

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL DA
TESE DEFENDIDA PORNatália Addas.....
.....Porto..... E APROVADA
PELA COMISSÃO JULGADORA EM ...02/02/2012

.....
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Natália Addas Porto

**Seleção de projetos do Mecanismo de
Desenvolvimento Limpo:
Modelo baseado em latisse binomial e teoria do portfólio**

Natália Addas Porto

**Seleção de projetos do Mecanismo de
Desenvolvimento Limpo:
Modelo baseado em lattice binomial e teoria do portfólio**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Correia

Campinas

2012

i

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

P838s Porto, Natália Addas
Seleção de projetos do mecanismo de desenvolvimento limpo: modelo baseado em lattice binomial e teoria do portfólio / Natália Addas Porto – Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Paulo de Barros Correia.
Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Mercado de emissões de carbono. 2. Créditos de carbono. 3. Política energética. 4. Otimização de carteiras de investimentos. I. Correia, Paulo de Barros. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Título em Inglês: Selection of projects from the clean development mechanism: model based on binomial lattice and portfolio theory
Palavras-Chave em Inglês: Emissions trading; Carbon credits; Energy policy; Optimization of investment portfolios.
Área de Concentração:
Titulação: Mestre em Planejamento de Sistemas Energéticos
Banca Examinadora: Joaquim Eugênio Abel Seabra e João Frederico da Costa Azevedo Meyer.
Data da Defesa: 02/02/2012
Programa de Pós-Graduação: Planejamento de Sistemas Energéticos

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Seleção de projetos do Mecanismo de
Desenvolvimento Limpo:**

Modelo baseado em latisse binomial e teoria do portfólio

Autor: Natália Addas Porto

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Barros Correia

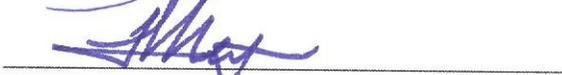
A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



Prof. Dr. Paulo de Barros Correia, Presidente
FEM – UNICAMP



Prof. Dr. Joaquim Eugênio Abel Seabra
FEM – UNICAMP



Prof. Dr. João Frederico da Costa Azevedo Meyer
IMECC – UNICAMP

Campinas, 2 de fevereiro de 2012

Aos meus pais
Anice e Jesuino
e às minhas irmãs
Lívia e Mayara
com muito amor e carinho.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de pessoas às quais presto aqui minha homenagem.

Primeiramente agradeço a Deus por ter me concebido o dom da vida.

Aos meus pais, Anice e Jesuino, pelo exemplo apontado durante toda minha vida, pela educação sólida, base e incentivo que me forneceram. Agradeço pela confiança depositada para que eu pudesse escolher meu caminho, vencer mais esta etapa e ter forças para continuar nesta trajetória. Desculpem-me pela ausência, mas sabem o quanto me comprometi para que este trabalho fosse concluído.

Ao professor Paulo de Barros Correia pela sábia orientação e paciência! Meu agradecimento pela oportunidade de pesquisa e tempo dedicado à orientação, aulas e conselhos.

Às minhas irmãs pela parceria e fidelidade, sempre! Elas são as melhores irmãs que alguém poderia ter.

Ao meu namorado Leandro, pela companhia, compreensão e amor. Quantas vezes aguentou minha ansiedade, angústia e impaciência. Seu carinho e dedicação fez toda a diferença, estando sempre ao meu lado.

Aos meus colegas integrantes, ex-integrantes e agregados da sala 301, Alaíse, Bruna, Bruno, Débora, Elisa, Glauber, Jéssica, João, Jonathan, Laura, Obed e Regiane, pela amizade, incentivo e alegria durante o mestrado.

Aos professores e funcionários do Departamento de Energia.

Aos meus amigos, Daiane, Elen, Eloá, Kátia, Marluce e Thiago sempre presentes, mesmo distantes fisicamente.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro.

E a todos que passaram na minha vida durante essa experiência que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

RESUMO

A humanidade tem selecionado seus sistemas energéticos incorporando, além dos parâmetros de disponibilidade técnica e viabilidade econômica, os impactos ambientais causados por eles. O mercado de créditos de carbono surge neste contexto ao estabelecer mecanismos de mercado para que partes envolvidas na contribuição de redução/remoção de gases de efeito estufa na atmosfera, no âmbito do Protocolo de Quioto, cumpram o acordo quantificado, ao mesmo tempo em que surgem também novas oportunidades para investimentos nos países em desenvolvimento como o Brasil. Assim, saber como funciona esse mercado é um fator crucial para o aproveitamento das conveniências criadas pelo Protocolo de Quioto. Destarte, considerando as dificuldades para precificação de contratos de créditos carbono no mercado brasileiro, principalmente por ser um mercado muito recente, e ainda com o objetivo de originar maiores investimentos em sistemas energéticos através de energia renovável, a dissertação oferece uma contribuição situada nos seguintes focos: análise de contratos de Reduções Certificadas de Emissões (RCEs) e seleção de projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Precificação, portanto, compreende determinar medidas de benefício e risco unitário ($\text{€}/\text{tCO}_2\text{e}$), uma vez que as decisões de contratação são instruídas pelo preço da RCE negociado. O modelo de lattice binomial é a principal ferramenta de precificação empregada neste trabalho, usada para calcular o valor médio esperado da RCE para realização de contratos a termo e de opções. Por sua vez, melhores condições para o comércio das RCEs é obtida por uma abordagem da teoria do portfólio proposta por Markowitz, através de projetos MDL relacionados à produção de eletricidade a partir de fontes renováveis de energia no Brasil, onde a energia oferecida por tais fontes são caracterizadas, sobretudo, pela sazonalidade.

Palavras-Chave: Mercado de emissões de carbono; Créditos de carbono; Política energética; Otimização de carteiras de investimentos.

ABSTRACT

Humanity has selected energy systems by incorporating, beyond the technical and economic feasibility parameters, also the environmental impacts caused by them. The carbon credit market has appeared in this context and brings alternative solutions for countries in Annex I to fulfill their emissions targets under Kyoto Protocol and also help developing countries in constructing or maintaining a clean energy mix. Knowing how this market works is crucial to incorporate all the conveniences brought by Kyoto Protocol. Pricing carbon credit market includes determining benefit and risk measures ($\text{€}/\text{tCO}_2\text{e}$), since the hiring decisions are instructed by the price of CERs traded. The binomial lattice model is the main tool used in this dissertation for pricing, which allow us to calculate the expected value of CERs for realization of forward and options contracts. Given that renewable energy sources are mainly characterized by seasonality, some sources can hedge others. In this sense, better conditions on trading CERs can be achieved through a portfolio theory approach proposed by Markowitz. Considering the difficulties for pricing carbon credits contracts on the Brazilian market, especially because of its recent characteristic, and with the aim of generating greater investments in the energy systems by using renewable energy sources, the present dissertation offers a contribution on: contract analysis applied to Certified Emission Reductions (CERs) and also on selecting projects from the Clean Development Mechanism (CDM).

Keywords: Emissions trading; Carbon credits; Energy policy; Optimization of investment portfolios.

LISTA DE FIGURAS

2.1	Efeito Estufa	6
2.2	Contribuição dos principais GEE para o aquecimento global	7
2.3	Emissões de CO ₂ pelo uso de combustíveis fósseis	7
2.4	Emissões de CO ₂ associadas ao uso de energia, por setor	8
2.5	Evolução da temperatura da Terra e concentração de CO ₂	9
2.6	Contribuição agregada dos maiores emissores de GEE	10
2.7	Mudanças na temperatura, nível do mar e cobertura de neve no hemisfério norte	11
2.8	Esquema do mecanismo de IC	17
2.9	Esquema do IET	18
2.10	Esquema do comércio no MDL	20
2.11	Ciclo do projeto do MDL	24
2.12	Cenário da linha de base	28
2.13	Fator de emissão no Sistema Interligado Nacional	30
2.14	Número de projetos registrados no Conselho Executivo do MDL por país anfitrião	35
2.15	Número de projetos brasileiros por escopo setorial	36
3.1	Interação entre IET, MDL, IC e mercados de carbono alternativos a Quioto	40
3.2	Esquema dos mercados de carbono	40
3.3	Evolução dos valores transacionais no EU ETS	42
3.4	Evolução dos valores transacionais no MDL	44
3.5	Esquema operacional dos derivativos	47
3.6	Contrato a termo	49
3.7	Benefícios de contrato a termo	50
3.8	Relação de preços à vista e futuro	51
3.9	Retornos de posições em opções europeias	54
4.1	Curva normal	61
4.2	Preços diários das RCEs (<i>Spot</i> e Futuro, € corrente) – 2008 a 2011	64
4.3	Evolução dos preços (€) das RCEs - 2010 a 2011	65

4.4	Variação percentual em base diária dos preços das RCEs	66
4.5	Volatilidade anual dos preços das RCEs	66
4.6	<i>Value at Risk</i>	67
5.1	Histórico de preços e latisse futura	69
5.2	Latisse binomial de um único período	70
5.3	Latisse binomial	70
5.4	Latisse binomial: recombinação	72
5.5	Latisse binomial: valor esperado	73
5.6	<i>VaR</i> e <i>CVaR</i> na latisse binomial	75
5.7	Latisse binomial: a termo (posição vendida)	76
5.8	Latisse binomial: a termo (posição comprada)	76
5.9	Latisse binomial: opção de venda	78
5.10	Latisse binomial: opção de compra	79
5.11	Modelos de precificação	81
5.12	Variações diárias dos preços (€) das RCEs: janeiro de 2012	83
5.13	Valor esperado (€) da RCE: Janeiro de 2012	84
6.1	Fronteira de eficiência	97
6.2	Função para seleção de projetos do MDL	100
6.3	Função para seleção de projetos do MDL	102
6.4	Portfólio de projetos	103
6.5	Estrutura do modelo: dados de entrada e otimização	104
6.6	Curva típica mensal Eólica: Região Sul	107
6.7	Curvas típicas mensais Biomassa: (a) Celulose (b) Bagaço de cana	107
6.8	Curvas típicas mensais PCH	107
6.9	Fronteira eficiente de contratação	113
A.1	Relação de dominância entre soluções	128

LISTA DE TABELAS

2.1	Metodologias aprovadas por escopo	23
2.2	Tipologia dos projetos elegíveis ao MDL	26
2.3	Fatores de emissão do SIN	31
2.4	Componentes dos custos de transação (valores em euro de 2005)	32
2.5	Distribuição das atividades de projetos no Brasil por tipo de projeto	36
3.1	Volumes e valores transacionados no mercado de carbono, 2009 e 2010	39
5.1	Preço RCE inicial	82
5.2	Parâmetros das latisses de 2012	83
5.3	Valor esperado - 2012	84
5.4	Benefício esperado do comprador	86
5.5	Benefício esperado do vendedor	86
5.6	Valor da <i>call</i> para janeiro de 2012	88
5.7	Pagamento esperado da <i>call</i>	89
5.8	Prêmio da opção <i>call</i>	90
5.9	Pagamento esperado da <i>put</i>	91
5.10	Valor da <i>put</i> para janeiro de 2012	92
5.11	Prêmio da opção <i>put</i>	93
5.12	Análise de risco em janeiro de 2012	94
5.13	Risco em 2012	95
6.1	Dados principais dos projetos MDL	105
6.2	Fatores de emissão dos projetos	106
6.3	Geração dos projetos MDL	108
6.4	RCEs dos projetos MDL	109
6.5	Custos de transação por projeto de MDL	109
6.6	Benefício médio mensal dos projetos MDL	111
6.7	Correlação anual ρ_{ij} e benefício médio b_i	112
6.8	Fronteira eficiente de Pareto	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A1	Anexo I
AND	Autoridade Nacional Designada
BIO-1	Bioenergia Cogeneradora S.A.
BIO-2	Cogeração Irani Celulose
BM&FBovespa	Bolsa de Valores, Mercadorias e Futuros
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCX	<i>Chicago Climate Exchange</i>
CE	Conselho Executivo
CH ₄	Metano
CIMGC	Comissão Interministerial sobre Mudança Global do Clima
CMO	Custo Marginal de Operação
CO ₂	Dióxido de carbono
CO ₂ e	Dióxido de carbono equivalente
COP	Conference of the Parties
<i>CVaR</i>	<i>Conditional Value at Risk</i>
DCP	Documento de Concepção do Projeto
ECX	<i>European Climate Exchange</i>
EOD	Entidade Operacional Designada
EOL-1	Projeto de Geração de Energia Eólica Água Doce
EOL-2	Projeto de Geração de Energia Eólica Horizonte
EU ETS	<i>European Union Emissions Trading Scheme</i>
EUA	<i>European Union Allowances</i>
F/R	Florestamento e Reflorestamento
FINEP	Financiadora de Estudos e Projetos
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWP	<i>Global Warming Potential</i>

H ₂ O	Vapor de água
HFCs	Hidrofluorcarbonetos
HIPC	<i>Harmonized Index of Consumer Prices</i>
IC	Implementação Conjunta
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IET	<i>International Emission Trading</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MBRE	Mercado Brasileiro de Reduções de Emissão
MCTI	Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
N ₂	Nitrogênio
N ₂ O	Óxido nitroso
NA1	Não-Anexo I
NAP	<i>National Allocation Plans</i>
OECD	<i>Organization for Economic Co-operation and Development</i>
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PCF	<i>Prototype Carbon Fund</i>
PCH	Pequena Central Hidrelétrica
PCH-1	Projeto de PCH Santana I
PCH-2	Projeto de PCH Cachoeirão
PFCs	Perfluorcarbonetos
PPM	Partes por milhão
Pró-MDL	Programa de Apoio a Projetos do MDL
<i>RaR</i>	Receita ao Risco
RCE	Redução Certificada de Emissões
SIN	Sistema Interligado Nacional
SF ₆	Hexafluoreto de enxofre

tCO ₂ e	Toneladas de dióxido de carbono equivalente
TIR	Taxa interna de retorno
UNFCCC	<i>United Nations Framework Conference on Climate Change</i>
UQA	Unidade de Quantidade Atribuída
URE	Unidade de Redução de Emissões
URM	Unidade de Remoção
<i>VaR</i>	<i>Value at Risk</i>
VPL	Valor presente líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

B	Benefício
\bar{B}	Benefício esperado
B_c	Benefício do comprador
B_v	Benefício do vendedor
\bar{B}_c	Benefício médio esperado do comprador
\bar{B}_v	Benefício médio esperado do vendedor
B^*	Benefício alvo
b	Benefício esperado em um portfólio
C	Custos de transação
c	Custo inicial do projeto MDL
d	Taxa de descida
E	Retorno esperado
EF_{BM}	Fator de emissão da margem de construção
EF_{CM}	Fator de emissão da margem combinada
EF_{OM}	Fator de emissão da margem operacional
F	Pagamento esperado
\bar{F}	Pagamento médio esperado
FC	Fluxo de caixa
K	Preço de exercício
k	Orçamento alvo do portfólio de projetos MDL
μ	Média
P	Preço no mercado bilateral
p	Probabilidade de subida
$1 - p$	Probabilidade de descida
ρ_{ij}	Matriz de correlação
\Pr	Probabilidade

q	Probabilidade de subida livre de risco
$1 - q$	Probabilidade de descida livre de risco
R	Taxa de retorno livre de risco
r	Taxa de desconto anual
S	Preço no mercado <i>spot</i>
\bar{S}	Valor esperado
T	Período de vencimento
u	Taxa de subida
σ	Desvio-padrão ou volatilidade
σ^2	Variância
σ_d	Volatilidade diária
σ_{ij}	Matriz de covariância
σ^*	Risco alvo
v	Taxa de crescimento
v_d	Taxa de crescimento diária
X	RCEs emitidas
x	Variável booleana
x^*	Vetor de seleção de projetos
ω	Participação de um ativo na carteira
w_{BM}	Ponderação do fator de emissão da margem de construção
w_{OM}	Ponderação do fator de emissão da margem operacional
Y	RCEs a serem entregues
Δt	Intervalo de discretização

Índices

i	Índice do ativo na carteira
j	Índice do ativo na carteira
n	Níveis de estágios da latisse
t	Período de tempo

N Número de ativos na carteira

y Ano

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Justificativa	1
1.2	Objetivo	3
1.3	Organização da Dissertação	3
2	DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO	5
2.1	Antecedentes	5
2.1.1	Efeito Estufa	5
2.1.2	Aquecimento global e mudanças climáticas	10
2.2	Protocolo de Quioto	14
2.3	Mecanismos de mercado	16
2.3.1	Implementação Conjunta	16
2.3.2	Comércio Internacional de Emissões	17
2.4	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo	19
2.4.1	Acordos de Marraqueche, ciclo e tipologia dos projetos	21
2.4.2	Linha de base	28
2.4.3	Custos de transação	31
2.4.4	Modalidades de execução dos projetos	33
2.4.5	MDL no Brasil	34
3	MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO	38
3.1	Créditos de carbono e modalidades de negociação	38
3.1.1	Mercado de permissões de emissão	41
3.1.2	Mercado de certificados	43
3.2	Modalidades e procedimentos dos mercados	45
3.2.1	Contrato a termo	47
3.2.2	Contrato futuro	50
3.2.3	Contrato de opção	52

4	BENEFÍCIO E RISCO	56
4.1	Benefício	56
4.1.1	Valor presente líquido	57
4.1.2	Taxa interna de retorno	57
4.2	Risco	58
4.2.1	Medidas de risco	58
4.2.2	Risco no mercado de RCEs	63
5	MODELO DE PRECIFICAÇÃO DE CONTRATOS	68
5.1	Lattice binomial	68
5.1.1	Valor esperado	69
5.1.2	Risco	74
5.1.3	Precificação de contrato a termo	75
5.1.4	Precificação de contrato de opção	77
5.2	Precificando RCEs	80
5.2.1	Valor esperado da RCE	82
5.2.2	Contrato a termo	85
5.2.3	Contrato de opção	87
5.3	Análise do risco dos contratos	94
6	OTIMIZAÇÃO DE PORTFÓLIOS DE CONTRATOS DE RCEs	96
6.1	Modelo tradicional de portfólio	97
6.2	Modelo de portfólio para seleção de projetos	101
6.3	Estudo de caso	102
6.3.1	Projetos de MDL	104
6.3.2	Benefício	109
6.3.3	Soluções eficientes	112
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS	115
7.1	Conclusões	115
7.2	Sugestão para trabalhos futuros	117

REFERÊNCIAS	119
APÊNDICE A - OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO	127

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A humanidade tem selecionado seus sistemas energéticos incorporando, além dos parâmetros de disponibilidade técnica e viabilidade econômica, os impactos ambientais causados por eles.

Com o objetivo principal de alcançar certo nível de estabilização de emissões antrópicas de gases precursores do efeito estufa, o regime climático tomou como base uma série de princípios gerais, dentre os quais destaca-se o princípio da responsabilidade comum, porém diferenciada.

Assim, a instituição de um regime legal internacional, o Protocolo de Quioto, tem possibilitado vislumbrar alguns instrumentos de mercado, popularmente conhecido como mercado de carbono. Representando assim uma alternativa promissora para os países que têm metas a cumprir. Ao mesmo tempo, proporcionando oportunidade de novos investimentos para países em desenvolvimento.

Mecanismos já existentes na Europa e nos Estados Unidos, onde se criou um valor transacionável para reduções das emissões de gases de efeito estufa (GEE)¹, assemelha-se do mercado de créditos de carbono hoje existente. Tais experiências são importantes paradigmas para o atual mercado e, saber como este funciona é fator crítico para o aproveitamento das oportunidades criadas pelo Protocolo de Quioto.

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) está inserido nesse contexto por constituir medidas de mitigação via prática de desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento; seja por transferência de investimentos e/ou tecnologias procedentes dos países desenvolvidos ou partes interessadas.

Sob uma perspectiva econômica, é imprescindível o uso de ferramentas que auxiliem no gerenciamento de recursos de investidores, responsáveis pela colocação do capital visando maior eficiência energética, diminuição da intensidade energética e, principalmente, racionalidade nos custos de investimentos.

¹Os gases de efeito estufa serão denominados pela sigla GEE e incluirão aqueles listados no Anexo A do Protocolo de Quioto: dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, hexafluoreto de enxofre, família dos hidrofluorcarbonos e família dos perfluorcarbonos.

Além do mais, o estabelecimento de um mercado de créditos de carbono, fundamentalmente o mercado de certificados do MDL, propicia uma negociação entre geradores ou comercializados de certificados e partes que possuam metas a cumprir. Os principais instrumentos de negociação são contratos bilaterais ou por meio do mercado *spot* (à vista).

Caso os contratos sejam bilaterais, nos quais se estabelecem regras e procedimentos específicos como, por exemplo, quantidades a serem entregues, prazo e preço, o acordo é negociado no ato da contratação. Porém, este tipo de negociação tem exigido maior atenção com o gerenciamento do risco contratual.

Este risco é agravado pela volatilidade dos preços e a incerteza significativa que pode comprometer o retorno esperado dos contratos. Por outro lado, quando um investidor opta por adquirir certificados no mercado *spot*, ele assume o risco de ter que pagar um preço mais elevado do que o seria pago por uma quantia contratada em um mercado bilateral.

O presente trabalho focaliza, inicialmente, a precificação de contratos de reduções certificadas de emissões (RCEs), com destaque para os contratos individuais a termo e de opção. Contratos a termo são acordos negociados diretamente entre comprador e vendedor com a fixação do montante e preço para entrega futura. Já, num contrato de opção, qualquer uma das partes interessadas pode adquirir direito, e não obrigação, de exercer um contrato. Por outro lado, a outra parte assume compromissos devendo cumpri-los, caso sejam solicitados. Destarte, um investidor pode estimar o preço sob o qual um contrato pode ser fechado no momento em que firmar uma contratação.

Sequencialmente, apresenta-se um estudo de caso, baseado na seleção de portfólio, no qual se discute um problema de alocação de capital disponível de um investidor para um conjunto de possíveis projetos do MDL. A abordagem proposta busca a eficiência nos contratos, dentro de um contexto de otimização multiobjetivo.

Para tanto, primeiramente, foi necessário analisar a base teórica, o contexto e o sistema de mercado de créditos de carbono estabelecido pelo Protocolo de Quioto, de modo particular o mercado voltado ao MDL. Posteriormente, procurou-se demonstrar, de forma sistemática, a conexão entre este tipo de mercado e modelos de comercialização encontrados na literatura de referência.

1.2 Objetivo

Devido à existência de uma tendência de que, o segundo período do compromisso, a partir de 2012, se apresentem novas metas, pretende-se que esta dissertação contribua para o fortalecimento do mercado de créditos de carbono, em especial mercado voltado ao MDL.

Desta forma, a princípio este trabalho apresenta alguns tópicos do aquecimento global bem como: a conseqüente mudança climática, tratados de mitigação da concentração de GEE e mecanismos de mercado que visam contribuir para o cumprimento de metas de poluição estabelecidas aos países desenvolvidos.

Este trabalho, portanto, tem por objetivo principal analisar e discutir medidas de benefício e risco em investimentos individuais, através do modelo de precificação de contratos fundamentado na construção de latisses binomiais baseado em cenários históricos de preços, e em uma carteira de investimentos, através do modelo de seleção de portfólio, inicialmente proposto por Markowitz (1952).

1.3 Organização da Dissertação

Por se tratar da parte introdutória, o Capítulo 1 apresenta os objetivos e a motivação da dissertação.

Uma revisão bibliográfica, no Capítulo 2, aborda as mudanças climáticas globais bem como o histórico e principais aspectos do Protocolo de Quioto. Aqui, também é dada maior importância ao MDL, apresentando-se como uma revisão bibliográfica desde sua implantação até o processo de certificação dos projetos.

No Capítulo 3, procurou-se realizar uma revisão bibliográfica de fundamentos econômicos subjacentes aos mecanismos do mercado de carbono, com ênfase também no mercado voltado ao MDL.

Em seguida, o Capítulo 4 faz uma discussão teórica das medidas de benefício e risco em investimentos individuais.

No Capítulo 5 é utilizado o modelo de lattice binomial para precificação de contratos individuais de certificados de emissões (termo e opção), estimando o valor presente líquido esperado.

No Capítulo 6 apresenta-se a determinação de benefício e risco analisados em uma carteira de investimentos, através de uma formulação matemática, para problemas da seleção de portfólios de contratos, tomando por base: a visão geral do MDL, dos mecanismos do mercado de carbono, modelos de precificação de contratos e seleção de portfólios, resultantes da conjugação dos Capítulos de 2 a 5.

E, finalmente, no Capítulo 7 são apresentados os resultados e conclusões dessa dissertação, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 DESENVOLVIMENTO DO MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO

2.1 Antecedentes

O sistema climático deve adaptar-se ao aumento da concentração de certos gases na atmosfera para preservar o equilíbrio do balanço energético. Assim, a Terra deve liberar energia, em média, na mesma proporção em que recebe energia do Sol. E, a partir do momento que uma quantidade maior de gases contribui para reduzir a perda de energia para o espaço, o clima deve mudar para restabelecer o balanço da energia recebida e enviada. Trata-se de um aquecimento global, uma vez que esta adaptação é a forma mais simples para liberação de energia excedente (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003).

2.1.1 Efeito Estufa

A atmosfera do nosso planeta constitui-se em 99% por uma mistura de nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). Além do vapor de água (H_2O)¹, dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbonetos (HFCs), perfluorcarbonetos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6), encontram-se em pequenas quantidades e constituem os chamados GEE.

A maior parte da irradiação que nosso planeta emite dirige-se ao espaço e parte dele é retido na atmosfera, devido à presença dos GEE. Deste modo, a energia recebida por um corpo, por radiação solar, pode ser absorvida, transmitida ou refletida, conforme ilustrado na Figura 2.1.

