



**Luiz de Magalhães Ozorio**

**Opções Reais na Siderurgia: O caso Brasileiro**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio como parte dos requisitos parciais para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção

Orientador: Prof. Tara Keshar Nanda Baidya

Rio de Janeiro  
Agosto de 2010



**Luiz de Magalhães Ozorio**

## **Opções Reais na Siderurgia: O caso Brasileiro**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Tara Keshar Nanda Baidya**

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Marco Antonio Guimarães Dias**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Carlos de Lamare Bastian Pinto**

IBMEC

**Prof. Paulo Henrique Soto Costa**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Marcelo de Sales Pessoa**

IPEA

**Prof. Fernando Antonio Lucena Aiube**

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

**Prof. Adrian Heringer Pizzinga**

UFF

**Prof. Luiz Eduardo Teixeira Brandão**

Departamento de Administração - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 19 de agosto de 2010

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

### **Luiz de Magalhães Ozorio**

Graduado em Administração de Empresas pela FIB (1996), MBA em Finanças pelo Ibmec/RJ (1999) e Mestre em Engenharia de Produção com foco na Análise de Projetos Industriais e Tecnológicos pela COPPE/UFRJ (2002). Professor da Faculdade de Economia e dos Programas de Pós-Graduação do Ibmec/RJ. Consultor na Área de Finanças Corporativas tendo atuado em projetos em renomadas instituições e empresas, como: Banco Mundial, Petrobras, Eletrobrás, Vale, Bradesco Seguros, Ampla, Light, Banco do Nordeste, Petros, Postalís, Agora Corretora, Souza Cruz, Amil, entre outras.

### Ficha Catalográfica

Ozorio, Luiz de Magalhães

Opções reais na siderurgia: o caso brasileiro / Luiz de Magalhães Ozorio ; orientador: Tara Keshar Nanda Baidya. – 2010.

208 f. ; 30 cm

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2010.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Opções reais. 3. Processos estocásticos. 4. Reversão à média. 5. Método binomial. 6. Simulação de Monte Carlo. 7. Preço do aço. 8. Indústria siderúrgica. I. Baidya, Tara Keshar Nanda. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. III. Título.

CDD: 658.5

Dedico esta tese a minha esposa Julia e aos meus pais Luiz e Lêda, meus maiores incentivadores.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Tara Keshar Nanda Baidya, pela confiança, oportunidades, atenção e sua permanente preocupação com o meu desenvolvimento.

Aos professores Luiz Brandão e Marco Antonio Dias, por suas aulas, participações nos processos de qualificação e tese de doutorado e todas as importantes contribuições ao meu trabalho.

Aos professores Carlos Bastian e Adrian Pizzinga pela imensurável contribuição ao meu desenvolvimento, disponibilidade de tempo e importantes contribuições e efetuadas ao meu trabalho.

Aos professores Paulo Henrique Soto, Fernando Aiube e Marcelo Pessoa, pela revisão do meu trabalho, pelos prestimosos comentários e contribuições na minha defesa de tese.

À minha colega de doutorado e amiga Frances Blank, pelo convívio nestes anos de estudo e todo apoio nos estudos para qualificação e desenvolvimento da tese.

Às funcionárias do DEI – Fernanda, Isabel, Ana e em especial à Claudinha – pelo profissionalismo, solidariedade e por estarem sempre dispostas em me ajudar nos assuntos administrativos.

À minha querida família, minha esposa Júlia, minha mãe Lêda, meus sogros Alvaro e Telma, meus irmãos Diego e Priscila, Lila e Luiz, e Pedro, e meus sobrinhos Lucas, Lígia e Luiza, pelo amor, incentivo e compreensão ao longo de todos esses anos.

Ao meu maior professor e amigo, meu pai Luiz, quem sempre me incentivou em todos os mais importantes projetos de minha vida.

