



José Francisco Moreira Pessanha

**Um Modelo de Análise Envoltória de Dados para
Estabelecimento das Metas de Continuidade do
Fornecimento de Energia Elétrica**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-
graduação em Engenharia Elétrica do Departamento
de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Reinaldo Castro Souza

Rio de Janeiro
Março de 2006



José Francisco Moreira Pessanha

**Um Modelo de Análise Envoltória de Dados para
Estabelecimento das Metas de Continuidade do
Fornecimento de Energia Elétrica**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Reinaldo Castro Souza
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Luiz da Costa Laurencel
UFF

Prof. Luiz Biondi Neto
UERJ

Profa. Maria Elvira Piñeiro Maceira
CEPEL

Profa. Mônica Barros
Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Annibal Parracho Sant'Anna
UFF

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de março de 2006

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

José Francisco Moreira Pessanha

Nascido na Cidade do Rio de Janeiro em 1971. Graduou-se em Estatística pela Escola Nacional de Ciências Estatísticas, ENCE (1992), e em Engenharia Elétrica (ênfase em sistemas de potência) pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ (1994). Obteve o título de Mestre em Ciências em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ (1999). Desde de 1999 é professor assistente do Departamento de Estatística da UERJ e desde 1995 é pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPEL, onde tem participado do desenvolvimento de modelos e sistemas computacionais para análise de confiabilidade de sistemas elétricos, operação de sistemas hidro-térmicos, tarifação, construção de tipologias de curvas de carga, regulação da continuidade do fornecimento e previsão do mercado de energia elétrica.

Ficha Catalográfica

Pessanha, José Francisco Moreira

Um modelo de análise envoltória de dados para estabelecimentodas metas de continuidade do fornecimento de energia elétrica / José Francisco Moreira Pessanha ; orientador: Reinaldo Castro Souza. Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

161 f. ; 30 cm

Tese (Doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica.

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Distribuição de energia elétrica. 3. Regulação da qualidade. 4. Continuidade do fornecimento. 5. Análise envoltória de dados. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha esposa Márcia e aos meus filhos Letícia e Pedro José

Aos meus pais Celmo e Nilda

Agradecimentos

À Deus, porque ele é bom e eterna é a sua misericórdia (Salmo 106).

À minha esposa Márcia e aos meus filhos Letícia e Pedro José por terem proporcionado um lar repleto de amor e felicidade, onde encontrei a motivação necessária para vencer os desafios com os quais me deparei durante o doutorado. Também sou grato a eles, por terem compreendido que a conclusão desta tese transcende o mero objetivo pessoal.

Ao Prof. Reinaldo Castro Souza, meu anfitrião na PUC-Rio e meu dedicado orientador, pelos valiosos ensinamentos, pelo incentivo ao desenvolvimento da tese e pelas diversas oportunidades a mim concedidas e que se fizeram significativas no meu aprimoramento profissional.

Ao Prof. Luiz da Costa Laurencel (Uerj/Uff), meu co-orientador, sou grato pela sua amizade e pelo incentivo durante todo o doutorado. Agradeço suas valiosas contribuições durante todo o desenvolvimento da tese e as ricas e longas conversas que sempre inspiram a elaboração de novas idéias.

Aos demais membros da comissão examinadora, Prof. Annibal Parracho Sant'Anna, Prof. Luiz Biondi Neto, Prof.^a Maria Elvira Piñeiro Maceira e Prof.^a Mônica Barros, pelas valiosas contribuições ao texto final da tese.