Da energia incidente na Terra (energia da radiação eletromagnética pelo sol), a maior parte é absorvida pela superfície, resultando na elevação de sua temperatura (A), outra parte é refletida ao espaço pelas nuvens e por gases atmosféricos e partículas (B). Assim, parte da radiação infravermelha é refletida pela superfície da Terra. Porém, não regressa ao espaço, pois é refletida novamente e

¹Dentre os gases naturais, o vapor d'água também tem sido apontado como um poderoso gás causador de efeito estufa devido sua capacidade de absorção infravermelha, porém, não é mencionado entre os outros gases pelo tempo de permanência do vapor na atmosfera ser curto, além de ser incerto o crescimento de sua concentração (IPCC, 2007).

absorvida pela atmosfera (ozônio e nuvens) que envolve o planeta (C).

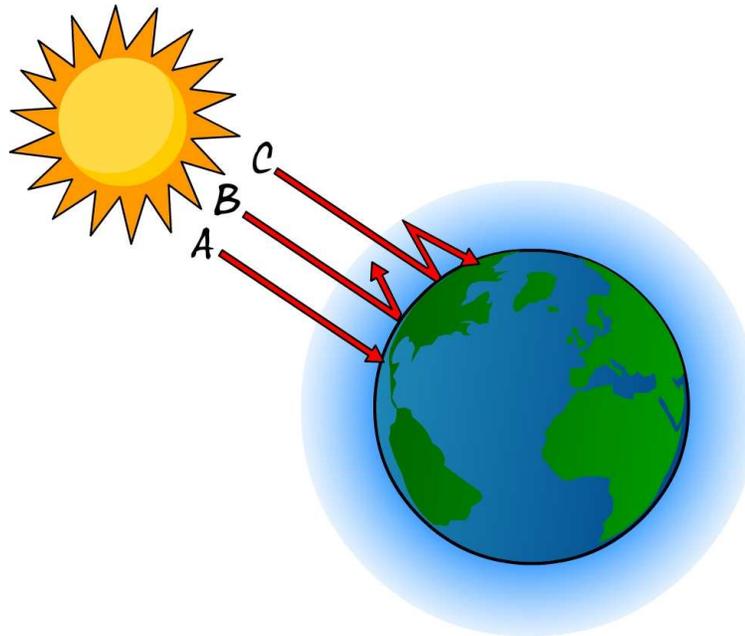


Figura 2.1 - Efeito Estufa

Dáí o denominado “efeito estufa”, no qual as radiações absorvidas pela superfície participam de processos físicos e sua energia transforma-se, resultando na emissão pela perda de calor, sob forma de radiação térmica.

As propriedades dos GEE foram primeiramente analisadas pelo matemático e físico francês Jean-Baptiste Fourier na década de 1820. Todavia, foi apenas em 1896 que o químico sueco Svante Arrhenius afirmou que a quantidade de CO₂ na atmosfera tinha relação direta com sua temperatura e que o consumo de combustíveis fósseis afetava o equilíbrio térmico da Terra (ARRHENIUS, 1896).

Desde então, o CO₂ é considerado o principal contribuinte do efeito estufa, representando algo em torno de 56% do total das emissões de GEE com permanência na atmosfera de pelo menos 100 anos (ARAUJO, 2010). Outros gases, como o metano, por exemplo, têm um Potencial de Aquecimento Global (*Global Warming Potencial – GWP²*) 25 vezes maior do que o CO₂, mas sua quantidade emitida é bem menor, contribuindo, em menor escala, para o aquecimento global, como é indicado na Figura 2.2.

²Contribuição relativa decorrente da emissão de 1 kg de um gás comparada com a emissão de 1 kg de CO₂. O GWP atualmente utilizado é o publicado pelo IPCC, em seu quarto relatório (IPCC, 2007).

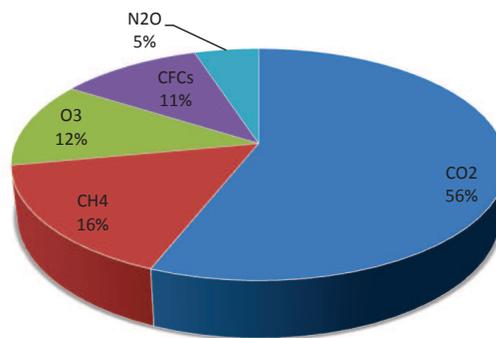


Figura 2.2 - Contribuição dos principais GEE para o aquecimento global
 Fonte: Adaptado de IPCC (2007)

Os níveis de concentração de GEE normalmente são expressos em termos de unidades de “CO₂ equivalente” (CO₂e), ou seja, todos os gases emissores possuem pesos determinados pelo GWP. Assim, são calculadas as médias ponderadas dos estoques das emissões de GEE.

Tal parcela de emissões de CO₂e na atmosfera é atribuída ao resultado acumulado das atividades antrópicas desde o início da Revolução Industrial em 1760. Sendo relacionadas, principalmente, à queima de combustíveis fósseis, mudanças do uso do solo (conversão de florestas em solo agrícola, por exemplo) e agricultura (emissões de metano provenientes da pecuária, por exemplo) (IPCC, 2007). As emissões mundiais de GEE vêm aumentando acentuadamente, com os maiores registros datados após 1940 (Fig.2.3), quando a industrialização chegou também aos países em desenvolvimento.

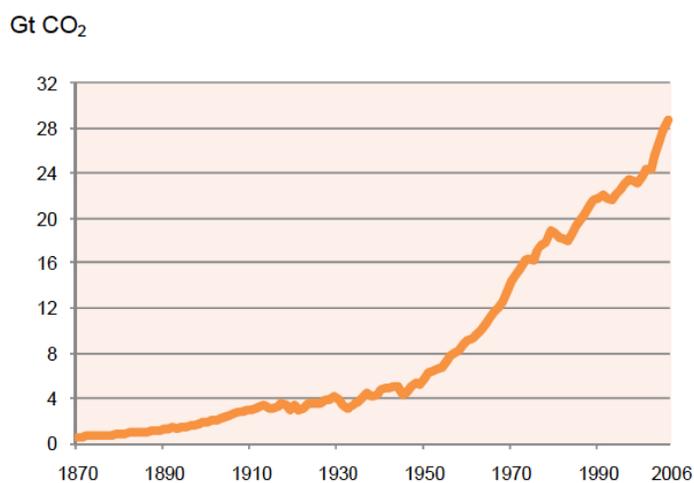


Figura 2.3 - Emissões de CO₂ pelo uso de combustíveis fósseis
 Fonte: IEA (2010a)

Não obstante tratar-se a existência do efeito estufa de um fenômeno natural e indispensável à vida no planeta, sem a qual a temperatura média na superfície da Terra seria de 15° a 20°C abaixo de zero, sua intensificação pode causar grandes prejuízos econômicos e ambientais. Principalmente em cenários que configuram demanda crescente de energia decorrentes do crescimento produtivo e populacional (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003).

Segundo Stern (2010), aproximadamente dois terços das emissões totais mundiais de GEE estão relacionados ao uso da energia, o restante relaciona-se com o uso do solo (18%), agricultura (14%) e resíduos (3%). Conforme ilustrado na Figura 2.4, o uso da energia está relacionado, sobretudo, à geração de eletricidade e calor, ao setor de transportes e a processos industriais e edificações.

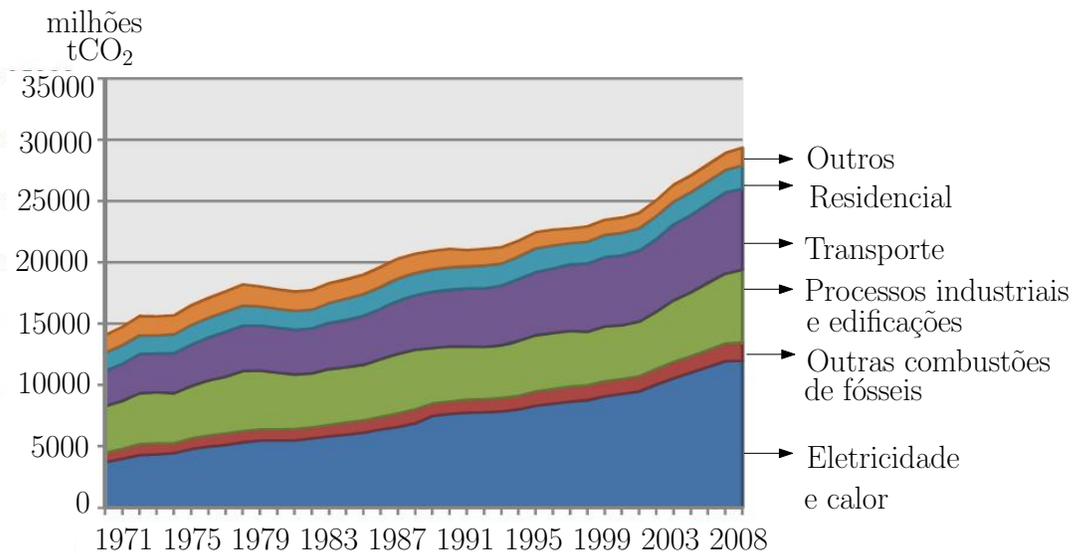


Figura 2.4 - Emissões de CO₂ associadas ao uso de energia, por setor
 Fonte: Adaptado de IEA (2010a)

A Figura 2.5 mostra a evolução da diferença de temperatura da Terra e a concentração de CO₂ nos últimos 140 anos. É evidente a correlação entre os dois fatores.

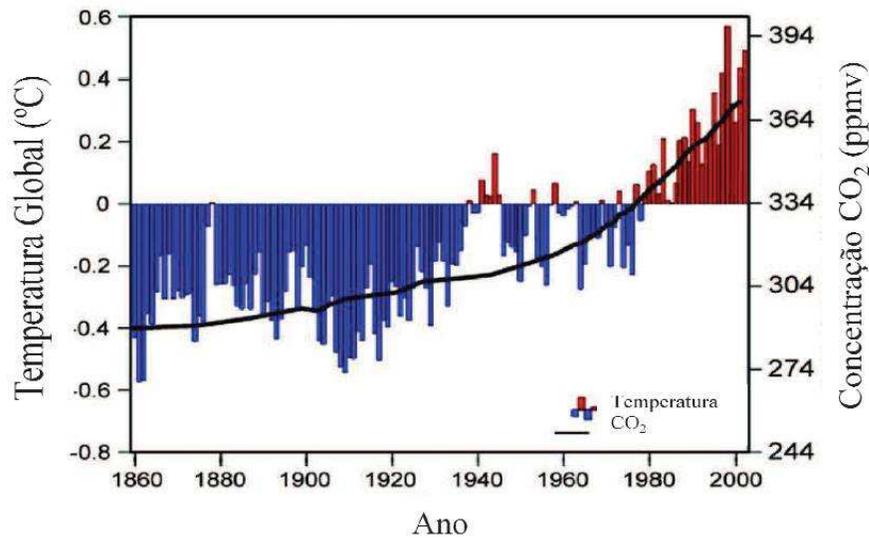


Figura 2.5 - Evolução da temperatura da Terra e concentração de CO₂
 Fonte: Adaptado de IEA (2010b)

Os maiores registros de temperaturas anuais na superfície da Terra em mais de um século observado, concentra-se no período desde a década de 80. Cientistas ponderam que a concentração de CO₂ na atmosfera está 30% acima do normal e já é maior do que a observada nos últimos 400 mil anos. O cenário anterior não deixa de ser verídico. E, caso se mantenha tal aceleração na emissão de CO₂ e sua consequente mudança do clima, o ser humano continuará a se deparar com fortes e frequentes furacões, recuo das geleiras, aumento de epidemias, incêndios florestais, secas, enchentes, etc.

A contribuição das emissões de CO₂ dos diferentes países é dada na Figura 2.6. Da esquerda do gráfico para a direita, os países são adicionados na ordem de suas emissões absolutas, com o maior emissor adicionado inicialmente. Neste caso, estão excluídas as emissões de CO₂ pela mudança no uso da terra e florestas.

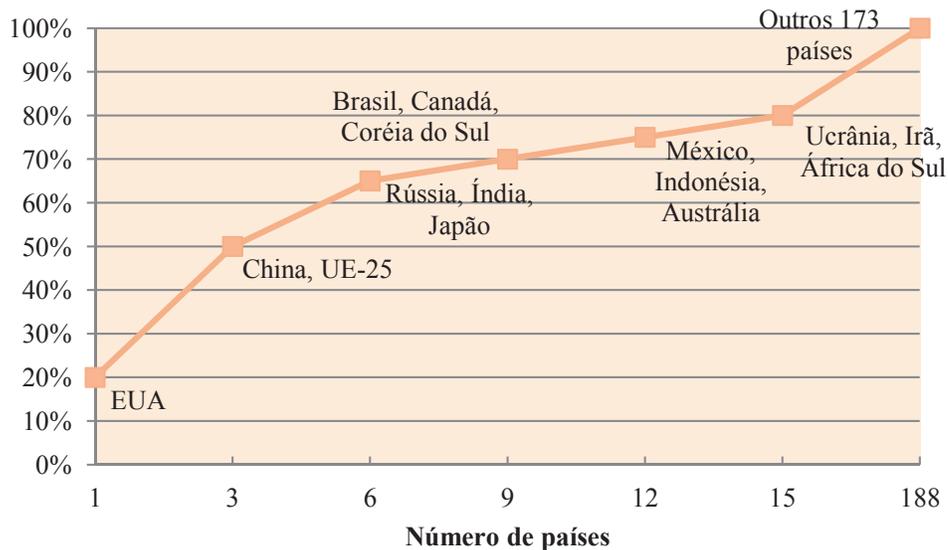


Figura 2.6 - Contribuição agregada dos maiores emissores de GEE
 Fonte: Adaptado de WRI e CAIT (2005)

Aproximadamente, 50% das emissões são devidos aos EUA, China e UE-25. Somadas as emissões da Rússia, Japão, Índia, Brasil, Canadá e Coreia do Sul, chega-se a 70% das emissões de GEE. Cabe ressaltar que, nos países desenvolvidos, as emissões são sobretudo devidas à queima de combustíveis fósseis (transportes e geração de eletricidade e calor); já, nos países em desenvolvimento, as emissões devido à mudança no uso da terra são quase tão importantes quanto à queima de combustíveis fósseis (WRI; CAIT, 2005).

2.1.2 Aquecimento global e mudanças climáticas

As mudanças climáticas representam um dos maiores desafios político, econômico e social atuais da humanidade, como consequência da crescente emissão de carbono, que gera sérios problemas à atmosfera do planeta.

A temperatura média da Terra já aumentou quase 1°C desde o início do período industrial e cientistas concordam que, se as emissões de CO₂ dobrarem, a temperatura mundial aumentará cerca de 3°C, com faixa de incerteza entre 2°C a 4,5°C. As concentrações atmosféricas globais de

CO₂ ficaram na faixa de 200 a 300 partes por milhão (ppm) durante 800.000 anos, mas saltaram para cerca de 387 ppm nos últimos 150 anos. Há fortes evidências científicas de que esse fenômeno se deve ao aumento da concentração dos GEE na atmosfera (IPCC, 2007).

Os efeitos já são visíveis no aumento das temperaturas médias do ar e do oceano, no derretimento generalizado da neve e do gelo e na elevação dos níveis do mar, conforme ilustrado na Figura 2.7. Dias frios, noites frias e geadas estão se tornando menos frequentes enquanto as ondas de calor são mais comuns (BIRD, 2009b).

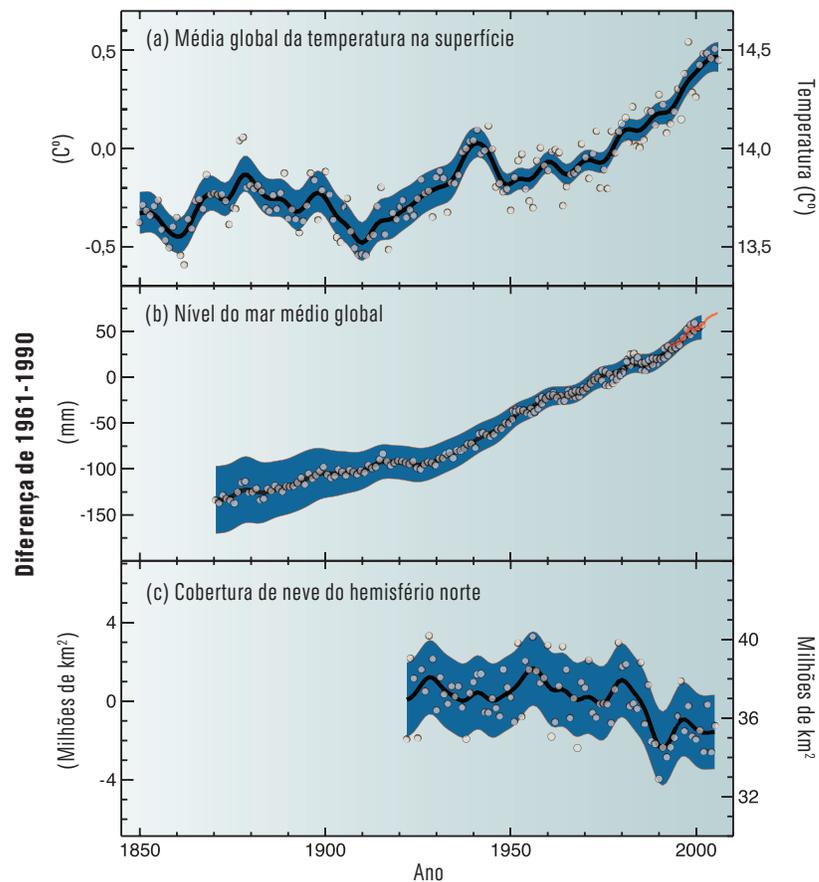


Figura 2.7 - Mudanças na temperatura, nível do mar e cobertura de neve no hemisfério norte
Fonte: MCTI (2009b)

Os gráficos apresentados acima ilustram o efeito do aumento das emissões na temperatura da superfície terrestre, no nível do mar e na cobertura de neve no hemisfério norte.

A melhor compilação das descobertas mais relevantes em relação aos estudos das mudanças climáticas global é a avaliação científica do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

(*Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC*), criado formalmente em 1988, em Toronto, de que participam centenas de cientistas de diversos países. Até o momento, já foram divulgados quatro Relatórios de Avaliação compreendendo a base científica, impactos, vulnerabilidade e adaptação e mitigação da mudança climática global.

Em 1990, o IPCC publicou seu Primeiro Relatório com uma declaração investida da autoridade da comunidade científica internacional, confirmando a hipótese do aquecimento global. Foi seguido pela atualização em 1995, por meio de um Segundo Relatório, que trazia evidências da influência humana no processo de aquecimento global; as quais foram fortalecidas com argumentos científicos mais sólidos no Terceiro Relatório, publicado em 2001, reiterando as hipóteses anteriormente apresentadas. Já, em seu Quarto e último Relatório publicado em 2007, em partes, o IPCC declarou que o “aquecimento do sistema climático é indiscutível” e atribuiu, com 95% de certeza, a influência humana no clima global. Assim, os relatórios do IPCC vêm a ser importante ferramenta para a maturação dos conhecimentos com relação à mudanças climáticas.

Com base nos resultados do primeiro relatório do IPCC, foi adotada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (*United Nations Framework Conference on Climate Change – UNFCCC*), em 1992, assinada por 189 países durante a Cúpula da Terra (Eco-92 ou Rio-92). Em vigor desde 1994, a UNFCCC foi o princípio das discussões sobre as alterações no clima e, nesse momento, adotaram-se metas voluntárias de redução de emissão de GEE.

Para implementação da Convenção, foi criado seu órgão supremo, a Conferência das Partes (*Conference of the Parties – COP*). O objetivo da COP é revisar e discutir periodicamente as questões climáticas; bem como as metas e ações a serem alcançadas para estabilização das concentrações de GEE na atmosfera, com a possibilidade de adoção de compromissos adicionais.

Até dezembro de 2011, 17 COPs foram realizadas entre os países participantes da UNFCCC, estabelecendo claramente compromissos diferenciados aos países desenvolvidos e aos em desenvolvimento. A primeira delas, COP-1, ocorreu em Berlim no ano de 1995, e contou com a participação daqueles que ratificaram a Convenção, entre outros interessados.

Em 1995, estava claro que os resultados seriam insatisfatórios com metas de redução apenas voluntárias. No entanto, após alguns anos de negociações dentro da UNFCCC, na terceira sessão (COP-3) realizada em dezembro de 1997, em Quito no Japão, adotou-se um instrumento legal contendo compromissos mais fortes para os países desenvolvidos. Entre outras medidas, a COP-3 adota o primeiro instrumento legal internacional que propõe uma solução comercial a um problema

ambiental global, o Protocolo de Quioto. Por fim, a COP-17, realizada em Durban, África do Sul, foi a chave da discussão para o futuro do Protocolo de Quioto.

Destarte, do ponto de vista científico, há praticamente um consenso de que a Terra passa por um período de aquecimento e a concentração de GEE na atmosfera está aumentando; devido a ações antropogênicas, embora ainda não se saiba precisamente sua fração correspondente. Ainda em concordância, alterações na cobertura do solo, concentração de nuvens e das partículas na atmosfera comprometem o balanço da radiação solar, causando também o aquecimento global.

Segundo o Relatório sobre o Desenvolvimento Mundial de 2010, a redução da pobreza e o desenvolvimento sustentável continuam a ser prioridades globais. Abordar essas necessidades deve continuar a ser prioridade, reconhecendo que o desenvolvimento se tornará mais difícil com a mudança climática, a qual também deverá provocar grandes efeitos negativos sobre os sistemas socioeconômicos.

Nessa perspectiva, Lomba (2009) cita três critérios que devem guiar a evolução das políticas de mudanças climáticas. Em primeiro lugar, a efetividade, a qual deve resultar em níveis de emissões de GEE; que mantenham os riscos derivados da mudança climática em níveis aceitáveis com a implementação, por exemplo, de reduções nas emissões tanto dos países industrializados quanto dos países em desenvolvimento. Em segundo lugar, a eficiência, a qual deve minimizar os custos associados ao processo de redução de emissões, por exemplo, com o estabelecimento de um processo que padronize o preço do carbono. E, como último critério, a equidade; que, neste caso, os países desenvolvidos são os responsáveis pela maior parte das emissões.

No entanto como medidas de caráter econômico, Lomba (2009) faz referência aos instrumentos de mandato e controle, os quais exigem um comportamento dos agentes econômicos em fixar limites máximos de emissões de gases. Penalizando deste modo, o seu não cumprimento e aos instrumentos de mercado, os quais geram incentivos para que agentes econômicos reduzam suas emissões ou desenvolvam tecnologias mais limpas.

As evidências aqui apresentadas, advertem que a mudança climática global atribuirá custos expressivos à humanidade e aos ecossistemas. Os fatores de mitigação (redução das emissões de GEE) e adaptação (adequação dos sistemas natural ou humano) podem minimizar esses dados (BIRD, 2009a).

2.2 Protocolo de Quioto

Na mais importante das COPs, realizada no ano de 1997 em Quioto, no Japão, na terceira reunião da Conferência entre as Partes (COP-3), os países da Organização das Nações Unidas (ONU) assinaram um acordo estipulando certo controle sobre as intervenções humanas no clima para um horizonte compreendido entre os anos de 2008 e 2012. Tal acordo, denominado Protocolo de Quioto, trouxe a possibilidade do uso de mecanismos de mercado para que, os países signatários do Protocolo de Quioto, que fazem parte do Anexo I (A1) da Convenção, cumpram suas metas de redução de emissões de GEE estabelecidas no Anexo B³ do Protocolo (UNFCCC, 2011b).

Os países listados no A1 são os desenvolvidos membros da OECD (*Organization for Economic Co-operation and Development*⁴), exceto México e Coréia do Sul, além de países industrializados em processo de transição para economias de mercado⁵ (UNFCCC, 2011b).

O Protocolo de Quioto entrou em vigor em 16 de fevereiro de 2005, em conformidade com o artigo 23, por ser o nonagésimo dia após a data em que, pelo menos 55 Partes da UNFCCC, ratificaram, aceitaram, aprovaram ou aderiram ao Protocolo; incluindo nesse número as Partes do A1 responsáveis por pelo menos 55% das emissões totais de dióxido de carbono no ano de 1990. Atualmente, 193 Partes (192 países e 1 bloco econômico regional) responsáveis por 63,7% das emissões aderiram ao Protocolo de Quito (UNFCCC, 2011b).

Este Protocolo constituiu uma proposta concreta para iniciar o processo de estabilização de GEE, baseada no princípio “responsabilidade comum, porém diferenciada”. Comum, porque é de responsabilidade de todos os países combater o aquecimento global. Porém, aqueles que mais contribuíram historicamente para o cenário de acúmulo de gases na atmosfera têm obrigação maior de reduzir suas emissões. Um aspecto intrínseco do Protocolo é que apenas os países listados no A1 e que assinaram o Protocolo são obrigados a reduzir suas emissões, estando sujeitos à punições pelo não cumprimento (UNFCCC, 1998).

³O Protocolo de Quioto traz o Anexo B listando os compromissos quantificados de limitação ou redução de emissões de todos os países do A1, com exceção de Belarus e Turquia, os quais não eram partes da Convenção no momento de adesão ao Protocolo (OLIVEIRA, 2004).

⁴Alemanha, Austrália, Áustria, Belarus, Bélgica, Canadá, Dinamarca, Espanha, Estados Unidos da América, Finlândia, França, Grécia, Irlanda, Islândia, Itália, Japão, Liechtenstein, Luxemburgo, Mônaco, Noruega, Nova Zelândia, Países Baixos, Portugal, Reino Unido da Grã-Bretanha e Irlanda do Norte, Suécia, Suíça, Turquia, União Europeia.