## Resumo

Ozorio, Luiz de Magalhães; Baidya, Tara Keshar Nanda (Orientador). **Opções Reais na Siderurgia: O Caso Brasileiro**. Rio de Janeiro, 2010. 208p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho analisa a aplicabilidade do método das opções reais na avaliação de projetos de investimento no setor siderúrgico e compara os resultados obtidos com os métodos tradicionais de avaliação de projetos. Por ser o aço uma *commodity* de grande oscilação nos preços e variabilidade nas quantidades comercializadas, os retornos dos projetos siderúrgicos são voláteis. A presença das incertezas citadas, combinadas ao conjunto de flexibilidades gerenciais existentes nos processos produtivos de aço, gera ambiente propício ao surgimento de valiosas opções reais, que – por ser assim – podem alterar significativamente o valor dos projetos e a tomada de decisão de investimentos na siderurgia. Além de contemplar o reconhecimento das principais opções reais existentes na siderurgia e prescrever métodos para avaliá-las, o trabalho analisa os modelos estocásticos que demonstram a melhor adequação ao comportamento dos preços do aço, ao levar em consideração a disponibilidade de dados empíricos existentes no mercado. Como aplicações das metodologias discutidas no decorrer da tese são apresentadas avaliações de dois tipos distintos de opções em reais em projetos siderúrgicos – parada temporária em fornos elétricos e troca de produto em siderúrgicas integradas – utilizando 3 tipos distintos de processos estocásticos: MGB, MRM e MRM com Tendência. Os resultados obtidos demonstraram que as flexibilidades gerenciais avaliadas podem agregar significativamente o valor criado em projetos siderúrgicos, sendo possível também observar a importância da escolha do processo estocástico tanto no valor do projeto como também no valor da opção.

## Palavras-chave

Opções Reais, Processos Estocásticos, Reversão à Média, Método Binomial, Simulação de Monte Carlo, Preço do Aço, Indústria Siderúrgica.

## Abstract

Ozorio, Luiz de Magalhães; Baidya, Tara Keshar Nanda (Advisor). **Real Options Analysis of Steel Sector Projects: The Brazilian Case.** Rio de Janeiro, 2010. 208p. DSc. Thesis – Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work analyzes the applicability of the real options method in the valuation of investments in steel industry, and compares the outcomes with the traditional methods of project evaluation. Being steel a commodity with high price volatility and great changeability in its demand, the return of steel projects are stochastic. The presence of these uncertainties, combined with the existing set of managerial flexibilities in the steel productive processes, create an adequate environment to emerge valuable real options that consequently may interfere significantly with the project values and the decision making process in the steel industry investments. Besides contemplating the recognition of the main existing real options in the steel sector and prescribing methodologies to evaluate them, the work analyzes stochastic methods that show the best fit to steel price performance, considering the available empirical data existing in the market. As application of the discussed methodologies in the course of the thesis the evaluation of two different kinds of real options in the steel industry are presented – shut down options in electrical furnace plants and switch of product in integrated plants – using three different types of stochastic processes: GBM, MRM and MRM with Drift. The obtained results showed that the evaluated managerial flexibilities can aggregate significantly the created value in steel projects and it also may be observed the relevance of the choice of stochastic process not only in the projects value but in the options value as well.

## Keywords

Real Options, Stochastic Processes, Mean Reversion, Binomial Lattice, Monte Carlo Simulation, Steel Prices, Steel Sector.

