



Eliane da Silva Christo

Previsão de Potência Reativa

Tese de Doutorado

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

Orientador: Reinaldo Castro Souza



Eliane da Silva Christo

Previsão de Potência Reativa

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

Dr. Reinaldo Castro Souza

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dra. Marley Maria Bernardes Rebuzzi Vellasco

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dra. Mônica Barros

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Sérgio Henrique Ferreiro da Cunha

EPE

Dr. Tufi Machado Soares

UFJF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 26 de Julho de 2005

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

Eliane da Silva Christo

Nascida em Juiz de Fora-MG em 1974. Graduou-se em Engenharia Elétrica (1997) pela Universidade Federal de Juiz de Fora, UFJF. Especialista em Métodos Estatísticos Computacionais (1998), pela mesma instituição. Mestre em Engenharia Elétrica em Teoria de Controle e Estatística (2001) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, PUC-Rio. Suas pesquisas de interesse incluem as áreas de previsão; análise estatística multivariada; e sistemas inteligentes aplicados à previsão e classificação de padrões.

Ficha Catalográfica

Christo, Eliane da Silva

Previsão de Potência Reativa / Eliane da Silva Christo; orientador: Reinaldo Castro Souza. - Rio de Janeiro: PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

100 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Potência Reativa. 3. Mínimos Quadrados Reponderados Iterativamente. 4. Modelo de Defasagem Distribuída Auto-Regressivo. 5. Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título

CDD: 621.3

Agradecimentos

A DEUS, pela dádiva da VIDA.

Ao meu orientador, Prof. Reinaldo Castro Souza, por todas oportunidades a mim oferecidas e pelo estímulo e incentivo constante na minha formação acadêmica.

Aos meus professores, pela excelente formação e aos funcionários, pela paciência e torcida dispensada a mim. Em especial, a Ana Paiva e o Flávio.

A todos os amigos da PUC-Rio, especialmente a Ana Paula, Flávia e Márcio Lessa, Cristiane e o Lúcio.

A Andréa pela amizade nesta longa jornada.

A minha mãe, que esteve todo o tempo me acompanhando com incentivo, paciência, dedicação e Amor.

Ao CNPq, pela bolsa do doutorado, sem a qual este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Christo, Eliane da Silva. **Previsão de Potência Reativa**. Rio de Janeiro, 2005. 100p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No novo modelo do Setor Elétrico é essencial desenvolver novas técnicas que estimem valores futuros, a curto e longo-prazos, das potências ativa e reativa. Com base nisso, este trabalho tem por objetivo apresentar uma nova técnica de previsão horária de potência reativa a curto-prazo, por subestação, baseada na linearidade existente entre as potências ativa e reativa. O modelo proposto, denominado de Modelo Híbrido de Previsão de Reativo, é dividido em duas etapas: A primeira etapa é feita uma classificação dos dados através de uma rede neural não supervisionada Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen (SOM); A segunda etapa, utiliza-se um modelo de defasagem distribuída auto-regressivo (ADL) com estimação de Mínimos Quadrados Reponderados Iterativamente (IRLS) acoplado a uma correção para autocorrelação serial dos resíduos – Método Iterativo de Cochrane-Orcutt. Este Modelo Híbrido tem como variável dependente a potência reativa, e como variáveis explicativas dados horários de potência ativa e reativa no instante atual e defasadas no tempo. A previsão de potência reativa a curto-prazo é dividida em “*in sample*” e em “*out of sample*”. A previsão “*out of sample*” é aplicada a períodos horários em até um mês à frente. O modelo proposto é aplicado aos dados de uma concessionária específica de Energia Elétrica e os resultados são comparados a um modelo de Regressão Dinâmica convencional e a um modelo de Redes Neurais Artificiais *Feedforward* de Múltiplas camadas (MLP) com um algoritmo de retropropagação do erro.

Palavras-chave

Potência Reativa; Mínimos Quadrados Reponderados Iterativamente; Modelo de Defasagem Distribuída Auto-Regressivo; Mapas Auto-Organizáveis de Kohonen

Abstract

Christo, Eliane da Silva. **Previsão de Potência Reativa**. Rio de Janeiro, 2005. 100p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The forecasting of reactive and active power is an important tool in the monitoring of an Electrical Energy System. The main purpose of the present work is the development of a new short-term reactive power hourly forecast technique, which can be used at utility or substations levels. The proposed model, named “A Hybrid Model for Reactive Forecasting”, is divided in two stages. In the first stage, the active and reactive power data are classified by an unsupervised neural network – the Self-Organized Maps of Kohonen (SOM). In the second stage, a Autoregressive Distributed Lags Model (ADL) is used with its parameters estimated by an Iteratively Reweighted Least Square (IRLS). It also includes a correction lag structure for serial autocorrelation of the residuals as used in the Cochrane-Orcutt formulation. The short term reactive power forecasting is divided in "in sample" and "out of sample". The "out of sample" forecast is applied to hourly periods until one month ahead. The proposed model is applied to real data of one substation and the results are compared with two other approaches, a conventional Dynamic Regression and a Feedforward Multi-layer Perceptron (MLP) Artificial Neural Network model.

Keywords

Reactive Power Forecasting, Iteratively Reweighted Least Squares, Autoregressive Distributed Lags Model, Kohonen Self-Organized Map.

