

**Francisco Ralston Fonseca**

**ESTRATÉGIAS DE SAZONALIZAÇÃO DA GARANTIA  
FÍSICA DE PCHS EM PORTFOLIOS PCH E BIOMASSA**

**Dissertação de Mestrado**

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.

Orientador: Álvaro Veiga

Co-orientador: Sergio Granville

Rio de Janeiro

Dezembro de 2009



**Francisco Ralston Fonseca**

**Estratégias de Sazonalização da Garantia  
Física de PCHs em Portfólios PCH e Biomassa**

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. Álvaro de Lima Veiga Filho**

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Sergio Granville**

Co-orientador

PSR Consultoria Ltda

**Prof. Alexandre Street de Aguiar**

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

**Luiz Augusto Barroso**

PSR Consultoria Ltda

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico

Rio de Janeiro, 10 de Dezembro de 2009

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

### **Francisco Ralston Fonseca**

Graduou-se em Engenharia Elétrica com ênfase nas áreas de Sistemas de Apoio à Decisão e Telecomunicações na PUC-Rio em 2004.

#### Ficha Catalográfica

Fonseca, Francisco Ralston

Estratégias de Sazonalização da Garantia Física de PCHs em Portfólios PCH e Biomassa / Francisco Ralston Fonseca ; orientador: Álvaro Veiga ; co-orientador: Sergio Granville. – Rio de Janeiro : PUC, Departamento de Engenharia Elétrica, 2009.

105 f. : il. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia elétrica – Teses. 2. Sazonalização da Garantia Física. 3. Comercialização de Energia Elétrica. 4. Conditional Value at Risk (CVaR). 5. Otimização Estocástica. 6. Energia Renovável. I. Veiga, Alvaro. II. Granville, Sergio. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica Letras. IV. Título.

CDD: 621.3

À minha família

## Agradecimentos

Agradeço a Bianca Tarrise da Fontoura, minha amada companheira, pelo amor, carinho e paciência.

À minha família. Ao meu pai Odemiro Artur Fonseca, minha mãe Denise Ralston Fonseca e meus irmãos (Isabel e Diogo), além de todos os demais, pelo carinho, amor e apoio nesta jornada.

Ao orientador Mario Veiga Ferraz Pereira, pela idéia original que resultou neste trabalho, por todas as oportunidades concedidas, pelo inestimável aconselhamento e pela formação acadêmica durante este período.

Ao orientador Sergio Granville, pela excelente orientação, pelos ensinamentos acadêmicos e pela amizade.

Ao orientador Álvaro Veiga Filho, pela motivação, ensinamentos e oportunidades concedidas durante toda minha vida acadêmica.

Ao grande amigo Bernardo Vieira Bezerra, um especial agradecimento por sua amizade e apoio pessoal desde o início da graduação e também durante este trabalho.

Ao grande amigo Luiz Augusto Barroso agradeço pela orientação, pela amizade e pelos incentivos acadêmicos e profissionais.

Ao CNPq, à CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo.

A todos os amigos da PSR Consultoria.

