



Rodrigo Flora Calili

Desenvolvimento de sistema para detecção de perdas comerciais em redes de distribuição de energia elétrica

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador: Reinaldo Castro Souza
Co-orientador: Henrique de O. Henriques

Rio de Janeiro
Julho de 2005



Rodrigo Flora Calili

**Desenvolvimento de Sistema para Detecção
de Perdas Comerciais em Redes de
Distribuição de Energia Elétrica**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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. Henrique de Oliveira Henriques
UFF

Prof. João Carlos de Oliveiras Aires
UGF/UFF

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

Rio de Janeiro, 28 de julho de 2005

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

Rodrigo Flora Calili

Graduou-se em Engenharia Elétrica na Universidade Federal de Juiz de Fora, Minas Gerais - Brasil no ano de 2003. Iniciou seus estudos de mestrado em 2003 no Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Ficha catalográfica

Calili, Rodrigo Flora

Desenvolvimento de sistema para detecção de perdas comerciais em redes de distribuição de energia elétrica / Rodrigo Flora Calili ; orientador: Reinaldo Castro Souza ; co-orientador: Henrique de O. Henriques. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2005.

157 f. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Adimplente. 3. Clusterização. 4. Fraudulento. 5. Inadimplente. 6. Perda comercial. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Henriques, Henrique de O. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica . IV. Título.

CDD: 621.3

Este trabalho é inteiramente
dedicado a minha amada
mãe Marilene, a melhor mãe
do mundo.

Agradecimentos

Aos meus pais, Marilene e José Elias, pelo apoio incondicional em toda minha caminhada.

Aos meus irmãos, Hugo e Luiza, por seu apoio nas horas difíceis.

Ao meu avô Geraldo Flora que sempre torceu pelo meu sucesso.

A minha tia Eliana pela acolhida.

A todos meus familiares que, próximos ou distantes, me incentivaram nessa jornada.

A todos os amigos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente pela realização do meu mestrado.

Ao meu orientador, professor doutor Reinaldo Souza Castro, pelo estímulo e auxílio para realização desta dissertação de mestrado.

Ao meu co-orientador, professor doutor Henrique Henriques da UFF, pela parceria na realização deste trabalho.

A CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios financeiros concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos colegas do NEC-PUC, especialmente ao Wesley, por todo auxílio com os bancos de dados.

Aos colegas Landi e João Carlos por toda ajuda concedida.

Aos colegas do Departamento de Engenharia Elétrica que de alguma forma contribuíram na confecção deste trabalho.

A Distribuidora de Energia ELEKTRO, especialmente Júlio Belan, que disponibilizou os dados utilizados neste trabalho.

Aos professores doutores que participaram da Comissão Examinadora.

Resumo

Calili, Rodrigo Flora. **Desenvolvimento de sistema para detecção de perdas comerciais em redes de distribuição de energia elétrica**. Rio de Janeiro, 2005. 157p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os modelos matemáticos comumente usados na identificação de irregularidades na medição se baseiam na análise da redução percentual do consumo do mês (normalmente de 20% a 30%) em relação aos meses anteriores. Este método tem gerado resultados imprecisos uma vez que considera o valor do consumo como um valor rígido e, portanto, não incorpora o efeito da sazonalidade na tipologia das cargas das unidades consumidoras.

Este trabalho tem o intuito de melhorar a identificação de clientes fraudulentos utilizando métodos de inteligência artificial, tais como Redes Neurais e Lógica Fuzzy, implementados a um banco de dados de cadastro da Distribuidora de Energia ELEKTRO e a uma Pesquisa de Posses e Hábitos de Consumo (PPH) feita nesta mesma empresa.

Nesta dissertação, o objetivo foi classificar um grupo de consumidores como normal (adimplente), inadimplente e fraudulento. Para tanto, foi feita inicialmente uma “clusterização” utilizando uma Rede Neural, mais especificamente uma Rede de Kohonen, para o banco de dados de cadastro disponibilizado pela distribuidora. Tomando os grupos desta classificação prévia feita pela Rede identificaram-se quais e quantos destes tiveram PPH's realizadas. Para se ter a classificação de um grupo quanto a incidência de consumidores normais, inadimplentes e fraudulentos utilizou-se um processo de Análise Fuzzy, o qual identifica os *clusters* com os consumidores de cada um dos segmentos. É feita uma análise de desempenho do modelo proposto com dados reais fornecidos pela empresa, na qual os resultados apontaram para uma robustez do método.

Palavras chave:

Adimplente, “Clusterização”, Fraudulento, Inadimplente, Perda Comercial, PPH's.