Ao Cepel, pelo suporte durante todo o curso de doutorado e pela oportunidade de participar do desenvolvimento de modelos e ferramentas computacionais utilizadas pelos vários agentes do setor elétrico brasileiro. Em especial, gostaria de agradecer o apoio que recebi dos meus amigos pesquisadores do Departamento de Otimização Energética e Meio Ambiente (DEA), Maria Elvira, André Diniz, Daniela Kyrillos, Debora Jardim, Fábio Batista, Luciano Xavier, Luiz Guilherme, Maria Luiza, Valk Castellani e Vitor Duarte. Agradeço também o inestimável apoio das secretárias do Departamento: Açucena, Ívila e Elaine. Gostaria de

agradecer aos pesquisadores Javier Soto, Juli Huang, Luiz Cordeiro e Rubens Passos com os quais também tenho o privilégio de trabalhar. Sou grato aos amigos Marcelo Luna, Márcia Kranen, Pablo Motta e Roberto Velásquez que passaram pelo Cepel, deixando uma sólida amizade.

Sou muito grato aos reguladores que conheci na Aneel, em especial ao José Tanure, Luciano Cheberle, Paulo Steele, Lígia, Cássio e Eduardo Hassin, com os quais tive a oportunidade ímpar de aprender como se realiza a regulação técnica e econômica da distribuição de energia elétrica no setor elétrico brasileiro.

Ao Nelson Leon (Eletrobrás), um grande conhecedor do sistema elétrico brasileiro, com quem tenho o privilégio de trabalhar. Sou grato a ele por sua amizade e por compartilhar comigo o seu vasto conhecimento.

Sou grato aos amigos Albert Melo (Cepel) e Luiz Pecorelli (Uerj) por terem orientado minhas primeiras pesquisas sobre análise de confiabilidade de sistemas elétricos de potência.

Ao Departamento de Estatística da Uerj, pelo exercício da transmissão do conhecimento e pelo agradável convívio com os professores e alunos.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Puc-Rio, pelo excelente trabalho que realizam.

Aos meus generosos pais Celmo e Nilda, gostaria de dedicar os meus eternos agradecimentos.

Aos meus irmãos Bernadete, Ana Paula e Emanuel Alexandre pelo incentivo recebido e pela alegria intensa dos reencontros.

Resumo

Pessanha, José Francisco Moreira; Souza, Reinaldo Castro (Orientador). **Um Modelo de Análise Envoltória de Dados para Estabelecimento das Metas de Continuidade do Fornecimento de Energia Elétrica.** Rio de Janeiro, 2006. 161p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No Setor Elétrico Brasileiro (SEB), a revisão das tarifas de distribuição é realizada com base na regulação por preço-teto. Este esquema de regulação tarifária cria incentivos à redução de custos que podem ser nocivos à qualidade do fornecimento. Neste contexto, torna-se necessário um aparato regulatório complementar que fixe padrões mínimos de qualidade a serem observados pelas concessionárias, sob risco de sanções e penalidades. Entre os aspectos da qualidade do fornecimento destaca-se o da continuidade, avaliado com base nos indicadores DEC e FEC que expressam, respectivamente, a duração e a frequência das interrupções do fornecimento de energia elétrica. Esta Tese propõe uma nova implementação da regulação por comparação de desempenho na definição dos níveis toleráveis de DEC e FEC, ou metas de continuidade, para as concessionárias de distribuição e seus conjuntos de unidades consumidoras. Na abordagem proposta combinam-se modelos de Análise Envoltória de Dados (DEA) em um processo com dois estágios: primeiro um modelo DEA estabelece quanto cada distribuidora deve melhorar globalmente os seus indicadores de continuidade, em seguida, por meio de um modelo para alocação de recursos baseado em DEA, comparam-se os desempenhos dos conjuntos em uma mesma distribuidora e definem-se metas locais de continuidade para cada conjunto, compatíveis com a meta global da concessionária. Apresentam-se metas globais de continuidade para as distribuidoras do SEB e metas locais para os conjuntos de unidades consumidoras das duas principais concessionárias que atendem o Estado do Rio de Janeiro.

Palavras-chave

Distribuição de energia elétrica, Regulação da qualidade, Continuidade do fornecimento, Análise envoltória de dados.