⁵Bulgária, Croácia, Eslováquia, Eslovênia, Estônia, Federação Russa, Hungria, Letônia, Lituânia, Malta, Polônia, República Tcheca, Romênia, Ucrânia.

Como consequência do não cumprimento com relação ao Protocolo de Quito, a Parte sofrerá uma dedução de um número de toneladas equivalente a 1,3 vez a quantidade em toneladas das emissões excedentes da quantidade atribuída para o segundo período de compromisso. Além de desenvolver um plano de ação de cumprimento e suspensão da elegibilidade para a realização de transferências até que a situação esteja regularizada (MCTI, 2009b).

Entre os 28 artigos do Protocolo, três tratam dos chamados mecanismos de flexibilização (ou mecanismos de mercado): Implementação Conjunta (IC), Comércio Internacional de Emissões (*International Emission Trading* – IET) e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL). Com o uso deles, as Partes no A1 podem alcançar suas metas de redução de emissões através da geração de créditos relativos às emissões reduzidas em outros países e com um melhor custo-benefício em relação às atividades internas. Os mecanismos devem ser suplementares às ações domésticas (UNFCCC, 2008).

Em síntese, o Protocolo então propõe:

- Limite de emissões de GEE;

Cada um dos países do A1 terá um limite máximo (diferenciado entre os países) para emitir GEE. Tais limites são divididos em unidades de quantidade atribuída (UQAs), calculado por “emissões do ano-base x meta de redução de emissões x cinco”. No total, esse limite corresponderá, em média, 5,2% de redução do volume de GEE emitido em 1990 (embora os países possam usar 1995 como ano-base para os HFCs, PFCs e SF₆), devendo ser cumprida entre 2008 e 2012 (MCTI, 2009a).

- Mecanismos de flexibilização.

Se um país do A1 exceder seu limite de emissões, outro país que obteve folga no cumprimento de sua meta, poderá transferir a diferença. Os países não-Anexo I (NA1), ou em desenvolvimento, poderão vender aos do A1 créditos gerados pelo surgimento de novas atividades que sequestrem dada quantidade certificada de GEE da atmosfera ou que reduzam as emissões de GEE.

Devido à escala exigida na redução das emissões de GEE, a participação dos países emergentes é indispensável tanto para eficácia, quanto para assegurar o alcance eficiente das metas de estabilização. De modo geral, o custo total da mitigação pode ser bastante reduzido por meio de mecanismos de financiamento de carbono de bom desempenho, transferências financeiras e sinalizações adequadas de preços (BIRD, 2009b).

2.3 Mecanismos de mercado

Os três mecanismos criados fazem parte de um sistema no qual a quantidade de emissões que cada Parte do A1 precisa reduzir ou remover é dividida em unidades. Cada um igual a uma tonelada de moléculas de dióxido de carbono equivalente (CO₂e).

Passaremos, a seguir, a avaliar individualmente cada um dos mecanismos de flexibilização mencionados na seção 2.2, conferindo maior profundidade ao MDL em razão de sua importância ao estudo proposto, apresentando-o de forma detalhada na seção 2.4.

2.3.1 Implementação Conjunta

Definido no artigo 6 do Protocolo de Quioto, o mecanismo de Implementação Conjunta (IC) permite que uma Parte no A1; a qual possua metas a cumprir; obtenha unidades de redução de emissões (UREs), através de projetos de redução ou remoção de emissões em outra Parte também no A1. Assim, a IC oferece às Partes um meio flexível e economicamente eficiente de cumprir uma parte de seus compromissos, enquanto o país anfitrião beneficia-se pelo investimento estrangeiro e transferência de tecnologia (UNFCCC, 2011b).

As Partes no A1 podem usar as UREs em benefício próprio como forma de contribuir para o cumprimento de suas metas quantificadas, bem como vendê-las a outras Partes. Porém, o limite total de emissão delas não mudará; uma vez que a IC é uma transferência de créditos entre as Partes, ambas com limites de emissão (MCTI, 2009b).

Um projeto de IC deve apresentar uma redução efetiva de emissões por fontes ou ainda um aumento das remoções por sumidouros. Sendo adicionais, portanto, ao que teria ocorrido sem a existência do mesmo. Após a verificação de todos os requisitos de elegibilidade, a Parte anfitriã pode emitir a quantidade adequada de UREs.

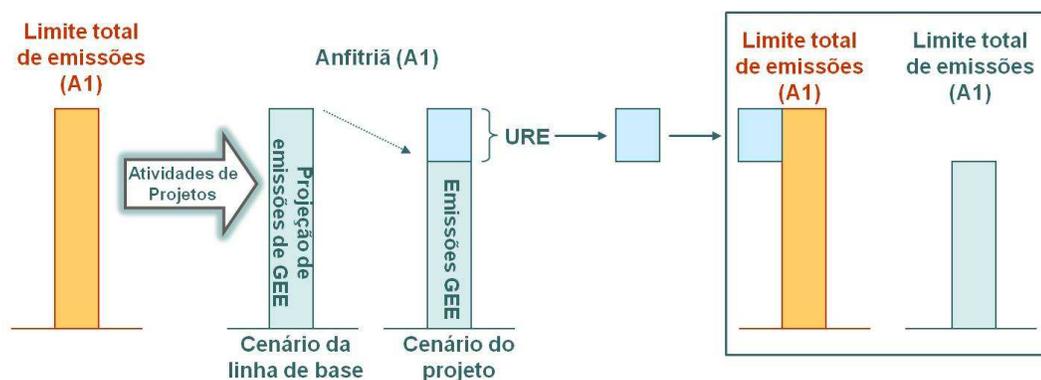


Figura 2.8 - Esquema do mecanismo de IC

Através deste sistema, objetiva-se a redução dos custos para que sejam mais baixos dos quais seriam verificados, caso fossem implementados individualmente, por cada Parte. Um país investindo em outro, o montante investido gera um benefício climático maior do que se aplicado em seu mercado interno.

Trata-se, por conseguinte, de um mecanismo com maior liquidez, por envolver uma menor quantidade de dinheiro e poluição, no qual os referidos membros realizam projetos conjuntos com o propósito de atingir suas metas, que se converterá em cotas de poluição para o país que custeou o projeto. Deduzindo-se, desta forma, das cotas do país financiado.

2.3.2 Comércio Internacional de Emissões

O Comércio Internacional de Emissões (*International Emission Trading – IET*) tal como estabelecido no artigo 17 do Protocolo de Quioto, permite aos países que possuem excedentes de UQAs, ou seja, emissões permitidas, mas não utilizadas, que vendam este excesso para os países que estão acima de suas metas. Outras unidades de emissões também podem ser negociadas e vendidas no âmbito do IET do Protocolo de Quioto, tais como:

- Unidade de remoção (URM), calculada a partir da remoção líquida de GEE pelas atividades de florestamento e reflorestamento (F/R) e por atividades adicionais relacionadas com as remoções de GEE por sumidouros;

- URE, gerada por projetos de IC;
- RCE, gerada a partir de uma atividade de projeto do MDL.

O IET, assim como os outros dois mecanismos, apresenta um caráter suplementar às ações domésticas com o objetivo de atender aos compromissos quantificados de limitação e redução de emissões. Por meio de mecanismo de mercado, o IET pode reduzir o custo total incorrido pelas Partes no A1 para alcançar suas metas de redução de emissões, conforme ilustrado abaixo (MCTI, 2009b):

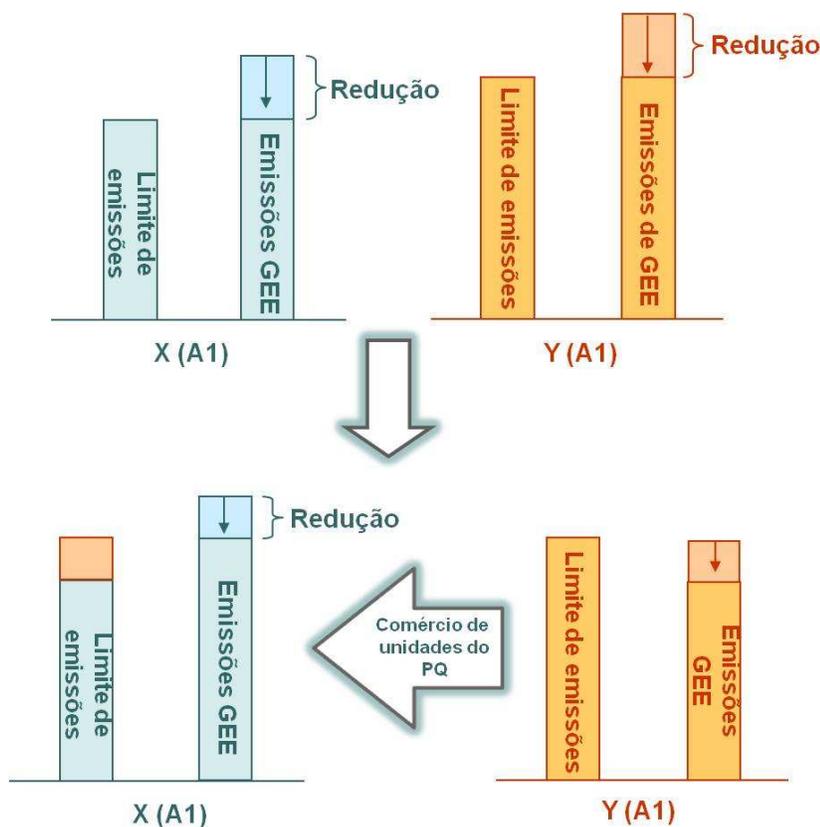


Figura 2.9 - Esquema do IET

Assim, o limite de emissões de GEE de uma Parte no A1 no final do primeiro período de compromisso (2008–2012) é o seguinte:

$$\text{Limite de emissões A1} = \text{UQAs} + \text{URMs} + \text{UREs} + \text{RCEs} \pm \text{Unidade adquiridas e transferidas pelo IET}$$

As transferências e aquisições destas unidades são rastreadas e registradas por um sistema previsto no Protocolo, o que garante a segurança da transferência entre os países.

Cabe ressaltar aqui a possibilidade de empresas privadas terem acesso direto ao mercado de carbono, desde que estejam sob a responsabilidade do país a que pertençam. A compra e venda de carbono dentro deste mecanismo pode se realizada por instituições financeiras e os valores relacionados são contabilizados na cota de seu país.

Esquemas de IET podem ser fundados como instrumentos de política do clima a nível nacional e regional. Através de tais esquemas, os governos estabelecem um número limitado de permissões de emissão dos GEE a ser alcançado pelas entidades participantes. O esquema desse comércio, presente na União Europeia, é o maior em operação, atualmente (UNFCCC, 2011b).

2.4 Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

O Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) originou-se na proposta brasileira de criação de um Fundo de Desenvolvimento Limpo, que seria formado por meio de recursos financeiros dos países desenvolvidos que não cumprissem suas metas de redução de GEE. Este conceito não foi aceito por alguns países, transformando-se, então, em MDL.

O referido mecanismo consiste na implementação ou implantação⁶ de atividades de projetos⁷ de redução de emissões de GEE, ou imobilização/remoção de emissões nas Partes NA1 que não têm limites de emissão, com o auxílio das Partes A1. Reduzir ou remover tais emissões significa dizer que projetos deverão valer-se de eficiência energética como uso de fontes e combustíveis renováveis e atividades de florestamento ou reflorestamento (SISTER, 2008).

Deste modo, créditos serão emitidos com base nas reduções de emissões obtidas pelas atividades de projeto. Tais créditos são chamados de reduções certificadas de emissões (RCEs) e, conforme descrito no artigo 12, devem ser “adicionais às que ocorreriam na ausência da atividade certificada de projeto”.

O conceito de adicionalidade é de extrema importância para um projeto ser classificado como

⁶Além da implementação de novas plantas, são também elegíveis ao MDL atividades de implantações em projetos já existentes: adição de capacidade, repotenciação e substituição.

⁷Tipos de projetos do MDL serão discutidos na subseção 2.4.1.

MDL. “Uma atividade de projeto MDL é adicional se as emissões antrópicas de gases de efeito estufa por fontes são reduzidas a níveis inferiores aos que teriam ocorrido na ausência da atividade de projeto de MDL registrada” (MCTI, 2009a). Resumidamente, um projeto é considerado adicional se sua implementação não fosse possível sem a expectativa dos seus créditos de carbono.

Casos como um parque de geração eólica, por exemplo, que pode vender a eletricidade que produz gerando benefício extra ao adquirido com a venda de créditos de carbono, deve ser justificado pela impossibilidade de construção; sem os recursos provenientes do MDL (MCTI, 2009b). Se, do ponto de vista financeiro e econômico, for mais interessante optar por construir uma usina térmica, o projeto pode também ser considerado adicional por optar por fazer uma usina hidrelétrica, por exemplo, motivado pelo MDL.

Como define o artigo 12 do Protocolo de Quioto, o objetivo do MDL é viabilizar a assistência às Partes NA1 para que alcancem o desenvolvimento sustentável, ao mesmo tempo, em que cooperam no processo de mitigação do aquecimento global. E ainda, ajudam as Partes no A1 a cumprir suas metas de redução de emissões (MCTI, 2009b).

Outrossim, as Partes no A1 podem usar as RCEs geradas nesses projetos, como forma de compensar suas reduções de emissões, não realizadas domesticamente, aumentando o limite de suas emissões, conforme ilustrado na Figura 2.10.

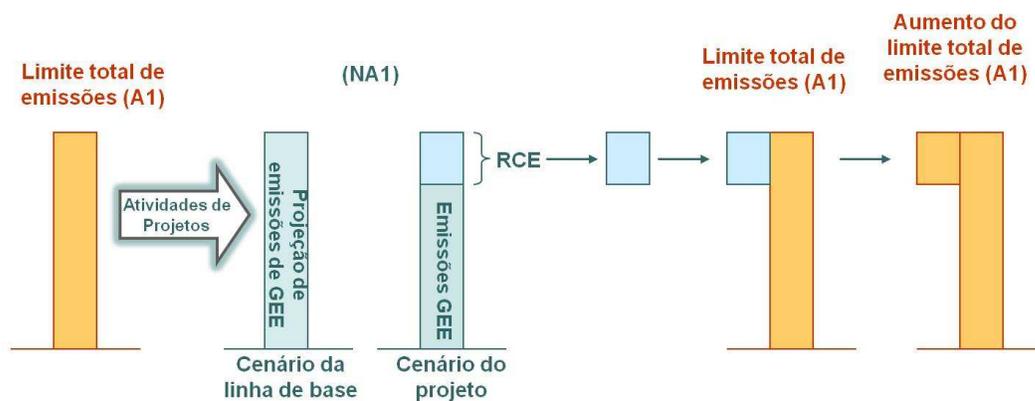


Figura 2.10 - Esquema do comércio no MDL

No caso do MDL, o limite de emissões é ultrapassado. Porém, as emissões líquidas globais não aumentam. Isto é possível, porque haverá a compensação através de um projeto que evita outras emissões ou sequestra GEE, na mesma quantidade. Desta forma, é que este mecanismo contempla tanto os interesses dos países poluidores, quanto daqueles em desenvolvimento. Justificando-se,

ainda, pelo menor custo de redução ou remoção de GEE fora das fronteiras nacionais dos países no A1.

2.4.1 Acordos de Marraqueche, ciclo e tipologia dos projetos

As normas dos Acordos de Marraqueche foram estabelecidas em 2001, durante a COP-7. Em decorrência, formou-se um conjunto de decisões disciplinando regras operacionais de medidas de mitigação confiadas pelo Protocolo de Quioto, a fim de avaliar os procedimentos de operacionalização dos mecanismos de flexibilização, em especial, o MDL. A partir daí, novas complementações e detalhamentos de questões relacionados ao MDL vêm ocorrendo no âmbito das COPs.

Dentre as decisões instituídas na COP-7, na Decisão 17 se estabeleceu o ciclo do projeto, do qual um projeto do MDL deve passar para obter a certificação das RCEs. Além da admissão do desenvolvimento de projetos e a atuação dos órgãos competentes para gerenciar o MDL; mesmo antes da entrada em vigor do Protocolo de Quioto.

Ciclo de um projeto do MDL

Os projetos do MDL possuem várias etapas de submissão até atender a todos os requisitos exigidos pelo Protocolo. A seguir, a descrição detalhada das etapas do ciclo de um projeto do MDL, instituída na COP-7, em Marraqueche.

1. Concepção do projeto.
2. Preparo do Documento de Concepção do Projeto (DCP).
3. Validação.
4. Aprovação.
5. Registro.
6. Implementação do projeto.
7. Monitoramento.

8. Verificação e certificação.

9. Emissão das RCEs.

Na fase de concepção do projeto, na primeira etapa, há o preparo de uma nota de ideia do projeto por empresa competente. Definindo-se assim, a escala do projeto, bem como sua metodologia a ser aplicada. As atividades de projetos do MDL podem ser divididas em diferentes tipos, conforme ilustrado na Figura 2.11, dependendo do tamanho e dos tipos de atividade envolvidos.

Em seguida, os participantes do projeto elaboram o DCP, que deve ser realizado segundo formulário padrão disponibilizado pela UNFCCC. Nesta fase, há uma descrição geral das atividades a serem desenvolvidas no projeto, da metodologia da linha de base⁸ adotada, duração do projeto e do período de creditação, metodologia e plano de monitoramento, cálculo das emissões de GEE por fontes, quando houver, impactos ambientais e comentários das partes interessadas (*stakeholders*)⁹.

Por consequência, o DCP é encaminhado para uma Entidade Operacional Designada (EOD)¹⁰, que deve emitir um relatório de validação caso tenha sido acatados todos os quesitos de implementação de um projeto do MDL. Se forem atendidas as condições de metodologia e linha de base do país anfitrião, o projeto pode ser registrado. Mediante análise dos pareceres emitidos pela EOD, as autoridades nacionais designadas (ANDs), papel representado pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC) em nível de Brasil, é encarregada por emitir e encaminhar ao Conselho Executivo (CE)¹¹ uma carta de aprovação para o início da implementação e registro do projeto do MDL (SEIFFERT, 2009).

A partir daí, a atividade do projeto é registrada e as RCE já entram em um ciclo de validação, podendo ser verificadas, certificadas e então, emitidas. Em decorrência de procedimentos do MDL, anteriormente à etapa 8, faz-se assim necessário, um monitoramento periódico pelos participantes do projeto para coletar e armazenar os dados necessários para calcular as reduções de emissões de GEE ou o aumento de remoções de CO₂ (MCTI, 2009b). A verificação é realizada periodicamente, nas quais são conferidas se as reduções de emissões realmente ocorreram em decorrência da atividade de projeto do MDL. Posteriormente, a EOD certifica, por escrito, que durante o monitoramento o projeto atingiu sua efetiva redução de emissões de GEE ou remoção de CO₂.

⁸Descrita na subseção 2.4.2.

⁹Definidos como “*público, incluindo os indivíduos, os grupos ou as comunidades afetadas, ou com possibilidade de serem afetadas, pela atividade de projeto do MDL.*”, conforme descrito no A1 da Decisão 17/COP-7.

¹⁰EOD é uma entidade jurídica do país ou uma organização internacional credenciada pela UNFCCC.

¹¹O Conselho Executivo é o órgão que supervisiona o funcionamento do MDL, representado pela UNFCCC.

Aqui, uma atenção especial deve ser dada à definição das metodologias referentes ao monitoramento. É necessário verificar junto ao CE o *status* da metodologia que se pretende adotar. As metodologias já aprovadas utilizam uma fórmula, chamada fator de emissão (supondo a geração de energia por uma fonte poluidora), como a informação chave a ser determinada no cenário de linha de base. Assim, tanto para o cálculo das emissões reduzidas ou removidas quanto para a adicionalidade do projeto, multiplica-se o fator de emissão (tCO₂/MWh) pela energia renovável gerada (MWh/ano) (CONEJERO, 2006).

Caso a atividade de projeto proposta ainda não tenha metodologia aprovada, a mesma deve ser então reconhecida pelo CE para que se possa dar continuidade ao ciclo. Porém, isto ocasiona uma elevação no nível de complexidade e risco do projeto de MDL (SEIFFERT, 2009).

Uma lista de escopos setoriais na Tabela 2.1 com seus respectivos números de metodologias adotadas para o monitoramento foi elaborada com base na lista de setores contida no Anexo A do Protocolo de Quioto e no registro de metodologias no sítio da UNFCCC¹². Os escopos setoriais de credenciamento definem os limites do trabalho que uma EOD poderá desempenhar no âmbito do MDL com relação à validação e verificação/certificação pertinentes a um determinado setor.

Tabela 2.1 - Metodologias aprovadas por escopo

Escopos	Número de metodologias
Indústrias de energia (fontes renováveis/não renováveis)	59
Distribuição de energia	3
Demanda de energia	21
Indústrias manufatureiras	28
Indústrias químicas	20
Construção	0
Transporte	12
Mineração/produção mineral	1
Produção de metais	7
Emissões fugitivas dos combustíveis (sólidos, oleosos e gasosos)	8
Emissões fugitivas da produção e do consumo de halocarbonos e hexafluoreto de enxofre	9
Uso de solventes	0
Tratamento e disposição de resíduos	20
Florestamento e reflorestamento	21
Agricultura	6

Fonte: Adaptado de UNFCCC (2011a)

¹²Atualizada em 24/09/2011 (UNFCCC, 2011b).

Decorrida esta etapa, a EOD solicita ao CE a emissão do montante certificado de RCE correspondente ao total de emissões reduzidas ou removidas. As RCE são emitidas para a conta pendente do CE no Registro do MDL, que torna pública tais emissões. Do valor a ser depositado, 2% do total das RCE são deduzidos a favor de um Fundo de Adaptação para auxiliar países em desenvolvimento particularmente vulneráveis às mudanças climáticas.

Por fim, o país anfitrião requer a transferência destas RCE de acordo com o estabelecido entre os participantes do projeto, podendo ser transferidas para uma conta do próprio país anfitrião (Registro do MDL) ou diretamente para a conta dos participantes da Parte no A1 (Registro nacional) (MCTI, 2009b). Qualquer que seja a situação das RCE geradas por projetos do MDL, estas apenas circulam entre as contas registradas pelo CE.

Para melhor visualizar o processo descrito, a Figura 2.11 traz o esquema ilustrado.

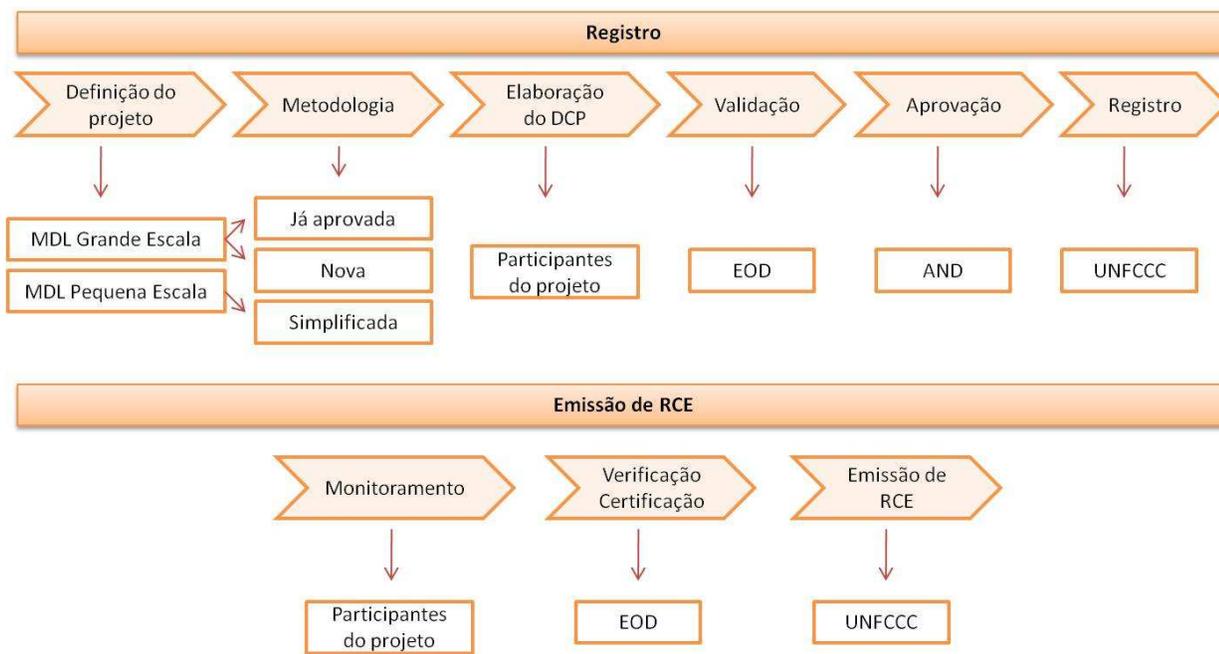


Figura 2.11 - Ciclo do projeto do MDL

De acordo com Sister (2008), até o momento a maior parte das operações alcançadas pelas negociações de RCE sustenta-se sob:

- Emissão das RCE pelo CE do MDL ao titular do projeto, após passar por todas as etapas do ciclo de aprovação para o MDL;

- Negociação entre a parte geradora das RCE e a que pretende obtê-las em momento posterior ao desenvolvimento e entrada em vigor do projeto do MDL;
- Negociação de RCE entre as partes interessadas antes mesmo do início do projeto do MDL ou de sua emissão por parte das entidades competentes, ocorrendo o adiantamento de recursos pelo futuro adquirente das RCE.

