

**Murilo Pereira Soares**

**Otimização Multicritério da Operação de  
Sistemas Hidrotérmicos Utilizando Algoritmos  
Genéticos**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Métodos de Apoio à Decisão do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio

Orientador : Dr. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco  
Co-Orientador: Dr. Joari Paulo da Costa

Rio de Janeiro  
Março de 2008

**Murilo Pereira Soares**

## **Otimização Multicritério da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Utilizando Algoritmos Genéticos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Métodos de Apoio à Decisão do Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Dr. Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. Joari Paulo da Costa**

Co-Orientador

Operador Nacional do Sistema Elétrico

**Dr. Juan Guillermo Lazo Lazo**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Dr. André Luís Marques Marcato**

UFJF

**Dr. Karla Tereza Figueredo Leite**

UERJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Março de 2008

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

### **Murilo Pereira Soares**

Graduou-se em Engenharia na Universidade Federal de Juiz de Fora (Juiz de Fora, MG). Seu trabalho de conclusão de curso foi em otimização linear, intitulado “Otimização Linear para o Cálculo da Energia Firme de Usinas Hidrelétricas utilizando Programação Orientada a Objetos (POO)”. Atualmente trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico, onde atua na área de modelos de otimização e geração de cenários de aflúências para o planejamento da operação energética do sistema interligado brasileiro.

### Ficha Catalográfica

Soares, Murilo Pereira

Otimização Multicritério da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Utilizando Algoritmos Genéticos / Murilo Pereira Soares; orientador: Marco Aurélio Cavalcanti Pacheco; co-orientador: Joari Paulo da Costa. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2008.

77 f: il.(color) ; 30 cm

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

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Elétrica – Tese. 2. Planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, Otimização, Algoritmos genéticos, Otimização Multicritério. I. Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti. II. Costa, Joari Paulo. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

## Agradecimentos

Dedico meus sinceros agradecimentos:

- ao meu orientador Marco Aurélio pelo incentivo desde o início do mestrado até os momentos finais, sempre se mostrando entusiasmado e confiante nos trabalhos;
- ao co-orientador deste trabalho, Joari, pelas longas conversas e explicações sobre o assunto, e principalmente pelas muitas idéias que sempre despertaram dessas conversas;
- aos colegas do ICA pela ajuda, principalmente ao Omar pelas dúvidas esclarecidas sobre o GAcem e à Luciana pela ajuda na execução dos estudos de casos;
- aos amigos que fiz na PUC nestes dois longos anos e com os quais ainda tomarei alguns chopps;
- aos meus pais Plínio e Fatinha, além de meus irmãos Fabrício e Gabriel, que sempre me ajudaram em toda a minha vida, em absolutamente todos os momentos, e sem os quais eu não seria a pessoa que sou;
- à minha namorada Victória pelo carinho, amizade e apoio, que foram indispensáveis para a conclusão desta etapa;
- ao amigo Beloti pelas revisões, discussões e ajuda sempre que precisei;
- aos meus amigos Beloti, Bruno Dias, Flávia, Iran, Léo e Pedretti que durante estes dois anos foram responsáveis por excelentes momentos nos quais me diverti muito;
- aos amigos do ONS pela convivência, apoio e pela oportunidade de aprender a cada dia mais;
- a todos que um dia passaram por minha vida e que deixaram alguma lembrança.

## Resumo

Soares, Murilo Pereira; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; Costa, Joari Paulo. **Otimização Multicritério da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Utilizando Algoritmos Genéticos**. Rio de Janeiro, 2008. 77p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No Brasil, o planejamento da operação energética do Sistema Interligado Nacional – SIN é realizado atualmente por meio de uma cadeia de modelos matemáticos concebidos para otimizar o planejamento segundo o critério de minimização do valor esperado do custo total de operação. No entanto, desde a crise ocorrida no Setor Elétrico Brasileiro entre os anos de 2001 e 2002, cujo ápice ocorreu no racionamento de energia, houve uma intensificação na busca por métodos de otimização que permitam a consideração explícita de critérios adicionais na otimização, tal como a segurança operativa. Neste contexto, este trabalho propõe uma modelagem utilizando algoritmos genéticos que permite a consideração de múltiplos objetivos no processo de otimização sem que a representação física do sistema e de suas incertezas sejam comprometidas. A abordagem multicritério para o problema possibilita que diversos indicadores, dentre os quais destaca-se o risco anual de déficit, que atualmente são apenas resultados da otimização, se tornem controláveis a partir de sua consideração diretamente no processo de otimização. A modelagem proposta foi computacionalmente implementada na linguagem C# utilizando a biblioteca GAcorn desenvolvida pelo ICA/PUC-Rio. O desempenho da metodologia proposta foi avaliado por meio de estudos de casos aplicados ao SIN. Os resultados obtidos, assim como as vantagens observadas ao se utilizar a otimização multicritério, são discutidos ao longo do texto.

