



**Norma Alice da Silva Carvalho**

**Aplicação de modelos estatísticos para  
previsão e monitoramento da cobrabilidade  
de uma empresa de distribuição de energia  
elétrica no Brasil**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação.

Orientador: Reinaldo Castro Souza  
Co-orientador: Maurício Nogueira Frota

Rio de Janeiro  
Setembro de 2011



**Norma Alice da Silva Carvalho**

**Aplicação de modelos estatísticos para  
previsão e monitoramento da cobrabilidade  
de uma empresa de distribuição de energia  
elétrica no Brasil**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Metrologia da PUC-Rio. Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Reinaldo Castro Souza**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica (PUC-Rio)  
Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PUC-Rio)

**Prof. Maurício Nogueira Frota**

Co-orientador

Programa de Pós-Graduação em Metrologia (PUC-Rio)

**Prof. Eugenio Kahn Epprecht**

Departamento de Engenharia de Produção (PUC-Rio)

**Prof. André Luis Marques Marcato**

Universidade Federal de Juiz de Fora

**Prof. João Carlos de Oliveira Aires**

Universidade Gama Filho

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico (PUC-Rio)

Rio de Janeiro, 14 de setembro de 2011

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

### **Norma Alice da Silva Carvalho**

Graduada em Matemática pela Universidade Federal Fluminense em 2009. Interesse acadêmico em metodologias estatísticas de apoio a tomada de decisão empresarial. Experiência profissional na área administrativa.

#### Ficha Catalográfica

Carvalho, Norma Alice da Silva

Aplicação de modelos estatísticos para previsão e monitoramento da cobrabilidade de uma empresa de distribuição de energia elétrica no Brasil / Norma Alice da Silva Carvalho; orientador: Reinaldo Castro Souza; co-orientador: Maurício Nogueira Frota. – 2011.

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

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação, 2011.

Inclui bibliografia.

1. Metrologia - Teses. 2. Setor elétrico brasileiro. 3. Índice de cobrabilidade. 4. Controle estatístico da qualidade. 5. Modelos de previsão. 6. Gráficos de controle. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Frota, Maurício Nogueira. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Metrologia para Qualidade e Inovação. IV. Título.

CDD: 389.1

À minha família, pelo apoio e incentivo em todas as etapas de minha vida escolar e profissional;  
Aos professores que fizeram parte do meu processo de aprendizagem;  
Ao Abiatar Pícoli Cardoso, pelo apoio e incentivo na realização da pós-graduação.

## Agradecimentos

A Deus, por me conceder os dons da fortaleza e da sabedoria e, guiar-me.

Aos meus pais, Djalma e Maria de Lourdes, pela vida e carinho.

Aos meus avós maternos, Geraldo (*in memoriam*) e Flora, pelo apoio e carinho.

À minha tia Hilda, pelo zelo e pela importante presença em todas as etapas e segmentos de minha vida.

À minha tia Carminha e ao tio Silvio, pelo apoio e incentivo em minha vida escolar e profissional.

Ao meu irmão Felipe, pelo carinho e amizade.

Ao meu priminho e afilhado Eduardo, pelo carinho e motivo de alegria em momentos difíceis.

Ao Abiatar Pícoli Cardoso, pelo amor, apoio e tempos de consolo a mim dedicado.

Aos amigos, pelo companheirismo e conselhos dados nos momentos bons e difíceis vividos.

Aos Professores e aos Tutores da graduação, em especial – Mario Olivero, Rioco, Regina Moreth, Marcos Venicius Cougo, Carlos Farina, Jorge Dias, Maria Helena Loth, Augusto – pelo aprendizado e incentivo na realização da pós-graduação.

Ao orientador, Professor Reinaldo Castro Souza, pelo apoio, pelos ensinamentos, pelas oportunidades e pelas grandes contribuições em minha formação profissional.

Ao co-orientador, Professor Maurício Nogueira Frota (coordenador do Programa de Pós-Graduação em Metrologia), pela oportunidade de realização do curso de mestrado, pelos ensinamentos e contribuições na elaboração desta dissertação.

À Professora Maria Fátima Ludovico de Almeida, pelos valiosos ensinamentos e momentos dedicados na elaboração do projeto de seminário de pesquisa.

