / Paula Medina Maçaira ; orientador: Reinaldo Castro Souza ; co-orientador: Fernando Luiz Cyrino Oliveira.– 2015.

91f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2015.

Inclui bibliografia

CDD: 621.3

*À minha família, por fazer absolutamente
tudo para que eu concretize meus sonhos.*

Agradecimentos

Agradeço,

Primeiramente a Deus, por me permitir viver esse momento e sempre me mostrar o caminho certo.

Aos meus pais, Arnaldo e Leila, por me apoiar incondicionalmente. Meus principais exemplos. Obrigada por tudo.

As minhas irmãs, Nanda e Joana, por estarem sempre ao meu lado. É por vocês duas que batalho todos os dias para ser um bom exemplo. Amo vocês.

Ao meu noivo, Marcinho, por ser essencial nessa conquista (essa vitória também é sua!). Obrigada por me incentivar e apoiar por todo o caminho até aqui e daqui em diante. Te amo.

A todos os Medina e Maçaira por serem, simplesmente, a minha família, sem vocês nada disso teria o menor sentido. Em especial ao meu avô Davi, que esteve presente em todas as etapas da minha caminhada e agora está vendo meu sucesso de um lugar privilegiado, ao lado do meu saudoso vô Jair.

A todos da família Louro e agregados por terem me acolhido e apoiado (MUITO) ao longo de todo esse processo. Obrigado.

Aos meus orientadores, Reinaldo e Fernando, por serem meus exemplos como pessoa e profissional.

A CAPES e a PUC-Rio pelo apoio financeiro e oportunidade de crescimento acadêmico.

A todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio por toda a ajuda.

A professora Mônica Barros por ter sido minha mentora lá no início da graduação e por ter aceitado o convite de ser membro da banca.

Ao professor José Francisco, membro da banca, por ter aceitado o convite.

Aos amigos de longa data por terem se mantido ao meu lado por toda essa jornada.

Aos amigos da ENCE pelos momentos divididos na graduação que foram fundamentais para a minha decisão de futuro.

Aos colegas da PUC-Rio, em especial a equipe do projeto Eneva, pelos momentos de aprendizado compartilhado.

Sinceramente, muitíssimo obrigada a todos que me apoiaram de perto ou de longe, por pouco ou muito tempo.

Resumo

Maçaira, Paula Medina; Souza, Reinaldo Castro; Oliveira, Fernando Luiz Cyrino. **Modelagem e previsão das séries de consumo de energia elétrica no Brasil com métodos de suavização exponencial de Pegels e abordagem bottom up por uso final.** Rio de Janeiro, 2015. 91p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Desde 2001, quando ocorreu uma crise no setor energético brasileiro, o planejamento e, conseqüentemente, a previsão do consumo de energia a médio e longo prazo do consumo de eletricidade vem sendo prioridade. A Empresa de Pesquisa Energética, por meio do Plano Decenal de Energia e do Plano Nacional de Energia, é a responsável por publicar tais previsões, tendo como versão mais atual os horizontes de 2023 e 2050, respectivamente. Este trabalho tem como objetivo principal modelar e prever as séries de consumo através de duas abordagens, *top down* e *bottom up*. Para a primeira utiliza-se os métodos de suavização exponencial de Pegels e para a segunda, aplica-se, o modelo FORECAST-Residential, desenvolvido pelo Fraunhofer *Institute*. O modelo *top down* é o responsável por modelar e prever o consumo de energia elétrica do Brasil agregado e desagregado por classes de consumo, enquanto que o *bottom up* será utilizado somente nas séries do setor residencial, em cada região geográfica. Além da previsão com o melhor modelo dentro do histórico para o primeiro caso, para as técnicas *Standard* e *Damped* Pegels otimiza-se os hiperparâmetros a fim de ajustar cada um dos valores projetados com as pesquisas disponibilizadas pela EPE. Os resultados mostraram que com a abordagem *top down* foi possível prever o consumo de eletricidade até 2050 para todos os setores energéticos e ajustar os parâmetros para cada um dos casos propostos; e, com a abordagem *bottom up*, chegou-se a valores considerados prováveis para o setor residencial do Brasil. Finalmente, é possível concluir que todos os resultados aqui são muito promissores e dão direções para futuros aperfeiçoamentos.

