KLEBER HASHIMOTO

**TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA MULTIOBJETIVO
APLICADAS NA ESTIMAÇÃO DO DESEMPENHO ELÉTRICO DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.

São Paulo
2004

KLEBER HASHIMOTO

**TÉCNICAS DE OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA MULTIOBJETIVO
APLICADAS NA ESTIMAÇÃO DO DESEMPENHO ELÉTRICO DE
REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do
Título de Doutor em Engenharia.

Área de Concentração:
Engenharia de Eletricidade

Orientador:
Prof. Dr. Nelson Kagan

São Paulo
2004

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que seja citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, ____ de _____ de 2004.

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Serviço de Documentação da
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Hashimoto, Kleber

Técnicas de otimização combinatória multiobjetivo aplicadas na estimação do desempenho elétrico de redes de distribuição./

Kleber Hashimoto – São Paulo, 2004. Edição Revisada.

114p.

Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Distribuição de energia elétrica (planejamento) 2. Otimização combinatória. I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Nelson Kagan, pela competência e valorosa orientação prestada no desenvolvimento deste trabalho.

À CSPE, por permitir a conclusão deste trabalho e ao IEE/USP por apoiar o desenvolvimento acadêmico de seus funcionários.

À Eletropaulo, em especial, ao Sr. João José e ao Sunny, pelas informações fornecidas.

Aos Profs. Tahan, Aderbal, Gouvêa e Moacyr, pelo incentivo e apoio, com quem tive o privilégio de aprender muita coisa.

Aos colegas da CSPE, em especial Jorge, Aldo, Milton, Márcia, Kimura, Guacira, Jucá, Vicente, Rodolfo, Celso, Paulo, pela amizade, companheirismo e compreensão nos meus dias de mau humor.

Aos sempre colegas do IEE/USP Alexandre e Arnaldo, que me motivaram a ingressar no doutorado.

Agradeço também aos Profs. Barioni, Hernán e Arango, sempre dispostos a nos incentivar.

Aos colegas do Enerq, em especial André, Alden e Rosana, que me ajudaram diversas vezes com muita disposição.

Ao Prof. Robba, que me incitou a estudar um pouco mais que eu queria.

Aos meus pais, mesmo não presentes, pelo empenho em meu desenvolvimento escolar.

À minha querida esposa Eloisa, companheira sempre presente e incansável mesmo nos momentos mais difíceis.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para que este trabalho se realizasse.

A Deus, por tudo.

RESUMO

HASHIMOTO, K. Técnicas de otimização combinatória multiobjetivo aplicadas na estimação do desempenho elétrico de redes de distribuição. 2004. 114p. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

Neste trabalho são apresentadas contribuições para a estimação do desempenho elétrico na distribuição de energia elétrica, com implicações nos mais diversos problemas da operação e do planejamento da distribuição. Entende-se por desempenho elétrico, a avaliação dos parâmetros de congestionamento de redes, as perdas e o nível de tensão. A motivação deste trabalho está na agregação dos esforços advindos da campanha de medição compulsória das concessionárias de distribuição e da necessidade do órgão regulador de estabelecer parâmetros de avaliação do desempenho operacional das empresas, como previsto no documento intitulado “Procedimentos da Distribuição” da Aneel. A estimação do desempenho elétrico é formulada segundo um problema de otimização multiobjetivo onde as funções objetivo compõem uma avaliação de probabilidade de ocorrência e uma avaliação de proximidade dos parâmetros elétricos calculados com os valores obtidos por medição. Os valores das cargas são discretizados segundo probabilidades de ocorrência em cada intervalo, de modo que a formulação resulte em um problema de otimização combinatória multiobjetivo de dimensão exponencial. Propõe-se um procedimento de redução de rede, que diminua consideravelmente o espaço de decisões, e um procedimento de expansão de redes para recompô-la. Também são propostas heurísticas específicas para a obtenção de soluções com cargas diversificadas e desequilibradas. Para uma aplicação adequada destas heurísticas, propôs-se e aplicou-se um método evolucionário metaheurístico para composição das soluções factíveis, ordenadas de acordo com o conceito de dominância de Pareto. Para cada fronteira de dominância, ou conjunto de fronteiras, o aplicativo constrói a distribuição probabilística da corrente e fluxo de potência de cada trecho, o nível de tensão em todas as barras e as perdas técnicas totais do circuito. A formulação matemática de otimização é flexível o bastante para a aplicação prática, considerando os diversos estágios de implementação dos atuais sistemas supervisórios. O modelo evolucionário metaheurístico proposto foi aplicado para um caso ilustrativo evidenciando as suas potencialidades e os pontos a serem aprimorados.