Abstract

Calili, Rodrigo Flora. **System development to detect commercial losses in electrical energy distribution network.** Rio de Janeiro, 2005. 157p. Master Dissertation – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Mathematical models commonly used to identify irregularities in measurement are based on percentile reduction analysis of the monthly consumption (normally from 20% to 30%) in relation to the previous months. This method tends to generate imprecise results, since it considers the value of the consumption as a rigid value and, therefore, it does not incorporate the seasonal effect in the loads topology of the consumer units.

This work has intention to improve the identification of fraudulent customers using artificial intelligence methods, such as Neural Networks and Fuzzy Logic, implemented to a database of consumers of ELEKTRO a distributing utility of São Paulo State, Brazil. It also uses information on appliances ownership obtained via market research in ELEKTRO area, named PPH (Portuguese for this particular type of market research).

In this dissertation, the main objective was to classify a group of consumers as solvent, insolvent and fraudulent. In order to achieve this task, a clustering was initially made using a Neural Network framework, more specifically a Kohonen Network, for the database available. It was then checked which of the groups had a minimum number of clients interviewed in the PPH. In order to have the classification of the clients in the three categories it was used Fuzzy Analysis. Selected data is also presented, considering the available database of the Company as well as the research environment, which had been taken from the PPH. Finally, it was checked the performance of the method against real data obtained from the utility and the results were very satisfactory.

Keywords:

Clustering, Fraudulent, Commercial Loss, Insolvent, PPH's, Solvent.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO.....	1
1.2 OJETIVOS DO TRABALHO.....	2
1.3 DESCRIÇÃO DO TRABALHO	4
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	5
2 PERDAS DE ENERGIA	8
2.1 INTRODUÇÃO.....	8
2.2 PERDAS TÉCNICAS	10
2.2.1 Perdas Técnicas no Sistema de Transmissão.....	11
2.2.1.1 Medição	11
2.2.1.2 Load Flow	11
2.2.2 Perdas Técnicas no Sistema de Distribuição	11
2.2.2.1 Modelos Simplificados	11
2.2.2.2 Fluxo de Potência	12
2.3 PERDAS COMERCIAIS.....	13
2.3.1 Introdução.....	13
2.3.2 A Perda Comercial e a Inadimplência	14
2.3.3 A Perda Comercial e a Qualidade de Atendimento aos Clientes.....	16
2.3.4 A Perda Comercial e o Medidor de Energia Elétrica	18
2.3.5 A Perda Comercial e a Violência.....	20
2.3.6 A Perda Comercial e a Economia Brasileira	23
2.3.7 A Perda Comercial e o Racionamento	25
2.3.8 A Perda Comercial e a Revisão Tarifária	26
3 FERRAMENTAS UTILIZADAS: REDES NEURAIS E LÓGICA FUZZY..	27
3.1 REDES NEURAIS.....	27
3.2 MAPA AUTO-ORGANIZÁVEL DE KOHONEN	29
3.2.1 Introdução.....	29
3.2.2 A Rede de Kohonen	31
3.2.3 Processo de Aprendizagem.....	33
3.2.4 Algoritmo de Kohonen	34
3.3 LÓGICA FUZZY	36
3.3.1 Introdução.....	36
3.3.2 Conjuntos Fuzzy	38
3.3.3 Conectivos Lógicos	40
3.3.4 Proposições ou Regras Fuzzy	41
3.3.5 Inferência Fuzzy	42
3.3.6 Defuzzificação	42

4 DESCRIÇÃO DO MODELO DE DETECÇÃO DE PERDAS	44
4.1 INTRODUÇÃO.....	44
4.2 DADOS SELECIONADOS	45
4.2.1 Dados de Entrada.....	45
4.2.2 Dados de pesquisa.....	49
4.2.3 Processo de Ligação dos Dados de Entrada com os Dados de Pesquisa.....	63
4.3 METODOLOGIA UTILIZADA	64
4.3.1 Introdução.....	64
4.3.2 Processo de Formação dos Clusters.....	65
4.3.3 Processo de Análise Fuzzy	68
5 RESULTADOS	81
5.1 INTRODUÇÃO.....	81
5.2 ANÁLISE PARA METADE DOS CLIENTES DE GUARUJÁ	82
5.2.1 Classificação por Rede de Kohonen	82
5.2.2 Análise Fuzzy	83
5.3 ANÁLISE PARA TODOS OS CLIENTES DE GUARUJÁ.....	87
5.3.1 Classificação por Rede de Kohonen	87
5.3.2 Análise Fuzzy	88
5.4 ANÁLISE FINAL DOS RESULTADOS.....	92
5.4.1 Introdução.....	92
5.4.2 Comparação entre Metade e Todos os Clientes de Guarujá	93
5.4.2.1 Clientes Fraudulentos	93
5.4.2.2 Clientes Inadimplentes.....	94
5.4.3 Procura dos Dados Reais nos Clusters Gerados	95
5.4.3.1 Clientes Fraudulentos	96
5.4.3.2 Clientes Inadimplentes.....	97
6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	99
6.1 CONCLUSÕES.....	99
6.2 TRABALHOS FUTUROS	102
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103
ANEXOS.....	110

