



**Giuliana Cassará de Castellammare Scott Siciliano**

**Estratégias de Compra de Contratos em Leilões  
Multiproduto de Fontes Renováveis**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC - Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Dr. Alexandre Street de Aguiar

Rio de Janeiro

Março de 2010



**Giuliana Cassará de Castellammare Scott Siciliano**

**Estratégias de Compra de Contratos em  
Leilões Multiproduto de Fontes Renováveis**

Dissertação 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. Alexandre Street de Aguiar**  
**Orientador**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Prof. Pedro Américo Moretz-Sohn David**  
EPE – Empresa de Pesquisa Energética

**Prof. Sérgio Granville**  
PSR Consultoria

**Prof. Delberis Araújo Lima**  
Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

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

Rio de Janeiro, 25 de março de 2010.

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

### **Giuliana Cassará de Castellammare Scott Siciliano**

Giuliana Cassará é formada em Engenharia de Produção Elétrica pela PUC - Rio (2007). Atualmente, finaliza o seu mestrado (2010) na mesma instituição. Dentre os temas de sua linha de pesquisa destacam-se: medidas de risco para modelos de decisão sob incerteza, modelagem de estratégias de contratação para os leilões de contratos de suprimento de energia, análise de risco de carteiras de contratos de curto e médio prazo, análise de impactos de medidas regulatórias, estudos econômico-financeiros de investimento em centrais de geração de energia renováveis alternativas e estudos da complementaridade destas.

#### Ficha Catalográfica

Siciliano, Giuliana Cassará de Castellammare Scott

Estratégias de compra de contratos em leilões multiproduto de fontes renováveis / Giuliana Cassará de Castellammare Scott Siciliano; orientador: Alexandre Street de Aguiar. – 2010.

99 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Comercialização de energia elétrica. 3. Leilões de contratos. 4. Fontes renováveis de energia. 5. Conditional value-at-risk. 6. Otimização estocástica. 7. Medidas de risco I. Alexandre Street de Aguiar. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3

A minha mãe Maria Manuela Teresa Cassará de Castellammare e Siciliano  
pelo apoio, amor e bons conselhos recebidos ao longo de minha vida  
acadêmica.

## **Agradecimentos**

Aos meus amados pais, Maria Manuela e Luiz Fernando Scott Siciliano, aos meus irmãos, Gisella, Fernando e Umberto, à minha avó, Maria Helena, e a toda minha família, pelas alegrias compartilhadas, por todo o carinho, incentivo, confiança, apoio e paciência.

Ao meu professor e orientador Alexandre Street, pela motivação, ensinamentos, suporte, atenção e confiança oferecidos por toda minha vida acadêmica.

Ao Dr. Pedro David, pela atenção, apoio, explicações e ensinamentos ao longo da minha dissertação.

Ao Rodrigo Barcellos Secchin, pelo carinho, suporte, companheirismo e amor, sempre presente ao meu lado, em todos os momentos da minha vida.

Ao professor Welles Morgado pela atenção, ensinamentos e conselhos ao longo de minha graduação e pós graduação.

Aos meus amigos, aos meus professores, e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pela infra estrutura.

## Resumo

Siciliano, Giuliana Cassará de Castellammare Scott; Street, Alexandre (Orientador). **Estratégias de Compra de Contratos em Leilões Multiproduto de Fontes Renováveis**. Rio de Janeiro. 2010. 99p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Atualmente, o mundo tem se voltado à promoção do desenvolvimento da energia proveniente de fontes renováveis, pois estas aparecem como uma alternativa para a redução do aquecimento global. No Brasil, as principais fontes de geração renováveis de energia são: geração de cogeração à bagaço de cana-de-açúcar (biomassa), eólica e pequenas centrais hidrelétricas (PCH). Atualmente, o grande desafio enfrentado por elas é comercialização de contratos lastreados em perfis de geração que, apesar de exibirem um baixo fator de emissões, são extremamente sazonais e incertos. Contudo, sabe-se que existe uma relevante complementaridade entre a disponibilidade dos seus recursos (colheita da cana, vento e hidrologia), que como consequência, promove a possibilidade de um ganho sinérgico com a formação de um portfólio contendo tais fontes. A sinergia entre os perfis de geração de uma biomassa e uma PCH foi recentemente estudada através de um modelo de otimização de portfólio com aversão a risco. Esta dissertação tem dois objetivos: (i) estender o modelo de comercialização integrada de fontes renováveis para considerar também a fonte de geração eólica, e (ii) utilizá-lo para definir a estratégia ótima de oferta (compra) da comercializadora em um leilão de compra de contratos de fontes renováveis no ACL. Dois formatos de leilão serão testados e comparados tanto em termos de benefício para a comercializadora, como em termos de participação final de cada fonte. Por fim, o objetivo (ii) preenche uma lacuna na literatura correspondente a ausência de modelos de oferta estratégica avessa a risco em leilões de contratos por parte da demanda.