À equipe técnica e administrativa do PósMQI – Jaime Mamani Ticono, Márcia Ribeiro e Paula Guimarães – pelas informações administrativas e apoio técnico.

Aos colegas do Pós-MQI, pela aprendizagem e momentos vividos.

Ao Poder Executivo do Município de Comendador Levy Gasparian pela concessão do afastamento de minhas atividades para realização da pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal do Ensino Superior (CAPES), pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

## Resumo

Carvalho, Norma Alice da Silva; Souza, Reinaldo Castro; Frota, Maurício Nogueira. **Aplicação de modelos estatísticos para previsão e monitoramento da cobrabilidade de uma empresa de distribuição de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro, 2011. 154p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O **objetivo** desta pesquisa é propor o desenvolvimento de uma metodologia baseada em métodos estatísticos para mensurar, a priori, as variáveis que compõem o índice de cobrabilidade de uma empresa distribuidora de energia elétrica brasileira. Tal índice, definido como a razão entre a arrecadação do mês corrente e o faturamento anterior, representa, para a cadeia de valor das empresas distribuidoras de energia elétrica, o retorno dos custos e a geração de excedentes para investimentos. A **motivação** para o desenvolvimento do trabalho ocorreu devido à necessidade empresarial de uma distribuidora em atribuir confiabilidade ao índice supracitado. A pesquisa foi realizada considerando uma amostra dos clientes cativos que pertencem ao grupo “A” de uma distribuidora de energia elétrica brasileira. A **metodologia** proposta consiste em: (i) utilizar estatísticas descritivas e modelo de previsão em séries temporais para fornecer a projeção de faturamento e de arrecadação mensal da distribuidora de energia elétrica visando estabelecer, a priori, o índice de cobrabilidade mensal desta e, (ii) adaptar e aplicar os gráficos de controle *Wineglass*, *Shipwreck* e *Outlook* a fim de monitorar diariamente a relação arrecadação prevista *versus* arrecadação real. Os **resultados** revelaram que a metodologia proposta estabelece uma estimativa confiável das variáveis que compõem o índice de cobrabilidade visto que o erro percentual de previsão é mínimo. Desta forma, **conclui-se que**, o uso de métodos estatísticos propicia às organizações modelar e quantificar as incertezas presentes nas variáveis do processo de tomada de decisão.

## Palavras-chave

Metrologia; setor elétrico brasileiro; índice de cobrabilidade; controle estatístico da qualidade; modelos de previsão; gráficos de controle.

## Abstract

Carvalho, Norma Alice da Silva; Souza, Reinaldo Castro (Advisor); Frota, Maurício Nogueira (Co-advisor). **Application of statistical models for forecasting and monitoring the collectability of a company distributing electrical energy in Brazil.** Rio de Janeiro, 2011. 154p. MSc. Dissertation – Programa de Pós-Graduação em Metrologia (Área de concentração: Metrologia para Qualidade e Inovação), Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The **objective** of this research is to propose the development of a methodology based on statistical methods to measure, a priori, the variables which compose the index of collectability of a Brazilian company distributing electric energy. This index, defined as the ratio between the revenue of current month by previous billing, represents for the value chain of the companies distributing electric energy, the return costs and the generation of surpluses for investment. The **motivation** for development of the work was due to the need of the companies distributing to assign reliability to the aforementioned index. The research was conducted considering a sample of captive customers who belong to the group “A” of a Brazilian company distributing electric energy. The proposed **methodology** consists of: (i) use descriptive statistic and forecasting model to provide a projection of billing and revenue monthly of companies distributing electric energy for the purpose of establish, a priori, the monthly index of collectability and, (ii) adapt and apply the control charts *Wineglass*, *Shipwreck* and *Outlook* for the monitoring daily of the relation forecast revenue against real revenue. The **results** showed that the proposed methodology provides a reliable estimate of the variables which compose the collectability index since the percentage error of prediction is minimal. So, **it is concluded that**, the use of statistical methods allow the organizations to model and to quantify the uncertainties present in the variables of the process of decision making.

## Keywords

Metrology; Brazilian electricity sector; collectability; statistical control quality; forecasting models; control charts.