Sumário

1	Introdução	13
1.1.	Setor Elétrico Brasileiro	15
1.2.	Objetivo	18
1.3.	Organização da Tese	18
2	Revisão Bibliográfica	20
2.1.	Modelos de Previsão de Carga Elétrica Ativa	20
2.2.	Trabalho em Potência Reativa	22
3	Potência Reativa	25
3.1.	Definição	25
3.2.	Modelo Linear entre Potência Ativa e Reativa	29
4	Modelo Híbrido de Previsão de Reativo	32
4.1.	Etapa I - Classificação dos Dados	32
4.2.	Etapa II – Modelo Dinâmico Iterativo	36
4.3.	Especificação do Modelo Dinâmico	48
4.4.	Testes Estatísticos	49
4.4.1.	Teste de Normalidade	49
4.4.2.	Teste de Homocedasticidade	50
4.4.3.	Teste de Autocorrelação dos Erros	50
4.4.4.	Teste de Erro de Especificação	53
4.5.	Algoritmo Conjunto	54
5	Estudos de Caso	55
5.1.	Dados da Concessionária Elektro	55
5.2.	Análise com Dados Reais de Carga Ativa	57
5.3.	Análise com Dados Previstos de Carga Ativa	78
6	Conclusões	84

6.1. Trabalhos Futuros	85
7 Referências Bibliográficas	86
8 Anexos – Redes Neurais Artificiais	95
8.1. Redes Feedforward	97
8.2. Métodos de Aprendizagem	98
8.2.1. Aprendizagem Supervisionada	99
8.2.2. Aprendizagem Não-Supervisionada	99

Lista de figuras

Figura 1- Triângulo de Potência	26
Figura 2– Triângulo de Potência	27
Figura 3 Arquiteturas típicas de um SOM. a) Bidimensional; b) Unidimensional	34
Figura 4– Função objetivo, Função ψ , e Função peso para os estimadores mínimos quadrados, Huber, e biquadrado, respectivamente.	45
Figura 5 – Fluxograma da construção de um modelo de regressão dinâmica.	49
Figura 6 – Algoritmo conjunto	54
Figura 7-Relação entre carga ativa (KW) e reativa (KVA _r), ano 2000, subestações: a) ARARAS 1 e b) ATIBAIA.	57
Figura 8 – Fator de Potência médio das subestações ARARAS1 e ATIBAIA no ano 2000	59
Figura 9 – Perfil de carga reativa ano 2000, subestações: a) ARARAS 1 e b) ATIBAIA	59
Figura 10 – Histograma de carga reativa ano 2000	60
Figura 11 - Grupos dentro de cada subestação, ano 2000.	64
Figura 12 – Carga Reativa real x prevista para mês de setembro/00 para as subestações ARARAS e ATIBAIA.	70
Figura 13 - Carga Reativa real x prevista para mês de dezembro/00 para as subestações ARARAS e ATIBAIA.	71
Figura 14 - Carga Reativa real x prevista por horário de carga no mês de setembro/00 das subestações ARARAS e ATIBAIA.	72
Figura 15 - Carga Reativa real x prevista por horário de carga no mês de dezembro/00 das subestações ARARAS e ATIBAIA.	73
Figura 16 - Carga Reativa real x prevista por horário e por dia útil de carga no mês de setembro/00 das subestações ARARAS e ATIBAIA.	75
Figura 17 - Carga Reativa real x prevista por horário e por dia útil de carga no mês de dezembro/00 das subestações ARARAS e ATIBAIA.	76
Figura 18 – Autocorrelação dos resíduos das previsões de “inverno” das subestações ARARAS e ATIBAIA ano 2000.	77

Figura 19 - Autocorrelação dos resíduos das previsões de “verão” das subestações ARARAS e ATIBAIA ano 2000.	77
Figura 20 - 2ª feira de Janeiro/04, subestação ARARAS	80
Figura 21 - 2ª feira de Janeiro/04, subestação ATIBAIA	80
Figura 22 - 3ª feira de Março/04, subestação ARARAS	81
Figura 24 – Célula Neural Biológica	96
Figura 25 – Representação funcional de um neurônio artificial	96
Figura 26 – Redes Neurais <i>Feedforward</i> camada única. a) Arquitetura;	
b) Sentido de propagação do sinal funcional.	97
Figura 27- Redes Neurais <i>Feedforward</i> múltiplas camadas a) Arquitetura;	
b) Sentido de propagação do sinal funcional.	98

Lista de quadros

Quadro 1 – Modelo do Setor Elétrico Brasileiro	16
Quadro 2 – Privatização da CESP	55

Lista de tabelas

Tabela 1- Funções objetivo e peso para os estimadores mínimos quadrados, Huber e biquadrado	45
Tabela 2 – Testes Kolmogorov-Smirnov e Levene para carga reativa de cada subestação do ano 2000	60
Tabela 3- Estatísticas Descritivas	60
Tabela 4 – Frequência dos dias nos 8 neurônios	62
Tabela 5 – Frequência de dias com 5 neurônios	63
Tabela 6 - Descrição das Variáveis da RN	67
Tabela 7 – MAPE Subestação ARARAS – 2000	68
Tabela 8 - MAPE Subestação ATIBAIA - ano 2000	69
Tabela 9 – MAPE carga ativa e reativa das terças-feiras de março/2004	83