## Palavras-chave

Comercialização de Energia Elétrica; Leilões de Contratos; Fontes Renováveis de Energia; *Conditional Value-at-Risk*; Otimização Estocástica; Medidas de Risco.

## Abstract

Siciliano, Giuliana Cassará de Castellammare Scott; Street, Alexandre (Advisor). **Strategic Demand-side Bidding in Multiproduct Contract Auctions of Renewable Energy**. Rio de Janeiro, 2010. 99p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nowadays, the world has turned to promoting the development of energy from renewable sources, because they appear as an alternative to reducing global warming. In Brazil, the main renewable energy sources are the thermoelectric co-generation of sugarcane bagasse (biomass), wind power and small hydro resources. Besides, the major challenge faced by them is the contracts trade guaranteed by generation profiles that, despite exhibiting a low emission factor, are highly seasonal and uncertain. However, it is known that there is an important complementarity between the availability of resources (sugar cane harvesting, wind and hydrology), which as a consequence, promotes the ability to gain a synergistic effect with the formation of a portfolio containing such sources. The synergy between the resources availability profile of biomass and a small hydro was recently studied by a model of portfolio optimization with risk aversion. This work has two objectives: (i) extend the portfolio trade model of renewable sources to consider also the a wind generation power plant, and (ii) define an optimal strategic bidding (demand side) for a trading company on a contract auction for renewable sources. Two auction formats will be tested and compared in terms of benefit to the energy trading company. Finally, the objective (ii) fills a gap in the literature corresponding to the absence of risk-averse bidding models for contract auctions on the demand side.

## Keywords

Energy Trade; Contract Auctions; Renewable Energy; Conditional Value-at-Risk; Stochastic Optimization; Risk Measures.

## Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Contratação de Energia no Brasil	14
1.2	Leilões de Energia no Brasil	14
1.3	Revisão Bibliográfica	16
1.4	Objetivo e Contribuições	17
1.5	Organização da Tese	18
2	SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO	20
2.1	Situação Atual do SEB	20
2.2	Ambientes de Comercialização	24
2.3	Mercado de Curto Prazo e Preço Spot	25
3	FONTES ALTERNATIVAS RENOVÁVEIS	27
3.1	Biomassa	27
3.2	Energia Eólica	31
3.3	Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH)	42
4	COMPLEMENTARIDADE DAS FONTES ALTERNATIVAS RENOVÁVEIS	46
5	DECISÃO SOB INCERTEZA	50
5.1	Medidas de Risco	51
5.2	Otimização de Portfolio	53
6	CONTRATOS DE ENERGIA ELÉTRICA	55
6.1	Contratos por Quantidade	55
6.2	Contratos por Disponibilidade	56
7	LEILÕES DE CONTRATOS DE ENERGIA	57
7.1	Modelo de Comercialização de Energia Renovável no ACL	59
8	ESTUDO DE CASO: OFERTA DE COMPRA CONJUNTA EM LEILÕES DE MÚLTIPLAS FONTES RENOVÁVEIS	72
8.1	Oferta de Energia de Biomassa	73
8.2	Oferta de Energia Eólica	75
8.3	Oferta de Energia pelas Pequenas Centrais Hidrelétricas	77
8.4	Preço Spot	79
8.5	Curvas de Oferta das Geradoras	80
8.6	Contrato de Venda para o Consumidor	83
8.7	Resultados	83



9	CONCLUSÃO	94
10	BIBLIOGRAFIA	95

## Lista de Figuras

Figura 2-1- Mapa com o sistema interligado nacional (Fonte: ONS [34])	21
Figura 2-2 - Diagrama Esquemático das Usinas Hidrelétricas do SIN (Fonte: ONS [34])	22
Figura 2-3 - Gráfico da Capacidade Instalada por Subsistema (Fonte: ANEEL [1])	23
Figura 2-4 - Gráfico da Distribuição do Mercado Consumidor por Subsistema (Fonte: ANEEL [1])	24
Figura 2-5 - Gráfico do Preço Spot Médio na Região Sudeste 2007-2009 (Fonte: CCEE [16])	26
Figura 3-1- Potência Instalada Acumulada no Mundo (Fonte: EWEA[26] e GWEC[24] )	32
Figura 3-2 - Capacidade "Nova" Instalada em 2008 no Mundo (Fonte: EWEA[26] e GWEC[24] )	33
Figura 3-3 - Mapa do Potencial Eólico Brasileiro (Fonte: Atlas do Potencial Eólico [4])	35
Figura 3-4 - Figura 12 - Aerogerador E-70 (Fonte: Wobben Windpower [50])	36
Figura 3-5- Curva da Potência do Aerogerador E-70 versus velocidade dos ventos (Fonte: Wobben[50])	39
Figura 3-6 - Gráfico dos Cenários de Ventos ao Longo do Ano	41
Figura 3-7 - Gráfico da Geração da Fazenda ao Longo do Ano	42
Figura 3-8 - mapa do potencial hidrelétrico brasileiro (Fonte: Atlas da Energia elétrica brasileira [6])	43
Figura 3-9 - exemplo de PCH (fonte: Portal PCH [38])	45
Figura 4-1 - Vazão Afluente no Reservatório de Sobradinho, 1931/32 (Fonte: Amarante ET AL [3])	46
Figura 4-2 - Produção de Parques Eólicos em 10% do Litoral do Ceará (Fonte: Amarante ET AL [3])	47