## Sumário

<b>1. Introdução</b>	19
1.1. Contexto	19
1.2. Caracterização do problema	20
1.3. Justificativa	22
1.4. Objetivos	22
1.5. Metodologia	23
1.6. Estrutura do trabalho	24
<b>2. O setor elétrico brasileiro</b>	26
2.1. Conceito e classificação de energia	26
2.2. Fontes de energia	27
2.2.1. Fontes renováveis de energia	28
2.2.2. Fontes não renováveis de energia	30
2.3. Unidades de medida	31
2.4. Matriz elétrica e matriz energética	35
2.5. Cadeia de valor do setor elétrico brasileiro	37
2.5.1. Instituições do setor elétrico	39
2.5.2. Agentes da indústria de energia	39
2.5.3. Consumidores	40
2.5.4. Descrição dos elos da cadeia de valor do setor elétrico	41
2.5.5. Mercados e ambientes de contratação de energia	43
2.6. Regulação do setor elétrico brasileiro	45
2.6.1. Missão da Agência Nacional de Energia Elétrica	46
2.6.2. Desafios da Agência Nacional de Energia Elétrica	46
2.7. Política tarifária	47
2.7.1. Estrutura tarifária	47
2.7.1.1. Tarifas aplicadas aos integrantes do “grupo A”	48
2.7.1.2. Tarifas aplicadas aos integrantes do “grupo B”	51
2.7.2. Composição da tarifa de fornecimento de energia elétrica	52
2.7.3. Leitura e faturamento	53



2.7.4. Modelos regulatórios	54
2.7.4.1. O Cost-Plus e o Price-Cap	54
2.7.4.2. O modelo regulatório adotado no Brasil	55
2.7.4.2.1. Mecanismos de correção tarifária	55
<b>3. Séries temporais</b>	<b>56</b>
3.1. Princípios fundamentais	56
3.2. Equação de previsão	58
3.2.1. Erro de previsão	58
3.3. Modelos paramétricos de previsão para séries temporais	58
3.3.1. Modelos estruturais	59
3.3.1.1. Modelos para séries localmente constantes	60
3.3.1.2. Modelos para séries com tendência	63
3.3.1.3. Modelos para séries com sazonalidade	66
<b>4. Gráficos de controle</b>	<b>69</b>
4.1. Princípios fundamentais	69
4.1.1. Variabilidade	70
4.1.2. Subgrupo racional	71
4.1.3. Análise de padrões no gráfico de controle	71
4.2. Gráficos de controle aplicados a processos	74
4.3. Aplicações não industriais do CEP	75
4.4. Gráficos de controle aplicados a negócios	76
4.4.1. O modelo estatístico	76
4.4.2. Gráfico de controle <i>Wineglass</i>	78
4.4.3. Gráfico de controle <i>Shipwreck</i>	80
4.4.4. Gráfico de controle <i>Outlook</i>	82
<b>5. Estudo de caso: índice de cobrabilidade</b>	<b>84</b>
5.1. Questão do caso e proposições	85
5.2. Tipo de caso e unidade(s) de análise	86
5.3. Coleta e organização dos dados: base de dados	86
5.4. Análise preliminar dos dados	87
5.5. Modelagem	89

5.5.1. Definição do horizonte de análise e da(s) variável(eis) para projeção do índice de cobrabilidade	90
5.5.2. Identificação dos clientes selecionados	90
5.5.3. Previsão de faturamento mensal	91
5.5.4. Análise da capacidade de pagamento dos clientes	94
5.5.5. Previsão de arrecadação mensal	95
5.5.6. Projeção da cobrabilidade mensal	96
5.5.7. Proposição de adaptação da metodologia de Wu et al. para observações diárias	97
5.5.8. Monitoramento diário da arrecadação	98
5.5.9. Análise e interpretação dos resultados	103
<b>6. Conclusões e recomendações</b>	<b>107</b>
<b>Referências bibliográficas</b>	<b>110</b>
<b>Apêndice A: Capacidade de pagamento dos clientes</b>	<b>118</b>
<b>Apêndice B: Incerteza <i>Wineglass</i></b>	<b>125</b>
<b>Apêndice C: Construção dos gráficos de controle</b>	<b>137</b>
<b>Anexo A: Métricas de avaliação do desempenho preditivo de um modelo</b>	<b>145</b>
<b>Anexo B: Lista de clientes selecionados</b>	<b>147</b>
<b>Anexo C: Período de faturamento</b>	<b>154</b>

