



Gustavo Alberto Amaral Ayala

**Aplicação de Teoria de Jogos à Alocação de
Capacidade Firme em um Sistema Térmico**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Prof. Cristiano Augusto Coelho Fernandes

Rio de Janeiro

Abril de 2008



Gustavo Alberto Amaral Ayala

**Aplicação de Teoria de Jogos à Alocação de
Capacidade Firme em um Sistema Térmico**

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.

Dr. Cristiano Augusto Coelho Fernandes
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Dr. Luiz Augusto Nóbrega Barroso
PSR Consultoria Ltda

Dr. Sérgio Granville
PSR Consultoria Ltda

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

Rio de Janeiro, 11 de abril de 2008

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

Gustavo Alberto Amaral Ayala

Graduou-se em Engenharia Elétrica na PUC-RJ em 2005 na área de Sistemas de Apoio à Decisão. Estagiou na empresa PSR Consultoria em 2005, onde participou de estudos relacionados à avaliação financeira de projetos; desenho de tarifas; gerenciamento de risco. Obteve o grau de Mestre em Economia Matemática no IMPA em fevereiro de 2008.

Ficha Catalográfica

Ayala, Gustavo Alberto Amaral

Aplicação de teoria de jogos à alocação de capacidade firme em um sistema térmico / Gustavo Alberto Amaral Ayala ; orientador: Cristiano Augusto Coelho Fernandes. – 2008.

109 f. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Programação estocástica. 3. Medidas de risco. 4. Certificados de capacidade firme. 5. Teoria dos jogos cooperativos. 6. Shpley. I. Fernandes, Cristiano Augusto Coelho. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

Essa dissertação é dedicada a minha família.

Agradecimentos

Agradeço a minha mãe e ao meu irmão pelo apoio, carinho e incentivos. Ao meu orientador Mario Veiga pelas oportunidades e pela excelente e competente orientação em todas as etapas da tese. Ao professor e orientador Cristiano Fernandes pela orientação e pelas oportunidades concedidas. Ao professor e orientador Sergio Granville pela dedicação, orientação, contribuições e apoio. Ao amigo Raphael Chabar pela dedicação e contribuição no desenvolvimento da tese. Ao amigo Luiz Augusto pelo apoio, motivação e pelas discussões fundamentais para o desenvolvimento da tese.

Aos amigos Bernardo Bezerra e Alexandre Street pela motivação, apoio, dedicação e discussões diárias. Ao amigo Luiz Carlos pelas discussões e contribuições. Ao Gerson Couto pelas revisões minuciosas.

Agradeço também a PUC - Rio pelo excelente ambiente de pesquisa. E a todos da PSR que me proporcionaram um excelente ambiente para as discussões e desenvolvimento da tese.

Resumo

Ayala, Gustavo Alberto Amaral; Fernandes, Cristiano Augusto Coelho (Orientador). **Aplicação de Teoria de Jogos à Alocação de Capacidade Firme em um Sistema Térmico**. Rio de Janeiro, 2008. 109p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O objetivo desta dissertação é analisar a aplicação de metodologias de alocação de capacidade firme de usinas termelétricas através da teoria dos jogos cooperativos e suas conseqüências na cooperação entre os agentes. 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 sentido de justiça equivale a pertencer ao chamado “núcleo” de um jogo cooperativo, onde não há subsídio de um subgrupo por outro. O cálculo da capacidade firme ou Capacidade de Suprimento de Carga será formulado como um problema de otimização linear e serão investigadas vantagens e desvantagens de distintos métodos de alocação (benefícios marginais, última adição, Nucleolus, Shapley). A aplicação desses métodos tem um crescimento exponencial de esforço computacional, o método de Aumann-Shapley abordado em seguida fornece para o problema de alocação de capacidade firme uma solução computacional mais eficiente, embora em sua descrição aparentemente o método aumente o esforço computacional. Em seguida foram realizados resultados numéricos com sistemas genéricos de pequeno porte.

Palavras-chave

Capacidade Firme, Mercado de Capacidade, Teoria dos Jogos Cooperativos, Otimização Estocástica, Aumann-Shapley, medidas de Risco.

Abstract

Ayala, Gustavo Alberto Amaral; Fernandes, Cristiano Augusto Coelho (Advisor). **Allocation of Firm Capacity Rights Among Thermal Plants: A Game Theoretical Approach**. Rio de Janeiro, 2008, 109p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The objective of this work is to investigate the application of different methodologies of allocation of firm capacity rights among thermal plants using a game-theoretic framework and the consequences in the cooperation among the agents. 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 a one sense of justice is equivalent to the condition of the core of a cooperative game. The calculation of the firm capacity will be formulated as a linear program and advantages/disadvantages of different allocation methods (marginal allocation, incremental allocation, Nucleolus, Shapley) will be investigated. The complexities of these methods are exponential, so it will be shown that the Aumann-Shapley (AS) scheme to the problem of allocation of capacity rights will be more efficient. Numerical results about the difference allocations in these methods are presented in general smalls systems.

Keywords

Firm Capacity, Capacity Market, Cooperative game theory, Stochastic Optimization, Aumann-Shapley, Risk measures.

