Wallace José Damasceno do Nascimento

**Conversão de Termelétricas para Bi-Combustível em
Ambiente de Incerteza: Uma Abordagem por Opções
Reais**

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. Reinaldo Castro Souza

Co-orientador: Prof. Marco Antonio Guimarães Dias

Rio de Janeiro
Outubro de 2008

Wallace José Damasceno do Nascimento

**Conversão de Termelétricas para Bi-Combustível em
Ambiente de Incerteza: Uma Abordagem por Opções
Reais**

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. Reinaldo Castro Souza
Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Guimarães Dias
Co-Orientador
Petrobras

Profa. Monica Barros
Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

Profa. Katia Maria Carlos Rocha
Ipea

Prof. José Eugenio Leal
Coordenador Setorial do Centro
Técnico Científico

Rio de Janeiro, 03 de outubro de 2008

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

Wallace José Damasceno do Nascimento

Graduado em Engenharia Elétrica (Sistemas de Potência) pela UERJ em 2001. Trabalhou no ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), na Gerência de Estudos Especiais e na Eletrobrás, no Departamento de Comercialização de Energia. Desde 2003 trabalha na Petrobras, onde se especializou em Engenharia de Equipamentos e atualmente é Gerente Setorial, na Implementação de Empreendimentos da Engenharia.

Ficha Catalográfica

Nascimento, Wallace José Damasceno do

Conversão de termelétrica para bi-combustível em ambiente de incerteza : uma abordagem por opções reais / Wallace José Damasceno do Nascimento ; orientador: Reinaldo Castro Souza ; co-orientador: Marco Antonio Guimarães Dias. – 2008.

115 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. Geração termelétrica. 3. Bicomcombustível. 4. Investimento sob incerteza. 5. Opções reais. 6. Simulação de Monte Carlo. I. Souza, Reinaldo Castro. II. Dias, Marco Antonio Guimarães. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

*Ao Seu José Pedro, meu avô,
pelo exemplo de amor à vida.*

Agradecimentos

A Deus, pela vida.

À minha família, em especial aos meus pais, Pedro José do Nascimento e Iraci Damasceno do Nascimento, pela educação, formação, apoio e amor oferecidos a mim, durante toda a minha vida.

Aos professores orientadores Reinaldo Castro Souza e Marco Antonio Guimarães Dias, pela orientação, motivação, confiança, ajuda e oportunidade de realização deste trabalho.

À Petrobras, em especial a Marco Antonio Barros, pela oportunidade e apoio para a realização do curso de Mestrado.

Aos professores dos Departamentos de Engenharia Elétrica e Engenharia Industrial da PUC-Rio, pelos conhecimentos transmitidos.

À minha irmã, Dayse Jane Damasceno do Nascimento, pela revisão ortográfica desta dissertação.

À PSR Consultoria, em especial a Bernardo Vieira Bezerra, pelo fornecimento dos resultados dos modelos SDDP e SGAS.

Aos colegas da PUC-Rio, pela ajuda, incentivo e trocas de experiências.

À FAETEC (Fundação de Apoio à Escola Técnica) e à PUC-Rio, pelo suporte financeiro e infra-estrutura oferecida.

Resumo

Nascimento, Wallace José Damasceno do; Souza, Reinaldo Castro (Orientador). **Conversão de Termelétricas para Bi-combustível em Ambiente de Incerteza: Uma Abordagem por Opções Reais**. Rio de Janeiro, 2008. 115p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

No Brasil, apesar da predominância da participação de usinas hidrelétricas no parque gerador, há alguns anos, devido ao Programa Prioritário de Termelétricidade (PPT), foram implantadas diversas centrais termelétricas movidas a Gás Natural. Muitas são as incertezas apresentadas aos agentes do Setor de Energia Elétrica no Brasil, e mais um risco tem ameaçado estas usinas: a oferta de Gás Natural. A conversão das usinas para bicomcombustível, possibilitando a utilização de Óleo Diesel como combustível alternativo, surgiu como opção para eliminar este risco. Face às diversas incertezas apresentadas, as técnicas tradicionais de análise econômico-financeira se mostram limitadas para avaliar este investimento e as flexibilidades operacionais, sendo proposto que estas avaliações sejam feitas a partir da Teoria de Opções Reais, que consegue tratar as incertezas e flexibilidades mais adequadamente. As opções operacionais (gerar com Gás Natural ou com Diesel) podem ser vistas como uma sequência de opções européias de compra (*European call option*), considerando a conversão como uma opção de mudança de insumo (*switch-input Real Option*) oferecida ao agente proprietário da usina. O objetivo maior deste trabalho é valorar esta opção para uma térmica instalada no subsistema Sudeste do Brasil, indicando, para cada caso, o prêmio que o agente estaria disposto a pagar pela tecnologia de conversão. Como método de avaliação, são utilizadas Simulações de Monte Carlo, a partir do modelo proposto de remuneração da usina, com as variáveis e incertezas associadas: níveis de despacho e contratação, preço do contrato e preço *spot* da energia elétrica, considerando que os custos variáveis unitários de geração (custos dos combustíveis) futuros seguem um processo estocástico de Movimento Geométrico Browniano (MGB), além da possível penalidade paga pela usina a ANEEL no caso de ser chamada a despacho pelo ONS e não gerar por falta de combustível. Por fim, algumas análises de sensibilidade são apresentadas.