# Sumário

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
<b>2 VISÃO GERAL DO SETOR SIDERÚRGICO .....</b>	<b>19</b>
2.1. INTRODUÇÃO .....	19
2.2. PROCESSOS PRODUTIVOS .....	21
2.3. PRODUTOS SIDERÚRGICOS .....	23
2.4. A SIDERURGIA NO MUNDO E O SETOR SIDERÚRGICO BRASILEIRO.....	26
2.5. PERFIL DAS PRINCIPAIS EMPRESAS SIDERÚRGICAS BRASILEIRAS .....	35
2.6. RISCOS INERENTES AO SETOR SIDERÚRGICO E AS FLEXIBILIDADES GERENCIAIS NA PRODUÇÃO DE AÇO .....	45
<b>3 PROCESSOS ESTOCÁSTICOS E APLICAÇÕES EM PROJETOS NA INDÚSTRIA SIDERÚRGICA .....</b>	<b>51</b>
3.1. INTRODUÇÃO .....	51
3.2. PROCESSOS MARKOVIANOS E O PROCESSO DE WIENER .....	53
3.3. MOVIMENTO ARITMÉTICO BROWNIANO (MAB) .....	54
3.4. PROCESSOS DE ITÔ E MOVIMENTO GEOMÉTRICO BROWNIANO (MGB) .....	55
3.5. PROCESSOS DE REVERSÃO À MÉDIA .....	58
3.5.1. Movimento de Reversão à Média Aritmético (MRA) de Ornstein-Uhlenbeck.....	58
3.5.2. Modelo de Reversão à Média Geométrico (MRG) de Dixit & Pindyck (1994).....	61
3.5.3. Modelos de Schwartz (1997).....	62
3.5.4. Modelo de 2 Fatores de Schwartz & Smith (2000) .....	65
3.5.5. Modelos de Pindyck (1999) .....	67
3.6. PROCESSOS DE POISSON .....	69
3.7. PROCESSOS MISTOS DE DIFUSÃO COM SALTOS .....	71
3.8. DISCUSSÃO SOBRE PROCESSOS ESTOCÁSTICOS E A ANÁLISE DE OPÇÕES REAIS EM PROJETOS NO SETOR SIDERÚRGICO.....	72
3.8.1. Proposição de Modelo.....	77
3.8.2. Modelo Empírico: Discretização, Estimação de Parâmetros e Simulação Neutra ao Risco .....	78
3.8.3. Medidas de Aderência.....	81
3.8.4. Descrição da Base de Dados .....	83
3.8.5. Resultados Empíricos: Parâmetros Estimados, Testes do Processo e Análise dos Resultados.....	85
<b>4 METODOLOGIAS DE AVALIAÇÃO DE INVESTIMENTO .....</b>	<b>90</b>
4.1. INTRODUÇÃO: MÉTODOS TRADICIONAIS DE ANÁLISE DE PROJETOS E OS MODELOS DE AVALIAÇÃO DAS OPÇÕES REAIS .....	90
4.2. COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DO FLUXO DE CAIXA DESCONTADO E A AVALIAÇÃO NEUTRA AO RISCO .....	92
4.3. O MODELO DE BLACK & SCHOLES (1973) .....	95
4.4. O MÉTODO BINOMIAL DE COX, ROSS & RUBINSTEIN (1979) .....	96
4.5. MÉTODO BINOMIAL PARA MOVIMENTO DE REVERSÃO À MÉDIA .....	98
4.6. SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO.....	101
4.7. OPÇÕES REAIS .....	102
4.7.1. Semelhanças e Diferenças entre Opções Financeiras e Reais .....	102
4.7.2. Opção de Adiamento.....	103
4.7.3. Opção de Expansão: .....	106
4.7.4. Opção de Parada Temporária .....	107
4.7.5. Opção de Redução de Escala .....	108