Lista de Ilustrações

Figura 1: Evolução do preço das tarifas médias de energia e do salário mínimo real.....	15
Figura 2: Satisfação dos clientes da ELEKTRO.....	17
Figura 3: Nível de escolaridade dos clientes da ELEKTRO.....	25
Figura 4: Representação de uma rede de Kohonen.....	33
Figura 5: Comparação entre um conjunto crisp e um conjunto fuzzy.....	39
Figura 6: Diferentes variáveis lingüísticas para a variável temperatura de um processo.....	40
Figura 7: Caracterização de um cliente na variável média de consumo.....	48
Figura 8: Configuração de um DNA.....	48
Figura 9: Número de moradores em cada domicílio entrevistado.....	50
Figura 10: Tempo que o entrevistado mora no domicílio.....	51
Figura 11: Área construída do domicílio em m ²	51
Figura 12: Posse média de lâmpadas.....	52
Figura 13: Posse média de eletrodomésticos (1).....	53
Figura 14: Posse média de eletrodomésticos (2).....	54
Figura 15: Renda familiar declarada pelo entrevistado (em s.m.).....	58
Figura 16: Classificação da região do domicílio pelo pesquisador.....	59
Figura 17: Proximidade do domicílio em relação a favela.....	60
Figura 18: Peso da conta de luz no orçamento do entrevistado.....	60
Figura 19: Esquema de ligação entre os dados de entrada e dados de pesquisa pela Uc.....	64
Figura 20: Esquema de formação de clusters.....	66
Figura 21: Curva de frequência normalizada das respostas para cada uma das 40 variáveis.....	69

Figura 22: Curva de freqüência respostas para os clientes normais com o corte.....	71
Figura 23: Curva de freqüência respostas para os clientes fraudulentos com o corte.....	71
Figura 24: Curva de freqüência respostas para os clientes inadimplentes com o corte.....	72
Figura 25: Curva de pertinência para variável 9 dos clientes normais.....	75
Figura 26: Curva de pertinência para variável 31 dos clientes fraudulentos.....	75
Figura 27: Curvas de pertinência das respostas de clientes adimplentes às 8 perguntas selecionadas.....	77
Figura 28: Curvas de pertinência das respostas de clientes fraudulentos às 13 perguntas selecionadas.....	77
Figura 29: Curvas de pertinência das respostas de clientes inadimplentes às 14 perguntas selecionadas.....	78
Figura 30: Resultado final da classificação fuzzy dos clusters.....	79
Figura 31: Curvas de pertinência de clientes adimplentes para metade de Guarujá.....	84
Figura 32: Curvas de pertinência de clientes fraudulentos para metade de Guarujá.....	85
Figura 33: Curvas de pertinência de clientes inadimplentes para metade de Guarujá.....	85
Figura 34: Resultado final da classificação fuzzy dos clusters para metade de Guarujá.....	86
Figura 35: Curvas de pertinência de clientes adimplentes de Guarujá.....	89
Figura 36: Curvas de pertinência de clientes fraudulentos de Guarujá.....	89
Figura 37: Curvas de pertinência de clientes inadimplentes de Guarujá.....	90
Figura 38: Resultado final da classificação fuzzy dos clusters para metade de Guarujá.....	91

Lista de tabelas

Tabela 1: Perdas de Energia no Brasil de 1970 a 2001.....	9
Tabela 2: Teste -t para a posse média de eletrodomésticos.....	56
Tabela 3: Teste de Levene para a posse média de eletrodomésticos.....	56
Tabela 4: Relação das variáveis selecionadas no questionário da PPH.....	61
Tabela 5: Relação das variáveis selecionadas e suas respectivas faixas....	62
Tabela 6: Pertinência para as variáveis 9 dos clientes normais e 31 dos clientes fraudulentos.....	74
Tabela 7: Número de consumidores e clientes pesquisados por cluster (metade de Guarujá).....	83
Tabela 8: Número de consumidores e clientes pesquisados por cluster (Guarujá).....	87
Tabela 9: Comparação entre os clientes fraudulentos de metade e toda Guarujá.....	93
Tabela 10: Comparação entre os clientes inadimplentes de metade e toda Guarujá.....	94
Tabela 11: Verificação dos clientes fraudulentos reais encontrados nos clusters de Guarujá.....	96
Tabela 12: Verificação dos clientes inadimplentes reais encontrados nos clusters de Guarujá.....	97