## Resumo

Fonseca, Francisco Ralston; Veiga, Alvaro. **Estratégias de Sazonalização da Garantia Física de PCHs em Portfólios PCH e Biomassa**. Rio de Janeiro, 2009. 105p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A busca por uma matriz limpa de geração de energia vem incentivando a expansão de fontes alternativas de geração de energia ao redor do mundo. No Brasil, Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs) e Usinas a Biomassa de Cana de Açúcar (Biomassa) vêm se mostrando alternativas atraentes nos últimos anos. No entanto, ambas as tecnologias são caracterizadas por perfis de geração sazonais (mas complementares). Este fato gera riscos que por muitas vezes inviabilizam a comercialização de maneira individual da energia produzida por essas usinas. As PCHs, em particular, têm uma opção de mitigação de parte desse risco participando do Mecanismo de Realocação de Energia (MRE). O MRE traz às PCHs a flexibilidade de sazonalizar sua Garantia Física ao longo do ano, o que se mostra uma ferramenta adicional para mitigar o risco da sazonalidade da geração hidráulica no Brasil. Neste trabalho, será estudado como a combinação de PCHs e Biomassas em um mesmo portfólio pode trazer ganhos sinérgicos para os Geradores. Em particular, será estudado como essa combinação altera a estratégia de sazonalização da Garantia Física da PCH participante do MRE e como essa sazonalização diferenciada resulta em benefícios para os geradores. Para isto, será proposto um modelo de otimização estocástica utilizado para simular o processo decisório de como sazonalizar a Garantia Física de PCHs combinadas com Biomassas em uma proporção fixa ou no contexto de otimização de portfólios compostos por estes dois tipos de usinas. Serão apresentados estudos de caso mostrando diferentes estratégias de comercialização de energia por parte destes Geradores e como a decisão de sazonalização da Garantia Física da PCH se comporta em cada um desses casos.

## Palavras-chave

Engenharia Elétrica; Sazonalização da Garantia Física; Comercialização de Energia Elétrica; Conditional Value at Risk (CVaR); Otimização Estocástica; Energia Renovável.

## Abstract

Fonseca, Francisco Ralston; Veiga, Alvaro (Advisor). **Firm Energy Monthly Allocation of SHPs in SHP and Biomass Portfolios**. Rio de Janeiro, 2009. 105p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The search for clean energy development has motivated the expansion of renewable sources of generation around the world. In Brazil, Small Hydro Plants (SHP) and Cogeneration from Sugarcane waste (Biomass) have proven themselves to be attractive alternatives during the last years. Nevertheless, both technologies have seasonal (yet complementary) availability. This fact results in financial risks that can make the commercialization of these plants energy individually too risky. SHPs have the option of mitigating their risk by joining the Energy Reallocation Mechanism (ERM). The ERM, additionally, gives the SHPs the flexibility of allocate its firm energy in different manners along the year, which can be a valuable tool in mitigating the risks due to the seasonal availability of these plants. In this work, the combination of SHPs and Biomass in a single portfolio will be studied as a tool to mitigate the risks each plant faces individually. In particular, we will study the impact that this combination has over the decision process of SHPs on how to allocate their firm energy and how this different allocation can prove to be beneficial to both generators. In order to do so, a stochastic optimization model will be proposed to simulate the decision process of the SHPs on how to allocate its firm energy when combined in a portfolio with a Biomass in a fixed proportion or in the context of portfolio optimization. Case studies will be presented showing different strategies of commercialization by these generators and how the firm energy allocation decision by the SHP changes in each case.

## Keywords

Electrical Engineering; Firm Energy Monthly Allocation; Electrical Energy Commercialization; Conditional Value at Risk (CVaR); Stochastic Optimization; Renewable Energy.

# Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	PCHs	16
1.2	USINAS A BIOMASSA DE CANA DE AÇÚCAR	16
1.3	PORTFÓLIO PCH E BIOMASSA	17
1.4	OBJETIVO	17
1.5	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	18
2	O SETOR ELÉTRICO BRASILEIRO	19
2.1	ASPECTOS FÍSICOS	19
2.2	REGULAMENTAÇÃO	22
2.2.1	AS DUAS REGRAS BÁSICAS PARA A SEGURANÇA DE SUPRIMENTO	22
2.2.2	OS AMBIENTES DE CONTRATAÇÃO – ACR E ACL	23
2.2.3	MERCADO DE CURTO PRAZO	26
2.2.4	PROCESSO DE FORMAÇÃO DE PREÇOS DO CCEE	27
2.2.5	O MECANISMO DE REALOCAÇÃO DE ENERGIA (MRE)	30
2.2.6	A SAZONALIZAÇÃO DA GARANTIA FÍSICA DAS USINAS NO MRE	32
3	RISCOS DE CONTRATAÇÃO DE PCHS E USINAS BIOMASSA	35
3.1	A VOLATILIDADE DO PREÇO DE CURTO PRAZO	35
3.2	POSSIBILIDADES DE CONTRATAÇÃO PARA AS PCHS E USINAS A BIOMASSA	38
3.3	O RISCO DE QUANTIDADE NO ACL	40
3.3.1	PCHs	40
3.3.2	USINAS BIOMASSA	44
4	UM MODELO DE SAZONALIZAÇÃO DA GARANTIA FÍSICA DE PCHS EM PORTFOLIOS PCH+BIOMASSA	48
4.1	SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS DE PLD E GERAÇÃO HIDRÁULICA	48
4.2	MODELAGEM DAS USINAS	50