Pode-se aferir, portanto, que a partir do registro de um projeto no CE do MDL já é possível atrair interesse dos investidores. Porém, as RCEs só devem ser emitidas para um período de obtenção de créditos com início após a data de registro de uma atividade de projeto no âmbito do MDL.

Tipologia dos projetos do MDL

Os participantes dos projetos que desejam desenvolver uma atividade de projeto do MDL, devem, primeiro determinar em qual categoria a atividade de projeto se enquadra, tendo em vista a existência de diferentes modalidades, procedimentos e formatos aplicados para cada tipo de projeto. Assim, as atividades de projetos do MDL podem ser divididas, de acordo com o tamanho e tipo de atividade realizada, conforme descrito abaixo:

- Projetos de pequena escala;

Três tipos de projetos são reconhecidos atualmente como sendo elegíveis às atividades de projetos de pequena escala no âmbito do MDL e no setor de redução de emissões:

- i) Projetos de energia renovável com capacidade máxima de produção equivalente à até 15 MW (ou uma equivalência adequada);
- ii) Projetos de melhoria da eficiência energética que reduzam o consumo de energia, no lado da oferta e/ou da demanda, em até o equivalente a 15 GWh por ano;
- iii) Projetos que tanto reduzam as emissões antrópicas por fontes, quanto emitam diretamente, menos de 15.000 tCO₂e por ano.

A estrutura dos projetos de pequena escala, no âmbito do MDL permite que os participantes dos mesmos usem uma metodologia mais simplificada, quanto aos procedimentos do MDL, o que ajuda a reduzir os custos de transação, com relação aos dos projetos de grande escala. Conforme

descritos na subseção 2.4.3.

- Projetos de grande escala;

Classifica-se nesta categoria, atividades de projetos do MDL que não são atividades dos de pequena escala ou de F/R.

- Projetos de F/R de pequena escala;

Tais projetos devem promover remoções líquidas de GEE por sumidouros inferiores a 8 quilotoneladas por ano. E ainda devem ser desenvolvidos ou executados por comunidades e indivíduos de baixa renda. Da mesma forma que as atividades de projeto de pequena escala, estas de F/R também pagam taxas menores para requerimento de registro e despesas administrativas.

- Projetos de F/R de grande escala.

Atividades de projetos de F/R que não são atividades de projetos de F/R de pequena escala no âmbito do MDL.

Há uma grande diversificação de tipos de projetos que apresentam uma tendência a serem considerados projetos do MDL. No entanto, de maneira geral, todos devem ser capazes de induzir à redução de emissões de GEE ou a remoção desses gases da atmosfera, sempre sendo justificados pela adicionalidade do projeto. A Tabela 2.2 apresenta, resumidamente, a tipologia dos projetos considerados mais relevantes elegíveis ao MDL.

Tabela 2.2 - Tipologia dos projetos elegíveis ao MDL

Atividade	Categorias	Opções específicas
Redução de emissões	Energia renovável	– Hidroelétricas / PCHs – Biomassa como eletricidade/ combustível – Energia geotérmica – Energia eólica
	Substituição de combustíveis	– Processos industriais – Transporte – Biomassa
	Eficiência energética	– Indústrias – Construção
	Cogeração	– Combustíveis fósseis – Biomassa
Sumidouros de GEE	Florestamento/ Reflorestamento	– Atividades de uso da terra, mudança no uso da terra e florestas
	Imobilização de GEE	– Imobilização geológica

Fonte: Adaptado de UNFCCC (2011a) e Seiffert (2009)

Os projetos de redução de emissão são aqueles baseados na implantação de processos relacionados com alternativas mais racionais e menos impactantes de consumo energético ou na produção de combustíveis, a partir de matéria orgânica. Já, os projetos de sumidouros de GEE são os que induzem à imobilização de GEE da atmosfera.

De maneira geral, as atividades de projetos de F/R e de redução de emissões têm aspectos similares quanto às disposições sobre os requisitos de participação, ciclo do projeto e procedimentos. Porém, a característica particular das atividades de projetos de F/R acarreta um esquema distinto para o período de obtenção de créditos no âmbito do MDL.

Em caso de projetos de redução de em emissões, o período de obtenção de créditos pode atender as seguintes possibilidades:

- 7 anos, com possibilidade de mais duas renovações, totalizando então 21 anos;
- 10 anos, sem possibilidade de renovação;

Já, em caso de projetos de F/R, aquele proposto deve atender os seguintes períodos:

- 20 anos, com possibilidade de duas renovações (60 anos); ou
- 30 anos, sem possibilidade de renovação.

Se o período de obtenção de créditos, com possibilidade de renovação, for selecionado ao fim de cada período, tanto a linha de base quanto às questões subjacentes a ela (como fator de emissão utilizado) serão reavaliadas a fim de verificar se permanecem aplicáveis e válidas.

A data de início do projeto é definida como o dia em que uma atividade de projeto é tomada, não sendo mais permitido o uso dos chamados “créditos retroativos”. Expirado em março de 2007, os créditos retroativos foram criados para incentivar o desenvolvimento do MDL, cujas atividades iniciadas a partir de janeiro de 2000 poderiam ser analisadas posteriormente e, caso aprovadas, seria possível contabilizar as reduções de emissões desde 2000.

A partir de 2 de agosto de 2008, determinou-se a obrigatoriedade de comunicar oficialmente a AND quanto à decisão de desenvolver uma atividade de projeto de MDL em até seis meses contados a partir da data de início do projeto, mesmo que o processo do MDL não seja iniciado prontamente.

2.4.2 Linha de base

A realização de uma linha de base consistente é crucial para a legitimidade do projeto MDL, onde o empreendedor do projeto consiga justificar claramente a substituição da geração emissora de GEE por uma tecnologia de geração limpa (MCTI, 2009b).

As emissões de linha de base são calculadas pelo produto da eletricidade gerada através da unidade de geração de energia renovável, em MWh, pelo fator de emissão correspondente, em tCO₂/MWh.

Resumidamente, entende-se por linha de base uma representatividade da quantificação da emissão de CO₂ que reduzirá após a implantação do novo projeto. O crédito de carbono a ser negociado será a diferença entre as duas linhas, conforme gráfico da Figura 2.12.

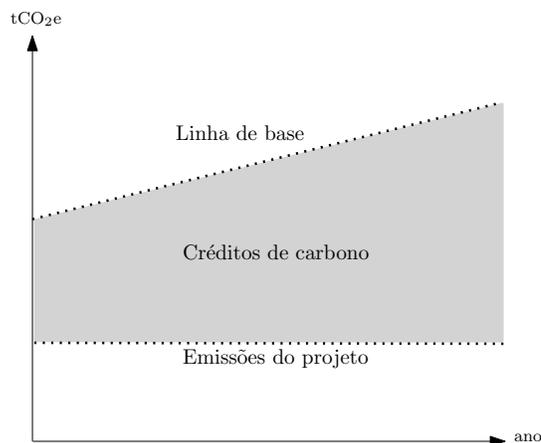


Figura 2.12 - Cenário da linha de base

Existem alguns procedimentos já estabelecidos para representar a linha de base, disponíveis no sítio da UNFCCC¹³. Ao selecionar uma das metodologias, o participante do projeto deve adotar uma abordagem mais apropriada à sua atividade e justificar a sua escolha, a fim de construir o cenário hipotético da linha de base, dentre as quais:

- Emissões atuais existentes ou históricas: aqui, assume-se que o nível futuro de emissões de GEE acompanhará a tendência atual ou passada observada no próprio local de implantação do projeto;
- Condições de mercado: emissões geradas por tecnologias reconhecidas e que represente

¹³<http://cdm.unfccc.int>.

curso economicamente atrativo, levando em conta as barreiras para o investimento;

- Melhor tecnologia disponível: a estimativa das emissões geradas pela tecnologia escolhida deve ser a média de emissões de projetos semelhantes produzidos nos cinco anos anteriores, e cujo desempenho esteja entre os primeiros 20% das melhores tecnologias de sua categoria.

De maneira geral, a linha de base é qualificada e quantificada com base em um cenário de referência, todos incluem a identificação de cenários hipotéticos na ausência da atividade de projeto e métodos para avaliar se o projeto seria desenvolvido sem o MDL (MCTI, 2009b).

A partir de julho de 2008, estabeleceu-se que, os fatores de emissão de CO₂ resultantes da geração de eletricidade para projetos de energia renovável conectados à rede elétrica e implantados no Brasil no contexto do MDL devem ser verificados nos quatro submercados do Sistema Interligado Nacional (SIN) (Norte, Nordeste, Sudeste, Centro-Oeste e Sul) do Brasil e calculados a partir dos registros de geração das usinas despachadas centralizadamente pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e, em especial, nas usinas termoeletricas¹⁴.

Desta maneira, o cenário da linha de base para projetos de geração de energia renovável conectados à rede utiliza o fator de emissão de CO₂ do SIN para calcular as reduções obtidas com a implantação do projeto, quantificando assim, a emissão que está sendo deslocada na margem através do seguinte cálculo:

$$EF_{CM,y} = EF_{OM,y} \times w_{OM} + EF_{BM,y} \times w_{BM} \quad (2.1)$$

onde:

$EF_{CM,y}$ = Fator de emissão da margem combinada, no ano y (tCO₂/MWh);

$EF_{OM,y}$ = Fator de emissão da margem operacional, no ano y (tCO₂/MWh);

$EF_{BM,y}$ = Fator de emissão da margem de construção, no ano y (tCO₂/MWh);

w_{OM} = Ponderação do fator de emissão da margem operacional (%);

w_{BM} = Ponderação do fator de emissão da margem de construção (%).

A margem combinada (CM) leva em consideração a margem operacional (OM), a qual reflete a intensidade das emissões de CO₂ da energia despachada na margem, e a margem de construção

¹⁴A metodologia utilizada para tal cálculo é a ACM0002 – “Metodologia consolidada de linha de base para a geração de eletricidade conectada à rede a partir de fontes renováveis”.

(BM), a qual reflete a intensidade das emissões de CO₂ das últimas usinas construídas. Os pesos w_{OM} e w_{BM} são fixados em 50%. Todavia, podem ser usados pesos alternativos desde que $w_{OM} + w_{BM} = 1$, apresentando-se justificativa pela alteração.

Com tamanho e características que permitem considerá-lo único em âmbito mundial, o SIN é um sistema basicamente hidrotérmico. A Figura 2.13 ilustra o esquema dos sistemas de produção para o suprimento do mercado consumidor de energia elétrica do Brasil e a origem do fator de emissão relacionado.

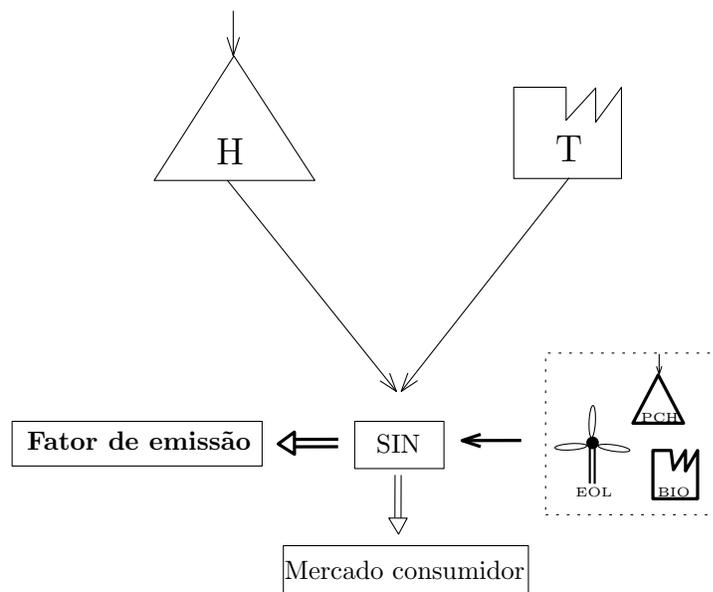


Figura 2.13 - Fator de emissão no Sistema Interligado Nacional

O fator de emissão é então calculado pela combinação da intensidade das emissões das últimas usinas construídas e das emissões da energia despachada na margem por plantas já existentes.

Se, um determinado projeto (como por exemplo, PCH, Eólica – EOL e Biomassa – BIO) entrar no sistema deslocando uma usina de geração térmica (T) de origem fóssil, o fator de emissão para o período tende a ser alto. Por outro lado, se um projeto entrar no sistema deslocando geração de origem hidráulica (H), o fator de emissão para o período tende a ser baixo. A seguir, uma tabela com a variação dos fatores de emissão do SIN nos últimos cinco anos.

Tabela 2.3 - Fatores de emissão do SIN

	2006	2007	2008	2009	2010
Margem operacional (tCO ₂ /MWh)	0,3232	0,2909	0,4766	0,2476	0,4787
Margem de construção (tCO ₂ /MWh)	0,0814	0,0775	0,1458	0,0794	0,1404
Fator de emissão (tCO ₂ /MWh)	0,2023	0,1842	0,3112	0,1635	0,3095

Fonte: Adaptado do MCTI (2011)

O fator de emissão do SIN para o ano de 2010 foi de 0,3095 tCO₂/MWh, valor superior ao observado no ano de 2009, de 0,1635 tCO₂/MWh. O valor é quase 90% maior do que o fator do ano anterior. Isso se deve principalmente à forte demanda impulsionada pelo crescimento da economia, a qual conduz a construção de empreendimentos de geração de energia a partir de combustíveis fósseis, com o conseqüente aumento das médias das emissões de CO₂ horárias durante todo o ano, além da disponibilidade hídrica.

2.4.3 Custos de transação

Diante do volume e da complexidade de informações que são requeridas para elegibilidade de um projeto do âmbito do MDL, é evidente que os custos de transação dos projetos terão uma participação considerável nas saídas do fluxo de caixa (OLIVEIRA, 2004).

No contexto do MDL, há dois tipos de custos relacionados com a elaboração e a execução de uma atividade de projeto: os custos de desenvolvimento, não só exclusivamente ocorridos das atividades de projetos do MDL, que são relacionados à análise de viabilidade, custos iniciais de construção, funcionamento, manutenção, entre outros, e os custos de transação, que são aqueles causados pelo processo administrativo envolvido nas etapas de aprovação do projeto. Os referidos custos variam dependendo das circunstâncias específicas do projeto e dos fornecedores dos serviços.

As faixas dos custos de transação do MDL são ilustradas na Tabela 2.4. Para os que não são determinados pelo processo da UNFCCC, os valores apenas indicam faixas possíveis com base na bibliografia existente sobre os custos de transação do MDL (MICHAELOWA; JOTZO, 2005), (CUNHA, 2005) e (OLIVEIRA, 2004).

Tabela 2.4 - Componentes dos custos de transação (valores em euro de 2005)

Etapas do ciclo do MDL	Considerações	Relação dos custo com o tamanho do projeto	Estimativa de custo 1000 €
Pesquisa		fixo	15
Negociação	Inclui custos incorridos na elaboração do DCP e consulta aos <i>stakeholders</i>	regressivo	25 – 400
Documentação do projeto	Desenvolvimento da linha de base e do plano de monitoramento	fixo	35
Aprovação	Custos com a autorização da AND do país anfitrião do projeto	proporcional	40
Validação	Revisão do DCP pela EOD	fixo	15 – 30
Registro	Registro do projeto no CE	pouco regressivo	10
Monitoramento	Coleta das informações	fixo	10
Verificação	Contratação de outra EOD	regressivo	8 por verificação
Certificação	Emissão das RCE pelo CE	regressivo	–
Mitigação de riscos	Custos com medidas legais e administrativas em caso de não cumprimento do contrato	proporcional	1% – 3% do valor anual da RCE
Transferência	Taxas e impostos	proporcional	1%
Registro	Manutenção da conta no Registro nacional	proporcional	0,03%
Fundo de adaptação		proporcional	2%
Custo mínimo fixado			150

Fonte: Adaptado de Cunha (2005), Michaelowa e Jotzo (2005) e Oliveira (2004)

Observa-se que, em quase todas as etapas, existem gastos. Logo, é de se esperar que quanto maior a complexidade da metodologia utilizada, maiores são os custos de transação. Estes custos podem ser considerados altos para projetos de pequena escala, e por isso, por meio dos Acordos de Marraqueche, foi definido procedimentos específicos mais simplificados para projetos de pequena escala.

Cabe salientar que as faixas de custos baseiam-se nos valores encontrados na bibliografia e mostrada apenas para fins ilustrativos. Não se garante, portanto, que os custos reais atuais fiquem dentro dessas faixas.

2.4.4 Modalidades de execução dos projetos

Uma vez que um DCP é aprovado e a atividade de projeto é inicializada, já é possível identificar a geração de energia de cada projeto. Multiplicando a energia gerada pelo fator de emissão de cada atividade de projeto, temos o benefício ambiental (redução ou remoção de emissões de GEE). A partir do momento que tais benefícios são calculados e confirmados, eles são usados como ativos financeiros.

Conforme descrito por Neto (2009) há três tipos de modalidades de execução dos projetos de MDL: bilateral, unilateral e o multilateral.

Esperava-se que, desde o início do projeto, sempre houvesse um participante de projeto pertencente ao A1, responsável pelo investimento do projeto e outro NA1, caso do MDL bilateral. Nesta modalidade, um contrato é efetuado disciplinando, inclusive, a compra e venda das RCE a serem geradas. E, caso não venham a existir as RCEs previstas, há de se estipular acordo que discipline a forma de devolução do valor pago, quando houver antecipação do pagamento.

Entretanto, na prática, isto não ocorre, necessariamente. Apresentado como projeto MDL unilateral, a implementação de tal num país NA1 é feita sem contar com qualquer forma de participação de Partes no A1. A maior parte dos projetos brasileiros registrados pelo CE do MDL tem sido desenvolvida apenas por participantes nacionais, os quais arcam sozinhos com todos os riscos e custos decorrentes do projeto. Por outro lado, as RCEs emitidas são de propriedade do país anfitrião do projeto e são levados à venda no mercado mundial de créditos de carbono para utilização final pelas Partes no A1 ou ainda vendidos; diretamente para investidores que possuem metas a cumprir.

Portanto, se um projeto é financiado por um fundo de investimentos, como, por exemplo, o *Prototype Carbon Fund* (PCF), um fundo para compras de crédito de carbono do Banco Mundial, ele é dito MDL multilateral.

De maneira geral, a Parte responsável pela implementação do projeto, bem como por todos seus custos incorridos, terá propriedade sob as RCEs quando geradas. Normalmente, a Parte terá boa parte do custeio do MDL pago pela negociação das RCEs.

Resumidamente, podemos ter os seguintes tipos de transação para este mercado:

- Sem garantia de entrega;

Aqui, o tipo de transação varia com preço pré-estabelecido, onde ambas as Partes do projeto se comprometem a transacionar um volume anual de RCE a um preço estipulado ou com preço indexado, na data de entrega.

- Entrega garantida;

Neste tipo de transação, a Parte compradora obtém a garantia de que as RCE serão entregues a um preço fixado. Caso o projeto falhe, a entrega das RCE é de responsabilidade do vendedor. A entrega pode ser assegurada por uma terceira parte ou através de um portfólio de projetos, quando se trata, por exemplo, de empresas especializadas pela gestão de projetos de MDL.

- Pagamento antecipado.

Neste caso, o vendedor necessita financiamento antecipado para implementação do projeto e assim sendo, a venda antecipada é endossada por uma carta de crédito emitida por um banco local e reconhecida por uma instituição financeira de um país desenvolvido.

As modalidades de execução de projetos do MDL aqui apresentadas são formalizadas por meio de contratos, os quais confiam a titularidade das RCEs, condições de preço e pagamento, assunção de riscos do projeto, garantias por rescisão ou não cumprimento, entre outras. Destarte, cada RCE representa um benefício ambiental na forma de um ativo financeiro, transacionável.

Como o central interesse desse estudo reside, portanto, na apreciação do mercado de carbono no âmbito do Protocolo de Quioto sob a ótica comercial brasileira, passaremos a focar em seu funcionamento dentro do nosso território.

2.4.5 MDL no Brasil

Desde a aprovação da UNFCCC, o Brasil tem tido importante papel no processo de negociação internacional sobre o regime climático internacional, tanto pelas contribuições científicas e técnicas quanto pela ponderação como país desenvolvido. Além do mais, o governo brasileiro tem chamado a atenção para sua matriz energética predominantemente limpa e sua ampla produção de biocombustíveis.

No que tange à implementação de atividades de projetos do MDL, o Brasil é um dos países mais organizados e estruturados. Antes mesmo da regulamentação do MDL, pelos Acordos de

Marraqueche, o país já havia instituído sua AND. Prova da evolução no âmbito do MDL, o tempo médio de aprovação de uma atividade de projeto brasileira caiu, em média, de 67 dias em 2009 para 20 dias em 2010.

De acordo com os dados apresentados pela UNFCCC (2011a), até 19 de agosto de 2011, 3.362 projetos já foram registrados em âmbito do MDL. Como pode ser verificado na Figura 2.14, o Brasil ocupa o terceiro lugar em número de atividades de projeto MDL, com 194 projetos, correspondendo à 6% do total, ficando atrás apenas da China, com 45% dos projetos e da Índia, com 21% dos projetos.

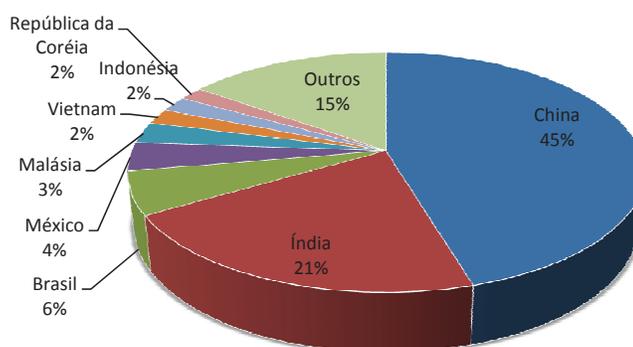


Figura 2.14 - Número de projetos registrados no Conselho Executivo do MDL por país anfitrião
Fonte: Adaptado de UNFCCC (2011a)

Em termos do potencial de reduções de emissões, associado aos projetos do MDL, o Brasil também ocupa a terceira posição, sendo responsável por 56.179.931 das RCE já emitidas, o que corresponde a 8% do total mundial (UNFCCC, 2011a).

Quanto aos escopos setoriais que mais atraem o interesse dos participantes de projetos no Brasil, podemos observar na Tabela 2.5 e na Figura 2.15 que a predominância encontra-se no setor energético devido à capacidade total instalada ser concentrada em hidrelétricas (40%), cogeração com biomassa (30%) e Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) (21%) (MCTI, 2011).

Tabela 2.5 - Distribuição das atividades de projetos no Brasil por tipo de projeto

Projetos em validação/aprovação	Número de projetos	Redução de emissão no primeiro período de obtenção de crédito (%)
Energia Renovável	261	38,1
Aterro Sanitário	38	22,0
Redução de N ₂ O	5	10,8
Suinocultura	77	9,5
Troca de combustível fóssil	46	6,8
Eficiência Energética	30	5,1
Reflorestamento	3	3,2
Processos Industriais	14	1,8
Resíduos	21	1,4
Emissões fugitivas	4	1,4

Fonte: Adaptado de MCTI (2011)

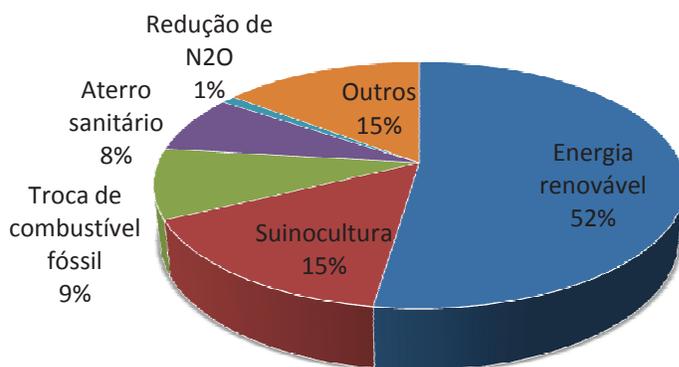


Figura 2.15 - Número de projetos brasileiros por escopo setorial

Fonte: Adaptado de MCTI (2011)

Conforme observado, o maior número de projetos brasileiros é desenvolvido na área de geração de energia e suinocultura, representando 67% das atividades de projeto. Porém, os setores que mais reduzirão emissões no primeiro período de obtenção de créditos (2008–2012), além dos setores de energia renovável com 38,1% do total de emissões, são atividades de aterro sanitário juntamente com atividades de redução de N₂O que somam 32,8% do total das reduções (MCTI, 2011).

Ainda, segundo o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI), aproximadamente

57% dos projetos brasileiros são considerados de larga escala. Este resultado parece aludir que os custos de transação ainda podem estar impedindo maior utilização de mecanismo nos projetos de pequena escala, mesmo com regras mais simplificadas.

Quanto aos investimentos realizados aqui no Brasil, alguns órgãos oferecem a possibilidade de financiamento integral ou parcial de atividades de projetos do MDL. A FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), empresa pública ligada ao MCTI, oferece um Programa de Apoio a Projetos do MDL (Pró-MDL), que financia o pré-investimento e o desenvolvimento científico e tecnológico de atividades de projeto no âmbito do MDL por meio de linhas de financiamento reembolsáveis e não reembolsáveis. O Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) também oferece uma linha de crédito para estudos de viabilidade, custos de elaboração do projeto e demais custos relativos ao processo de validação e registro. Adicionalmente, a Caixa Econômica Federal conta com uma linha de crédito para o financiamento integral de atividades de projetos no âmbito do MDL em áreas de saneamento, bombeamento de água e PCHs, entre outras (MCTI, 2011).