## Lista de figuras

Figura 1 – Processo de faturamento	21
Figura 2 – Desenho da pesquisa	24
Figura 3 – Terminologia para os produtos de energia	27
Figura 4 – Perfil esquemático de usina hidrelétrica	28
Figura 5 – Variação da radiação solar no Brasil	29
Figura 6 – Geração de energia em usina maremotriz	29
Figura 7 – Reservas de carvão em 2007 (milhões de toneladas)	30
Figura 8 – Reservas de petróleo em 2007 (milhões de toneladas)	31
Figura 9 – Matriz energética brasileira em 2009	36
Figura 10 – Matriz elétrica brasileira em 2009	36
Figura 11 – Sistema de valor para o setor elétrico	37
Figura 12 – Cadeia de valor genérica	38
Figura 13 – Visão geral do sistema de valor do setor elétrico	38
Figura 14 – Relação entre agentes e consumidores	43
Figura 15 – Energia comercializada no mercado de curto prazo	43
Figura 16 – Visão geral da comercialização de energia	44
Figura 17 – Composição da tarifa de fornecimento de energia elétrica	52
Figura 18 – Processo estocástico interpretado como uma família de trajetórias	56
Figura 19 – Série não estacionária quanto ao nível e inclinação	57
Figura 20 – Série localmente constante	60

Figura 21 – Série com tendência linear	63
Figura 22 – Séries com sazonalidade	66
Figura 23 – Gráfico de controle típico	70
Figura 24 – Gráfico de controle $\bar{x}$ com comportamento não aleatório	72
Figura 25– Gráfico de controle $\bar{x}$ com comportamento cíclico	72
Figura 26 – Regras de Western Electric ou de zonas	73
Figura 27 – Representação gráfica do <i>Wineglass</i>	80
Figura 28 – Representação gráfica do <i>Shipwreck</i>	81
Figura 29 – Representação gráfica do <i>Outlook</i>	83
Figura 30 – Cadeia de valor do segmento de distribuição de energia elétrica	84
Figura 31 – Tipos básicos de projetos para estudos de caso	86
Figura 32 – Gráfico de Pareto do valor faturado por clientes em 2010	88
Figura 33 – Demonstrativo de faturamento dos 250 maiores clientes em 2010	89
Figura 34 – Série temporal <i>valor faturado</i>	91
Figura 35 – Gráfico de controle <i>Wineglass</i> (março/2011)	100
Figura 36 – Gráfico de controle <i>Wineglass</i> (abril/2011)	100
Figura 37 – Gráfico de controle <i>Shipwreck</i> (março/2011)	101
Figura 38 – Gráfico de controle <i>Shipwreck</i> (abril/2011)	102
Figura 39 – Gráfico de controle <i>Outlook</i> (março/2011)	103
Figura 40 – Gráfico de controle <i>Outlook</i> (abril2011)	103

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Prefixo SI	33
Tabela 2 – Unidades em uso com o SI	34
Tabela 3 – Algumas unidades fora do SI e admitidas em campos específicos	34
Tabela 4 – Fatores de conversão para energia	35
Tabela 5 – Opção tarifária de contratação dos consumidores do grupo “A”	51
Tabela 6 – Previsão e erro percentual de faturamento mensal dos clientes Tipo 2 (ano 2010)	92
Tabela 7 – Previsão e incerteza associada de faturamento dos clientes Tipo 2 (março/2011 e abril de 2011)	93
Tabela 8 – Valor faturado dos clientes Tipo 1 para 2010, março/2011 e abril/2011	93
Tabela 9 – Faturamento mensal previsto (ano 2010, março/2011 e abril/2011)	94
Tabela 10 – Arrecadação mensal prevista (ano 2010, março/2011 e abril/2011)	96
Tabela 11 – Índice de cobrabilidade de março/2011	105
Tabela 12 – índice de cobrabilidade de abril/2011	106
Tabela 13 – Análise descritiva da capacidade de pagamento dos clientes selecionados	118
Tabela 14 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (jan./2010)	125
Tabela 15 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (fev./2010)	126
Tabela 16 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (mar./2010)	127
Tabela 17 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (abr./2010)	128
Tabela 18 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (mai./2010)	129