Palavras-chave

Setor elétrico brasileiro; Séries Temporais Hierárquicas; Suavização Exponencial; Pegels.

Abstract

Maçaira, Paula Medina; Souza, Reinaldo Castro (Advisor); Oliveira, Fernando Luiz Cyrino (Co-advisor). **Modeling and forecasting the electricity consumption series in Brazil with Pegels exponential smoothing techniques and bottom up approach per end use.** Rio de Janeiro, 2015. 91p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

After the 2001 energy crises in Brazil, the energy sector priority has been the planning and consequently the forecast middle and long term energy consumption. The Energy Research Company (EPE for short) is in charge of publishing two official reports: "The Ten Year Energy Planning" and "The National Energy Planning" which contain, among other things, the forecast for longer lead times. In the present formulation these horizons are 2023 and 2050. This work aims to model and predict the consumption series with two approaches, top down and bottom up. The first uses Pegels exponential smoothing methods and for the second is applied the model FORECAST Residential, developed by the Fraunhofer Institute, Germany. The top-down model is responsible for modeling and predicting Brazil energy consumption aggregated and disaggregated by class of consumption, while the bottom up will be used only in the residential sector, but for each geographic region. In addition to the forecast with the best model in sample for the top down case, an optimization of the model hyper parameters is carried out in order to adjust each of the projected values with the figures provided by EPE. The results obtained show that with the top down approach it is possible to predict satisfactorily the electricity consumption up to 2050 for all energy sectors; and the bottom up approach produce forecasts very likely to occur in the future. Finally, it is possible to conclude that all the results obtained here are very promising and give directions for future improvements.

Keywords

Brazilian electricity sector; Hierarchical Time Series; Exponential Smoothing; Pegels.

Sumário

1	Introdução	16
1.1	Considerações gerais	16
1.2	Objetivo	18
1.3	Organização do trabalho	18
2	Referencial Teórico	20
2.1	A abordagem <i>top-down</i>	20
2.1.1	Métodos de suavização exponencial	21
2.2	A abordagem <i>bottom-up</i>	24
2.2.1	O modelo FORECAST- <i>Residential</i>	26
3	Análise exploratória das séries de consumo de energia elétrica no Brasil	33
4	Resultados obtidos	38
4.1	Abordagem <i>top-down</i>	38
4.1.1	Melhores modelos <i>in-sample</i>	39
4.1.2	Otimização dos hiperparâmetros	45
4.2	Abordagem <i>bottom-up</i>	51
4.2.1	Previsão das variáveis macro econômicas	52
4.2.2	Bens finais	58
4.2.3	Previsão do consumo de energia do setor residencial	60
4.3	Comparação entre as abordagens <i>top-down</i> e <i>bottom-up</i>	64
5	Conclusões e considerações finais	67
6	Referências Bibliográficas	70
	Apêndice A	75

