



Bruno Henriques Dias

**Programação Dinâmica Estocástica e Algoritmo
de Fechos Convexos no Planejamento da
Operação de Sistemas Hidrotérmicos**

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.

Orientadores: Reinaldo Castro Souza
André Luís Marques Marcato



Bruno Henriques Dias

**Programação Dinâmica Estocástica e Algoritmo
de Fechos Convexos no Planejamento da
Operação de Sistemas Hidrotérmicos**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor 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. André Luís Marques Marcato
Co-orientador
UFJF

Prof. Edimar José de Oliveira
UFJF

Prof. Edmarcio Antonio Belati
UFABC

Prof. Leonardo Lima Gomes
IAG/PUC-Rio

Prof. Ivo Chaves da Silva Junior
UFJF

Prof. João Alberto Passos Filho
UFJF

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

Rio de Janeiro, 05 de julho de 2010

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

Bruno Henriques Dias

Bruno Henriques Dias é formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora - UFJF (2005) e obteve seu título de mestre em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio (2007). Atualmente finaliza seu doutorado na mesma instituição. Tem atuado em pesquisa nas áreas de Planejamento da Operação de Sistemas Elétricos, Coordenação Hidrotérmica, Comercialização e Mercados de Energia Elétrica.

Ficha Catalográfica

Dias, Bruno Henriques

Programação dinâmica estocástica e algoritmo de fechos convexos no planejamento da operação de sistemas hidrotérmicos / Bruno Henriques Dias ; orientadores: Reinaldo Castro Souza, André Luís Marques Marcato. – 2010.

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

Tese (Doutorado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Rio de Janeiro, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Planejamento da operação. 3. Sistemas hidrotérmicos. 4. Programação dinâmica estocástica. 5. Fechos convexos. 6. Processamento paralelo. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Marcato, André Luís Marques III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título

CDD: 621.3

Dedico este trabalho àquela que foi a minha primeira professora, me ensinando as primeiras letras e me incentivando, ao longo dos anos, na busca constante pelo aprendizado: minha Mãe.
E ao meu Pai, que mesmo distante, encontra maneiras de dizer que está sempre por perto.

Agradecimentos

“Agradecer é reconhecer que não conquistamos nada sozinhos”

Agradeço inicialmente e, sobretudo, a Deus, pela vida, oportunidade constante de aprendizado.

Ao amor, exemplo e dedicação incondicional de minha mãe, Regina, que tornou possível a realização deste trabalho. E aos bons momentos vividos ao lado de meu pai, que me inspiram e trazem felizes recordações.

A minha querida irmã, Fernanda, amiga de todos os momentos.

Agradeço eternamente o carinho e a atenção de D. Isabel Salomão, por todos os ensinamentos e pela força, nos momentos mais difíceis. E aos amigos da Comunidade Espírita “A Casa do Caminho” pelos laços de amizade fraternos.

A minha noiva, Anne Karole, por todo amor e apoio de sempre.

A toda minha família, fonte eterna de carinho e inspiração, em especial pelo auxílio de meus tios Itamar Henriques e Elimar Dias. Agradeço sempre ao Roberto Dias e Marcílio Henriques, meus primos e eternos amigos, companheiros de ideal no aprendizado constante.

Meus sinceros agradecimentos aos muitos amigos que me incentivam na minha caminhada. Agradeço em especial, ao Ivo Junior, Bruno Beloti e Leonardo Moraes, que me incentivaram, cada um em um momento diferente, no desenvolvimento deste trabalho.

Dedico minha especial gratidão ao amigo Murilo Soares, pelo apoio, discussões, e principalmente pelas idéias, durante todo o doutorado. Meu reconhecimento de que a realização deste trabalho só foi possível devido à sua ajuda.

Agradeço também ao Tales Ramos e Rafael Bruno, pelos muitos momentos de trabalho e estudo, além da amizade dividida durante todo o tempo de convivência além da participação neste trabalho. Agradeço ainda ao Filipe Niquini pelo tempo de excelente convivência e por seu constante apoio e ao Marcelo Tomim, pelas discussões e auxílio em parte da tese.

Aos professores Edimar Oliveira, Marley Velasco e Mônica Barros, Edmarcio Belati, Leonardo Gomes, Ivo Chaves Junior e João Alberto pela participação e pelas sugestões na proposta de tese e na defesa de tese.

Aos meus orientadores, Reinaldo Souza e André Marcato, que me possibilitaram a realização deste trabalho, concedendo a oportunidade de continuar no doutorado, além de todo o apoio no desenvolvimento do mesmo.

A todos os amigos que, apesar de não estarem nominalmente citados, me incentivaram com suas amizades e com a torcida para que eu vencesse mais este desafio, meus mais sinceros agradecimentos.

A CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro recebido durante a realização deste trabalho.

Resumo

Henriques Dias, Bruno; Castro Souza, Reinaldo **Programação Dinâmica Estocástica e Algoritmo de Fechos Convexos no Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos**. Rio de Janeiro, 2010. 123p. Tese de Doutorado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese apresenta uma nova proposta para modelagem das funções de custo futuro, utilizadas na Programação Dinâmica Estocástica (PDE). A técnica proposta é aplicada ao planejamento da operação de médio prazo de sistemas elétricos de potência. Através da discretização do espaço de estados, o algoritmo de fechos convexos (*convex hull*) é utilizado na obtenção de uma série de hiperplanos que compõe um conjunto convexo. Estes planos representam uma aproximação linear por partes da função de custo futuro. O custo operacional médio utilizando a metodologia proposta considerando-se um único cenário de afluências foi comparado com o custo obtido da programação dinâmica dual determinística para o mesmo cenário de afluências. Esta análise mostra a convergência das duas metodologias e é utilizada para determinar o nível mínimo de discretização necessário para modelagem das funções de custo futuro. A partir deste resultado é feita a extensão da análise para diversos cenários de afluências utilizando-se a metodologia proposta, sendo a função de custo futuro obtida através da média do custo de operação para os diversos cenários, em cada discretização. A aplicabilidade do método é mostrada utilizando um caso exemplo de duas usinas hidrelétricas reais em cascata. Adicionalmente, um estudo de caso analisa as vantagens da paralelização do código de programação, onde métricas tais como fator de aceleração e eficiência são analisadas. Por fim, é apresentada uma simulação contendo todo o sistema elétrico brasileiro, representado por reservatórios equivalentes.

Palavras-chave

Planejamento da Operação, Sistemas Hidrotérmicos, Programação Dinâmica Estocástica, Fechos Convexos, Processamento Paralelo.

Abstract

Henriques Dias, Bruno; Castro Souza, Reinaldo **Stochastic Dynamic Programming and Convex Hull Algorithm in the Hydrothermal Systems Operation Planning**. Rio de Janeiro, 2010. 123p. PhD. Thesis - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents a new approach for the expected-cost-to-go functions modeling used in the stochastic dynamic programming (SDP) algorithm. The proposed technique is applied to the long-term operation planning of electrical power systems. Using state space discretization, the convex hull algorithm is used for constructing a series of hyperplanes that composes a convex set. These planes represent a piecewise linear approximation for the expected-cost-to-go functions. The mean operation costs obtained by the proposed methodology for a single water inflow scenario were compared with those from the deterministic dual dynamic programming for the same inflow scenario. This sensitivity analysis shows the convergence of both methods and is used to determine the minimum discretization level necessary to model the expected-cost-to-go functions. From the obtained result the proposed methodology is extended to the analysis of a set of water inflow scenarios, where the expected-cost-to-go function is obtained by the mean operation cost to all the considered scenario in each discretization level. The applicability of the proposed methodology for two hydro plants in a cascade is demonstrated. Additionally, a case study using code parallelization is presented aiming at gaining computational performance, where the parallelization performance, as speedup and efficiency are measured. To finish with a simulation with the whole Brazilian electrical system considering aggregated reservoir is presented.

Keywords

Operation Planning, Hydrothermal Systems, Stochastic Dynamic Programming, Convex Hull, Parallel Processing.

Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Breve Histórico do Planejamento Energético no SEB	16
1.2.	Objetivo	19
1.3.	Publicações e Submissões Decorrentes da Pesquisa	19
1.4.	Organização da Tese	20
2	Estado da Arte em Planejamento da Operação de Sistemas Hidrotérmicos	22
2.1.	Planejamento de Sistemas Hidrotérmicos	22
2.2.	Planejamento da Operação de Médio Prazo	25
2.3.	Modelo de Reservatórios Equivalentes de Energia	29
2.4.	Revisão Bibliográfica	33
2.4.1.	Planejamento de Longo/Médio Prazo	34
2.4.2.	Planejamento de Curto Prazo	36
2.4.3.	Técnicas de Processamento Paralelo	38
2.4.4.	Técnicas de Inteligência Artificial	40
2.4.5.	Sistemas de Suporte à Decisão	47
2.4.6.	Programação Dinâmica	48
3	Programação Dinâmica Estocástica e Algoritmo de Fechos Convexos	52
3.1.	Introdução	52
3.2.	Programação Dinâmica Estocástica – Formulação do Problema	53
3.2.1.	Função Objetivo	54
3.2.2.	Restrições	54
3.3.	Modelagem das Funções de Custo Futuro	56
3.3.1.	Introdução	56
3.3.2.	Exemplo Didático	56
3.3.3.	Método Proposto: Conjuntos Convexos	64
3.3.4.	Eliminação de Planos	69
4	Computação Paralela	72

