



**Pablo Motta Ribeiro**

**Remuneração dos Serviços Ancilares de Suporte de  
Potência Reativa e Reserva de Potência Quando Providos  
por Geradores**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientadores: Ricardo Bernardo Prada  
Albert Cordeiro Geber de Melo

Rio de Janeiro, abril de 2005



**Pablo Motta Ribeiro**

## **Remuneração dos Serviços Ancilares de Suporte de Potência Reativa e Reserva de Potência Quando Providos por Geradores**

Dissertação de Mestrado apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Dr. Ricardo Bernardo Prada**  
Orientador  
DEE/PUC-Rio

**Prof. Dr. Albert Cordeiro Geber de Melo**  
Co-Orientador  
CEPEL / IME / UERJ

**Dr. Luiz Guilherme Barbosa Marzano**  
CEPEL

**Dr. João Ricardo Paes de Barros**  
CHESF

**Prof. José Eugênio Leal**  
Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 01 de abril de 2005

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

**Pablo Motta Ribeiro**

Graduou-se em engenharia elétrica em 1999 pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Atualmente trabalha como pesquisador no Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL.

Ficha Catalográfica

Ribeiro, Pablo Motta

Remuneração dos serviços ancilares de reserva de potência e suporte de potência reativa quando providos por geradores / Pablo Motta Ribeiro ; orientador: Ricardo Bernardo Prada. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Engenharia Elétrica, 2004.

144 f. ; 30 cm

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

Incluí referências bibliográficas.

1. Engenharia Elétrica – Teses. 2. Serviços ancilares. 3. Suporte de potência reativa. 4. Reserva de potência. 5. Teoria dos jogos cooperativos. 6. Fluxo de potência ótimo. 7. Confiabilidade composta. I. Prada, Ricardo Bernardo. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

À minha esposa, Marcia, e sua filha, Andressa

Aos meus pais, Jorge e Cida

À minha irmã, Paloma

## Agradecimentos

Aos professores e orientadores Ricardo Prada e Albert, pela orientação e conhecimentos partilhados ao longo deste trabalho.

À Marcia e Andressa, pela paciência e compreensão nos momentos difíceis.

Aos amigos Luiz Guilherme e Javier, pela assistência e apoio no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos do CEPEL, que sempre me apoiaram ao longo deste trabalho.

Aos amigos da PUC, pelo convívio agradável e pelo apoio técnico recebido.

Ao Centro de Pesquisas em Energia Elétrica, pela disponibilização do tempo e das ferramentas computacionais que propiciaram a conclusão deste trabalho.

À Pontifícia Universidade Católica, pelo suporte técnico e financeiro.

## Resumo

Ribeiro, Pablo Motta. **Remuneração dos Serviços Ancilares de Suporte de Potência Reativa e Reserva de Potência Quando Providos por Geradores**. Rio de Janeiro, 2005. 144p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta metodologias para definir a remuneração dos geradores que provêem serviços ancilares em função do benefício proporcionado ao sistema. São analisados os serviços ancilares de suporte de potência reativa e reserva de potência. Para o serviço ancilar de suporte de potência reativa, o valor do benefício proporcionado pelos geradores é obtido por meio do custo evitado de alocação de novas fontes de potência reativa. Já para o serviço ancilar de reserva de potência, o benefício é calculado a partir da redução observada no valor esperado de energia não suprida, multiplicada pelo custo unitário de interrupção do sistema de potência. O valor de benefício proporcionado por cada serviço ancilar é determinado por meio de um algoritmo de pontos interiores em um problema de fluxo de potência ótimo. A remuneração que cabe a cada gerador é definida por meio do emprego do método de repartição de custos de Aumann-Shapley, oriundo da Teoria dos Jogos Cooperativos. A aplicação deste método garante que a repartição do benefício entre os geradores seja realizada de forma justa e eficiente. As metodologias propostas para são ilustradas em dois sistemas de potência distintos: o sistema IEEE-RTS e o sistema Sul-Sudeste Brasileiro. Os resultados obtidos são discutidos e a eficácia da metodologia é analisada.

## Palavras-chave

serviços ancilares; reserva de potência; suporte de potência reativa; teoria dos jogos cooperativos; fluxo de potência ótimo; confiabilidade composta

## **Abstract**

Ribeiro, Pablo Motta. **Pricing the Ancillary Services of Reactive Power Supply and Generation Reserve When Provided by Generators**. Rio de Janeiro, 2005. 144p. M.Sc. Dissertation – Electrical Engineering Department, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work presents methodologies to define the remuneration of the generators that provide ancillary services to the power system as a function of the benefit provided to the system. In this work the ancillary services considered are the reactive power supply and the generation reserve. To the ancillary service of reactive power supply, the benefit provided by the generators is calculated by the avoided cost of new reactive power sources. The benefit provided by the ancillary service of generation reserve is calculated as the reduction on the expected energy not supplied, multiplied by the interruption cost of the power system. An optimum power flow is used to determine the benefit provided by each ancillary service. The remuneration of each generator is defined through the cost allocation method of Aumann-Shapley, which belongs to the Cooperative Game Theory. The Aumann-Shapley method guarantees that the payment partition among the generators is fair and efficient. The proposed methodology is applied to the IEEE-RTS power system and the Brazilian South-Southwest power system. The numerical results are discussed and the efficiency of the methodology is analyzed.