## Palavras-chave

Planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos, Otimização, Algoritmos genéticos, Otimização Multicritério.

## Abstract

Soares, Murilo Pereira; Pacheco, Marco Aurélio Cavalcanti; Costa, Joari Paulo. **Multicriteria Optimisation of Hydrothermal Systems Operation using Genetic Algorithms**. Rio de Janeiro, 2008. 77p. MsC Thesis — Department of Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In Brazil, the planning of the energy operation of the National Interconnected Power System is currently done through a chain of mathematical models designed to optimise the planning according to criterion of minimisation of the expected value of the total operation's cost. However, since the 2001-2002 energy supply crisis, there was an intensification in the search for methods of optimization allowing explicit consideration of additional criteria, such as the operative security. In this context, this work proposes a modelling using genetic algorithms that makes possible the consideration of multiple objectives in the optimisation process without compromising the physical representation of the system and its uncertainties. A multicriteria approach to the problem allows that various indicators, like, for instance, annual deficit, which currently are only results of the optimisation, become controllable from its consideration in the optimisation process. The modelling proposal was computationally implemented in language C# using the GAcom library developed by the ICA/PUC-Rio. The performance of the proposed methodology was evaluated through potential National Interconnected Power System case studies. The results, as well as the benefits seen when using the multicriteria optimisation, are discussed throughout the text.

## Keywords

Hydrothermal systems operation planning, Optimisation, Genetic Algorithms, Multicriteria optimisation.

## Sumário

1	Introdução	<b>12</b>
1.1	Motivação do Trabalho	12
1.2	Objetivo do Trabalho	12
1.3	Descrição do Trabalho	13
1.4	Organização da Dissertação	13
2	Introdução ao Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos	<b>14</b>
2.1	Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos	14
3	Modelagem do Problema de Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos Utilizando Algoritmos Genéticos	<b>22</b>
3.1	Introdução	22
3.2	Algoritmos Genéticos	23
3.3	Métodos Multicritério	28
3.4	Proposta de Modelagem Utilizando Algoritmos Genéticos	31
3.5	Abordagens Propostas	44
3.6	Considerações Finais	48
4	Estudo de Caso	<b>50</b>
4.1	Introdução	50
4.2	Estudo de Caso: PMO 01/2008	50
4.3	Considerações Finais	70
5	Conclusões e trabalhos futuros	<b>71</b>
5.1	Conclusões	71
5.2	Trabalhos Futuros	72

