



Eduardo Thomaz Faria

**Aplicação de Teoria dos Jogos à Repartição da
Energia Firme de um Sistema Hidrelétrico**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica da PUC-Rio como requisito parcial para
obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Professores Orientadores:

Álvaro Veiga Filho, Docteur
Mario Veiga Ferraz Pereira, D.Sc.

Rio de Janeiro
Maio de 2004



Eduardo Thomaz Faria

**Aplicação de Teoria dos Jogos à Repartição da
Energia Firme de um Sistema Hidrelétrico**

Dissertação de Mestrado 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. Álvaro Veiga Filho
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Mario Veiga Ferraz Pereira
Co-Orientador
PSR Consultoria

Dr. João Lizardo Rodrigues Hermes de Araújo
UFRJ

Dr. Jerson Kelman
ANA

Dr. Sergio Granville
PSR Consultoria

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

Rio de Janeiro, 21 de maio de 2004

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

Eduardo Thomaz Faria

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-RJ em 2001 na área de Sistemas de Apoio à Decisão. Estagiou na empresa Mercados de Energia Ltda., onde participou ativamente de estudos relacionados à avaliação financeira de projetos; comercialização de energia; gerenciamento de risco e otimização físico/financeira para o setor elétrico e estudos de planejamento energético.

Ficha Catalográfica

Faria, Thomaz Eduardo

Aplicação de teoria dos jogos à repartição da energia firme de um sistema hidrelétrico / Eduardo Thomaz Faria ; orientadores: Álvaro Veiga Filho, Mario Veiga Ferraz Pereira. - Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

167 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Energia firme. 3. Alocação de custos. 4. Alocação de Benefícios. 5. Teoria dos jogos cooperativos. 6. Otimização linear. 7. Teoria marginalista. I. Veiga Filho, Álvaro. II. Pereira, Mario Veiga Ferraz. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

Aos meus pais, Sérgio Nilo e Vera Lúcia.

Aos meus irmãos, Francisco e Fernando.

Agradecimentos

Aos meus pais, pela educação, carinho e apoio, sem os quais este trabalho não poderia ter sido concluído.

Aos meus irmãos e família, pelos incentivos demonstrados durante todos os momentos.

Ao amigo Mário Veiga Ferraz Pereira, pela oportunidade de realização deste trabalho e pela orientação indispensável em todas as etapas do desenvolvimento.

Ao amigo Luiz Augusto Barroso, pela excelente orientação e imprescindível disposição em ajudar sempre que foi necessário.

Aos amigos Sérgio Granville e Rafael Kelman, por toda excelente orientação.

Aos amigos Jorge Trinkenreich, Frank Ávila e Priscila Lino, pelos ensinamentos e apoio.

À Cristiane Faria Coelho, pelo carinho e estímulo em todos os momentos.

Ao orientador Álvaro Veiga, pelo estímulo e apoio.

À CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos

A todos os amigos da PSR/Mercados de Energia.

Resumo

Faria, Eduardo Thomaz. **Aplicação de Teoria dos Jogos à Repartição da Energia Firme de Um Sistema Hidrelétrico**. Rio de Janeiro, 2004, 167 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo desta monografia é investigar a aplicação de distintas metodologias de alocação de energia firme de usinas hidrelétricas através da teoria dos jogos de coalizão. Mostra-se que não existe uma maneira “ótima”, única, de se fazer esta repartição, mas existem critérios para verificar se uma metodologia de repartição específica apresenta algum aspecto inadequado. Um desses critérios é a “justiça”. Mostra-se que este critério equivale a pertencer ao chamado “núcleo” de um jogo cooperativo. O cálculo da energia firme será formulado como um problema de otimização linear e serão investigadas vantagens e desvantagens de distintos métodos de alocação (a benefícios marginais, geração média no período crítico, última adição e “nucleolus”). Em seguida será desenvolvida uma aplicação do esquema Aumann-Shapley (AS) à repartição da energia firme de usinas hidrelétricas. Demonstra-se que além de robusto em relação aos tamanhos dos recursos e eficiente computacionalmente, este método fornece para o problema do firme uma alocação pertencente ao núcleo e, portanto, atende à condição de “justiça”. A aplicação do esquema AS será apresentada para o Sistema Brasileiro e serão comparados os resultados obtidos por este método com outros esquemas de alocação adotados no Sistema Hidrelétrico Brasileiro.