Abstract

Pessanha, José Francisco Moreira; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **A Data Envelopment Analysis Model to Set Electricity Supply Continuity Standards.** Rio de Janeiro, 2006. 161p. D.Sc. Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In the Brazilian electric power sector, the distribution tariff revision is made by the price cap method. Since this approach encourages the cost reduction, the quality of supply can suffer deterioration. In this context, a quality supply regulation becomes more important. The continuity of supply regulation consists in setting upper limits or standards to the number and the duration of outages and penalties for any violation of these standards. The main dimension of the electricity quality is the supply continuity, evaluated by indices SAIDI (System Average Interruption Duration Index) and SAIFI (System Average Interruption Frequency Index). This Thesis presents a new implementation of the yardstick competition in the setting of the continuity standards for the electricity distribution utilities and their groups of consumption units. The approach proposed combines two Data Envelopment Analysis models (DEA) in a framework with two stages. First, a classical DEA model performs a comparative analysis between utilities, in order to define global standards for each utility. Then, in order to set the local standards for each consumption units group, a model for resource allocation, based on DEA, performs a comparative analysis between groups in a same utility. Global standards for Brazilian distribution utilities and local standards for consumption units groups of the two main distribution utilities in the Rio de Janeiro State are presented.

Keywords

Electric power distribution, Quality regulation, Continuity of supply, Data envelopment analysis.

Sumário

1. Introdução	15
1.1. Considerações Gerais	15
1.2. A regulação da continuidade do fornecimento	18
1.3. Objetivo da tese	27
1.4. Modelos DEA na regulação técnico-econômica do setor elétrico	32
1.5. Organização da tese	36
2. A Regulação da Continuidade no Setor Elétrico Brasileiro	38
2.1. Introdução	38
2.2. Portaria Dnaee nº 46/1978	39
2.3. Resolução Aneel nº 24/2000	41
2.4. Resolução Aneel nº 75/2003	50
2.5. Audiência Pública 001/2005	52
3. Análise Envoltória de Dados	53
3.1. Introdução	53
3.2. Modelos DEA na versão envelope	56
3.3. Modelos DEA na versão dos multiplicadores	58
3.4. Modelos DEA com orientação ao produto	60
3.5. Restrições aos pesos	61
3.5.1. Restrições diretas aos pesos	62
3.5.2. Região de segurança	63
3.5.3. Método do Cone Ratio	66
3.5.4. Restrições nos insumos e produtos virtuais	68
3.6. Alocação de recursos baseada em DEA	71
4. Modelo para definição das metas globais de continuidade	75
4.1. Introdução	75
4.2. Segmentação do conjunto de concessionárias	75
4.3. Identificação das variáveis insumos e produtos	90
4.4. Formulação do modelo DEA para definição das metas globais	95
5. Modelo para definição das metas locais de continuidade	98
5.1. Introdução	98
5.2. Modelo para definição das metas locais de continuidade	99
6. Resultados	105
6.1. Introdução	105
6.2. Estabelecendo as metas globais de continuidade do fornecimento	106
6.3. Estabelecendo as metas locais de continuidade do fornecimento	121
6.3.1. Estabelecendo as metas para os conjuntos da Light	122
6.3.2. Estabelecendo as metas para os conjuntos da Ampla	134

7. Conclusões e propostas para trabalhos futuros	144
Referências bibliográficas	147
Apêndice A – Análise Fatorial de Correspondência	156
Apêndice B - Rede Mapa Auto Organizável	159