Lista de figuras

Figura 1 - Estrutura do FORECAST- <i>Residential</i>	28
Figura 2 - Passo a passo da metodologia FORECAST	32
Figura 3 - Histórico do consumo de energia elétrica no Brasil	33
Figura 4 - Histórico do consumo de energia elétrica no Brasil desagregado por setores	34
Figura 5 - Previsão de consumo de energia da EPE para Brasil	35
Figura 6 - Previsão de consumo de energia da EPE para Brasil desagregado por setores	36
Figura 7 - Previsão da série de consumo do Brasil com Holt, melhor modelo <i>in-sample</i>	40
Figura 8 - Previsão das séries de consumo por classe com Holt, melhor modelo <i>in-sample</i>	40
Figura 9 - Previsão da série de consumo do Brasil com <i>Standard Pegels</i> , melhor modelo <i>in-sample</i>	42
Figura 10 - Previsão da série de consumo por classe com <i>Standard Pegels</i> , melhor modelo <i>in-sample</i>	42
Figura 11 - Previsão da série de consumo do Brasil com <i>Damped Pegels</i> , melhor modelo <i>in-sample</i>	44
Figura 12 - Previsão da série de consumo por classe com <i>Damped Pegels</i> , melhor modelo <i>in-sample</i>	44
Figura 13 - Melhor modelo ajustado às previsões do PDE 2014-2023 e PNE 2050, total Brasil	50
Figura 14 - Melhor modelo ajustado às previsões do PDE 2014-2023 e PNE 2050, por classe de consumo	50
Figura 15 - Evolução esperada do número de habitantes até 2050 por região	53
Figura 16 - Evolução esperada do número de domicílios até 2050 por região	54
Figura 17 - Evolução esperada do número habitantes por domicílio até 2050 por região	55
Figura 18 - Evolução esperada do PIB per capita até 2050 por região	56

Figura 19 - Evolução esperada do preço médio de eletricidade até 2050 por região	57
Figura 20 - Previsão da série de consumo por região com o FORECAST-Residencial	60
Figura 21 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2014	61
Figura 22 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2020	61
Figura 23 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2030	62
Figura 24 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2040	62
Figura 25 - Divisão percentual de consumo esperado por região em 2050	63
Figura 26 - Previsão da série de consumo do Brasil, setor residencial, com o FORECAST-Residencial	64

Lista de tabelas

Tabela 1 - Plano Decenal de Expansão de Energia 2014-2023 (TWh).....	36
Tabela 2 - Plano Nacional de Demanda de Energia 2050 (TWh)	37
Tabela 3 - Parâmetros e MAPE com o método Holt	39
Tabela 4 - Parâmetros e MAPE com o método <i>Standard Pegels</i>	41
Tabela 5 - Parâmetros e MAPE com o método <i>Damped Pegels</i>	43
Tabela 6 - Parâmetros, MAPE e previsões com <i>Standard Pegels</i> , melhores modelos	46
Tabela 7 - Parâmetros, MAPE e previsões com <i>Damped Pegels</i> , melhores modelos	48
Tabela 8 - Melhores modelos PDE 2014-2023 e PNE 2050	49
Tabela 9 – Variáveis de <i>input</i> plataforma FORECAST- <i>Residential</i>	52
Tabela 10 - Parâmetros da regressão dinâmica para população por região.....	53
Tabela 11 - Parâmetros do <i>Standard Pegels</i> para número de domicílios do Brasil.....	53
Tabela 12 - Parâmetros da regressão dinâmica para número de domicílios por região.....	54
Tabela 13 - Parâmetros da regressão dinâmica para produto interno bruto por região	56
Tabela 14 - Parâmetros do <i>Standard Pegels</i> para preço médio de eletricidade por região	57
Tabela 15 - Variáveis macro econômicas.....	58
Tabela 16 - Taxa de posse e consumo específico em 2013	59
Tabela 17 - Consumos previstos por região para o setor residencial com abordagem <i>bottom up</i> (TWh).....	60
Tabela 18 - Comparação entre previsões do FORECAST- <i>Residential</i> e do PDE 2014-2023	64
Tabela 19 - Comparação entre previsões do FORECAST- <i>Residential</i> e do PNE 2050.....	64
Tabela 20 - Comparação entre as abordagens <i>top-down</i> , <i>bottom-up</i> e o PDE 2014-2023	65

Tabela 21 - Comparação entre as abordagens *top-down*, *bottom-up*
e o PNE 20250..... 65

“A ciência nunca resolve um problema sem criar pelo menos outros dez.”

George Bernard Shaw