Palavras-chave

Engenharia Elétrica, Geração Termelétrica, Bicomcombustível, Investimento sob Incerteza, Opções Reais, Simulação de Monte Carlo.

Abstract

Nascimento, Wallace José Damasceno do; Souza, Reinaldo Castro (Advisor). **Bi-fuel Conversion of Thermal Power Plants Under Uncertainty: A Real Options Approach**. Rio de Janeiro, 2008. 115p. MSc Dissertation – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In Brazil, despite the predominant participation of hydro power plants, some years ago, due to Thermo Power Priority Program (PPT), a large number of Natural Gas-powered plants were implanted. A lot of uncertainties are imposed to the players in the Brazilian Power Market, and one more risk arises: the Natural Gas offer. The bi-fuel conversion arises as an option to rule out this risk, since it allows the use of diesel as alternative fuel to the plant. Because of the many uncertainties presented, traditional techniques of economics and financial analysis are limited to value this investment and its operational flexibilities. Real Options Theory is proposed to value this investment, since it is able to deal more appropriately with the uncertainties and flexibilities. Operational options can be seen as a sequence of European Call Options, considering the conversion as a “Switch-Input” Real Option offered to the Thermo Power Plant’s owner. The main objective of this paper is to increase this option’s value, to a plant located in the Brazilian Southeast Subsystem, indicating in each case, the premium that the player would be willing to pay for the conversion technology. Monte Carlo Simulation was used as a valuation method, for the plant’s cash-flow model, considering the following variables and uncertainties: dispatch and contract level, contract energy and spot prices. Fuel costs are assumed to follow a Brownian Geometric Motion. The possibility of payment of fines to the Electricity Regulatory Agency (ANEEL) in case of the power plant be dispatch by the Brazilian ISO (ONS) and not delivery energy to the system because of fuel constraints is also considered. Finally, we present sensitivity analysis.

Keywords

Electrical Engineering, Thermopower Generation, Bi-fuel, Investment under Uncertainty, Real Options, Monte Carlo Simulation.

Sumário

1	Introdução.....	12
1.1	Considerações Gerais	12
1.2	Investimento Sob Incerteza	14
1.3	Conversão para Bicombustível.....	14
1.4	Objetivo	15
1.5	Estrutura da Dissertação	16
2	O Mercado de Energia Elétrica no Brasil.....	17
2.1	O Setor Elétrico Brasileiro	17
2.2	O Novo Modelo Institucional.....	21
2.2.1	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica	23
2.2.2	Operador Nacional do Sistema Elétrico	24
2.3	O Despacho Hidrotérmico Centralizado	25
2.4	Formação do Preço <i>Spot</i>	30
2.4.1	Formulação do Despacho Hidrotérmico para uma Etapa.....	31
2.4.2	Solução do Problema e Custos Marginais	33
2.4.3	Cálculo da Função de Custo Futuro	33
2.5	Geração Termelétrica no Brasil.....	36
2.5.1	Estratégia Operativa das Térmicas	38
2.5.2	Modelo de Comercialização	40
2.6	Gás Natural.....	42
3	Teoria de Opções Reais.....	47
3.1	Introdução.....	47
3.2	Opções	49
3.2.1	Arbitragem.....	52
3.2.2	Mercado Completo	52
3.2.3	Investimento Irreversível.....	53
3.2.4	Modelos de Decisões Gerenciais.....	53
3.3	Processos Estocásticos.....	54
3.3.1	Processos de Markov	55
3.3.2	Processo de Wiener	56
3.3.3	Movimento Browniano Generalizado	57
3.3.3.1	Lema de Itô.....	57
3.3.4	Movimento Aritmético Browniano (MAB).....	59
3.3.5	Movimento Geométrico Browniano (MGB)	59
3.3.6	Movimento de Reversão À Média (MRM)	64
3.4	Métodos de Avaliação de Opções Reais	65
3.5	Simulação de Monte Carlo	68
3.5.1	Simulação de Monte Carlo na Precificação de Opções.....	70
4	Opções Reais em Energia e Geração Térmica de Eletricidade	72
4.1	Introdução.....	72
4.2	Avaliação de Termelétricas Utilizando a Teoria das Opções Reais.....	73
4.3	Opção de Flexibilidade Operacional	74
4.3.1	Aplicações no Sistema Elétrico Brasileiro	77