Palavras-chave: estimação do desempenho elétrico, otimização combinatória multiobjetivo, método evolucionário, metaheurística.

ABSTRACT

HASHIMOTO, K. **Multiobjective combinatorial optimization techniques applied on electrical performance estimation of distribution networks**. 2004. 114p. Thesis (Doctoral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

This thesis aims at contributing for the estimation of electrical performance in the distribution of electrical energy. Electrical performance is assumed to be the evaluation of network congestion parameters, losses and voltage level. The development of this work was impelled due to distribution utilities compulsory measurement permanent campaigns, and due to the need of the regulatory agency in establishing operational performance standards, as stated in the Distribution Code of *Aneel*, the Brazilian Energy Regulatory Agency. The electrical performance estimation is formulated according to an optimization problem where the objective functions correspond to an evaluation of occurrence probability, and correspond to a proximity evaluation of calculated parameters with values obtained by measurement as well. Load values are discretized according to occurrence probabilities within each interval, so that formulation results in a multiobjective combinatorial optimization of exponential dimension. Network reduction procedures to substantially reduce Decision Domain and network expansion procedures to recompose it are proposed. Specific heuristics are also proposed to get solutions with load diversity and unbalanced loads. In order to adequately apply these heuristics, a metaheuristic evolutionary method to build feasible solutions is proposed and applied, and ranked according to Pareto's concept. For each dominance frontier or group of frontiers, the application builds the probabilistic: current and load flow distribution of for each branch, voltage level for each bar and circuit technical losses. The mathematical formulation of optimization is flexible enough to be effectively applied taking into account different levels of supervisory systems developed in the utilities. The metaheuristic evolutionary model proposed was applied to a representative case with main potentialities and weak points to be improved.

Keywords: Electrical performance estimation. Multiobjective combinatorial optimization. Evolutionary method. Metaheuristics.

SUMÁRIO

RESUMO

ABSTRACT

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	1
1.2	MOTIVAÇÃO	2
1.3	OBJETIVOS	3
1.4	METODOLOGIA.....	5
1.5	ESTRUTURA DO DOCUMENTO	8
2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO ELÉTRICO NA DISTRIBUIÇÃO	9
2.1	DESEMPENHO ELÉTRICO	9
2.2	PESQUISA DE SATISFAÇÃO	10
2.2.1	DNAEE	10
2.2.2	Projeto de Qualidade	10
2.2.3	Contratos de Concessão	11
2.2.4	ABRADEE	12
2.2.5	IASC	12
2.3	RECLAMAÇÃO DO CONSUMIDOR	14
2.4	MEDIÇÃO.....	15
2.4.1	Sistema de Medições Permanente.....	15
2.4.2	Sistema de Medições Amostral.....	17
2.4.3	Curvas Típicas de Carga	19
2.4.4	Protocolo de Medições	21
2.5	SIMULAÇÃO	23
2.5.1	Modelo Determinístico.....	24
2.5.2	Modelo Agregado.....	24
2.5.3	Modelo Difuso	27
2.5.4	Modelo Probabilístico	27

3	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	30
3.1	CONCEITOS BÁSICOS	30
3.2	MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	33
3.3	OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA MULTIOBJETIVO	34
3.4	MÉTODOS HEURÍSTICOS	35
3.4.1	Heurísticas Construtivas	36
3.4.2	Busca Local	37
3.4.3	Metaheurísticas	37
3.5	CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO	39
4	FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE ESTIMAÇÃO DO DESEMPENHO ELÉTRICO	42
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS DADOS	42
4.2	PROGRAMAÇÃO POR METAS MULTIOBJETIVO	43
4.3	ESTIMAÇÃO PROBABILÍSTICA	47
4.4	OTIMIZAÇÃO COMBINATÓRIA MULTIOBJETIVO	51
4.5	APLICACAO DE HEURÍSTICAS	56
4.5.1	Redução de Redes	57
4.5.2	Controle da Discretização	60
4.5.3	Primeira Solução Direta	64
4.5.4	Soluções Diversificadas	65
4.5.5	Soluções Desequilibradas	67
4.6	MÉTODO EVOLUCIONÁRIO	69
5	APLICAÇÃO DE UM MÉTODO EVOLUCIONÁRIO METAHEURÍSTICO	81
5.1	INTRODUÇÃO	81
5.2	CASO ILUSTRATIVO	81
5.2.1	Enumeração Parcial	83
5.2.2	Método Evolucionário Metaheurístico	94
5.3	CASO REAL	102
5.4	COMENTÁRIOS	104

6	CONCLUSÕES	107
6.1	CONCLUSÕES GERAIS.....	107
6.2	CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO	108
6.3	TÓPICOS PARA DESENVOLVIMENTO	109
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	111