Tabela 19 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (jun./2010)	130
Tabela 20 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (jul./2010)	131
Tabela 21 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (ago./2010)	132
Tabela 22 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (set./2010)	133
Tabela 23 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (out./2010)	134
Tabela 24 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (nov./2010)	135
Tabela 25 – Dados da incerteza <i>wineglass</i> (dez./2010)	136
Tabela 26 – Arrecadação diária prevista e real (mar./2011)	137
Tabela 27 – Dados do <i>Wineglass</i> (mar./2011)	138
Tabela 28 – Dados do <i>Shipwreck</i> (mar./2011)	139
Tabela 29 – Dados do <i>Outlook</i> (mar./2011)	140
Tabela 30 – Arrecadação diária prevista e real (abr./2011)	141
Tabela 31 – Dados do <i>Wineglass</i> (abr./2011)	142
Tabela 32 – Dados do <i>Shipwreck</i> (abr./2011)	143
Tabela 33 – Dados do <i>Outlook</i> (abr./2011)	144

## Lista de quadros

Quadro 1 – Unidades de base do SI	32
Quadro 2 – Unidades derivadas do SI utilizadas no setor de energia	32
Quadro 3 – Unidades derivadas adimensionais	32
Quadro 4 – Classificação dos consumidores pertencentes ao “grupo A”	48
Quadro 5 – Estrutura tarifária por modalidade contratada dos consumidores do grupo “A”	51
Quadro 6 – Classificação dos consumidores pertencentes ao “grupo B”	51
Quadro 7 – Síntese dos gráficos de controle aplicados a processos	74
Quadro 8 – Lista de variáveis por cliente	87
Quadro 9 – Lista de clientes selecionados	147
Quadro 10 – Período de faturamento	154
Quadro 11 – Feriados Nacionais	154

## Lista de abreviaturas

**ABRADEE:** Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica

**ABRACEEL:** Associação Brasileira dos Comercializadores de Energia

**ACL:** Ambiente de Contratação Livre

**ACR:** Ambiente de Contratação Regulada

**ANEEL:** Agência Nacional de Energia Elétrica

**BEN:** Balanço Energético Nacional

**BIPM:** *Bureau International des Poids et Mesures*

**BNDES:** Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social

**CCEAL:** Contratos de Compra de Energia no Ambiente Livre

**CCEAR:** Contratos de Compra de Energia no Ambiente Regulado

**CCEE:** Câmara de Comercialização de Energia Elétrica

**CEP:** Controle Estatístico de Processos

**CGPM:** Conferência Geral de Pesos e Medidas

**CM:** Consumo Medido

**CMSE:** Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico

**CNPE:** Conselho Nacional de Política Energética

**CUSUM:** *Cumulative Sum*

**DC:** Demanda Contratada

**DM:** Demanda Medida

**EPE:** Empresa de Pesquisa Energética

**EWMA:** *Exponentially Weighted Moving Average*

**FPW:** *Forecasting Pro Windows*

**INMETRO:** Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial

**LC:** Linha Central

**LP:** Limite de Previsão

**LIC:** Limite Inferior de Controle

**LSC:** Limite Superior de Controle

**MAD:** *Mean Absolute Deviation*

**MAPE:** *Mean Absolute Percentual Error*

**MME:** Ministério de Minas e Energia



**ONS:** Operador Nacional do Sistema

**PROCEL:** Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica

**SI:** Sistema Internacional de Unidades

**SIN:** Sistema Interligado Nacional

**TC:** Tarifa de Consumo

**TD:** Tarifa de Demanda

**TE:** Tarifa de Energia

**TU:** Tarifa de Ultrapassagem

**TUSD:** Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição

**TUST:** Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão

*“Se você medir aquilo sobre o que você fala e expressar por um número, você sabe algo sobre o assunto; mas se não puder medi-lo, seu conhecimento é pouco ou insatisfatório”.*

Lord Kelvin