## **Key words**

ancillary services; generation reserve; reactive power supply; cooperative game theory; optimum power flow; composite reliability

## Sumário

1	Introdução	15
1.1.	Considerações Gerais	15
1.2.	Objetivo	16
1.3.	Estado da Arte	17
1.4.	Estrutura da Dissertação	21
2	Métodos de Repartição de Custos	23
2.1.	Introdução	23
2.2.	Conceitos Básicos	24
2.3.	Exemplo Ilustrativo	28
2.4.	Método Nucleolus	30
2.5.	Método dos Custos Marginais	33
2.6.	Método dos Custos Incrementais	36
2.7.	Método de Shapley	38
2.8.	Método de Shapley Modificado	39
2.9.	Método de Aumann-Shapley	41
2.10.	Conclusões	44
3	O Problema de Fluxo de Potência Ótimo	46
3.1.	Introdução	46
3.2.	Fluxo de Potência	47
3.2.1.	Método de Newton-Raphson	49
3.3.	Fluxo de Potência Ótimo	50
3.3.1.	Restrições de Igualdade	51
3.3.2.	Restrições de Desigualdade	53
3.3.3.	Funções-objetivo	54
3.4.	Resolução do Problema do FPO	57
3.4.1.	Método de Pontos Interiores	58
3.4.2.	Condições de Otimalidade	59
3.4.3.	Resolução do Sistema de Equações	60
3.4.4.	Passo Primal-Dual	62

3.4.5. Atualização do Parâmetro Barreira	62
3.4.6. Algoritmo de Solução	63
3.5. A Função Valor Ótimo de um Problema de Otimização	64
3.6. Conclusões	65
4 Análise de Confiabilidade em Sistemas de Potência	67
4.1. Introdução	67
4.2. Níveis Hierárquicos de Confiabilidade	68
4.3. Conceitos Gerais	69
4.4. Definição de Algumas Funções-Teste	72
4.4.1. Função-Teste para LOLP	72
4.4.2. Função-Teste para EPNS	72
4.4.3. Função-Teste para LOLE	72
4.4.4. Função-Teste para EENS	73
4.5. Métodos de Seleção de Estados	73
4.5.1. Método de Enumeração de Estados	74
4.5.2. Simulação de Monte Carlo	75
4.5.3. Cálculo da Precisão das Estimativas	76
4.6. Análise de Desempenho	77
4.6.1. Etapa de Configuração de Estados	77
4.6.2. Etapa de Pré-Solução	78
4.6.3. Etapa de Solução	78
4.6.4. Etapa de Pós-Solução	79
4.6.5. Etapa de Medidas Corretivas	79
4.7. Algoritmo de Simulação Monte Carlo Não-Sequencial	79
4.8. Conclusões	80
5 Metodologia para Remuneração do Serviço Ancilar de Suporte de Potência Reativa Quando Provido por Geradores	82
5.1. Introdução	82
5.2. O Problema de Mínimo Custo de Instalação de Novas Fontes de Potência Reativa	84
5.3. Aplicação do Método de Aumann-Shapley à Metodologia Proposta	86
5.4. Algoritmo de Solução	89
5.5. Exemplo Numérico	91
5.6. Resultados Numéricos	97
5.7. Conclusões	103

6 Metodologia para Remuneração do Serviço Ancilar de Reserva de Potência Quando Provido por Geradores	105
6.1. Introdução	105
6.2. O Problema de Mínimo Custo de Corte de Carga	108
6.3. Aplicação do Método de Aumann-Shapley à Metodologia Proposta	110
6.4. Algoritmo de Solução	113
6.5. Exemplo Numérico	116
6.6. Resultados Numéricos	122
6.7. Conclusões	126
7 Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	128
8 Referências Bibliográficas	131
9 Apêndice A – Método de Aumann-Shapley	135
10 Apêndice B – Dados de Entrada para o Sistema-Exemplo	139
11 Apêndice C – Resultados Numéricos para a Metodologia de Precificação do Serviço Ancilar de Suporte de Potência Reativa	141
12 Apêndice D – Resultados Numéricos para a Metodologia de Precificação do Serviço Ancilar de Reserva de Potência	144