4.2.1	PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS (PCHs)	50
4.2.2	USINAS À BIOMASSA DE CANA DE AÇÚCAR	53
4.3	A MODELAGEM DA RECEITA OPERACIONAL LÍQUIDA DAS USINAS	54
4.4	A MODELAGEM DAS RESTRIÇÕES	55
4.4.1	PRIMEIRA RESTRIÇÃO: GARANTIA FÍSICA ANUAL	55
4.4.2	SEGUNDA RESTRIÇÃO: LIMITE SUPERIOR DE SAZONALIZAÇÃO MENSAL	56
4.4.3	TERCEIRA RESTRIÇÃO: RISCO FINANCEIRO (CVAR)	56
4.5	A FUNÇÃO OBJETIVO	59
5	ESTUDOS DE CASO E RESULTADOS	61
5.1	CASO DO PROPRIETÁRIO DE UMA PCH	61
5.2	CASO DO PROPRIETÁRIO DE UMA USINA BIOMASSA	66
5.3	CASO DA COMERCIALIZADORA	74
6	CONCLUSÃO	82
7	REFERÊNCIAS	86
8	ANEXO A – DESPACHO HIDROTÉRMICO E O PREÇO SPOT	89
8.1	SISTEMAS PURAMENTE TÉRMICOS	89
8.1.1	DESPACHO ECONÔMICO	89
8.1.2	SOLUÇÃO DO DESPACHO ECONÔMICO	90
8.1.3	PREÇO SPOT	90
8.1.4	VENDA NO MERCADO DE CURTO PRAZO E RENDA LÍQUIDA	90
8.1.5	EXEMPLO	91
8.2	SISTEMAS HIDROTÉRMICOS	91
8.2.1	CUSTOS DE OPORTUNIDADE	92
8.2.2	ÁRVORE DE DECISÕES	92
8.2.3	CUSTOS OPERACIONAIS IMEDIATOS E FUTUROS	93
8.2.4	VALOR DA ÁGUA	94
8.2.5	FORMULAÇÃO DO DESPACHO HIDROTÉRMICO PARA UMA ETAPA	95
8.2.6	SOLUÇÃO DO PROBLEMA E CUSTOS MARGINAIS	97
8.2.7	EXEMPLO	97