Figura 4-3 - Complementaridade Chuva - Ventos no Território Brasileiro (Fonte: [4])	47
Figura 4-4 - Complementaridade das Gerações de Energia - Vento no Sul e Hidro no Sudeste. (Fonte: [3])	48
Figura 4-5 - Perfil combinado: 58% de Geração PCH	49
Figura 4-6 - Perfil combinado: 58% de Geração PCH e 12% Biomassa	49
Figura 4-7 - combinado: 58% de Geração PCH, 12% Biomassa e 30% Eólica	49
Figura 5-1 - Comparação de CVaR para duas distribuições com o mesmo valor de VaR (Fonte: Street [45])	52
Figura 7-1 - Representação das Operações de Compra e Venda por Parte de uma Comercializadora.	60
Figura 7-2 - Oferta Geradoras da Fonte f no Leilão Dinâmico	65
Figura 7-3 - Oferta Geradoras da Fonte f no Leilão Estático	67
Figura 7-4 - Curva de Custo de Compra em Função da Quantidade Demandada por Cada Fonte	68
Figura 8-1 - Gráfico da Geração das Ofertantes de Biomassa em Função da Capacidade instalada	74
Figura 8-2 - Gráfico dos Cenários de Geração das Ofertantes de Eólica em Função da Potência Disponível	76
Figura 8-3 - Gráfico dos Cenários de Geração das Ofertantes de Eólica em Função do Lastro Contratual	77
Figura 8-4 - Gráfico dos Cenários de Geração das Ofertantes de PCH em Função da Capacidade instalada (MRE 2014)	78
Figura 8-5 - Gráfico dos Cenários de Geração das Ofertantes de PCH em Função do Lastro Contratual	79
Figura 8-6 - Gráfico com o Intervalo de Confiança de 90% dos Cenários de Preço Spot para o Mercado do Nordeste (2014)	80
Figura 8-7 - Gráfico com o Intervalo de Confiança de 90% dos Cenários de Preço Spot para o Mercado do Sudeste (2014)	80
Figura 8-8 - Curva de Ofertas Biomassa	81
Figura 8-9 - Curva de Ofertas Eólica	82
Figura 8-10 - Curva de Ofertas PCH	82

Figura 8-11 - Distribuição do Valor Presente da Renda Líquida (Leilão Dinâmico)	84
Figura 8-12 - Distribuição do Valor Presente da Renda Líquida	86
Figura 8-13 - Comparação valor esperado do lucro anual x $R^{\min}$	91
Figura 8-14 - Portfolio Ótimo em Função de $R^{\min}$ no Leilão Dinâmico	92
Figura 8-15 - Portfolio Ótimo em Função de $R^{\min}$ no Leilão Estático	92
Figura 8-16 - Disposição a Contratar por Quantidade no Leilão Dinâmico	93
Figura 8-17 - Disposição a Contratar por Quantidade no Leilão Estático	93

## Lista de Tabela

Tabela 2-1- Matriz energética brasileira (Fonte: ANEEL [1])	23
Tabela 3-1 - Consumo Mundial de combustíveis à base de madeira em 2005 (Fonte:WEC [51])	28
Tabela 3-2- Parâmetros Weibull - Fazenda Eólica	38
Tabela 3-3 - Coeficientes do Aerogerador E-70 (Fonte: Wobben[50])	40
Tabela 8-1 - Resultados Leilão Dinâmico	84
Tabela 8-2 - Resultados Dinâmico versus Estático	85
Tabela 8-3 - Sensibilidade $R^{\min}$ : Resultados Energéticos do Leilão Dinâmico	88
Tabela 8-4 - Sensibilidade $R^{\min}$ : Resultados Energéticos do Leilão Estático	88
Tabela 8-5 - Sensibilidade $R^{\min}$ : Resultados Financeiros do Leilão Dinâmico	89
Tabela 8-6 - Sensibilidade $R^{\min}$ : Resultados Financeiros do Leilão Estático	89