Palavras-chave

Engenharia Elétrica, Energia Firme, Alocação de Custos, Alocação de Benefícios, Teoria dos Jogos Cooperativos, Otimização Linear, Teoria Marginalista.

Abstract

Faria, Eduardo Thomaz. **Allocation of Firm Energy Rights Among hydro plants: a game theoretic approach**. Rio de Janeiro, 2004, 167 p. Master Thesis – Electrical Engineering Department, Catholic University of Rio de Janeiro.

The objective of this work is to investigate the application of different methodologies of allocation of firm energy rights among hydro plants using a game-theoretic framework. It is shown that there is not an optimal and unique approach to make this allocation but there are criteria to verify if a given approach presents any inadequate aspect. One of these criteria is the “justice”, or “fairness”. It is shown that this criterion is equivalent to the condition of the core of a cooperative game. The calculation of the firm energy will be formulated as a linear program and advantages/disadvantages of different allocation methods (marginal allocation, average production on the dry period, incremental allocation and “nucleolus”) will be investigated. Next, an application of the Aumann-Shapley (AS) scheme to the problem of allocation of firm energy rights will be developed. It is shown that, besides being robust and computationally efficient, this scheme provides an allocation that belongs to the core of the game and therefore meets the condition of “justice”. The AS scheme will be applied to the Brazilian system (composed of about 100 hydro plants) and the results obtained will be compared with the allocation schemes currently adopted in the Brazilian system.

Keywords

Electrical Engineering, Firm Energy, Cost Allocation, Benefit Allocation, Cooperative game theory, Linear Optimization, Marginal Theory.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	13
1.1. Energia firme de uma usina hidrelétrica	13
1.2. Energia firme de múltiplas usinas	14
1.3. Sinergia da operação integrada de usinas hidrelétricas	15
1.4. O problema da repartição de benefícios	16
1.5. Objetivos	18
1.6. Organização e principais resultados	18
2 ENERGIA FIRME DE SISTEMAS HIDRELÉTRICOS	22
2.1. Formulação como um problema de otimização – uma única usina	22
2.2. Formulação como um problema de otimização – múltiplas usinas	26
2.3. Aplicações do modelo para cálculo de energia firme.	29
2.4. Período Crítico	34
3 O PROBLEMA DA REPARTIÇÃO DOS BENEFÍCIOS	39
3.1. Teoria de Jogos Cooperativos	39
3.2. Condição para um jogo cooperativo	49
4 ALOCAÇÃO PELA GERAÇÃO MÉDIA NO PERÍODO CRÍTICO (GMPC)	59
4.1. Descrição do Método	59
4.2. Vantagens e Desvantagens do Método GMPC	61
5 ALOCAÇÃO A BENEFÍCIOS MARGINAIS (BM)	63
5.1. Descrição do Método	63
5.2. Alocação no Núcleo	64
5.3. Núcleo do Jogo Não Vazio	68

5.4. Vantagens e Desvantagens do Método	68
6 ALOCAÇÃO POR ÚLTIMA ADIÇÃO (UA)	70
6.1. Descrição do Método	70
6.2. Vantagens e Desvantagens do Método	71
7 ALOCAÇÃO PELO MÉTODO DO “NUCLEOLUS”	76
7.1. Definição do “Nucleolus”	76
7.2. Descrição do Método do “Nucleolus”	77
7.3. Definição do “Nucleolus” Proporcional	79
7.4. Vantagens e desvantagens do método	81
8 ALOCAÇÃO PELO MÉTODO AUMANN-SHAPLEY (AS)	82
8.1. Método por Benefício Incremental	83
8.2. Método de Shapley	83
8.3. Método Aumann-Shapley (AS)	85
8.4. Alocação no Núcleo	89
8.5. Vantagens e Desvantagens do Método AS	91
9 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DOS MÉTODOS DE ALOCAÇÃO	93
9.1. Resultados da aplicação a três sistemas-exemplo fictícios	93
9.2. Resultados: Sistema Interligado Brasileiro	100
9.3. Alocação da Energia Firme do Sistema Interligado Brasileiro	101
9.4. Resultados por cascata	107
9.5. Análise dos resultados: síntese geral	114
10 CONCLUSÕES	116
11 REFERÊNCIAS	119
12 ANEXO A – MÉTODO DO DIAGRAMA DE MASSAS (ou DIAGRAMA DE RIPPL).	127