8.3	CÁLCULO DA FUNÇÃO DE CUSTO FUTURO	99
9	ANEXO B – FORMULAÇÃO DO $CVAR_{\alpha}$ ATRAVÉS DE RESTRIÇÕES LINEARES	102

## Lista de Figuras

Figura 2-1 Sistemas Isolados no Brasil	19
Figura 2-2- Composição da matriz de energia elétrica	20
Figura 2-3 - Sistema de Transmissão, horizonte 2007-2009	21
Figura 2-4 - Evolução do Consumo no ACR e ACL	25
Figura 2-5- Cadeia de Modelos	28
Figura 2-6 – Sazonalização da GF das Usinas no MRE em 2009	33
Figura 3-1 - Preço spot de energia na região Sudeste do sistema brasileiro	36
Figura 3-2- Preço spot semanal	37
Figura 3-3- Distribuição de probabilidade acumulada do PLD	38
Figura 3-4 – Geração histórica estimada de PCH de 30 MW	41
Figura 3-5 – Comparação entre a Geração Física e créditos no MRE	42
Figura 3-6 – Distribuição da Receita Líquida de uma PCH no MRE	44
Figura 3-7 – Geração de Energia de uma Usina Biomassa típica com 30 MW	45
Figura 3-8 - Distribuição da Receita Líquida de uma Biomassa	47
Figura 4-1 – PLD resultante da simulação hidrotérmica	49
Figura 4-2 - GSF resultante da simulação hidrotérmica	53
Figura 4-3 – Perfil de Geração de Energia da Usina Biomassa	54
Figura 4-4 - Comparação de duas distribuições com diferentes curtoses.	57
Figura 4-5 - Comparação do CVaR das duas distribuições anteriores	58
Figura 5-1 – Sazonalização da GF da PCH	63
Figura 5-2 – Distribuição da Receita Líquida da PCH	63
Figura 5-3 - Sazonalização da GF da PCH	65
Figura 5-4 - Distribuição da Receita Líquida do portfólio PCH + Biomassa	66
Figura 5-5 - Distribuição da Receita Líquida do gerador Biomassa	68
Figura 5-6 - Sazonalização da GF da PCH	73
Figura 5-7 – Distribuição da Receita Líquida do portfólio PCH + Biomassa	73
Figura 5-8 – Sazonalização da GF da PCH	78
Figura 5-9 - Distribuição da Receita Líquida do portfólio PCH + Biomassa	79
Figura 5-10 – Sazonalização da GF da PCH	80
Figura 5-11 - Distribuição da Receita Líquida do portfólio PCH + Biomassa	80
Figura 8-1 – Processo Decisório em Sistemas Hidrotérmicos	93
Figura 8-2 – Custos Imediatos e Futuros contra Armazenamento Final	93

Figura 8-3 – Cálculo da FCF	94
Figura 8-4 – Programação Hidrelétrica Ótima.	95
Figura 8-5 – Balanço hídrico do reservatório	96
Figura 8-6 – Função de Custo Futuro.	97
Figura 8-7 – Definição dos Estados do Sistema.	99
Figura 8-8 – Cálculo da Decisão Ótima por Cenário - Último Estágio	99
Figura 8-9 – Cálculo do primeiro segmento da FCF	100
Figura 8-10 – FCF Linear por partes para o Estágio T-1	100
Figura 8-11 – Cálculo do custo operativo para o estágio T-1 e FCF para T-2.	101

## Lista de Tabela

Tabela 5-1 – Dados do Problema - Estudo de Caso 1	66
Tabela 5-2 – Resultados Estudo de Caso 2	74
Tabela 5-3 – Dados do Problema - Estudo de Caso 2	74
Tabela 5-4 – Portfólio Biomassa + PCH (Sazonalização da GF uniforme)	78
Tabela 5-5 – Portfólio Biomassa + PCH (Sazonalização da GF otimizada)	79
Tabela 5-6 – Dados do Problema - Estudo de Caso 3	80
Tabela 8-1 – Características das Termelétricas	91
Tabela 8-2 – Características da Hidrelétrica	97
Tabela 8-3 – Despacho Ótimo – Sistema Hidrotérmico.	98

## Siglas Utilizadas

ACL:	Ambiente de Contratação Livre
ACR:	Ambiente de Contratação Regulado
CCEE:	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CMO:	Custo Marginal de Operação
CNPE:	Conselho Nacional de Política Energética
CVaR:	Valor no Risco Condicionado ( <i>Conditional Value at Risk</i> )
GF:	Garantia Física
GSF:	Fator de Ajuste da Garantia Física ( <i>Generation Scaling Factor</i> )
MME:	Ministério de Minas e Energia
MRE:	Mecanismo de Realocação de Energia
ONS:	Operador Nacional do Sistema
PCH:	Pequena Central Hidroelétrica
PLD:	Preço de Liquidação de Diferenças
PMO:	Plano Mensal de Operação
SEB:	Sistema Elétrico Brasileiro
SIN:	Sistema Interligado Nacional
VaR:	Valor em Risco ( <i>Value at Risk</i> )