3 MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO

É evidente, o aumento da preocupação com a emissão de GEE e a consequente transformação do mercado de energia mundial e atribuição de valor econômico aos recursos ambientais.

As ciências econômicas provam historicamente que é necessário “*atrelar o poder do mercado ao processo de perpetuar os ecossistemas naturais dentro de um contexto de progresso econômico*” (NICHOLAS, 1995 apud NETO, 2009). Por conseguinte, o valor dos recursos naturais deve ser incorporado às dinâmicas de mercado a ponto de mitigar pelo menos parcialmente os impactos ambientais do crescimento econômico (SEIFFERT, 2009).

Neste Capítulo, são apresentadas as características dos mercados de carbono em vigência, com maior ênfase no desenvolvimento do mercado, dentro das modalidades de execução de projetos do MDL, apresentadas no Capítulo anterior, subseção 2.4.4. O próprio mercado já estabeleceu o tratamento da RCE como uma *commodity* ambiental, e seus contratos já estão sendo mundialmente comercializados em mercados de balcão e de valores mobiliários, através de contratos futuros, de opções e de outros derivativos (NETO, 2009).

3.1 Créditos de carbono e modalidades de negociação

Como visto no Capítulo 2, as Partes no A1 podem adicionar às suas unidades estabelecidas pelo Protocolo de Quioto (UQAs) as RCEs e URMIs ou, ainda, mover unidades de um país para outro, através do IET ou projetos de IC (UREs). Esta possibilidade requer sistemas de registro que possam rastrear a localização de unidades de Quioto em todos os momentos. Além de registrar as unidades transacionadas, esses sistemas estabelecem um comércio de emissões através da transferência das unidades das contas dos vendedores para a dos compradores, formando assim uma base visível para o mercado de carbono.

Uma vez que o dióxido de carbono é o GEE principal, fala-se simplesmente em comércio de carbono, no qual este é controlado e negociado como qualquer outra mercadoria. Mercado de créditos de carbono trata, portanto, de um termo popular e generalizado para se referir a todos

os sistemas de negociação de unidades de redução ou remoção de emissões de GEE, não sendo, absolutamente, adequado para referir-se apenas às operações específicas de um tipo de unidade.

Assim, os mecanismos de flexibilização surgem para permitir a realização de transações internacionais dos créditos gerados, enquanto os mecanismos de IC e MDL criam certificados baseados em projetos, o IET permite a transação entre eles, diferenciando-se, deste modo, o mercado de carbono em dois conceitos: o mercado de permissões, descrito na subseção 3.1.1 e o mercado de certificados, descrito na subseção 3.1.2, especificamente para certificados do MDL.

Não obstante, diversas experiências de mercado de carbono, mesmo antes da entrada em vigor do Protocolo de Quioto, mas que também são dirigidas à redução de emissões de GEE, servem como modelo ao culminado em Quioto. Em geral, há dois tipos de mercado voltados a comercialização de créditos de carbono: o mercado em conformidade com o Protocolo de Quioto, ou mercado oficial, e o mercado voluntário alternativo a Quioto.

No mercado oficial, os créditos são negociados com o objetivo principal de facilitar o cumprimento das metas de redução de emissões estabelecidas pelo Protocolo de Quioto.

Paralelo ao mercado oficial de créditos de carbono, e não menos importante, no mercado voluntário de emissões não há metas a serem cumpridas sob reconhecimento do Protocolo de Quioto e sim metas estabelecidas, voluntariamente, por empresas ou governos locais. As Partes interessadas que querem neutralizar o impacto de suas emissões excessivas, investem comprando créditos de compensação em projetos que têm como objetivo reduzir as suas emissões de GEE. Tal mercado vem apresentando um grande crescimento, nos últimos anos. Só em 2010 o mercado movimentou US\$ 424 milhões referentes a 131 MtCO₂e transacionadas (STANLEY et al., 2011).

O mercado voluntário apresentou, nos dois últimos anos, um acentuado crescimento de seu volume transacionado mundialmente, apresentando um aumento de aproximadamente 34% de suas transações entre 2009 e 2010, conforme segue na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Volumes e valores transacionados no mercado de carbono, 2009 e 2010

Mercado	2009		2010	
	MtCO₂	milhões US\$	MtCO₂	milhões US\$
Oficial	7.437	127.642	6.692	123.954
Voluntário	98	415	131	424
TOTAL	7.535	128.057	6.823	124.378

Fonte: Adaptado de Stanley et al. (2011)

A *Chicago Climate Exchange* (CCX), por exemplo, é um mercado regulado em operação voluntária nos Estados Unidos desde 2002 e foi o pioneiro em negociações de reduções de GEE, tratando-se de um importante paradigma para os atuais mercados. As empresas participantes comprometem-se a reduzir suas emissões em determinado nível, durante um período determinado. Sob a administração da CCX, as transações são registradas, eletronicamente, e as empresas participantes recebem créditos correspondentes às reduções. Podem, desta maneira, comprá-los e vendê-los, conforme suas necessidades (CUNHA, 2009).

A Figura 3.1 ilustra a interação entre os mercados de carbono em conformidade com Quioto e mercados de carbono voluntários.

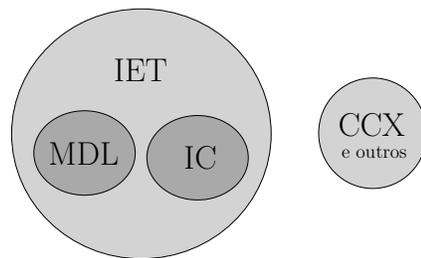


Figura 3.1 - Interação entre IET, MDL, IC e mercados de carbono alternativos a Quioto
 Fonte: Adaptado de Seiffert (2009)

É importante ressaltar que em ambos os mercados, oficial e voluntário, é possível a negociação de certificados e/ou negociação de permissões de emissão, conforme ilustrado na Figura 3.2.

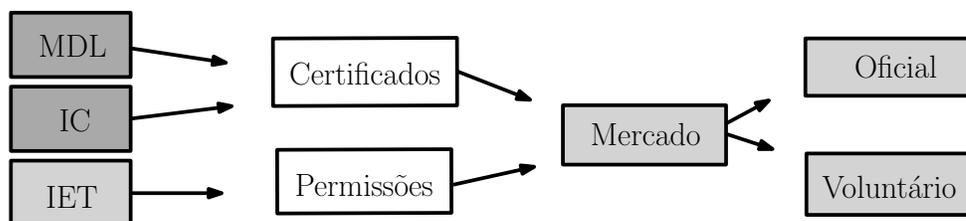


Figura 3.2 - Esquema dos mercados de carbono

3.1.1 Mercado de permissões de emissão

O mercado de permissões de emissão regulamentado pelo Protocolo de Quioto apresenta estrutura do tipo *cap and trade*¹, de caráter mandatório. O respectivo governo de cada país é o responsável por alocar, em bases anuais, a cada uma dessas instalações o montante de autorizações para emissões de carbono, de acordo com os respectivos Planos Nacionais de Alocação (*National Allocation Plans* – NAPs). Assim, a comercialização das permissões é caracterizada pelo princípio da compra/venda da diferença de quantidade de CO₂ que ultrapassou/reduziu dentro de um teto máximo (*cap*) para fontes de emissão de larga escala e as quantidades permitidas para a troca são determinadas pelo limite global. Há previsão de multa para o não cumprimento das metas estabelecidas, cujos valores são tomados como base nos preços de mercado das permissões (CUNHA, 2009).

Neste tipo de mercado, como as negociações são feitas no âmbito do IET, há formação de um mercado exclusivo aos países desenvolvidos e tanto os compradores como os vendedores têm interesses concorrentes e mutuamente equilibrados.

O maior e mais importante mercado dessas permissões concentra-se nas indústrias europeias. Para o cumprimento de suas obrigações, os países fixados no *European Union Emissions Trading Scheme* (EU ETS) podem negociar diariamente as unidades chamadas *European Union Allowances* (EUAs), através da *European Climate Exchange* (ECX). Nesta plataforma, além da comercialização das EUA, também está inserida a comercialização das RCEs e UREs, com suas negociações feitas através de contratos futuros, de opções e *spot*². Em menor proporção, outras diversas bolsas de valores também permitem a negociação de permissões.

O EU ETS, em vigor desde 2005, nasceu com objetivo de assegurar a redução da emissão de GEE por parte de grandes plantas industriais localizadas na União Europeia. Tornando, outrossim, compulsória a participação de mais de 12.000 instalações industriais e de geração de energia elétrica, as quais representam, aproximadamente, 45% do total de emissões da União Europeia (FRAGA, 2007).

¹Sistema econômico no qual se determina uma quantidade limite de CO₂ que um determinado país ou indústria pode emitir. É fundamentado em uma iniciativa bem sucedida implantada nos Estados Unidos, na década de 90, com o intuito de reduzir emissões de dióxido de enxofre.

²Mercado *spot* trata-se de um mercado livre para entrega imediata de um ativo subjacente (LUENBERGER, 1998).

Segundo Kossoy e Ambrosi (2010), o sucesso do EU ETS é mensurável e diversificado. As lições aprendidas durante este primeiro período de vigência (2008–2012) devem ajudar a orientar sua expansão além de desenvolver novos programas de redução de GEE em todo o mundo.

Para entender a importância financeira do esquema europeu no âmbito do mercado de créditos de carbono, a Figura 3.3 traz a evolução dos valores transacionados no mercado de permissões de emissão negociadas no EU ETS. Entre 2005 e 2008, houve um aumento de mais de 1000% nos valores transacionados.

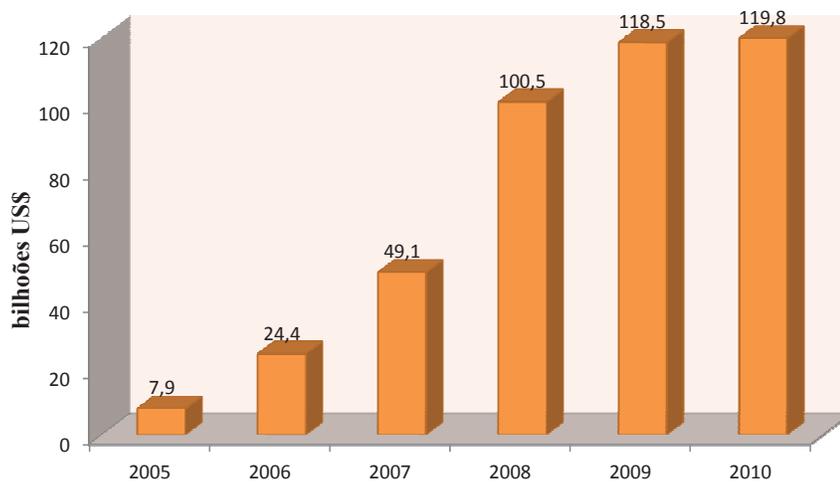


Figura 3.3 - Evolução dos valores transacionais no EU ETS
Fonte: Adaptado de Linacre et al. (2011)

Vale destacar que, no ano de 2010, o mercado de permissões fixado no EU ETS movimentou o equivalente a US\$ 119,8 bilhões, mais que o dobro registrado em 2007, de US\$ 49,1 bilhões. De acordo com Linacre et al. (2011), o EU ETS é responsável por 84% do valor global do mercado de carbono em 2010.

Por ser diversificada as fontes que participam deste comércio e ser maior o número de participantes, é de se esperar que o potencial de redução dos preços e do volume negociado sejam maiores. Isso ocorre porque a demanda por certificados sucede somente por aquele que deseja comprar apenas RCEs ou UREs. Diferentemente do mercado de permissões que admite a transação de vários outros tipos de créditos, incluindo, até mesmo, as unidades do MDL e da IC.

Outro exemplo de mercado regulado que também permite a negociação de permissões de emissão e RCEs é a *BlueNext*, uma bolsa internacional líder no comércio ambiental. O grupo foi

fundado em dezembro de 2007 e, em Janeiro deste ano, incorporou também a *NYSE Euronext*. Os membros participantes desse comércio podem negociar tanto no mercado *spot*, como no mercado de derivativos.

3.1.2 Mercado de certificados

Como foi dito no início deste Capítulo, o mercado de certificados refere-se às transações realizadas sob os mecanismos de IC e MDL cuja ocorrência se dá na base de financiamento de projetos que reduzem emissões de GEE.

A quantidade de certificados são gerados por cada novo projeto. Por isso, compradores e vendedores destes certificados têm interesse em maximizar o resultado gerado pelo projeto.

Certificados já vinham sendo negociadas mesmo antes da entrada em vigor do Protocolo de Quioto e, normalmente, por serem emitidos por fundos ou governos, possuem valor de mercado inferior às permissões de emissão.

Para que um mercado de certificados esteja em funcionamento, é necessário que já existam tais créditos ou, pelo menos, exista um projeto de MDL ou IC em andamento para que venham a existir os certificados. O maior problema na maioria das transações baseadas em projetos de MDL e de IC é que elas são realizadas antes mesmo dos certificados serem emitidos. Assim, a compra/venda de RCEs ou UREs antes de serem lançadas envolve mais riscos que a compra/venda de permissões de emissão.

Assim, caso os contratos sejam realizados antes da emissão dos certificados, as Partes envolvidas poderão pactuar ou realizar um contrato preliminar da propriedade de tais títulos (NETO, 2009). Quanto à realização de contratos, de natureza jurídica, o leitor pode consultar bibliografia de referência Hull (1997), Neto (2009) e Sister (2008).

A Figura 3.4 ilustra a evolução do valor transacionado no mercado de certificados do MDL ao longo do tempo. Após três anos consecutivos de forte crescimento, o valor total do mercado de certificados do MDL estagnou-se em US\$ 20 bilhões. Com a ausência de clareza regulamentar do pós-2012, os valores referentes ao MDL caíram por dois anos consecutivos.

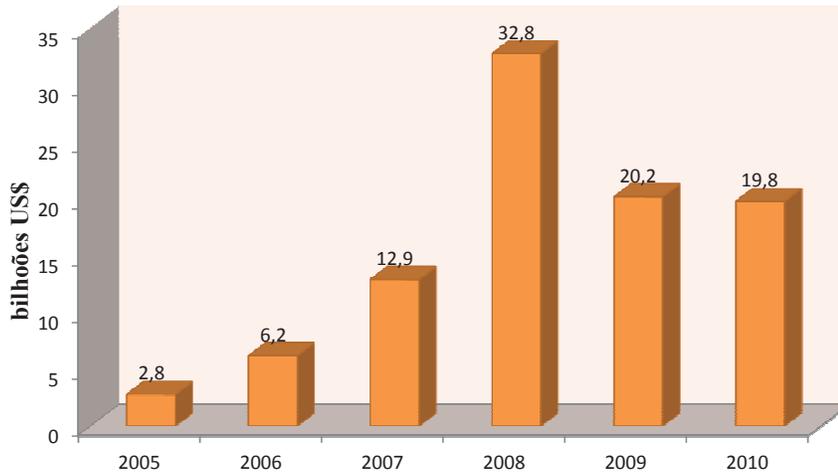


Figura 3.4 - Evolução dos valores transacionais no MDL
 Fonte: Adaptado de Linacre et al. (2011)

Entretanto, existe uma forte tendência à elevação desses valores, à medida que o processo de certificação de projetos do MDL torne-se mais amadurecido e confiável. Apresentando, consequentemente, um menor nível de risco.

Os contratos futuros, de opções e *spot* de RCEs são negociados diariamente na ECX, em vigor desde março de 2008. Encontra-se, no entanto, em negociação quatro contratos futuros para entrega em dezembro de cada ano até 2014.

Mercado de certificados no Brasil

Em território brasileiro, o Mercado Brasileiro de Reduções de Emissão (MBRE) implantado na BM&FBovespa (Bolsa de Valores, Mercadorias e Futuros) foi lançado em 2004 com o intuito de gerar a negociação diária de créditos de carbono através de contratos a termo. O MBRE não decolou, sendo realizados atualmente apenas leilões eletrônicos, no mercado à vista e sessões contínuas de negociação, com previsão da inserção para negociação nos mercados de opções e a termo; para comercializar créditos que ainda estejam em processo de geração e certificação (BM&FBOVESPA, 2011).

Em 2010, a Bolsa lançou o primeiro leilão da América Latina voltado para o mercado voluntário. Embora a ausência de oferta, os organizadores consideraram o resultado positivo; o pioneirismo da iniciativa colocou o Brasil na dianteira do mercado voluntário da América Latina.

Assim, o mercado de carbono na BM&FBovespa tem por objetivo comercializar, tanto os créditos gerados por projetos de MDL como os créditos gerados no âmbito do mercado voluntário (BM&FBOVESPA, 2011). Visando à organização do mercado de carbono no país com a criação de um Banco de Projetos para a atração de investimentos externos e a implantação de um sistema de leilão de créditos obtidos com projetos MDL.

O Banco de Projetos BM&FBovespa registra os projetos já validados pelas EODs. As intenções de compra ou venda podem proceder de entidades de natureza pública ou privada, nacionais ou internacionais, incluindo organizações governamentais, organismos multilaterais de financiamento, fundos de carbono e comercializadores do mercado de RCEs e EUAs (BM&FBOVESPA, 2011).

Os participantes que têm intenções em projeto MDL devem anexar ao DCP seus respectivos relatórios de validação e/ou verificação e certificação. Deve acompanhar, também, informações que objetivam o reconhecimento do projeto no Protocolo de Quioto, tais como estudo de possíveis impactos ambientais e sociais e de viabilidade econômico-financeira, incluindo a estimativa de custos de implantação, desenvolvimento e operação e documento com comentários dos *stakeholders*.

No que se diz respeito às intenções de compra dos proponentes, os mesmos devem também registrar seus interesses. Porém, não são obrigados a adquirir créditos de carbono quando disponibilizados. O procedimento apenas facilita as condições de eventual comercialização futura, mediante à divulgação de informações (BM&FBOVESPA, 2011).

3.2 Modalidades e procedimentos dos mercados

Produtores e consumidores, de uma maneira geral, desejam proteger sua exposição às incertezas de preços ou, então, definir estratégias de risco (*hedger*) que viabilizem seus lucros. Entretanto, os objetivos para ambas as partes interessadas são distintos: os produtores querem reduzir a variabilidade e aumentar suas receitas e consumidores querem evitar altos preços.

Dentre os principais fatores que afetam os preços dos certificados de carbono, estão a relação

entre a oferta e a demanda, os custos de transação, eventos climáticos e *status* operacional da atividade. Assim, a criação de um mercado voltado à comercialização de redução ou remoção de emissões possibilita a utilização de instrumentos financeiros, tanto para redução de risco quanto para que seja possível tirar proveito deste risco, oferecendo proteção contra movimentos adversos de preços e indicações de expectativas futuras dos agentes quanto aos preços dos certificados.

De acordo com o Dicionário de Derivativos (SANTOS, 1998), derivativos são instrumentos financeiros cujo preço de mercado deriva do preço de mercado de um bem (as *commodities*, ou seja, produtos primários como soja, algodão, minério de ferro, etc) ou de outro instrumento financeiro (taxas de câmbio, de juros, moedas, índice de Bolsas, etc). Estes preços estão ligados a outro instrumento que lhes servem de referência. Por exemplo, o mercado futuro de petróleo é uma modalidade de derivativo cujo preço depende dos negócios realizados no mercado à vista, seu instrumento de referência.

Dentre os três tipos de derivativos, agropecuários, financeiros e de energia e climáticos, este último tem como objetivo a negociação dos créditos de carbono, além de energia elétrica, gás natural e outros.

Os derivativos classificam-se ainda em:

- Não padronizados;

Contratos não padronizados abrangem os negociados fora das bolsas, em balcão. Em geral, existe menos regulamentação e supervisão governamentais das transações efetuadas neste tipo de mercado. Especificações como preços, quantidades, pagamento e locais de entrega são determinadas diretamente entre as partes contratantes.

Os derivativos negociados em mercado de balcão são feitos sob medida, existindo grande flexibilidade na negociação dos itens do contrato: qualidade, quantidade, garantias, liquidação, entre outros. Dificilmente o participante conseguirá transferir sua obrigação a outro, porque esse contrato foi negociado para satisfazer às necessidades particulares dos participantes que o celebraram. De modo que, as partes ficam amarradas umas às outras até a data de vencimento do contrato (BM&FBOVESPA, 2007).

Exemplos desses derivativos são os contratos a termo, *swap* e de opções.

- Padronizados.

Os contratos padronizados são regulamentados em bolsas, nas quais se estabelece, todas as características do produto negociado, como cotação, data de vencimento, tipo de liquidação e ou-

tras. Normalmente, apenas dois fatores variam nas bolsas: o número de contratos ofertados e o preço negociado entre as partes (BM&FBOVESPA, 2007). Exemplos destes derivativos são os contratos a termo, futuro, *swap* e de opções.

A Figura 3.5 ilustra as modalidades operacionais dos derivativos.

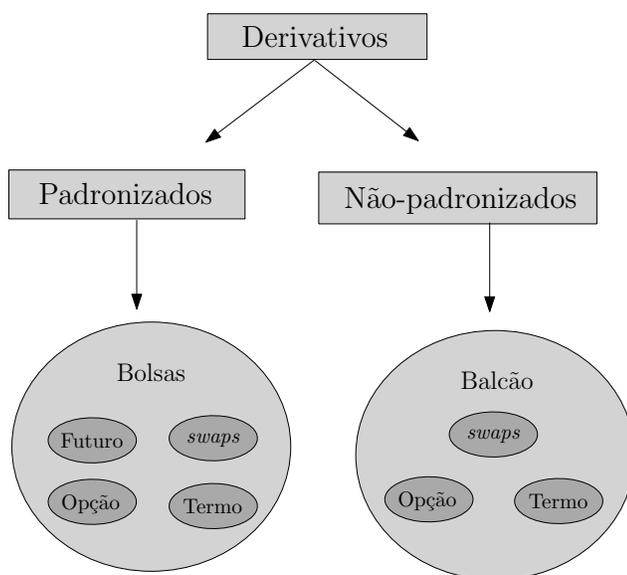


Figura 3.5 - Esquema operacional dos derivativos

No caso dos créditos de carbono, eles são negociados tanto em mercado de balcão como regulado em bolsas. Nesta dissertação, apenas os contratos a termo e de opções são analisados usando latisses binomiais.

A seguir, serão descritas as características e o funcionamento de cada uma das modalidades de derivativos, exceto os *swaps* devido a sua semelhança com o mercado a termo.

3.2.1 Contrato a termo

Contratos a termo, foram as primeiras modalidades de derivativo conhecidas pela sociedade. Contrate agora e acerte o pagamento depois – rudemente, este era o conceito básico dado a estes tipos de contratos.

Um contrato a termo se trata, portanto, de um acordo de compra ou venda de certa quantidade de um bem por um preço fixado, ainda na data de realização do negócio, para liquidação em data futura. São, normalmente, negociados em mercado de balcão, mas também podem ser negociados diretamente entre as partes interessadas ou ainda via instituições financeiras (HULL, 1997).

Em geral, os contratos a termo são liquidados, integralmente, no vencimento. Não há possibilidade de sair da posição antes disto. Impede, portanto, o repasse do compromisso a outro participante. Caso os contratos sejam negociados em bolsas, a liquidação da operação a termo pode ser antecipada pela vontade do comprador (BM&FBOVESPA, 2007).

As partes do contrato a termo, assumem posição comprada (*long*) e posição vendida (*short*); a primeira concorda em comprar o ativo na data especificada pelo preço a termo pré-estabelecido. E a contraparte concorda em vender o ativo na mesma data pelo mesmo preço. No momento em que o contrato é realizado, o preço de entrega escolhido equivale ao preço a termo, de modo que não haja custos para ambas as partes (o valor do contrato equivale a zero). No entanto, este valor varia ao longo do tempo, já que, embora o preço de entrega seja fixo, o preço a termo varia conforme as condições de mercado, abrindo um diferencial de preços (REILLY; NORTON, 2008).

A fim de exemplificar, imagina-se um caso hipotético no qual um comprador corre o risco de alta acentuada nos preços e um vendedor o de queda acentuada nos preços. Para eliminar os riscos de variações adversas dos preços praticados, ambas as partes podem realizar uma operação a termo. Ou seja, independentemente dos preços estabelecidos no mercado à vista no período de entrega, ambos terão seus preços de compra e venda travados em um valor já fixado.

Parâmetros do contrato

A Figura 3.6 apresenta um tipo de contrato a termo padrão, no qual uma quantidade X constante de determinado ativo é entregue ao longo da duração do contrato que tem seu vencimento em T .

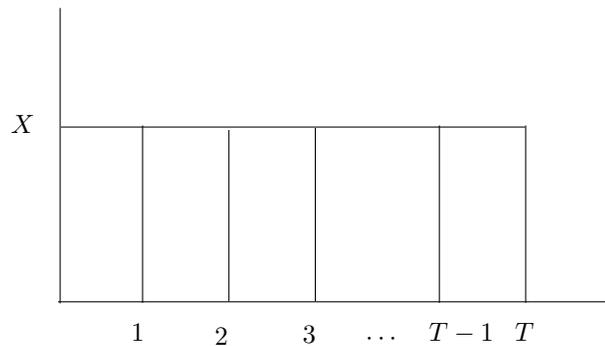


Figura 3.6 - Contrato a termo

O preço a termo de determinado contrato é definido como o preço de entrega que o levará a ter valor igual a zero. Destarte, tanto o preço de entrega estabelecido como o preço a termo são iguais, no momento em que o contrato é firmado. O que difere, portanto, é que o preço a termo é passível de mudanças durante o tempo de vida do contrato, enquanto o de entrega permanece sempre o mesmo (HULL, 1997).