## Lista de figuras

Figura 2-1 – Definição Gráfica do Núcleo	27
Figura 2-2 – Representação Geométrica do Núcleo	30
Figura 2-3 – Representação gráfica dos custos marginais	33
Figura 2-4 – Sobre-remuneração do método de custos marginais	35
Figura 2-5 – Custo Incremental do Serviço – Seqüência 1-2-3	37
Figura 2-6 – Custo Incremental do Serviço – Seqüência 1-3-2	38
Figura 2-7 – Número de Combinações x Número de Agentes	40
Figura 2-8 – Custo Incremental Causado pelo Agente i	42
Figura 4-1 – Níveis Hierárquicos de Confiabilidade	68
Figura 4-2 – Diagrama de Estados dos Componentes	70
Figura 4-3 – Modelo de Markov a Dois Estados	70
Figura 5-1 – Sistema-Exemplo de 5 Barras	91
Figura 5-2 – Valor Unitário e Remuneração dos Geradores que Provêm o Serviço Ancilar de Suporte de Potência Reativa	96
Figura 5-3 – Diagrama Unifilar do Sistema IEEE-RTS	98
Figura 5-4 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema IEEE-RTS	99
Figura 5-5 – Remuneração dos Geradores – Sistema IEEE-RTS	100
Figura 5-6 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema S-SE (1)	100
Figura 5-7 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE (1)	101
Figura 5-8 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema S-SE (2)	101
Figura 5-9 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE (2)	101
Figura 5-10 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema S-SE (3)	101
Figura 5-11 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE (3)	102
Figura 5-12 – Valor Unitário de Aumann-Shapley – Sistema S-SE (4)	102
Figura 5-13 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE (4)	102
Figura 6-1 – Representação Esquemática da Reserva de Potência	106
Figura 6-2 – Custo de Oportunidade dos Geradores ao Prover Reserva de Potência	107
Figura 6-3 – Cálculo dos Limites de Geração e de Reserva de Potência	113
Figura 6-4 – Remuneração dos Geradores que Provêm o Serviço Ancilar de Reserva de Potência	120
Figura 6-5 – Valor Unitário Esperado de Aumann-Shapley – Sistema IEEE-RTS12	

Figura 6-6 – Remuneração dos Geradores – Sistema IEEE-RTS	125
Figura 6-7 – Valor Unitário Esperado de Aumann-Shapley – Sistema S-SE	125
Figura 6-8 – Remuneração dos Geradores – Sistema S-SE	126
Figura A-1 – Caminho ABA	135

## Lista de tabelas

Tabela 2.1 – Resultado da Repartição de Custos (milhões)	29
Tabela 2.2 – Repartição de Custos pelo Método de Custos Marginais	34
Tabela 2.3 – Repartição pelo Método de Custos Marginais com Fator de Ajuste $\phi$	35
Tabela 2.4 – Repartição pelo Método dos Custos Incrementais – Sequência 1-2-3	36
Tabela 2.5 – Repartição pelo Método dos Custos Incrementais – Sequência 1-3-2	37
Tabela 2.6 – Repartição de Custos Alocado pelo Método de Shapley	38
Tabela 2.7 – Repartição de Custos pelo Método de Shapley – Custos Unitários	39
Tabela 2.8 – Custos Alocados pelo Método de Shapley Modificado	40
Tabela 2.9 – Repartição pelo Método de Shapley Modificado – Custos Unitários	40
Tabela 2.10 – Repartição de Custos pelo Método de Aumann-Shapley	43
Tabela 2.11 – Vantagens e Desvantagens dos Métodos de Repartição de Custos	45
Tabela 5.1 – Parâmetros da Nova Fonte de Suporte de Potência Reativa	92
Tabela 5.2 – Custo Evitado de Instalação de Novas Fontes de Potência Reativa	93
Tabela 5.3 – Limites de Geração de Potência Reativa	94
Tabela 5.4 – Custos Marginais Associados aos Limites de Potência Reativa	94
Tabela 5.5 – Valor Unitário de Aumann-Shapley (\$/MVA <sub>r</sub> )	94
Tabela 5.6 – Remuneração dos Geradores	95
Tabela 6.1 – Limites de Potência Ativa e Reservas de Potência dos Geradores	117
Tabela 6.2 – Limites Ajustados de Potência Ativa	117
Tabela 6.3 – Custo Interrupção do Sistema-Exemplo	117
Tabela 6.4 – Limites de Reserva de Potência dos Geradores (MW)	118
Tabela 6.5 – Valor Esperado dos Custos Marginais Associados aos Limites de Reserva de Potência	118
Tabela 6.6 – Valor Unitário Esperado de Aumann-Shapley (\$/MW)	119
Tabela 6.7 – Remuneração dos Geradores	120

Tabela A-1 – Dados de Barras AC para o Sistema-Exemplo	139
Tabela A-2 – Dados de Circuitos para o Sistema-Exemplo	139
Tabela A-3 – Dados Estocásticos de Circuitos para o Sistema-Exemplo	139
Tabela A-4 – Dados de Usinas para o Sistema-Exemplo	140
Tabela A-5 – Dados de Estocásticos de Usinas para o Sistema-Exemplo	140
Tabela A-6 – Limites de Tensão para o Sistema Exemplo	140
Tabela B-1 – Remuneração dos Geradores que Provêem o Serviço Ancilar de Suporte de Potência Reativa – Sistema IEEE-RTS	141
Tabela B-2 – Remuneração dos Geradores que Provêem o Serviço Ancilar de Suporte de Potência Reativa - Sistema Sul-Sudeste	143
Tabela C-1 –Remuneração dos Geradores que Provêem o Serviço Ancilar de Reserva de Potência – Sistema IEEE-RTS	144
Tabela C2 –Remuneração dos Geradores que Provêem o Serviço Ancilar de Reserva de Potência – Sistema Sul-Sudeste	144