4.1. Introdução	72
4.2. <i>Clusters</i> de Computadores	74
4.3. Métricas de Desempenho em Sistemas Paralelos	75
4.3.1. Fator de Aceleração	75
4.3.2. Fator de Aceleração Máximo	76
4.3.3. Eficiência	76
4.4. Interfaces de Programação Paralela	77
4.4.1. <i>Message Passing Interface</i> (MPI)	77
4.4.2. <i>Open Multi-Processing Application Program Interface</i> (OpenMP)	78
4.5. Proposta de Paralelização do Problema de Planejamento Energético	79
5 Simulações e Resultados	80
5.1. Introdução	80
5.2. Sistema Tutorial: obtenção das funções de custo futuro	80
5.3. Estudo de Caso 1: Sistema com dois reservatórios	88
5.3.1. Análise de Sensibilidade	90
5.3.2. Modelagem das Funções de Custo Futuro	90
5.3.3. Simulação com pós-estudo utilizando cenário médio	94
5.4. Estudo de Caso 2: processamento paralelo	96
5.5. Estudo de Caso 3: Sistema Elétrico Brasileiro	98
5.5.1. Simulação dos subsistemas Sul e Sudeste/Centro-Oeste	99
5.5.2. Simulação dos SEB completo	103
6 Conclusões	104
6.1. Conclusão	104
6.2. Trabalhos Futuros	105
7 Referências Bibliográficas	107

Lista de Figuras

Figura 1: Complementaridade hidrológica dos subsistemas	17
Figura 2: Modelagem dos sistemas hidrotérmicos no planejamento da operação	24
Figura 3: Representação da decisão operativa de um sistema hidrotérmico	28
Figura 4: Função de custo imediato, custo futuro e custo total (SILVA, 2001)	28
Figura 5: Sistema equivalente de energia	30
Figura 6: Sistema contendo sete usinas	31
Figura 7: Representação do sistema utilizado no exemplo didático	57
Figura 8: Aproximação da FCF construída no estágio 3	61
Figura 9: Aproximação da FCF construída no estágio 2	63
Figura 10: Aproximação da FCF construída no estágio 1	64
Figura 11: Exemplo de Conjuntos Convexo e Não-convexo	64
Figura 12: Pontos aleatórios no plano bidimensional	65
Figura 13: Algoritmo QuickHull – passo 1	65
Figura 14: Algoritmo QuickHull – passo 2	66
Figura 15: Algoritmo QuickHull – passo 3	66
Figura 16: Algoritmo QuickHull – passo 4	67
Figura 17: Conjunto convexo obtido pelo algoritmo QuickHull	67
Figura 18: Conjunto convexo no plano tridimensional: (a) conjunto aleatório de pontos e (b) Conjunto convexo obtido	68
Figura 19: Algoritmo da obtenção das funções de custo futuro utilizando fechos convexos.	69
Figura 29: Conjunto convexo obtido a partir dos custos calculados	70
Figura 30: Conjunto convexo com pontos artificiais.	70
Figura 31: Conjunto de planos de corte que aproximam a FCF	71
Figura 20: Cluster de computadores tipo <i>Beowulf</i> genérico.	74
Figura 21: Algoritmo da obtenção das funções de custo futuro utilizando fechos convexos e processamento paralelo	79
Figura 22: níveis de discretização do reservatório	81
Figura 23: Conjunto convexo do estágio três	83

Figura 24: Função de custo futuro aproximada obtida no terceiro estágio.	83
Figura 25: Função de custo futuro aproximada obtida no segundo estágio.	85
Figura 26: Função de custo esperado obtido no primeiro estágio	86
Figura 27: Aproximação da função de custo futuro para diferentes discretizações	86
Figura 28: Custos operativos do sistema com reservatório único	87
Figura 32: Diagrama esquemático das duas usinas do SEB utilizadas.	88
Figura 33: Mercado de energia considerado	89
Figura 34: Afluência incremental à usina de Sobradinho	91
Figura 35: função de custo futuro obtida no estágio 60	92
Figura 36: função de custo futuro obtida no estágio 59	92
Figura 37: função de custo futuro obtida no estágio 2	92
Figura 38: Geração hídrica e térmica	95
Figura 39: Energia armazenada no reservatório de Sobradinho	95
Figura 40: Energia armazenada no reservatório de Itaparica	96
Figura 41: Geração hídrica e térmica do caso em estudo	97
Figura 42: Fator de aceleração do algoritmo paralelo	98
Figura 43: Eficiência do algoritmo paralelo.	98
Figura 44: Função de custo futuro obtida no último estágio	99
Figura 45: Função de custo futuro obtida no estágio 59	100
Figura 46: Função de custo futuro obtida no estágio 2	100
Figura 47: Geração hidráulica e térmica do caso em estudo	101
Figura 48: Gráfico de armazenamento dos Subsistemas.	101
Figura 49: Fator de aceleração do algoritmo paralelo	102
Figura 50: Eficiência do algoritmo paralelo.	102
Figura 51: Geração hidráulica e térmica do SEB	103