Admitindo que uma posição comprada num contrato a termo implique no pagamento de um preço de entrega K na data de vencimento T do contrato. Então, sendo S_T o preço do ativo na data de vencimento do contrato, o retorno do comprador é:

$$B_c = (S_T - K) \quad (3.1)$$

Neste caso, o detentor do contrato é obrigado a pagar o preço K pelo certificado que vale S_T . Por sua vez, o retorno de um posição vendida num contrato a termo sobre uma unidade de ativo é:

$$B_v = (K - S_T) \quad (3.2)$$

Ambos os benefícios dos contratos podem ser positivos ou negativos, pois, como a realização de um contrato a termo não envolve custos, seu retorno é também a perda ou ganho totais realizados pelo investidor. Assim, se o preço *spot* se elevar muito, logo após a abertura do contrato, o valor do mesmo tornará positivo ao comprador e negativo para o vendedor. A situação está ilustrada na Figura 3.7.

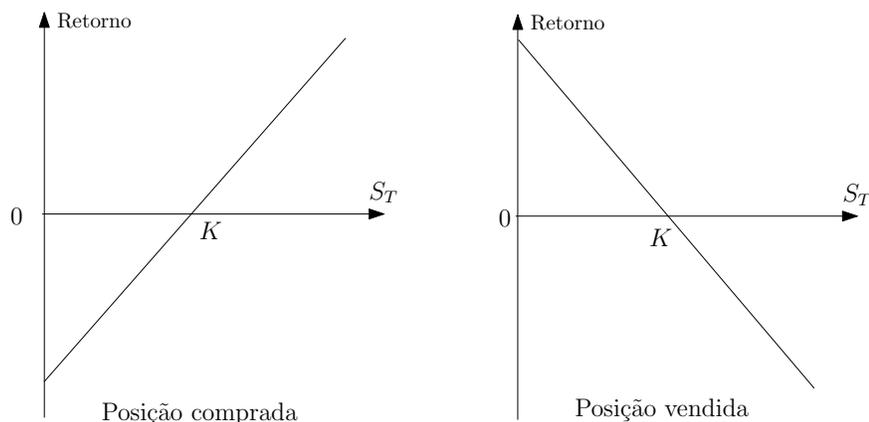


Figura 3.7 - Benefícios de contrato a termo
 Fonte: Hull (1997)

3.2.2 Contrato futuro

Tal como no contrato a termo, um contrato futuro é um acordo entre duas partes para comprar ou vender um ativo em determinada data futura por um preço especificado. Utilizado assim, para reduzir a exposição ao risco do mercado físico futuro. Distingue-se, portanto, do mercado a termo, por permitir a negociação de seus contratos, exclusivamente em mercados organizados e regulados, como a Bolsa de Valores (HULL, 1997).

A principal diferença entre um mercado futuro e a termo, é que, no mercado futuro, os compromissos são ajustados financeiramente às expectativas do mercado acerca do preço futuro de um bem. E, por este motivo, são também mais difíceis de analisar (HULL, 1997).

Assim, as margens constituem um aspecto importante dos mercados futuros, com a possibilidade de prática do ajuste diário ao preço de mercado (que apura perdas e ganhos). Ou seja, ao final de cada dia o contrato é liquidado (parcialmente) pelos compradores ou vendedores, com base na variação do preço, entre este dia e o dia anterior. Esta possibilidade é uma das principais vantagens do mercado futuro, no qual todas as perdas e ganhos auferidos pela posição são liquidados, diariamente (HULL, 1991).

A estrutura do funcionamento deste mercado fixou uma característica importante na negoci-

ação para liquidação futura: a competitividade. Os preços referentes ao mercado futuro se ajustam conforme as leis de mercado, ou seja, de acordo com as pressões de oferta e demanda.

Um provável ganho de um investidor no mercado futuro ocorrerá quando, no vencimento, o preço à vista do derivativo for superior ao esperado na data em que entrou no mercado; perderá se o preço à vista for inferior. Desta forma, pode-se afirmar que o contrato futuro é uma aposta no que irá acontecer ao preço à vista.

No intuito de ilustrar a questão apresentada acima, consideremos a Figura 3.8 a seguir. Assumindo que o preço de um crédito de carbono seja igual a S_t , e que os participantes do mercado esperem que o preço venha a ser F_t em um determinado período de tempo. No intuito de atrair investidores para o mercado, o preço do contrato futuro é fixado em S_T . Esta diferença entre o preço do contrato futuro e o preço à vista esperado no futuro, $F_t - S_T$, é o denominado prêmio pelo risco que os investidores esperam receber, por assumir o risco do mercado à vista.

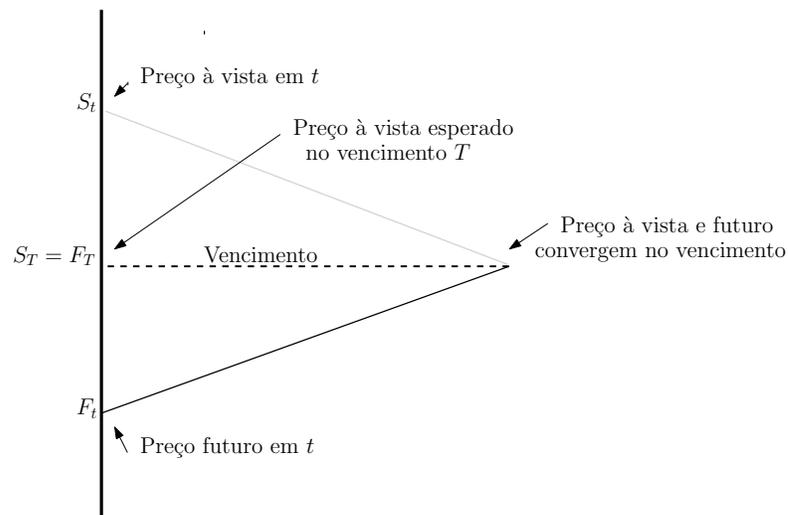


Figura 3.8 - Relação de preços à vista e futuro

Fonte: Adaptado de (GORTON; ROUWENCHORST, 2005 apud FRAGA, 2007)

A convergência do preço à vista e do preço futuro para o mesmo valor no vencimento, embora não necessariamente na mesma ordem de grandeza e de tempo, é resultado da existência de um contrato que prevê a entrega física do produto (FRAGA, 2007).

3.2.3 Contrato de opção

O desenvolvimento de um mercado de opções se deu pela necessidade específica de controlar o risco ligado às flutuações dos preços nos mercados agrícolas. A fim de minimizar esse risco e assegurar uma certa margem de lucro, muitos mercados compravam opções dos produtores. O preço máximo para os mercadores era fixado até que chegasse o momento de entregar tulipas aos aristocratas e receber o pagamento (BM&FBOVESPA, 2007).

As opções, portanto, foram criadas para ser um instrumento de proteção contra flutuações de preços no mercado *spot*, e não para ser um instrumento especulativo. Isoladamente, ou seja, sem a combinação com a posição no mercado à vista, todas as posições são sim especulativas. Porém, isso também ocorre nas demais modalidades de derivativos.

Assim, um contrato de opção define-se por ser um instrumento que dá a seus titulares o direito, mas não a obrigação, de comprar ou vender algo a um preço fixo; seja em uma data específica ou a qualquer tempo até uma data certa. O detentor de uma opção não é obrigado a completar o acordo caso a transação não seja de seu interesse. Em síntese, o que determina se uma opção é ou não exercida é a diferença relativa entre o valor contratado e o preço no mercado (REILLY; NORTON, 2008).

Um investidor que quer possuir um bem no futuro comprará a opção garantindo o preço de compra. Quem possui o bem hoje e poderá dispor em data futura, é o vendedor dessa opção, que adquire a obrigação futura de entregar o bem no valor acordado, mediante o recebimento do preço pago pela opção propriamente dita, chamado de prêmio da opção. Já, o preço pelo qual o ativo pode ser adquirido ou vendido durante o exercício da opção é denominado preço de exercício (HULL, 1997).

Atualmente, as opções são negociadas sobre vários tipos de ativos financeiros, como, por exemplo, ações, índices de preços, contratos futuros, contratos a termo, mercadorias.

O tipo de uma opção é definido por ela ser de compra (*call*) ou de venda (*put*).

Quem tem uma opção *call* tem o direito, mas não a obrigação, de comprar uma *commodity* por um dado preço (preço de exercício), no futuro (data de vencimento). Para obter o direito de comprar, o comprador paga ao vendedor um valor chamado prêmio.

Quem possui uma opção *put* tem o direito de venda sob um objeto do contrato, mas não uma

obrigação, por um preço de exercício, em data de vencimento futura acordada pelas partes. Para ceder o direito de venda ao comprador, o vendedor recebe também o valor chamado prêmio.

Embora não haja custo para realização de contratos a termo e futuro, o mesmo não vale para um contrato de opções.

Conforme exemplificado por Reilly e Norton (2008), considerando o preço de exercício de 45 dólares de uma opção de compra de uma ação, a qual permite ao possuidor da opção comprar ações a 45 dólares cada uma. Se o preço corrente de mercado for menor que 45 dólares, a opção *call* tem valor intrínseco nulo; ela não terá valor algum, e o seu titular optará por não exercê-la, pois não faz sentido pagar 45 dólares (preço de exercício) por algo cujo valor é inferior no mercado à vista. Agora, se o preço corrente do mercado for superior a 45 dólares, a opção *call* tem certo valor intrínseco, que será a diferença do preço da ação subjacente e do preço de exercício.

O período de tempo pelo qual a opção é válida deve ser especificado e definido pela data de vencimento. Há duas convenções acerca da aceitação da data de exercício antes do vencimento:

- Modelo americano: a opção americana pode ser exercida a qualquer momento, até a data de vencimento acordada entre as partes. Normalmente, tendem a ser mais valiosas, conforme aumenta o prazo para o vencimento.
- Modelo europeu: a opção europeia pode ser exercida somente na data de vencimento, acordada entre as partes. O tempo, porém, nem sempre conta a favor do portador da opção.

A maioria das opções transacionadas em bolsas é americana. Porém, as opções europeias são mais fáceis de analisar do que as americanas. Em geral, há quatro tipos básicos de posições em opções. A Figura 3.9 a seguir ilustra os retornos das posições em opções europeias.

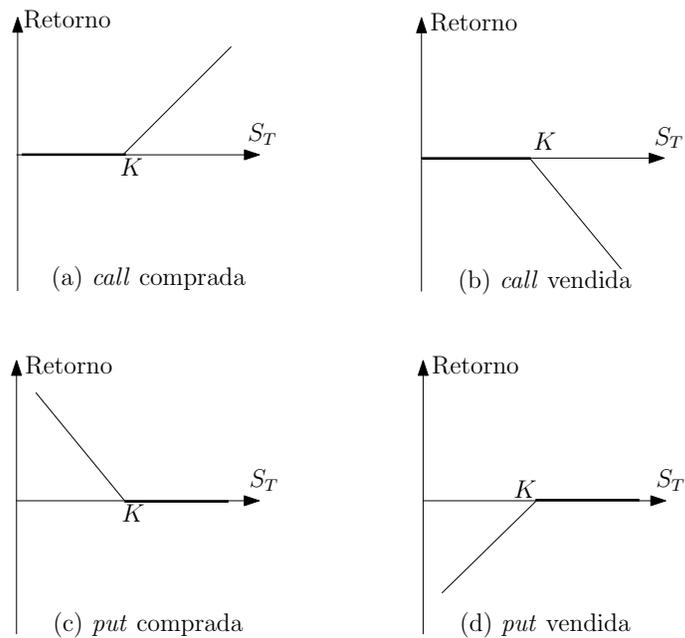


Figura 3.9 - Retornos de posições em opções europeias
 Fonte: Hull (1997)

Em (a) está ilustrada a posição de compra em uma opção *call*. Neste caso, o comprador paga um prêmio por comprar a opção de compra no momento de abertura da operação e, então, passa a ter o direito de adquirir o objeto do contrato pelo preço de exercício se lhe for viável. Já (b), ilustra a posição vendida em uma opção *call* na qual o vendedor recebe um prêmio por comprar a opção de compra, no momento de abertura da operação. Sendo assim, o vendedor assume a obrigação de atender ao exercício do comprador, caso solicitado.

Em (c) está esboçada a posição comprada em uma opção *put*; aqui, o comprador paga um prêmio por comprar a opção de venda no momento de abertura da operação e passa a ter o direito de vender o objeto do contrato pelo preço de exercício se lhe for viável. Por último, (d) mostra a opção *put* para a posição de venda, na qual o vendedor recebe um prêmio por comprar a opção de venda no momento de abertura da operação. Desta forma, o vendedor assume a obrigação de atender ao exercício do comprador, caso solicitado.

Parâmetros do contrato

Considerando uma opção de compra com um preço de exercício K e que na data de vencimento, o preço seja S_T . Então, o lucro ou valor da opção, neste caso, pode ser:

- Zero, se $S_T \leq K$. No caso, entre exercer a opção e comprar o ativo por K ou não exercer a opção e comprar o ativo no mercado de curto prazo por um preço inferior S_T , é preferível não exercer a opção por ser a pior alternativa.
- $S_T - K$, se $S_T > K$. Aqui, ao exercer a opção e comprar o ativo por K o mesmo pode ser vendido no mercado de curto prazo por S_T .

Resumidamente, o retorno de uma opção de compra na data de vencimento pode ser calculada pelo seu máximo valor, conforme Equação 3.3.

$$Bc = \max(S_T - K, 0) \quad (3.3)$$

Analogamente, podemos definir o retorno de uma opção de venda (Eq. 3.4).

$$Bv = \max(K - S_T, 0) \quad (3.4)$$

Outro fator influente na valoração de uma opção é a volatilidade que um ativo apresenta. Um ativo, com maior volatilidade, provavelmente, terá um maior valor da opção em relação a um outro ativo menos volátil, conseqüentemente, terá maiores chances de aumentar seu preço em um período curto até seu vencimento (GUNN, 2008).

Ao precificar opções, Hull (1997) cita a avaliação neutra em relação ao risco, mencionando que, ao precificar opções ou mesmo outros derivativos, podemos assumir com total segurança que o mundo seja neutro ao risco. Os preços obtidos são adequados, tanto para uma situação de indiferença ao risco quanto para outras situações.

4 BENEFÍCIO E RISCO

Os investimentos em geral devem ser analisados do ponto de vista econômico, financeiro e, também, dos riscos associados. Riscos estes que podem ser entendidos como a possibilidade de obtenção de benefício inferior àquele que foi anteriormente estimado, e que motivou a decisão de investir. Há riscos de distinta natureza, tais como tecnológicos, operacionais e financeiros.

Entretanto, são discutidas algumas medidas de avaliação do benefício, apresentando dessa forma o conceito de valor presente esperado e taxa interna de retorno, bem como as definições e tipos de risco e algumas diferentes possibilidades para avaliar tais riscos.

4.1 Benefício

Avaliar o benefício de um investimento consiste em analisar a rentabilidade total de um projeto, considerando todas as receitas e despesas ao longo de certo período de tempo.

Um dos passos para demonstrar e avaliar a adicionalidade dos projetos de MDL é a análise de investimento para determinar se a atividade de projeto proposta é menos atrativa financeiramente do que, pelo menos, uma alternativa na qual os participantes do projeto poderiam se interessar. Projeções de cenários para o mercado futuro estão dentre os principais temas que devem ser tratados no DCP. Assim, a análise de investimento pode ser feita através dos seguintes indicadores financeiros (MCTI, 2009a):

- Análise simples dos custos, feita em casos em que a atividade de projeto não traga nenhuma lucratividade além dos créditos de carbono.
- Análise por comparação de investimentos, feita quando o projeto tem rentabilidade além dos créditos de carbono gerados (caso em que um projeto gere eletricidade para venda). São utilizados critérios de análise de investimentos como o valor presente líquido (VPL) ou a taxa interna de retorno (TIR).
- Análise *benchmark*, na qual se identifica o indicador financeiro relevante mais adequado para o tipo de projeto.

Especial atenção é dada às ferramentas de análise do retorno esperado ao cálculo da TIR e do VPL.

4.1.1 Valor presente líquido

O critério do valor presente líquido (VPL) representa a diferença entre o investimento realizado (despesa corrente de caixa) e o valor presente dos fluxos de caixa futuros (retorno futuro), devidamente atualizados para o momento presente por uma taxa de desconto pré-estabelecida. De uma maneira geral, existe um consenso quanto ao uso do valor presente esperado como medida de benefício (TAKAHASHI, 2008).

Para o cálculo do VPL, é essencial considerar que o dinheiro possui um valor temporal, ou seja, uma mesma quantia em dinheiro hoje é diferente da mesma quantia daqui um ano. Assim, é possível estabelecer o valor de equivalência entre ambos os valores pela seguinte relação:

$$\text{VPL} = \sum_{t=0}^T \frac{FC_t}{(1+r)^t} \quad (4.1)$$

sendo FC_t o valor do fluxo de caixa um dado período $t = 0, \dots, T$. A taxa de desconto r pode ser derivada, dentre várias opções, de um padrão de referência oficial ou governamental aprovado e que seja utilizado para decisões de investimento (MCTI, 2009a).

Assim, se o VPL for positivo, um investimento pode ser aceito, caso contrário, deve-se rejeitá-lo. Basicamente, esta é a maneira pela qual se usa comparar o valor de um investimento a seu preço de mercado (REILLY; NORTON, 2008).

4.1.2 Taxa interna de retorno

Outra abordagem para decisão de investimento dá-se pelo cálculo da taxa interna de retorno (TIR). A TIR representa a rentabilidade média gerada por determinado investimento. Em síntese, a

TIR é igual à taxa de desconto que anula o VPL, ou seja iguala receitas e despesas observadas nos vários períodos de um fluxo de caixa. Matematicamente, a TIR corresponde a uma das raízes de um polinômio de grau n .

Assim, um dos procedimentos para solução é resolver o problema graficamente, encontrando o valor que iguala receitas e despesas.

4.2 Risco

Conforme descrito por Reilly e Norton (2008), risco, no mercado financeiro, é “*a chance de não se atingir as metas de investimento em razão à incerteza do retorno no tempo*”. Podemos dizer, então, que o risco de um investimento decorre diante de uma opção de retorno e pode causar tanto flutuações nos valores do benefício esperado quanto flutuações do preço futuro esperado de um ativo.

Na concepção de risco especificamente relacionada a operações financeiras, a modelagem de risco pressupõe como condição essencial o entendimento do comportamento dos preços *spot*, ou seja, a compreensão do mercado.

Os consumidores no mercado de derivativos, de maneira geral, requerem contratos financeiros específicos. Em adição, os mercados de derivativos em carbono, especificamente relacionados as transações de RCEs, são considerados investimentos com certa característica de risco, que tende a ser maior no início do projeto e menor à medida que ele passa pelas etapas exigidas.

4.2.1 Medidas de risco

A mensuração de risco financeiro tem motivado pesquisadores e tomadores de decisão a buscar indicadores capazes de identificarem quão arriscada é uma decisão. Assim, várias alternativas podem ser usadas para se avaliar o risco. Usualmente, o risco de um determinado ativo pode ser medido pela variabilidade de seus retornos no tempo. Dentre algumas medidas quantitativas dessa

variabilidade, temos a variância, semivariância, o desvio-padrão dos retornos esperados e amplitude dos retornos.

Conforme sugerido por Reilly e Norton (2008), as medidas de risco mais adequadas para estudo são a variância e o desvio padrão, por tratarem-se de medidas intuitivas, corretas, amplamente reconhecidas e têm sido utilizadas na maioria dos modelos teóricos de precificação de ativos.

A variância e o desvio-padrão foram tradicionalmente utilizados para descrever o risco notório dentro do modelo de seleção de portfólio proposto por Markowitz (1952). Sendo assim uma referência mundial em finanças a ser descrito mais adiante. Outras principais abordagens para mensuração do risco são: o *Value at Risk (VaR)* e o *Conditional Value at Risk (CVaR)*.

Variância

Na estatística e na teoria da probabilidade, a variância de uma variável aleatória é uma medida da sua dispersão estatística que indica a longevidade entre seus valores e o valor esperado. Destarte, quanto maior for a variância, maior será a dispersão das expectativas em torno do benefício esperado e, conseqüentemente, maior será o risco do investimento.

De maneira formal, se o benefício fosse representado pela variável aleatória B , sua variância seria dada por:

$$\sigma^2 = E [B^2] - (E [B])^2 \quad (4.2)$$

O uso da variância como medida de avaliação de risco é justificada caso a distribuição subjacente dos retornos (benefícios) segue uma distribuição aproximadamente normal, ou seja, tenha a forma de sino, ou ainda se as preferências do decisor corresponde a uma função utilidade quadrática¹ (VARIAN, 1992 apud TAKAHASHI, 2008).

Matematicamente, a variância é difícil de ser interpretada devido a sua grande extensão numérica. Portanto, prefere-se o uso do desvio-padrão (ou volatilidade), que é simplesmente a raiz quadrada da variância.

¹A suposição de a função utilidade ser quadrática conduz à conclusão que a análise através do critério da média-variância explica do comportamento do decisor.

Desvio-padrão

Dentre as medidas de risco, o desvio-padrão é a mais simples e a mais utilizada, podendo ser definida simplesmente como a raiz quadrada da variância.

Uma formulação alternativa para a avaliação do desvio-padrão no retorno dos preços é dada pela variação percentual nos preços em relação ao seu preço no dia anterior, normalizado no tempo (fundamentalmente, anualizado), conforme Equação 4.3 a seguir:

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2 \left[\ln \left(\frac{S_T}{S_0} \right) \right]} \quad (4.3)$$

sendo σ o desvio-padrão anual, S_T o preço ao final de um ano e S_0 o preço inicial.

O desvio-padrão, então, nos indica a magnitude da componente estocástica² referente à alteração de preços em função do tempo.

Segundo Hull (1991), qualquer variável cujo valor mude de maneira incerta com o tempo, discreto ou contínuo, segue um processo estocástico. No caso de tempo discreto, o valor da variável pode mudar apenas em determinados pontos fixos no tempo, como por exemplo, o preço de ações que além de serem limitados a valores discretos sofrem mudança apenas quando a bolsa está operante. Já num processo de variável contínua, as mudanças podem ocorrer a qualquer tempo.

A fim de dar uma noção intuitiva da possível amplitude dos retornos para um investidor, uma interpretação estatística também pode ser dada ao desvio-padrão. Caso este em que o investidor acredite que o comportamento futuro de um mercado seja semelhante ao comportamento passado (REILLY; NORTON, 2008).

Assim, se a distribuição de mudanças dos retornos é contínua e aproximadamente normal, conforme ilustrada na Figura 4.1, podemos estimar uma faixa aproximada para os retornos esperados uma vez determinados a média (μ) e o desvio-padrão (σ).

²O termo estocástica representa a aleatoriedade dos preços ao longo do tempo.

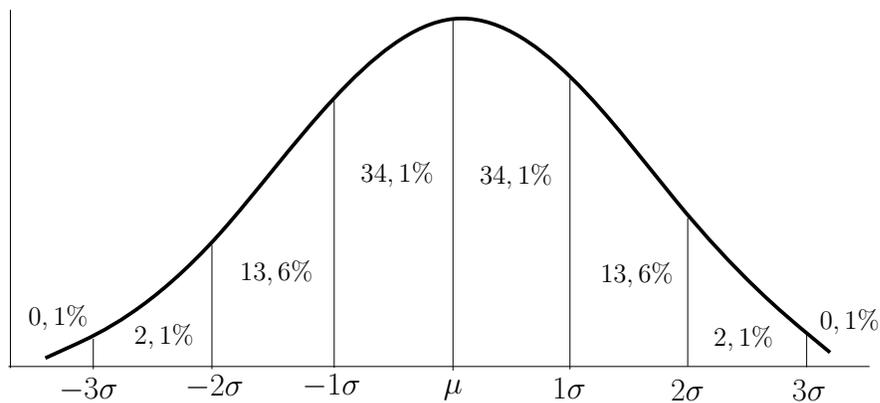


Figura 4.1 - Curva normal

Aproximadamente 68% dos retornos efetivos por período ficam em um intervalo de um desvio-padrão em relação à média ($\mu \pm 1\sigma$), 95% dos retornos observados ficam na faixa de dois desvios-padrões ($\mu \pm 2\sigma$) e, aproximadamente 99% dos retornos efetivos ficam na faixa de três desvios-padrões ($\mu \pm 3\sigma$).

Value at Risk

O *Value at Risk* (*VaR*) é uma ferramenta de gerenciamento de riscos a qual tem a finalidade de quantificar a exposição ao risco de uma carteira de investimentos. Resumidamente, o *VaR* traduz, na forma de perda máxima potencial, a diferença entre o preço esperado e o preço que pode ocorrer quando o mercado se comporta de maneira normal, com certa probabilidade de risco (JORION, 1997).

Na abordagem *VaR*, o primeiro passo para sua mensuração é definir dois fatores quantitativos: o horizonte de tempo, sujeito a uma distribuição de probabilidade, e o grau de confiança. Assim, o risco é quantificado analisando a máxima perda ou pior ocorrência a um dado nível de probabilidade (nível de confiança).