4.4	Opções de Mudança de Insumo.....	78
5	Avaliação da Conversão de Uma Termelétrica para Bicombustível.....	81
5.1	Introdução.....	81
5.2	Parâmetros do Caso Base	82
5.2.1	Custos de Operação da Termelétrica (Custos Variáveis Unitários)	82
5.2.2	Preço Spot (PLD)	86
5.2.3	Nível de Contratação	87
5.2.4	Preço do Contrato	88
5.2.5	Taxa de Desconto	89
5.2.6	Taxa de Desconto Livre de Risco.....	89
5.3	Restrições de Oferta de Gás Natural.....	90
5.3.1	Valor da Multa (Vsm)	91
5.4	Modelagem do Problema.....	92
5.4.1	Térmica a Gás Natural.....	93
5.4.2	Térmica Convertida para Bicombustível.....	94
5.5	Valor da Opção.....	95
5.6	Processo de Avaliação (Simulação)	95
5.7	Resultados.....	96
5.7.1	Caso Base	96
5.7.2	Análises de Sensibilidade	98
5.7.2.1	Sensibilidade ao Nível de Contratação.....	98
5.7.2.2	Sensibilidade À Taxa de Desconto (Livre de Risco).....	100
5.7.2.3	Sensibilidade à Volatilidade nos Preços dos Combustíveis	102
6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	103
6.1	Introdução.....	103
6.2	Conclusões.....	103
6.3	Sugestões para Trabalhos Futuros	104
7	Referências Bibliográficas	106
	Anexo – Demonstração da Equação de Black & Scholes	111

Lista de Figuras

Figura 2-1 – Modelo Institucional do Setor Elétrico Brasileiro	21
Figura 2-2 – Acoplamento Temporal em Sistemas Hidrotérmicos	25
Figura 2-3 – Função de Custo Imediato e Função de Custo Futuro	26
Figura 2-4 – Decisão Ótima para o Uso da Água.....	27
Figura 2-5 – Evolução do Preço <i>Spot</i> no Subsistema Sudeste (<i>Fonte:CCEE</i>).....	30
Figura 2-6 – Balanço hídrico do reservatório	32
Figura 2-7 – Definição dos Estados do Sistema.	34
Figura 2-8 – Cálculo da Decisão Ótima por Cenário - Último Estágio.....	34
Figura 2-9 – Cálculo do primeiro segmento da FCF	35
Figura 2-10 – FCF Linear por partes para o Estágio T-1	35
Figura 2-11– Cálculo do custo operativo para o estágio T-1 e FCF para T-2.....	36
Figura 2-12 – Evolução da Capacidade de Geração do Brasil (<i>Fonte:EPE</i>).....	37
Figura 2-13 – Projeção da demanda total de Gás Natural (<i>Fonte: ANP</i>)	40
Figura 2-14 – Evolução da Oferta de Gás Natural (<i>Fonte:ANP</i>)	42
Figura 3-1 – Valor (<i>pay-off</i>) de uma opção de compra no vencimento.....	50
Figura 3-2 – Valor (<i>pay-off</i>) de uma opção de venda no vencimento.	51
Figura 3-3 – Variância e Tendência no MGB.	62
Figura 3-4 – Simulação MGB real x MGB neutro ao risco	63
Figura 3-5 – Valor (<i>pay-off</i>) de uma opção em cada período.....	66
Figura 3-6 – Etapas da Simulação de Monte Carlo.	69
Figura 5-1 – Evolução dos preços de Gás Natural	83
Figura 5-2 – Evolução dos preços de Diesel	84
Figura 5-3 – Preço de Liquidação de Diferenças (série 6)	87
Figura 5-4 – Fluxo de informações do modelo SGAS	91
Figura 5-5 – Distribuição de Probabilidades do VP da usina a Gás Natural.....	96
Figura 5-6– Distribuição de Probabilidades do VP da usina Bicombustível	97
Figura 5-7 – Distribuição de Probabilidades do Valor da Opção Real de Troca ..	98
Figura 5-8 – Gráficos de Sensibilidade da Opção em relação ao Nível de Contratação.....	99
Figura 5-9 – Evolução do Valor da Opção em relação ao Nível de Contratação	100
Figura 5-10 – Evolução do Valor da Opção em relação à Taxa Livre de Risco .	101

Lista de Tabelas

Tabela 2-1 – Capacidade Instalada de Geração do Brasil (<i>Fonte: Aneel</i>).....	37
Tabela 2-2 – Vendas anuais de gás natural pelas distribuidoras	44
Tabela 3-1 – Quadro comparativo entre Opções Reais e Opções Financeiras	54
Tabela 5-1 – Parâmetros da Usina (Caso Base)	82
Tabela 5-2 – Parâmetros do Processo Estocástico MGB	84
Tabela 5-3 – PLD máximo e PLD mínimo	87
Tabela 5-4 – Evolução do Valor da Opção em relação à Tx. Livre de Risco	101
Tabela 5-5 – Valor da Opção x Volatilidades CVUs	102