Lista de figuras

Figura 1: Conjuntos da Eletropaulo (Silva Neto et al., 2003)	21
Figura 2: Nível ótimo de confiabilidade pelo modelo microeconômico	22
Figura 3: Evolução dos indicadores de continuidade no SEB	26
Figura 4: Fronteira de eficiência	32
Figura 5: Critérios para definição das metas de continuidade	43
Figura 6: Conjunto de Possibilidades de Produção e fronteira de produção	53
Figura 7: Projeção na fronteira de eficiência	57
Figura 8: Região viável P	65
Figura 9: Região de segurança	66
Figura 10: Cone convexo (V) gerado pelos vetores a_1 e a_2	66
Figura 11: Montante de energia distribuída (<i>Box plots</i>)	77
Figura 12: Número de unidades consumidoras (<i>Box plots</i>)	77
Figura 13: Consumo médio por consumidor residencial (<i>Box plots</i>)	78
Figura 14: Consumo por unidade consumidora (CPC) (<i>Box plots</i>)	79
Figura 15: Extensão da rede de distribuição (<i>Box plots</i>)	80
Figura 16: Número de consumidores por quilômetro de rede (<i>Box plots</i>)	80
Figura 17: Consumo (MWh) por quilômetro de rede (<i>Box plots</i>)	80
Figura 18: Custos operacionais (<i>Box plots</i>)	81
Figura 19: Razão entre o custo operacional e o consumo (MWh) (<i>Box plots</i>)	82
Figura 20: Indicadores de continuidade (<i>Box plots</i>)	82
Figura 21: Participação da classe residencial no consumo de energia elétrica	83
Figura 22: Participação da classe comercial no consumo de energia elétrica	83
Figura 23: Participação da classe industrial no consumo de energia elétrica	84
Figura 24: Participação da classe rural no consumo de energia elétrica	84
Figura 25: Mapa das associações entre as distribuidoras e as classes de consumo	86
Figura 26: Mapa de Kohonen (mapa dos perfis das concessionárias)	89
Figura 27: Agrupamentos de concessionárias	89
Figura 28: Diagrama de dispersão entre o DEC e a razão OPEX/MWh	93
Figura 29: Diagrama de dispersão entre o FEC e a razão OPEX/MWh	93
Figura 30: Divisões geográficas da área de concessão da Ampla	100
Figura 31: Agrupamentos de concessionárias de distribuição	107
Figura 32: Distribuidoras de eletricidade no Estado do Rio de Janeiro	122
Figura 33: <i>Box plots</i> dos indicadores DEC e FEC dos conjuntos da Light	123
Figura 34: DEC (valores iniciais e metas) nas regiões atendidas pela Light	127
Figura 35: FEC (valores iniciais e metas) nas regiões atendidas pela Light	127
Figura 36: Deslocamento da fronteira eficiente do DEC	128
Figura 37: Deslocamento da fronteira eficiente do FEC	128
Figura 38: DEC (valores iniciais e metas) nos conjuntos não urbanos	129
Figura 39: DEC (valores iniciais e metas) nos conjuntos em favelas	129
Figura 40: DEC (valores iniciais e metas) na Cidade do Rio	130
Figura 41: DEC (valores iniciais e metas) na Baixada Fluminense	130
Figura 42: DEC (valores iniciais e metas) no Sul Fluminense	131
Figura 43: FEC (valores iniciais e metas) nos conjuntos não urbanos	132

Figura 44: FEC (valores iniciais e metas) nos conjuntos em favelas	132
Figura 45: FEC (valores iniciais e metas) na Cidade do Rio	133
Figura 46: FEC (valores iniciais e metas) na Baixada Fluminense	133
Figura 47: FEC (valores iniciais e metas) no Sul Fluminense	134
Figura 48: Componentes específicas em função dos valores iniciais de DEC	136
Figura 49: Componentes específicas em função dos valores iniciais de FEC	136
Figura 50: Metas de DEC para as regionais da Ampla	137
Figura 51: Metas de FEC para as regionais da Ampla	138
Figura 52: Deslocamento da fronteira eficiente do DEC	138
Figura 53: Deslocamento da fronteira eficiente do FEC	139
Figura 54: DEC (valores iniciais e metas) na regional Guanabara	139
Figura 55: DEC (valores iniciais e metas) na regional Oceânica	140
Figura 56: DEC (valores iniciais e metas) na regional Norte	140
Figura 57: DEC (valores iniciais e metas) na regional Serrana	141
Figura 58: FEC (valores iniciais e metas) na regional Guanabara	141
Figura 59: FEC (valores iniciais e metas) na regional Ocêânica	142
Figura 60: FEC (valores iniciais e metas) na regional Norte	142
Figura 61: FEC (valores iniciais e metas) na regional Serrana	143
Figura B1: Arquitetura da rede SOM	159
Figura B2: Evolução da região de vizinhança entre os instantes t_0 e t_N	161