Todos os elementos deste modelo são obtidos de forma estocástica de acordo com informações passadas. Outrossim, considerando um determinado nível de risco, definido por *RaR* (Receita ao Risco³), tal que *RaR* seja maior ou igual ao benefício *B*. Assim:

³Definido por Munhoz (2008).

$$\Pr [B \leq RaR] = \int_{-\infty}^{RaR} f(B) dB \quad (4.4)$$

Ao mesmo tempo em que RaR considera o ganho mínimo potencial da receita, o VaR estima a perda máxima de um investidor.

$$VaR = E[B] - RaR = \int_{-\infty}^{\infty} B \cdot f(B) dB - RaR \quad (4.5)$$

O método mais popular para estimar o VaR é utilizar a distribuição empírica dos retornos passados do ativo de interesse. Conhecida como método de simulação histórica, esta abordagem simples para estimação do VaR admite que os valores assumidos pelo retorno do portfólio representam uma boa aproximação para o valor futuro da variável aleatória retorno do portfólio (OLIVEIRA, 2009).

Embora o VaR forneça as informações à respeito da perda que um portfólio está sujeito para um determinado intervalo de tempo e nível de confiança, esta métrica não informa a magnitude desta perda, quando o VaR é excedido. Além disso, quando se quer otimizar um portfólio, utilizando o VaR como função objetivo a ser minimizada, o processo se torna difícil pois o VaR é uma função não convexa, não diferenciável em alguns pontos e apresenta múltiplos extremos locais (HUANG, 2008).

Conditional Value at Risk

A partir da métrica VaR foi determinada a *Conditional Value at Risk* ($CVaR$). Nesta métrica, é informada a perda média dos próximos T períodos, considerando todos os momentos em que o retorno é inferior ao VaR , medindo também a profundidade da perda e não apenas o valor na condição limite.

A medida de $CVaR$ utiliza informações sobre eventos que ocorrem nas caudas das distribuições de probabilidades. Esta medida vem sendo usada, mais recentemente, e tem sido destaque na literatura relacionada a riscos. Explica-se por conduzir modelos lineares de grandes dimensões quando empregada para composição de portfólios.

Ao contrário do VaR , o $CVaR$ mede a perda esperada para um determinado nível de risco:

$$CVaR = \int_{-\infty}^{RaR} B \cdot f(B) dB \quad (4.6)$$

Como exemplo, consideremos um nível de confiança de 95%, então, o *CVaR* é dado pela média das 5% maiores perdas e nunca será menor do que seu respectivo *VaR*.

O *CVaR* pode também ser utilizado em análises de risco-retorno, assim como o modelo de média-variância proposto por Markowitz (1952).

4.2.2 Risco no mercado de RCEs

Como dito anteriormente, as transações de RCEs geradas por um projeto MDL são consideradas investimentos com certa característica de risco, visto que possui várias etapas de submissão a fim de verificar a presença de todos os requisitos exigidos pelo Protocolo. O risco, neste caso, tende a ser maior no início do projeto e menor à medida que ele passa pelas etapas exigidas.

Assim, a geração de RCEs a partir de sua análise de investimento seguida pelo equacionamento de seus riscos pode ser atualizada no Brasil como um incremento do retorno dos investidores. Riscos estes como a liquidez e volatilidade na formação de preços, potencial de geração de créditos, organização institucional, instabilidade governamental e status do projeto em andamento são os que mais interferem na atratividade de investimentos em MDL.

Os riscos são alocados entre comprador e vendedor e dependem do crédito que está sendo negociado, do tipo e estágio do projeto e da empresa controladora. Dessa forma, cabe ao comprador buscar proteções contratuais como níveis de preços distintos e garantia de entrega e pagamento e, quanto aos investidores, cabe utilizar diferentes critérios de acordo com os seus interesses e necessidades para analisar as oportunidades de investimento, tais como a eficiência do capital aplicado, o período de retorno, a relação ganho sobre o capital investido, impactos do investimento no fluxo de caixa e os riscos futuros em relação à continuidade do projeto (MCTI, 2009a).

Sob a ótica financeira, mesmo estando negociando o mesmo ativo, não podemos correlacionar dois mercados em face de terem óticas e estruturas diferentes. Porém, para efeito de ilustração, associamos os preços *spot* praticados na *BlueNext* e os preços futuros praticados na ECX para contratos com vencimento em dezembro de 2012, uma vez que ambos os mercados apresentam uma

certa regularidade com relação aos preços praticados (Fig. 4.2), e suas volatilidades são semelhantes (Fig. 4.5) em função de ter-se uma amostra de dados com praticamente o mesmo período de tempo.

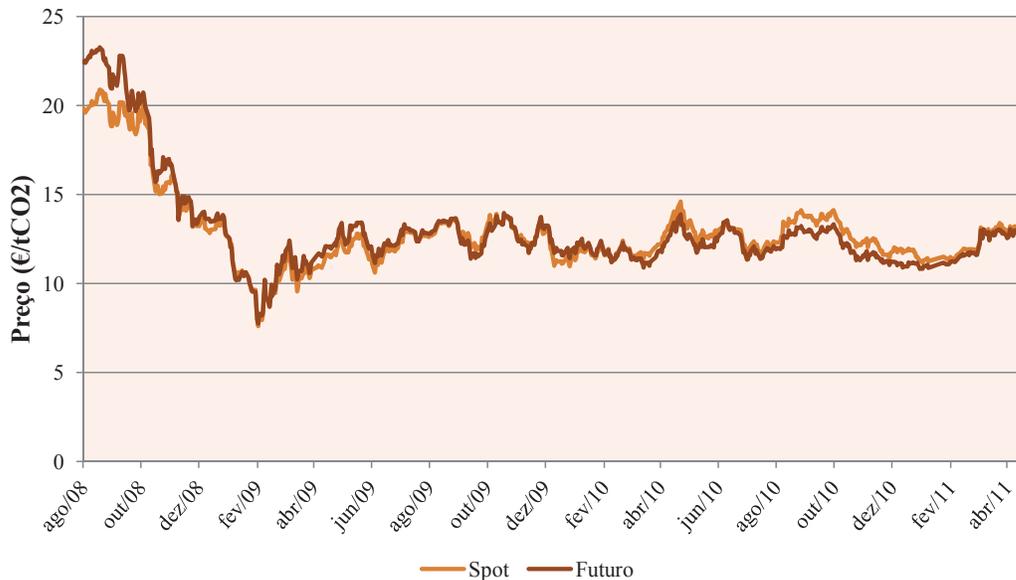


Figura 4.2 - Preços diários das RCEs (*Spot* e Futuro, € corrente) – 2008 a 2011
Fonte: ECX (2011), BlueNext (2011)

Em 2009 a crise econômica mundial, que se iniciou em 2008, se intensificou e afetou tanto a oferta como a demanda no mercado de RCE; por um lado, como a atividade industrial se contraiu em países industrializados sua necessidade por aquisição dos certificados se reduziu. Pelo lado da oferta, a crise financeira levou instituições financeiras e investidores privados a desfazer certos investimentos em projetos do MDL reposicionando-os em ativos e mercados mais seguros e menos voláteis.

Entre agosto de 2008 e maio de 2011, o preço médio da RCE negociada no mercado *spot* foi registrado em 12,92 €/tCO₂, semelhante ao preço médio da RCE negociada no mercado futuro da plataforma da ECX, de 12,98 €/tCO₂. Após esse período, houve uma queda acentuada nos preços devido ao cenário da crise europeia, conforme ilustrado na Figura 4.3 abaixo.



Figura 4.3 - Evolução dos preços (€) das RCEs - 2010 a 2011
 Fonte: ECX (2011)

Em 25 de novembro de 2011, foi registrado o menor nível do preço da RCE, chegando a 4,82 €/tCO₂, para contratos futuros com vencimento em dezembro de 2012.

Para se capturar a realidade dos mercados de RCEs deve-se procurar incorporar, além de informações relativas à estrutura dos preços esperados para entrega em diferentes prazos, informações quanto à estrutura das volatilidades futuras, ou seja, as variabilidades nos preços nos diferentes pontos no tempo.

A Figura 4.4 ilustra a variação percentual diária dos preços das RCEs com vencimento em dezembro de 2012 e a Figura 4.5 ilustra a evolução das volatilidades anuais calculada em base diária, referentes ao mercado *spot* e contratos futuro com vencimento em dezembro de 2012.

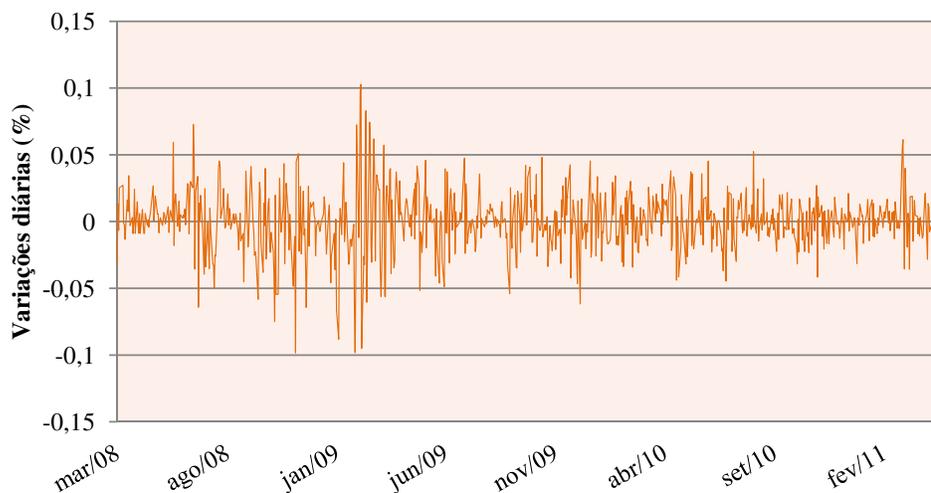


Figura 4.4 - Variação percentual em base diária dos preços das RCEs

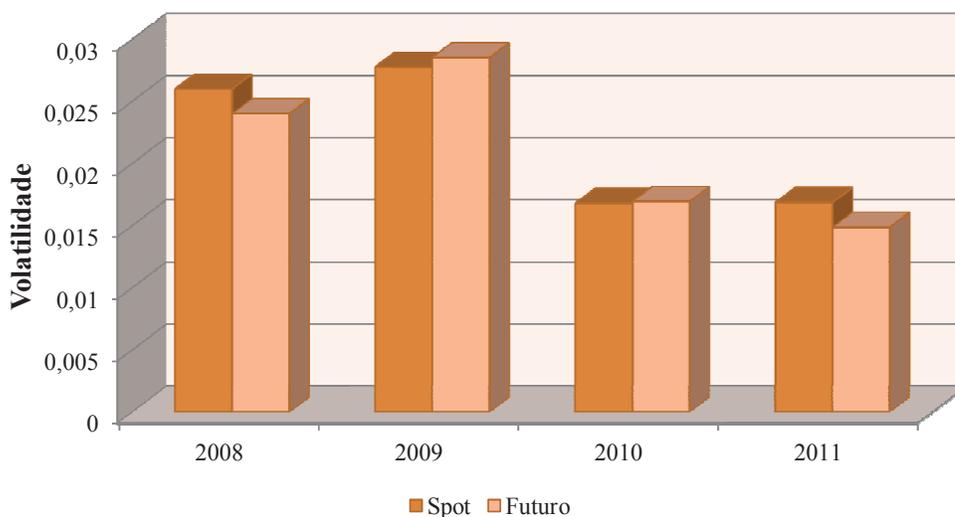


Figura 4.5 - Volatilidade anual dos preços das RCEs

Fonte: ECX (2011), BlueNext (2011)

Os picos ocasionais da variação percentual expostos na Figura 4.4 devem-se à elevadas variações nos preços, às vezes atribuídas a choques eventuais, como eventos políticos, problemas na regulação que afetam variáveis críticas do projeto, alteração da paridade cambial, etc.

Identifica-se na Figura 4.5 uma volatilidade de curtíssimo prazo por refletir oscilações diárias dos preços. Tal volatilidade está associada principalmente aos efeitos de sazonalidade, em resposta a flutuações cíclicas na oferta e na demanda, na sua maioria devidas a variações nas condições climáticas. Em geral, os preços das RCEs tendem a apresentar fortes padrões sazonais. A proximi-

dade do término do primeiro período de compromisso pode ser a principal causa da diminuição da volatilidade anual dos preços da RCE nos últimos dois anos.

A Figura 4.6 reorganiza os dados da Figura 4.4 transformando-os em uma distribuição de frequência do período analisado, considerando 95% de confiabilidade. Observa-se que, se o futuro repetir as variações passadas, o valor esperado do retorno diário das RCEs será de $-0,001\%$. O *VaR* será de $-0,036\%$ ao risco de 5%.

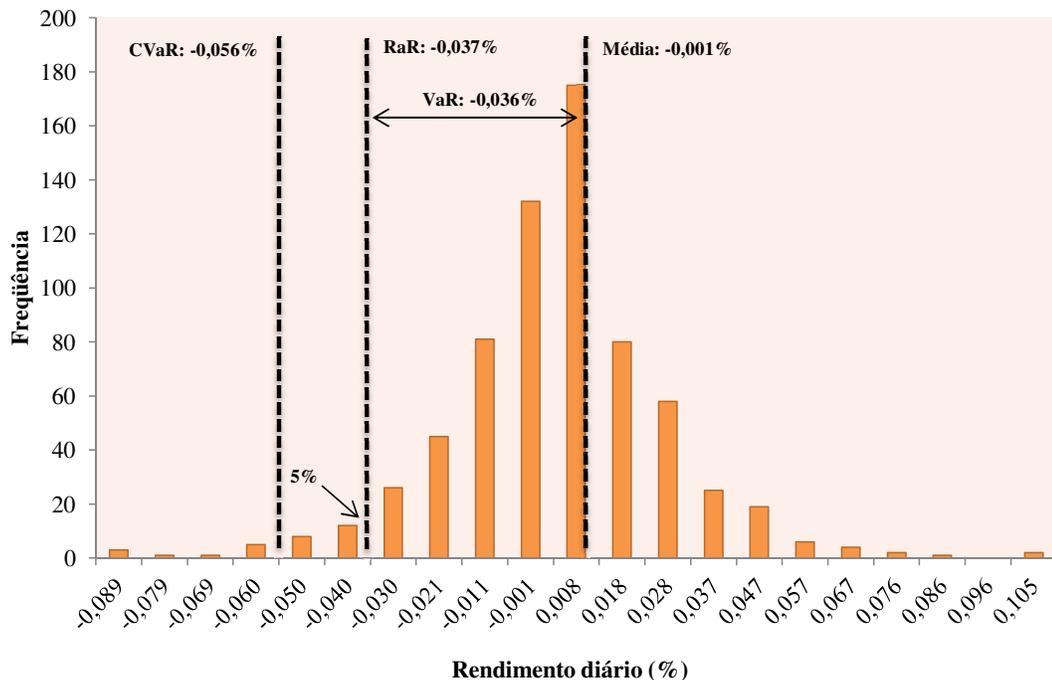


Figura 4.6 - *Value at Risk*

Se o valor esperado de $-0,001\%$ for interpretado como receita esperada de uma carteira de contratos, existe um risco de 5% da receita da carteira ser menor do que $-0,037\%$ (MUNHOZ, 2008).

Em última instância, os mercados *spot*, futuro e de opção das RCEs inseridos na ECX oferecem a possibilidade de se mitigar o risco de variação de preços dos créditos de carbono de projetos MDL realizados no Brasil, por exemplo, dado que se tornou prática de mercado referenciar os preços das RCEs negociadas nesta bolsa (FRAGA, 2007).

5 MODELO DE PRECIFICAÇÃO DE CONTRATOS

Trabalhos de Samuelson (1965), Merton (1973), Black e Scholes (1973) entre outros, abordam a teoria geral de precificação de derivativos no mercado financeiro. A inovação veio quando Merton (1973) e Black e Scholes (1973) criaram um modelo para eliminar o risco de um portfólio. Mais tarde, Harrison e Kreps (1979) aplicaram os avanços da teoria financeira na precificação de derivativos de *commodities*.

A precificação de contratos, quando se consideram ambientes com incertezas como em contratos do MDL, requer a avaliação do benefício e da exposição ao risco. Normalmente, a transação com a entrega das RCEs contratadas ocorre durante o ciclo de vida do projeto. Daí a necessidade de estimar valores para determinados anos, a fim de criar um compromisso confiável entre empresas e financiadores, na busca de continuidade da relação enquanto durar o contrato. Nesse contexto, estudos econômicos fundamentados em cenários futuros têm sido cada vez mais necessários para a compreensão de longo prazo.

Atualmente, a dinâmica de preços dos ativos e seus derivados são comumente citados nos trabalhos de Duffie (1996), Hull (1997) e Luenberger (1998).

Destarte, neste Capítulo é apresentado um modelo baseado naquele desenvolvido por Cox e Rubinstein (1979), hoje conhecido como Modelo Binomial. Desenvolvido originalmente para precificar ativos, este modelo é discutido neste trabalho com o propósito de precificar contratos de RCEs a termo e de opção.

5.1 Lattice binomial

Desenvolvido originalmente para precificar ativos, o modelo de lattice binomial é uma técnica muito útil e popular devido à sua simplicidade de implementação, e é discutido neste trabalho com o propósito de representar o comportamento dos parâmetros aleatórios de contratos de certificados de carbono oriundos de projetos do MDL (HULL, 1997).

No mercado de RCEs o principal parâmetro aleatório é o comportamento dos preços pratica-

dos. Aqui, o modelo de latisse binomial é usado para estimar em base mensal o benefício esperado do contrato a termo e o valor esperado de uma opção.

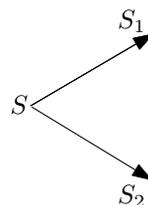
5.1.1 Valor esperado

A construção da latisse representa, a partir de uma série de dados históricos, uma exploração do futuro conforme ilustrado na Figura 5.1.



Figura 5.1 - Histórico de preços e latisse futura
Fonte: Adaptado da ECX (2011)

De acordo com o modelo, se um preço S é conhecido no início do período, o preço inicial do próximo período é um determinado valor dentre duas possibilidades.



Usualmente, essas duas possibilidades são definidas como múltiplas do preço S e cada uma delas possui uma probabilidade de ocorrência. Sendo assim, conforme ilustrado na Figura 5.2, a latisse analisa a dinâmica do preço *spot* S , considerando que a cada intervalo de discretização do contrato (como, por exemplo, uma semana, um mês, um ano) o preço pode subir com uma taxa u , então $S_1 = Su$, com $u > 1$, ou pode descer com uma taxa d , então $S_2 = Sd$, com $0 < d < 1$. A forma geral de uma latisse é mostrada na Figura 5.3.

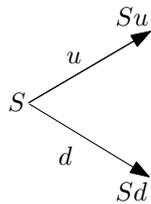


Figura 5.2 - Latisse binomial de um único período

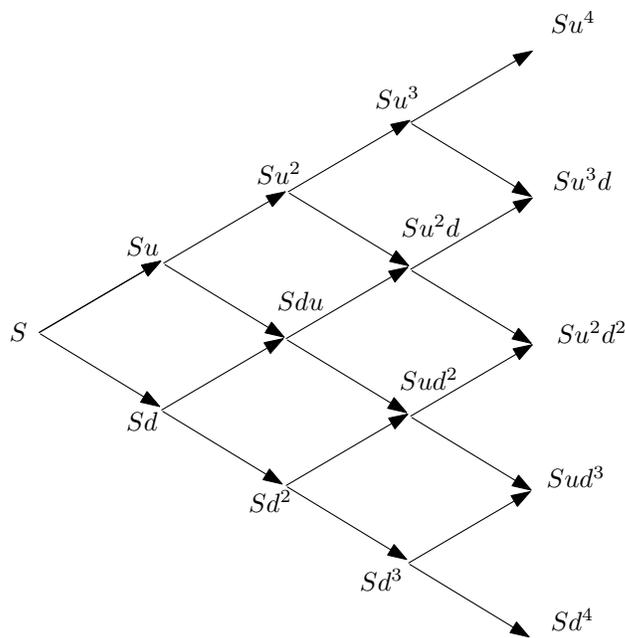


Figura 5.3 - Latisse binomial

A fim de especificar o modelo completamente, devemos calcular os parâmetros u e d . Entretanto, cabe destacar que tais parâmetros devem ser escolhidos de tal forma que a verdadeira natureza estocástica do ativo em questão seja capturada, como foi discutido no Capítulo 4, subseção 4.2.1.

A volatilidade histórica é utilizada como parâmetro para previsão dos possíveis comportamentos do preço futuro da RCE. Ela corresponde ao desvio-padrão dos logaritmos naturais, conforme formulação alternativa para a avaliação do desvio-padrão já apresentada pela Equação 4.3.

Como o modelo de latisse binomial é de natureza multiplicativa (com cada novo valor sendo uS ou dS e $u, d > 0$), os preços nunca serão negativos. Isto é possível ao considerar que o logaritmo do preço é a variável fundamental do modelo proposto. O uso do logaritmo justifica-se, portanto, pela utilidade e simplificação das fórmulas para seleção dos parâmetros (LUENBERGER, 1998).

A fim de obter valores razoáveis para u e d , os mesmos são calculados utilizando a volatilidade σ dos preços, conforme visto na subseção 4.2.1, Equação 4.2. E então, conhecendo-se o intervalo de discretização Δt , os parâmetros da latisse binomial podem ser calculados como:

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (5.1)$$

$$d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}} \quad (5.2)$$

A partir daí, a latisse binomial é expandida de $t = 0 \rightarrow T$ (horizonte do contrato). O número de níveis n de cada estágio é dado por $n = 0, \dots, T$. Logo, se as variações do preço são dadas em bases que não sejam anuais, o tempo de discretização passa a ser calculado como:

$$\Delta t = \frac{T}{n} \quad (5.3)$$

Por sua vez, a taxa de crescimento e o desvio-padrão passam a ser calculados por:

$$v = \frac{v}{n} \quad (5.4)$$

$$\sigma = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (5.5)$$

Adicionalmente, é necessário que $u = 1/d$. Deste modo, um passo de subida seguido por um passo de descida produz o mesmo preço que um passo de descida seguido por um passo de subida:

$$Sud = Sdu = S \quad (5.6)$$

A latisse da Figura 5.4, por exemplo, indica a evolução dos preços de determinado ativo ao longo de quatro períodos; se o crédito vale S no início do período, ela será Su ou Sd no próximo período, Su^2 , S ou Sd^2 no seguinte, e assim sucessivamente até o horizonte T do contrato.

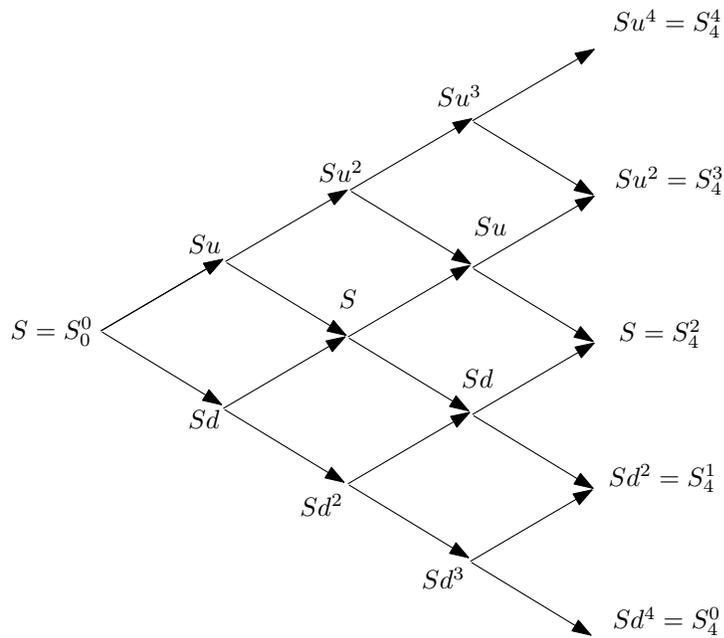


Figura 5.4 - Latisse binomial: recombinação

Nesta etapa, conhecido o preço atual S , a latisse é expandida usando u e d para produzir todas as possíveis realizações de preço S_T^n . Assim, os preços são calculados por:

$$S_{t+1}^{n+1} = S_t^n u \quad (5.7)$$

$$S_{t+1}^n = S_t^n d \quad (5.8)$$

Outra etapa para análise da latisse binomial é contrair a latisse para resultar em \bar{S}_0^0 , uma vez conhecido os preços S_T^n . A cada etapa, dois resultados são possíveis, com probabilidades p e $1 - p$, respectivamente, onde $0 < p < 1$ (LUENBERGER, 1998). Inicialmente, definimos v como a taxa de crescimento anual esperada:

$$v = E \left[\ln \left(\frac{S_T}{S_0} \right) \right] \quad (5.9)$$

sendo S_0 o preço inicial e S_T o preço ao final de um ano.

E então, o parâmetro p pode ser calculado por:

$$p = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{v}{\sigma} \right) \sqrt{\Delta t} \quad (5.10)$$

Neste caso, os valores esperados do preço \bar{S}_t^n são descontados com a taxa livre de risco

$R = (1 + r)^1$, e são calculados por:

$$\bar{S}_t^n = \frac{1}{R} [p_t \bar{S}_{t+1}^{n+1} + (1 - p_t) \bar{S}_{t+1}^n] \quad (5.11)$$

A Figura 5.5 ilustra a contração dessa latisse ao longo de quatro períodos, partindo dos nós correspondentes ao horizonte do contrato até resultar no preço esperado \bar{S}_0^0 .