12.1. Algoritmo recursivo	130
13 ANEXO B – ENERGIA ASSEGURADA E O SISTEMA BRASILEIRO	131
13.1. Certificados de Energia Assegurada (CEA)	131
13.2. Importância comercial dos CEAs	132
13.3. Cálculo dos CEAs – Sistema 100% hidroelétrico	132
13.4. Cálculo dos CEAs – sistema hidrotérmico	136
13.5. Outros Temas para Discussão na metodologia atual	139
14 ANEXO C –O MECANISMO DE REALOCAÇÃO DE ENERGIA	143
14.1. MRE: Motivação	143
14.2. O Mecanismo de Realocação de Energia	145
14.3. Exemplo de Aplicação do MRE	146
14.4. Vantagens e Limitações do MRE	151
15 ANEXO D – MÉTODO AUMANN-SHAPLEY: SEÇÕES AUXILIARES	153
15.1. Efeito da ordem de entrada na alocação por benefício incremental	153
15.2. Efeito do tamanho dos agentes no método de Shapley	155
15.3. Desenvolvimento do método AS a partir do método de Shapley: uma interpretação intuitiva.	157
16 Anexo E – Certificados de energia assegurada das usinas do Sistema Interligado Brasileiro.	162

Lista de figuras

Figura 1.1 - Gráfico de sucessivas aplicações do método de Rippl	14
Figura 2.1 - Resultados do cálculo da energia firme para 1 usina	31
Figura 2.2– Legenda das figuras usadas para representar usinas hidrelétricas	32
Figura 2.3 – Topologia dosistema-exemplo	32
Figura 2.4 – Resultados do cálculo da energia firme para 4 usinas	34
Figura 3.1 – Representação geométrica do núcleo	49
Figura 3.2 – Usinas em paralelo	54
Figura 3.3– Usinas em série	54
Figura 3.4 - Nova representação das usinas em série	56
Figura 5.1 – Exemplo do efeito do aumento do reservatório no método BM	69
Figura 9.2 – Cascata do rio Iguaçu	109
Figura 9.3 - Resultados dos três métodos de alocação das usinas do rio Iguaçu	109
Figura 9.4 - Cascata do rio Tocantins	110
Figura 9.5 - Resultados dos três métodos de alocação das usinas do rio Tocantins	110
Figura 9.6 - Cascata do rio São Francisco	111
Figura 9.7 - Resultados dos três métodos de alocação das usinas do rio Tocantins	112
Figura 9.8 – Cascata do rio Paraná e seus afluentes	113
Figura 9.9 - Resultados dos três métodos de alocação das usinas do rio Paraná e dos valores agregados das usinas de seus rios afluentes.	114

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Características físicas da usina do primeiro exemplo	30
Tabela 2.2 - Características físicas das 4 usinas segundo exemplo	33
Tabela 3.1 – Possíveis alocações de Energia Firme das usinas	48
Tabela 9.1 - Sistemas-exemplo	94
Figura 9.1– Topologia das cascatas dos sistemas-exemplo	94
Tabela 9.2 – Resultados dos quatro métodos de alocação aplicados ao CASO 1	95
Tabela 9.3 - Resultados dos quatro métodos de alocação aplicados ao CASO 2	97
Tabela 9.4 - Resultados dos quatro métodos de alocação aplicados ao CASO 3	99
Tabela 9.5 - Resultados dos métodos GMPC, UA, AS aplicados ao sistema hidrelétrico brasileiro e seus respectivos Certificados de Energia Assegurada	106