Sumário

1. Introdução	12
1.1. O processo de Reforma no Setor Elétrico e a garantia de expansão da oferta	12
1.2. Uso dos certificados para assegurar Segurança no Suprimento	15
1.3. Capacidade Firme de um sistema	16
1.4. Cálculo da CSD de um sistema	16
1.5. Capacidade Firme x Energia Firme	18
1.6. A repartição dos certificados de Capacidade Firme entre os geradores	19
1.7. Objetivos	19
1.8. Organização da Tese	20
2. Modelagem Probabilística	22
2.1. Representação da variável aleatória capacidade de geração	22
2.2. Convolução	22
3. Critérios de Confiabilidade	25
3.1. Medidas de Confiabilidade	25
3.2. Medidas de Risco	28
3.3. Medida de Risco Coerente	33
4. Cálculo dos Certificados de Capacidade Firme	36
4.1. Cálculo da Capacidade de Suprimento da Demanda (CSD)	37
4.2. Sensibilidade com Relação à Potência	41
4.3. Dividindo ganhos entre duas usinas: um conceito de justiça	45
5. Teoria dos Jogos Cooperativos	50
5.1. Revisão Bibliográfica	50
5.2. Conceitos Básicos	51
5.3. O Conceito de Núcleo de um jogo	52
5.4. Condição para um jogo cooperativo	56
6. Alocação Marginal dos Benefícios	62
6.1. Noção Intuitiva da Alocação Marginal	62
6.2. Alocação no Núcleo	64
6.3. Núcleo do Jogo Não Vazio	67
6.4. Vantagens e Desvantagens do Método	68
7. O Método do Nucleolus	70
7.1. Definição do Nucleolus	70
7.2. Principais Resultados da Alocação por Nucleolus	72
7.3. Descrição do Método do Nucleolus	72
7.4. Vantagens e desvantagens do método	74
8. O Método de Alocação de Shapley	75
8.1. Método por Ganho Incremental	75
8.2. Método de Shapley	76

9. Alocação de Aumann-Shapley	81
9.1. Divisão dos Agentes	81
9.2. O processo limite	82
9.3. Extensões do método de Aumann-Shapley	86
9.4. Aumann-Shapley para Cálculos de Certificados de Capacidade Firme	87
10. Resultados da Aplicação dos Métodos de Alocação	90
10.1. Caso com três usinas	90
10.2. Caso com dez usinas	93
11. Conclusões e Trabalhos Futuros	98
11.1. Conclusões	98
11.2. Trabalhos Futuros	99
12. Referências bibliográficas	100
13. Apêndice	104
13.1. Análise das restrições do problema de maximização da carga	104
13.2. Relação entre a LOLP e EENS	105
13.3. CVaR como um operador linear	106
13.4. CVaR como aproximação convexa do VaR	108

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Variação da Oferta e Demanda ao longo do tempo	17
Figura 2.1 – Convolução dos Geradores	23
Figura 3.1 - Ilustração da Convexidade do operador $[\cdot]^+$	31
Figura 4.1 – Comportamento da restrição EENS em função de D	40
Figura 4.2 – Distribuição de geração de Capacidade obtida por Convolução	43
Figura 4.3 – Representação geométrica do núcleo	48
Figura 8.1 – Divisão igualitária dos ganhos com a cooperação	78
Figura 10.1 – Alocação de potência firme para três usinas	93
Figura 10.2 – Alocação de potência firme para dez usinas	97
Figura 13.1 – Ilustração da melhor aproximação convexa para $1_{(0,\infty)}(z)$	109

Lista de tabelas

Tabela 3.1. Exemplo - Dados das usinas térmicas	35
Tabela 3.2. Exemplo - Cenários de capacidade	35
Tabela 4.1. Exemplo - Dados das usinas térmicas	45
Tabela 4.2. Exemplo - Cenários de capacidade	46
Tabela 4.3 – Soluções propostas de repartições de Capacidade Firme	47
Tabela 5.1. Exemplo - Dados das usinas térmicas	54
Tabela 5.2 – Capacidade Firme das Coalizões	55
Tabela 5.3 – Alocações de capacidade Firme das usinas na Solução 1	56
Tabela 5.4 – Alocações de capacidade Firme das usinas na Solução 2	56
Tabela 5.5 – Alocações de capacidade Firme das usinas na Solução 3	56
Tabela 6.1. Dados das usinas térmicas	68
Tabela 6.2 – Alocações de capacidade Firme das usinas na Solução 2	68
Tabela 7.1 – Alocações de capacidade Firme das usinas na Solução 1	70
Tabela 7.2 – Alocações de capacidade Firme das usinas na Solução 2	71
Tabela 8.1 – Alocações de Shapley	80
Tabela 10.1. Dados das usinas térmicas	90
Tabela 10.2. Capacidades Firme	91
Tabela 10.3. Nucleolus	92
Tabela 10.4. Shapley	92
Tabela 10.5. Resumo dos certificados de Capacidades Firme	93
Tabela 10.6 – Características das usinas que compõem o sistema	94
Tabela 10.7 – Resumo dos certificados firme dos métodos	94