4.7.6. Opção de Abandono .....	108
4.7.7. Opção de Troca de Tecnologia.....	109
4.7.8. Opção de Calote .....	109
4.7.9. Opções Compostas .....	110
4.8. OPÇÕES REAIS NA SIDERURGIA.....	110
4.8.1. Casos Base 1 – Projeto de Investimento em um Forno-Elétrico (Usina Semi-Integrada) .....	111
4.8.2. Caso Base 2 – Projeto de Investimento em um Alto-forno (Usina Integrada).....	113
4.8.3. Opção de Parada Temporária em Usinas Semi-Integradas .....	114
4.8.3.1. Opção de Parada Temporária em Usinas Siderúrgicas – MGB .....	115
4.8.3.2. Opção de Parada Temporária em Usinas Siderúrgicas – MRM.....	117
4.8.3.3. Opção de Parada Temporária em Usinas Siderúrgicas – MRM com Tendência .....	119
4.8.4. Opção de Troca de Tecnologia em Usinas Integradas .....	120
4.8.4.1. Opção de Troca de Tecnologia em Usinas Integradas – MGB .....	121
4.8.4.2. Opção de Troca de Tecnologia em Usinas Integradas – MRM.....	124
4.8.4.3. Opção de Troca de Tecnologia em Usinas Integradas – MRM com Tendência .....	125
4.8.5. Análise dos Resultados Obtidos.....	127
4.8.5.1. Análise da Opção de Parada Temporária em Usinas Siderúrgicas.....	127
4.8.5.2. Análise da Opção de Troca de Tecnologia em Usinas Integradas .....	135
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....</b>	<b>140</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>146</b>
<b>APÊNDICE I .....</b>	<b>153</b>
<b>APÊNDICE II.....</b>	<b>155</b>
<b>APÊNDICE III .....</b>	<b>162</b>
<b>APÊNDICE IV .....</b>	<b>164</b>
<b>APÊNDICE V .....</b>	<b>168</b>
<b>APÊNDICE VI .....</b>	<b>173</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>176</b>
<b>ANEXO II .....</b>	<b>177</b>
<b>ANEXO III.....</b>	<b>178</b>
<b>ANEXO IV.....</b>	<b>183</b>
<b>ANEXO V .....</b>	<b>190</b>
<b>ANEXO VI.....</b>	<b>198</b>
<b>ANEXO VII .....</b>	<b>205</b>

## Lista de Figuras

Figura 1 - Etapas dos Processos Produtivos do Aço – Fluxo Simplificado de Produção.....	23
Figura 2 - Realizações de um Processo Estocástico.....	51

## Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Produção de Aço Mundial.....	26
Gráfico 2 - Participação no Consumo Mundial de Aço (%).....	27
Gráfico 3 - Participação no Setor Brasileiro por Empresa (2009).....	32
Gráfico 4 – Segmentação da Demanda por Aço no Brasil - 2009.....	33
Gráfico 5 - Vendas nos Mercados Interno e Externo da CSN – 1º, 2º e 3º Trimestres de 2009.....	37
Gráfico 6 - Percentual das Vendas por Tipo de Produto da CSN – 2º e 3º Trimestre de 2009-11-22.....	38
Gráfico 7 - Produção de Aços Bruto e Laminados da Gerdau – 3T08 até 3T09.....	43
Gráfico 8 - Volume de Vendas por Área de Negócio da Arcelor-Mital Brasil em 1.000 Ton/Ano - 2007 e 2008.....	44
Gráfico 9 - Volume de Vendas de Aços Longos da Arcelor-Mital Brasil em 1.000 Ton/Ano - 2007 e 2008.....	45
Gráfico 10 - Volume de Vendas de Aços Planos da Arcelor-Mital Brasil em 1.000 Ton/Ano - 2007 e 2008.....	45
Gráfico 11 - Preço Spot (US\$/Ton) da Bobina de Laminado à Quente no Mercado Norte-Americano – jan/2000 até set/2009.....	46
Gráfico 12 - $\Delta$ PIB Mundial X $\Delta$ Produção Mundial de Aço.....	47
Gráfico 13 - Placas de aço - Índice de Preços de Placas de Aço.....	73
Gráfico 14 - LME Steel Billet – Far Fast – 3 months seller.....	76
Gráfico 15 - Índices de Preços do Aço no Período de Jan/2000 a Abr/2009.....	82
Gráfico 16 - Índices de Preços do Aço deflacionados pelo IGP-DI no Período de Jan/2000 a Abr/2009.....	84
Gráfico 17 - Índice de Preços Placas de Aço no Período de Jan/1996 a Dez/2009..	84
Gráfico 18 - Índice de Preços Placas de Aço deflacionado pelo IGP-DI no Período de Jan/1996 a Dez/2009.....	85
Gráfico 19 - Log dos Preços da Série de Placas de Aço (IBS) deflacionada pelo IGP-DI no Período de Jan/2000 a Abr/2009.....	86