## Lista de figuras

2.1	Exemplo da tomada de decisão e seus possíveis rebatimentos	16
2.2	Função de custo futuro, custo presente e custo total de operação	17
2.3	Sistema equivalente de energia	21
3.1	Descrição Geral de um Algoritmo Genético	24
3.2	Exemplo de Probabilidades de Seleção de cada Indivíduo	25
3.3	Crossover BLX-alfa para um valor de $\beta$ constante	27
3.4	Crossover BLX-alfa para valores variáveis de $\beta$	27
3.5	Fronteira, ou conjunto de Pareto ótimo	30
3.6	Sistema de Apoio à Decisão	32
3.7	Cromossomo proposto, baseado nas metas de geração hidráulica para cada sistema.	34
3.8	Verificação da viabilidade das metas de geração hidráulica do cromossomo	37
3.9	Fluxograma para redistribuição dos excessos de geração	40
3.10	Fluxograma para cálculo da geração térmica e intercâmbios	41
3.11	Processo de avaliação do cromossomo – Exemplo	42
3.12	Exemplo – Gerações Hidráulicas Viáveis	42
3.13	Exemplo – Caso hipotético – Configuração	42
3.14	Exemplo – Caso hipotético – Cálculo e Distribuição dos Excessos de Geração	43
3.15	Exemplo – Caso hipotético – Geração Térmica (1/2)	44
3.16	Exemplo – Caso hipotético – Geração Térmica (2/2)	45
3.17	Processo de avaliação do cromossomo – Riscos de Déficit	46
4.1	Representação espacial do Sistema Interligado Nacional	52
4.2	Caso 01/2008 – Evolução do GA – $\text{Min}\{E[\text{Custo}]\}$	57
4.3	Caso 01/2008 – Evolução do GA – Metas de Riscos de Déficit = 5%	57
4.4	Caso 01/2008 – Valor esperado dos custos totais de operação – 200 séries	58
4.5	Caso 01/2008 – Riscos anuais de déficit – Sudeste – 200 séries	59
4.6	Caso 01/2008 – Riscos anuais de déficit – Sul – 200 séries	60
4.7	Caso 01/2008 – Riscos anuais de déficit – Nordeste – 200 séries	60
4.8	Caso 01/2008 – Riscos anuais de déficit – Norte – 200 séries	61
4.9	Caso 01/2008 – Balanço de Carga (série 190) – Sudeste – <i>Minimização do valor esperado do custo total de operação</i>	63
4.10	Caso 01/2008 – Balanço de Carga (série 190) – Sudeste – <i>Multicritério – Riscos de Déficit = 5%</i>	64
4.11	Caso 01/2008 – Balanço de Carga (série 190) – Sul – <i>Minimização do valor esperado do custo total de operação</i>	64
4.12	Caso 01/2008 – Balanço de Carga (série 190) – Sul – <i>Multicritério – Riscos de Déficit = 5%</i>	65
4.13	Caso 01/2008 – Balanço de Carga (série 190) – Nordeste – <i>Minimização do valor esperado do custo total de operação</i>	65



4.14	Caso 01/2008 – Balanço de Carga (série 190) – Nordeste – <i>Multicritério – Riscos de Déficit = 5%</i>	66
4.15	Caso 01/2008 – Balanço de Carga (série 190) – Norte – <i>Minimização do valor esperado do custo total de operação</i>	66
4.16	Caso 01/2008 – Balanço de Carga (série 190) – Norte – <i>Multicritério – Riscos de Déficit = 5%</i>	67
4.17	Caso 01/2008 – Valor esperado dos custos totais de operação – 2000 séries	67
4.18	Caso 01/2008 – Riscos anuais de déficit – Sudeste – 2000 séries	68
4.19	Caso 01/2008 – Riscos anuais de déficit – Sul – 2000 séries	68
4.20	Caso 01/2008 – Riscos anuais de déficit – Nordeste – 2000 séries	69
4.21	Caso 01/2008 – Riscos anuais de déficit – Norte – 2000 séries	69

## Lista de tabelas

4.1	Dados Gerais (Caso 01/2008)	51
4.2	Custos de Déficit por Profundidade de Corte de Carga (Caso 01/2008)	51
4.3	Características dos Sistemas Equivalentes de Energia (Caso 01/2008)	51
4.4	Capacidades de Intercâmbio entre os Sistemas Equivalentes de Energia (Caso 01/2008)	52
4.5	Mercado Total de Energia (Caso 01/2008)	53
4.6	Geração de Pequenas Usinas (Caso 01/2008)	53
4.7	Características das Usinas Térmicas (Caso 01/2008)	54

*Owing to this struggle for life, any variation, however slight and from whatever cause proceeding, if it be in any degree profitable to an individual of any species, in its infinitely complex relationship to other organic beings and to external nature, will tend to the preservation of that individual, and will generally be inherited by its offspring.*

*(...)*

*If it could be demonstrated that any complex organ existed, which could not possibly have been formed by numerous, successive, slight modifications, my theory would absolutely break down. But I can find out no such case.*

**Charles Darwin**, *Origin of Species* (1859).