Lista de tabelas

Tabela 1: Custos de interrupção da classe residencial no Estado de São Paulo	23
Tabela 2: Custos de interrupção para o Estado de São Paulo	24
Tabela 3: Portaria Dnaee nº 46/1978 – padrões coletivos	40
Tabela 4: Portaria Dnaee nº 46/1978 - padrões individuais	40
Tabela 5: Metas de continuidade da Light Serviços de Eletricidade S.A.	46
Tabela 6: Vínculos entre metas dos indicadores individuais e coletivos	47
Tabela 7: Atualização dos vínculos entre as metas individuais e coletivas	51
Tabela 8: Modelos com orientação ao insumo na formulação envelope	56
Tabela 9: Modelos orientados ao insumo na formulação dos multiplicadores	59
Tabela 10: Modelos com orientação ao produto na versão envelope	60
Tabela 11: Modelos com orientação ao produto na versão dos multiplicadores	61
Tabela 12: Modelos DEA com as restrições da região de segurança	63
Tabela 13: Dados do exemplo (Cooper et al., 2000)	65
Tabela 14: Modelo DEA original e aumentado pelas restrições tipo <i>cone-ratio</i>	67
Tabela 15: Modelos DEA com restrições aos insumos e produtos virtuais	70
Tabela 16: Mercado por classe de consumo das 45 distribuidoras analisadas	85
Tabela 17: Variáveis consideradas na classificação das distribuidoras	88
Tabela 18: Matriz de correlações	91
Tabela 19: Matriz de correlações entre as variáveis insumos e produtos	95
Tabela 20: Metas globais de continuidade para as concessionárias do <i>cluster A</i>	108
Tabela 21: Histórico do DEC	109
Tabela 22: Histórico do FEC	109
Tabela 23: Metas globais para as concessionárias classificadas no <i>cluster B</i>	110
Tabela 24: Histórico do DEC	111
Tabela 25: Histórico do FEC	111
Tabela 26: Metas globais de continuidade para as concessionárias do <i>cluster C</i>	112
Tabela 27: Histórico do DEC	112
Tabela 28: Histórico do FEC	113
Tabela 29: Conjuntos de referência (<i>peer set</i>) das concessionárias do <i>cluster A</i>	113
Tabela 30: Conjuntos de referência (<i>peer set</i>) das concessionárias do <i>cluster B</i>	114
Tabela 31: Conjuntos de referência (<i>peer set</i>) das concessionárias do <i>cluster C</i>	114
Tabela 32: Análise de sensibilidade das metas globais de DEC (<i>cluster A</i>)	115
Tabela 33: Análise de sensibilidade das metas globais de FEC (<i>cluster A</i>)	116
Tabela 34: Análise de sensibilidade das metas globais de DEC (<i>cluster B</i>)	117
Tabela 35: Análise de sensibilidade das metas globais de FEC (<i>cluster B</i>)	118
Tabela 36: Análise de sensibilidade das metas globais de DEC (<i>cluster C</i>)	119
Tabela 37: Análise de sensibilidade das metas globais de FEC (<i>cluster C</i>)	120
Tabela 38: DEC, FEC e atributos das regiões atendidas pela Light em 2001	123

Tabela 39: Estatísticas de posição do DEC nas regiões da Light	124
Tabela 40: Estatísticas de posição do FEC nas regiões da Light	124
Tabela 41: Dados dos conjuntos Copacabana e Baía de Guaratiba	125
Tabela 42: DEC, FEC e atributos das regionais da Ampla em 2001	134
Tabela 43: Estatísticas de posição do DEC nas regionais da Ampla	135
Tabela 44: Estatísticas de posição do FEC nas regionais da Ampla	135
Tabela A1: Tabela contingência	156
Tabela A2: Perfis das linhas	156
Tabela A3: Perfis das colunas	157