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Produção Mundial de Aço Bruto dos Países associados ao IISI.....	27
Tabela 2 - Maiores Produtores de Aço Bruto do Mundo (Anual) – 106 t.....	28
Tabela 3 - Produção de Aço Bruto na América Latina (Anual) – 103 t.....	29
Tabela 4 - Ranking dos Países Maiores Exportadores e Importadores de Aço – Milhões de Toneladas – 2009.....	29
Tabela 5 - Brasil – Produção de Aço Bruto (Anual).....	31
Tabela 6 - Brasil – Distribuição Regional da Produção de Aço Bruto em Milhares de Toneladas (Anual).....	32
Tabela 7 - Vendas Mercado Interno.....	34
Tabela 8 - Vendas Mercado Externo (USINAS).....	34
Tabela 9 - Exportações Brasileiras.....	34
Tabela 10 - Produção Anual das Usinas de Ipatinga e Cubatão – 2003 a 2008.....	40
Tabela 11 - Indicadores operacionais – produção de vendas.....	40
Tabela 12 - Produção de Aços Bruto e Laminados da Gerdau – 1º, 2º e 3º Trimestres de 2009.....	42
Tabela 13 - Parâmetros dos Modelos MGB e MRM estimados a partir das séries de Índices de Preços do Aço (IBS) deflacionados pelo IGP-DI no Período de Jan/2000 a Abr/2009.....	86
Tabela 14 - Parâmetros do Modelo MRM com Tendência estimados a partir das séries de Índices de Preços do Aço (IBS) deflacionados pelo IGP-DI no Período de Jan/2000 a Abr/2009.....	87
Tabela 15 - Resultados dos Testes de Aderência – Pseudo R2, EQM e MAPE – dos 3 Tipos de Processo – MGB, MRM e MRM com Tendência – sobre as 6 Série de Preços de Aço (IBS) deflacionadas pelo IGP-DI no Período de Jan/2000 a Abr/2009.....	88
Tabela 16 – Comparação entre os Parâmetros dos Modelos MGB e MRM estimados a partir das séries do Índice de Preços de Placa de Aços (Bloomberg) no Período de Jan/1996 a Dez/2009 e do Índice de Preços de Placas de Aço (IBS) no Período de Jan/2000 a Abr/2009, ambos deflacionados pelo IGP-DI.....	88
Tabela 17 – Comparação entre os Parâmetros do Modelo MRM com Tendência estimados a partir das séries do Índice de Preços de Placa de Aços (Bloomberg) no Período de Jan/1996 a Dez/2009 e do Índice de Preços de Placas de Aço (IBS) no Período de Jan/2000 a Abr/2009, ambos deflacionados pelo IGP-DI.....	89