Lista de tabelas

Tabela 1: Referências de planejamento de longo/médio prazo	36
Tabela 2: Referências de planejamento de curto prazo	37
Tabela 3: Referências de processamento paralelo	40
Tabela 4: Referências de inteligência artificial no planejamento energético	46
Tabela 5: Referências de sistemas de suporte à decisão	48
Tabela 6: Referências de programação dinâmica	50
Tabela 7: Dados da usina hidrelétrica São Simão (ONS)	57
Tabela 8: Dados das usinas termelétricas	57
Tabela 9: Cenário de aflúncias ao reservatório São Simão	58
Tabela 10: Volume do reservatório em relação às discretizações	58
Tabela 11: Decisões térmicas possíveis do caso exemplo	59
Tabela 12: Resultado dos cálculos da PDE no terceiro estágio	61
Tabela 13: Decisões térmicas no estágio 2 ($x_t = 50\%$, $y_t = alta$)	62
Tabela 14: Resultado dos cálculos da PDE no segundo estágio	62
Tabela 15: Resultado dos cálculos da PDE no primeiro estágio	63
Tabela 16: Características operativas da usina hidrelétrica	80
Tabela 17: Características operativas das usinas termelétricas	81
Tabela 18: Cenários de aflúncias considerados	81
Tabela 19: custos esperados do terceiro estágio	82
Tabela 20: Número de retas de corte obtidas no último estágio	84
Tabela 21: custos esperados do segundo estágio	84
Tabela 22: custos esperados do primeiro estágio	85
Tabela 23: Dados da usinas hidrelétricas consideradas.	88
Tabela 24: Dados operativos das usinas termelétricas	89
Tabela 25: Demanda considerada para os 5 anos do estudo (MW-Médio)	89
Tabela 26: comparação de resultados para diferentes níveis de discretização	90
Tabela 27: Custo esperado para três cenários de aflúncias	93
Tabela 28: Tempo total gasto em função do número de processadores utilizados	97
Tabela 29: Tempo de processamento	102

Lista de Abreviaturas

AG	Algoritmo Genético
CEPEL	Centro de Pesquisas de Energia Elétrica
EAD	Equação de Atendimento à Demanda
EAR_{max}	Energia Armazenável Máxima
EBH	Equação de Balanço Hídrico
EE	Estratégia Evolutiva
ENA	Energia Natural Afluenta
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FCF	Função de Custo Futuro
FCI	Função de Custo Imediato
FCT	Função de Custo Total
FLOPS	<i>Floating Point Operations per Second</i> – número de operações de ponto flutuante por segundo
FR	Fluxo em Rede
IA	Inteligência Artificial
LA	Lagrangeano Aumentado
LP	Lista de Prioridade
MLP	<i>Multi-Layer Perceptron</i>
MLT	Média de Longo Termo
MPI	<i>Message Passing Interface</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAR	Auto-regressivo Periódico (do inglês)

PC	Computador Pessoal (do inglês)
PD	Programação Dinâmica
PDAS	Programação Dinâmica por Aproximações Sucessivas
PDD	Programação Dinâmica Discreta
PDDD	Programação Dinâmica Dual Determinística
PDDE	Programação Dinâmica Dual Estocástica
PDE	Programação Dinâmica Estocástica
PDEA	Programação Dinâmica Estocástica Amostral
PDI	Programação Dinâmica Incremental
PIM	Programação Inteira Mista
PL	Programação Linear
PNL	Programação Não Linear
PPL	Problema de Programação Linear
PVM	<i>Parallel Virtual Machine</i>
RL	Relaxação Lagrangeana
RNA	Rede Neural Artificial
S	<i>Speedup</i> – Fator de aceleração
SA	<i>Simulated Annealing</i> – recozimento simulado
SEB	Sistema Elétrico Brasileiro
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOM	<i>Self-Organized Map</i> - Mapa auto-organizável
VAF	Volume Armazenado Final
OPENMP	<i>Open Multi-Processing Application Program Interface</i>