Tabela 18 – Comparação dos Resultados dos Testes de Aderência – Pseudo R2, EQM e MAPE – dos 3 Tipos de Processo – MGB, MRM e MRM com Tendência – sobre séries do Índice de Preços de Placa de Aços (Bloomberg) no Período de Jan/1996 a Dez/2009 e do Índice de Preços de Placas de Aço (IBS) no Período de Jan/2000 a Abr/2009, ambos deflacionados pelo IGP-DI.....	89
Tabela 19 – Outros Custos e Despesas (OCD) do projeto nos casos de 90% de uso da capacidade, parada temporária 1 e 2.....	115
Tabela 20 – Opção de Parada Temporária: Valor do Projeto, VPL Estático, VPL Expandido e o Valor da Opção em Milhões de Reais para Parada Temporária Tipos 1 e 2, considerando 3 Tipos de Processos Estocásticos (MGB, MRM e MRM com Tendência).....	127
Tabela 21 – Sensibilidade da Razão entre Valor da Opção de Parada Temporária e o VPL Estático em Relação ao Percentual de OCD Evitado e a Volatilidade do Preço do Aço seguindo um MGB.....	128
Tabela 22 – Sensibilidade da Razão entre Valor da Opção de Parada Temporária (Tipo 1) e o Valor do Projeto em Relação ao Drift de Tendência e a Volatilidade do Preço do Aço seguindo um MGB.....	129
Tabela 23 – Diferença em Milhões de Reais entre o VPL Estático do MGB e do MRM, em Função de Níveis Distintos de Equilíbrio de Preços no MRM e Magnitude do Drift de Tendência no MGB.....	130
Tabela 24 – Sensibilidade da Razão entre Valor da Opção de Parada Temporária (Tipo 1) e o Valor do Projeto em Relação aos Parâmetros de Velocidade da Reversão e a Volatilidade do Preço do Aço seguindo um MRM.....	131
Tabela 25 – Sensibilidade da Razão entre Valor da Opção de Parada Temporária (Tipo 1) e o Valor do Projeto em Relação aos Parâmetros da Volatilidade e Nível de Equilíbrio do Preço do Aço seguindo um MRM.....	132
Tabela 26 – Sensibilidade do Valor da Opção de Parada Temporária (Tipos I e II) em Milhões de Reais e do Percentual da Opção em Relação ao Valor do Projeto, considerando Níveis Distintos de Magnitude do Drift de Tendência dos Preços do Aço seguindo um MRM.....	133
Tabela 27 – Sensibilidade do Valor da Opção de Parada Temporária (Tipos I e II) e do Percentual da Opção em Relação ao Valor do Projeto, considerando Diferentes Valores Iniciais do Nível de Equilíbrio de Longo Prazo dos Preços do Aço seguindo um MRM com Tendência.....	133
Tabela 28 – Sensibilidade da Razão entre Valor da Opção de Parada Temporária (Tipo 1) e o VPL Estático em Relação aos Parâmetros de Velocidade da Reversão e a Volatilidade do Preço do Aço seguindo um MRM com Tendência...	134
Tabela 29 – Opção de Troca de Tecnologia: Valor do Alto-Forno, VPL do Alto-Forno, VPL do Laminador, Valor Expandido do Laminador, Valor da Opção em Milhões de Reais.....	135
Tabela 30 - Sensibilidade do Valor da Opção de Troca de Tecnologia considerando Diferentes Valores dos Drifts de Tendência dos Processos de Preços do Aço seguindo o MGB.....	136

Tabela 31 - Sensibilidade do Valor da Opção de Troca de Tecnologia considerando Diferentes Volatilidades dos Processos de Preços do Aço seguindo o MGB.....	136
Tabela 32 - Sensibilidade do Valor da Opção de Troca de Tecnologia considerando Diferentes Níveis de Correlacao entre os Processos de Preços do Aço seguindo um MGB.....	136
Tabela 33 - Sensibilidade do Valor da Opção de Troca de Tecnologia considerando Diferentes Velocidades de Reversao dos Processos de Preços do Aço seguindo o MRM.....	137
Tabela 34 - Sensibilidade do Valor da Opção de Troca de Tecnologia considerando Diferentes Níveis de Equilibrio de Longo Prazo dos Processos de Preços do Aço seguindo o MRM.....	138
Tabela 35 - Sensibilidade do Valor da Opção de Troca de Tecnologia considerando Diferentes Níveis Iniciais da Tendencia de Longo Prazo dos Processos de Preços do Aço seguindo o MRM com Tendencia.....	139