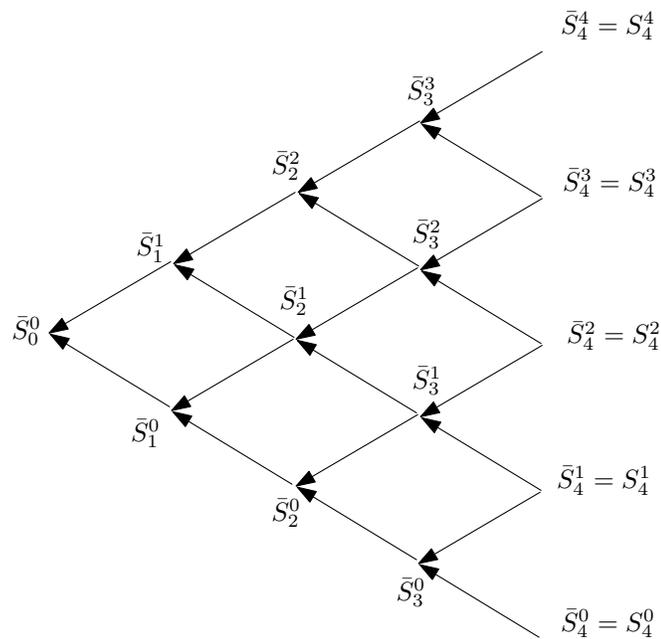


Figura 5.5 - Latisse binomial: valor esperado

O valor esperado do contrato é então $\bar{S} = \bar{S}_0^0$. O acoplamento entre as duas etapas de análise é obtido simplesmente fazendo $S_T^n = \bar{S}_T^n$ nos nós terminais da latisse, para $n = 0, \dots, T$.

A vantagem de construir uma latisse recombinante em vez de uma árvore é evidente em termos de esforço computacional (BRANDIMARTE, 2002). Explica-se também pelo movimento de subida seguido de um de descida ser idêntico ao movimento de descida seguido de um de subida (LUENBERGER, 1998).

¹Princípio geral da precificação de opções e de outros derivativos, o qual assume com total impunidade que o mundo seja neutro ao risco (HULL, 1997).

5.1.2 Risco

Usualmente, o modelo de latisse binomial está associado a receitas e benefícios esperados, porém, pode ser também utilizado para estimar valores do VaR e $CVaR$ (LUENBERGER, 1998). Tais métricas podem ser facilmente identificadas na latisse binomial, basta calcular as probabilidades acumuladas de realização de preços no último estágio da latisse.

Para a previsão do VaR é necessário estabelecer uma margem de erro aceitável para o modelo, que é determinado pelo intervalo de confiança estabelecido sobre a distribuição de probabilidade. Considerando um intervalo de confiança de 95%, por exemplo, um erro de 5% na perda máxima com relação ao valor esperado é aceitável.

Primeiramente, calculam-se os preços nos nós terminais S_T^n e na situação, podemos calcular a probabilidade do preço final S_T ser igual a S_T^n , conforme Equação 5.12.

$$\Pr [S_T = S_T^n] = \binom{T}{n} p^n (1-p)^{T-n}, \text{ para } n = 0, \dots, T \quad (5.12)$$

A probabilidade acumulada do preço final S_T ser menor ou igual a S_T^n é dado por:

$$\Pr [S_T \leq S_T^n] = \sum_{n=1}^T \left[\binom{T}{n} p^n (1-p)^{T-n} \right] \quad (5.13)$$

Sendo o coeficiente binomial calculado por:

$$\binom{T}{n} = \frac{T!}{n!(T-n)!} \quad (5.14)$$

A partir daí, pode-se localizar o RaR (Eq. 5.15) admitindo-se, por exemplo, um nível de risco de 5%.

$$RaR = S_T^n | \Pr [S_T \leq S_T^n] \leq 0,05 \quad (5.15)$$

As métricas VaR e $CVaR$ são calculadas conforme descrito abaixo.

$$VaR = \bar{S} - RaR \quad (5.16)$$

$$CVaR = E [S_T^n | S_T^n \leq RaR] \quad (5.17)$$

A Figura 5.6 ilustra as probabilidades de ocorrência dos preços para uma latisse binomial de quatro estágios bem como a identificação do *VaR* e *CVaR* na latisse.

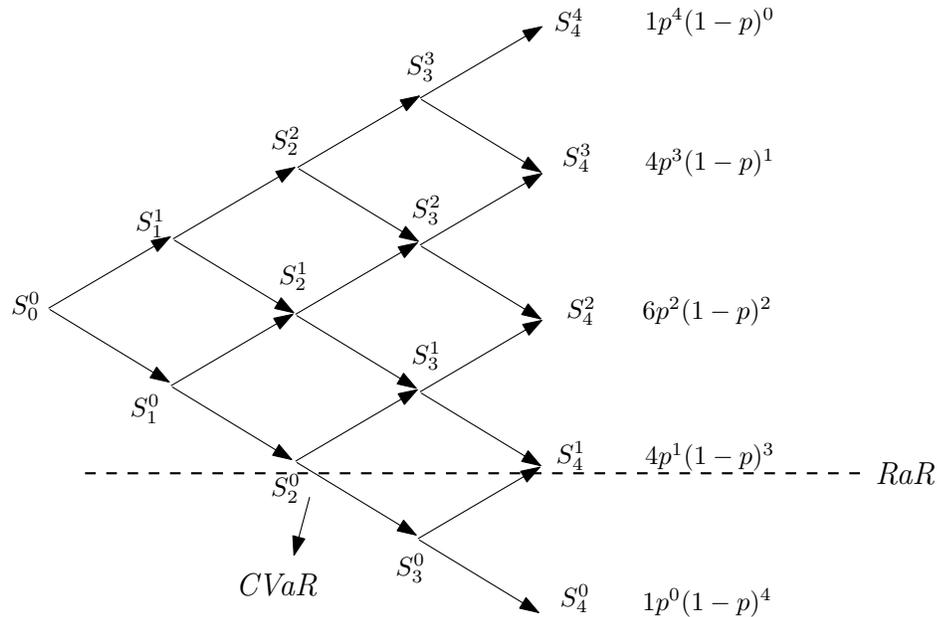


Figura 5.6 - *VaR* e *CVaR* na latisse binomial

5.1.3 Precificação de contrato a termo

Uma primeira alternativa de análise de um investidor seria buscar obter com o contrato a termo um benefício equivalente ao benefício esperado no mercado *spot* (GUNN, 2008).

O mesmo modelo de expansão da latisse apresentado na Figura 5.4 pode ser aplicado para obter os valores de \bar{S}_t^n de um contrato a termo. Porém, na etapa de contração da latisse (Fig. 5.5), os nós terminais da latisse para o início da segunda etapa passa a ser calculado como:

$$\bar{B}v_t^n = K - \bar{S}_T^n \quad (5.18)$$

sendo $\bar{B}v_t^n$ é o benefício da posição vendida no vencimento de cada período contratual t , K o preço de entrega e \bar{S}_T^n o preço esperado da RCE na data de vencimento T . A Figura a seguir ilustra a etapa de contração da latisse para a posição vendida de um contrato a termo.

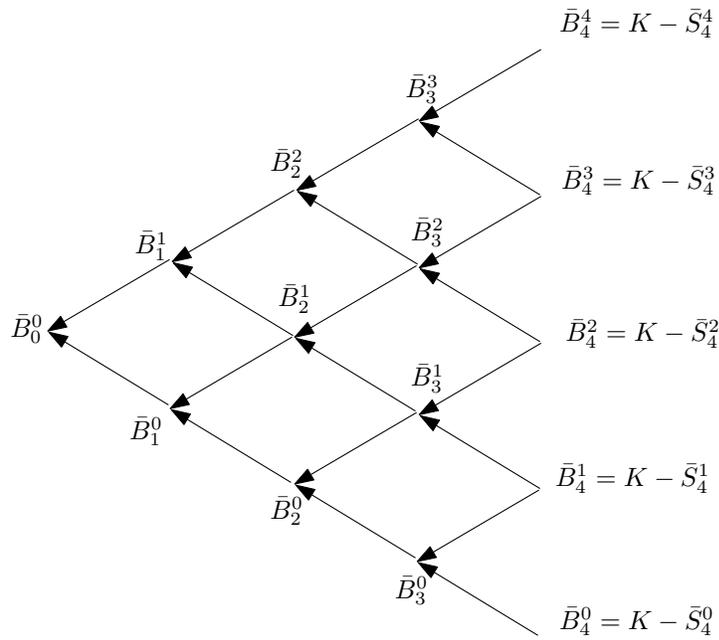


Figura 5.7 - Latisse binomial: a termo (posição vendida)

Analogamente, o benefício do comprador \bar{B}_c na data de vencimento de cada período contratual é calculado conforme Equação 5.19.

$$\bar{B}_c^n = \bar{S}_T^n - K \quad (5.19)$$

A Figura 5.8 mostra a contração da latisse para posição comprada de um contrato a termo.

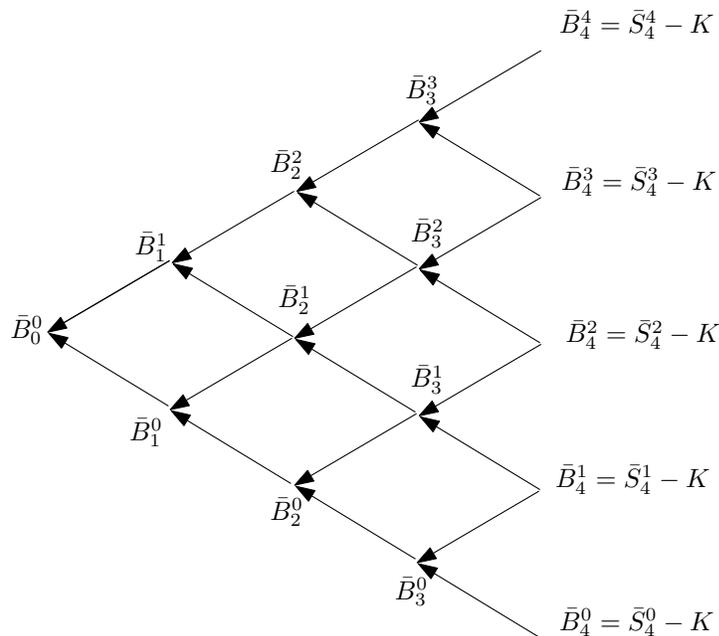


Figura 5.8 - Latisse binomial: a termo (posição comprada)

Dessa forma, o benefício esperado do contrato a termo para cada nó da latisse é calculado com:

$$\bar{B}_t^n = \frac{1}{R} [p_t \bar{B}_{t+1}^{n+1} + (1 - p_t) \bar{B}_{t+1}^n] \quad (5.20)$$

Então, no momento de abertura do contrato, o benefício médio esperado, por tCO₂e, descontado uma taxa r é calculado por:

$$\bar{B} = \frac{1}{T} \sum_{n,t=1}^T \frac{\bar{B}_t^n}{(1+r)^t} \quad (5.21)$$

5.1.4 Precificação de contrato de opção

Para se precificar um contrato de opção, a mesma metodologia descrita na primeira etapa de construção da latisse binomial para contratos a termo é utilizada. Partindo deste feito, evoluindo conforme a taxa de subida u e descida d , conforme Figura 5.4.

Porém, agora temos dois modelos de precificação de opções: a opção de compra (*call*) e a opção de venda (*put*). A primeira proporciona ao comprador o direito de adquirir o ativo negociado na data de vencimento pelo preço de exercício, pagando-se para isso um prêmio; se no futuro o preço do ativo S_T estiver acima do preço de exercício K (estabelecido pelo contrato), o portador da opção de compra exercerá este direito e o vendedor tem a obrigação de atender ao comprador assim que solicitado. Já a opção venda, proporciona ao vendedor o direito de vender, mediante pagamento de um prêmio, o objeto do contrato na data de vencimento pelo preço de exercício.

Logo, a opção é precificada comparando as alternativas que um vendedor/comprador possui: comprar/vender no mercado *spot* ou comprar/vender no mercado bilateral.

Após a expansão da latisse, o valor esperado da opção é também obtido com a contração da mesma. Nos nós finais da latisse são apresentados os retornos da opção, enquanto o nó inicial apresenta o valor da opção.

Tanto a opção de compra como a opção de venda é exercida pelo preço de exercício K se o valor do benefício for maior do que zero; caso contrário, não exerce a opção. Matematicamente, temos:

$$F_t = K, \quad \text{se } B_t > 0 \quad (5.22)$$

No caso de opção de venda, o benefício esperado da opção de cada período contratual t corresponde ao prêmio pago por adquirir o direito de opção, e é calculado como:

$$\bar{B}v_t^n = \max(K - \bar{S}_T^n, 0) \quad (5.23)$$

sendo $\bar{B}v_t^n$ é o benefício da posição vendida no vencimento de cada período contratual t , K o preço de entrega e \bar{S}_T^n o preço esperado da RCE na data de vencimento T . A Figura a seguir ilustra a etapa de contração da latisse para a posição vendida de um contrato de opção.

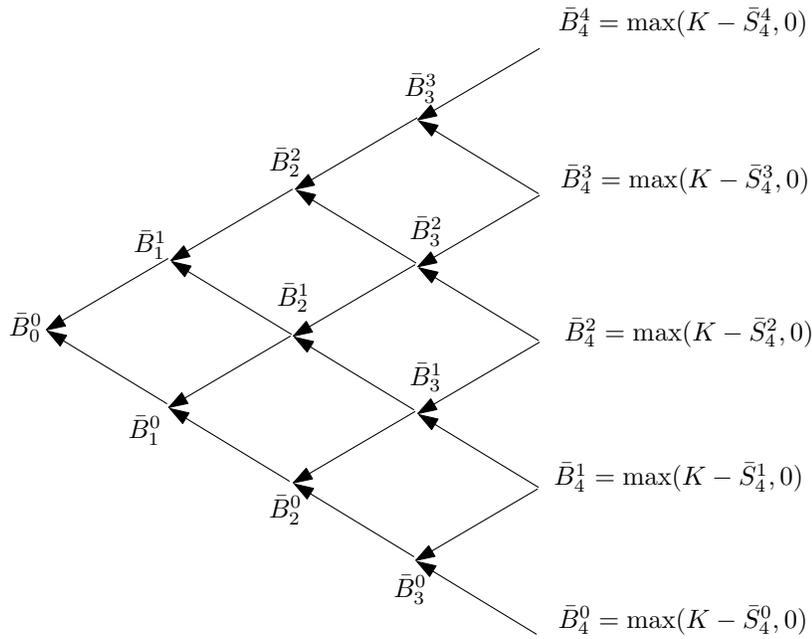


Figura 5.9 - Latisse binomial: opção de venda

Já, no caso de uma opção de compra, o benefício da posição comprada $\bar{B}c_t^n$ é calculado como:

$$\bar{B}c_t^n = \max(\bar{S}_T^n - K, 0) \quad (5.24)$$

A contração da latisse usada para avaliar o comportamento dos preços para opção de compra é ilustrada Figura 5.10 a seguir:

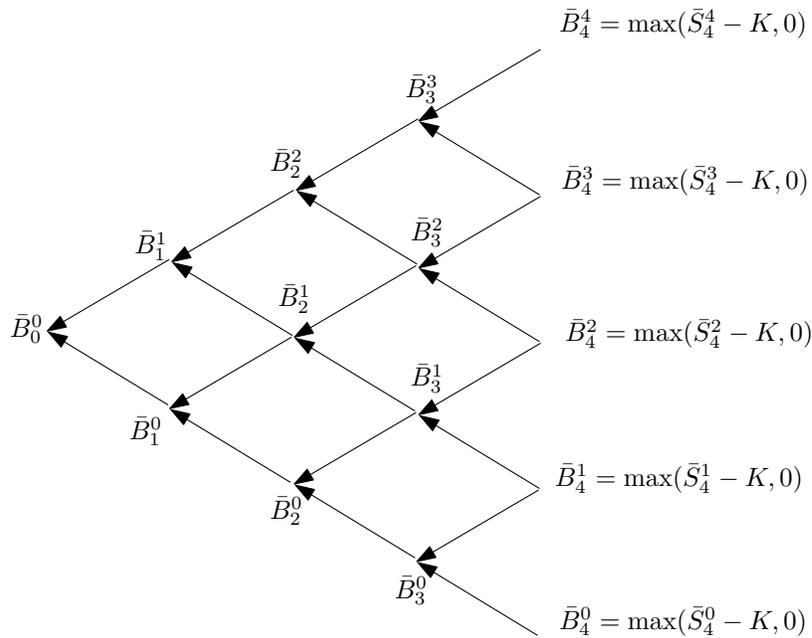


Figura 5.10 - Lattice binomial: opção de compra

Sendo assim, se um contrato de opção tiver duração de um mês, por exemplo, o vendedor deve efetuar a soma do valor da opção em cada dia, descontada a uma taxa de desconto livre de risco R e, então, cobrar como prêmio um valor superior ao encontrado.

Matematicamente, o valor esperado da opção no mês t e o prêmio da opção de compra ou venda para cada nó da latisse são calculados, respectivamente, como:

$$F_t^n = \frac{1}{R} [q_t F_{t+1}^{n+1} + (1 - q_t) F_{t+1}^n] \quad (5.25)$$

$$\bar{B}_t^n = \frac{1}{R} [q_t \bar{B}_{t+1}^{n+1} + (1 - q_t) \bar{B}_{t+1}^n] \quad (5.26)$$

sendo a probabilidade q equivalente à probabilidade de subida livre de risco, e $1 - q$ a probabilidade de descida, calculada por:

$$q = \frac{R - d}{u - d} \quad (5.27)$$

Então, no momento de abertura do contrato, o valor médio esperado de uma opção descontado uma taxa r , é calculado por:

$$\bar{F} = \frac{1}{T} \sum_{n,t=1}^T \frac{F_t^n}{(1 + r)^t} \quad (5.28)$$

Similarmente, o benefício ou prêmio médio esperado por tCO₂e é calculado por:

$$\bar{B} = \frac{1}{T} \sum_{n,t=1}^T \frac{\bar{B}_t^n}{(1+r)^t} \quad (5.29)$$

Então, a latisse binomial para um contrato de opção, *call* ou *put*, representa as diferentes trajetórias que podem ser seguidas por um preço do objeto do contrato durante toda a vida do mesmo.

5.2 Precificando RCEs

Para maior eficácia do modelo, recomenda-se considerar um maior intervalo de discretização para calcular um maior leque de preços possíveis e obter melhores estimativas dos valores de v e σ (LUENBERGER, 1998) (BRANDIMARTE, 2002), uma vez que a intensidade da abertura dessas latisses indicam o nível de risco associado.

Conforme ilustrado na Figura 5.11, algumas técnicas de precificação adicionam o risco ou a sazonalidade associados ao comportamento das variações passadas de preços.

Em (a), o esquema apresenta a análise do comportamento futuro de preços simplesmente como sendo o preço médio de variações passadas. Como forma de aprimorar tal medida, são encontradas na literatura de referência técnicas de precificação como demonstrado em (b), a qual faz uso da latisse binomial discretizada anualmente adicionando, assim, informação de risco e em (c), a qual captura o efeito de sazonalidade através da estimativa de preços mensais.

Por um lado, precificações como apresentada em (b) apresentam o nível de risco associado mas possuem uma maior dispersão dos valores esperados, por serem discretizadas anualmente. Já em modelos conforme apresentado em (c), capturam efeitos de sazonalidade por serem discretizados mensalmente, mas não atribuem medidas de risco.

Diante deste cenário, optou-se por combinar as informações apresentadas em (b) e (c) e incorporá-las ao modelo de precificação aqui proposto.

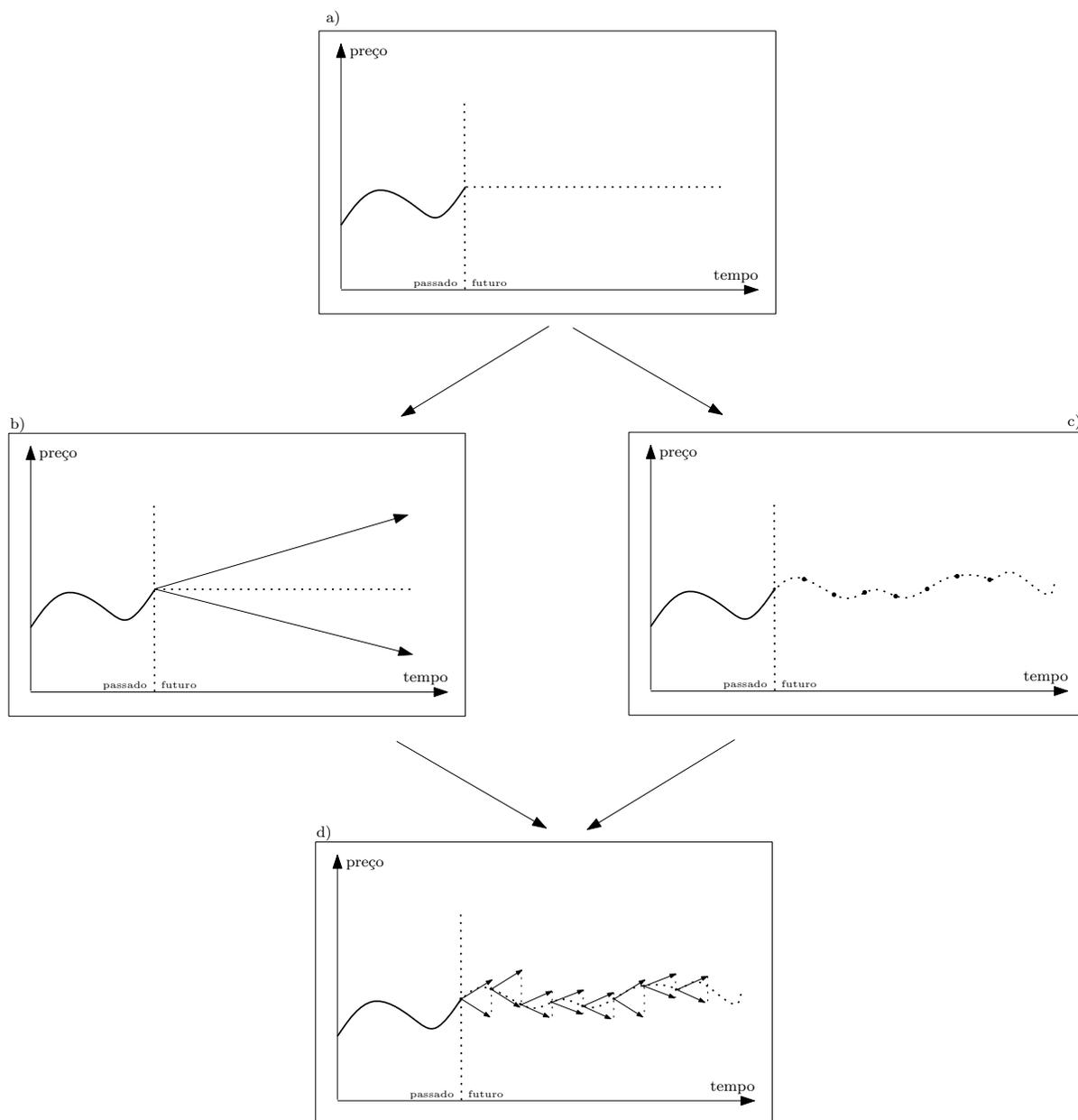


Figura 5.11 - Modelos de precificação

Aqui, serão considerados contratos a termo e de opção assinados entre comprador e vendedor de RCEs, em um horizonte de contratação de um ano. Para o ano considerado (2012), o contrato de RCEs tem início no mês 1 (janeiro) e término no mês 12 (dezembro). A taxa de desconto utilizada é de 10% ao ano.

5.2.1 Valor esperado da RCE

O processamento inicial dos dados envolve a aplicação de técnicas de regressão linear, utilizando as séries históricas dos preços praticados diariamente no mercado *spot* e futuro da ECX. Assim, os preços médios mensais das RCEs referentes ao período de janeiro de 2009 à abril de 2011 são as variáveis dependentes da regressão linear. Segundo Chevallier (2009), é conveniente a escolha de tal período pelo comportamento não confiável dos preços *spot* devido à restrições bancárias implementadas entre 2007 e 2008. A crise econômica europeia e a consequente queda dos preços das RCEs a partir de maio de 2011 também foi fator para que os preços mais atuais fossem desconsiderados.

A Tabela 5.1 mostra o preço da RCE inicial em cada mês para o ano de 2012.

Tabela 5.1 - Preço RCE inicial

Mês	€/tCO ₂ e
1	11,57
2	14,25
3	14,65
4	15,51
5	13,27
6	14,80
7	10,97
8	11,36
9	14,52
10	13,00
11	10,37
12	9,53

A partir dos dados apresentados acima, são construídas doze latisses (doze meses) com variações diárias, sendo $\Delta t = 1 \div 30 = 0,033$. Os parâmetros v e σ passam a ser calculados, respectivamente, como $v_d = v \div 30$ e $\sigma_d = \sigma \div \sqrt{30}$. Os demais parâmetros para o ano de 2012 seguem na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Parâmetros das latisses de 2012

Mês	v_d	σ_d	u	d	p	$1 - p$
1	-0,00210	0,01632	1,00298	0,99702	0,48825	0,51175
2	-0,00239	0,03108	1,00569	0,99434	0,49297	0,50703
3	0,00288	0,01665	1,00304	0,99696	0,51580	0,48420
4	0,00189	0,00398	1,00073	0,99927	0,54342	0,45658
5	0,00205	0,01070	1,00196	0,99805	0,51749	0,48251
6	-0,00088	0,00786	1,00144	0,99857	0,48973	0,51027
7	-0,00026	0,01547	1,00283	0,99718	0,49849	0,50151
8	0,00127	0,00021	1,00004	0,99996	1,06002	-0,06002
9	0,00035	0,01227	1,00224	0,99776	0,50259	0,49741
10	0,00002	0,00606	1,00111	0,99889	0,50036	0,49964
11	-0,00190	0,00817	1,00149	0,99851	0,47876	0,52124
12	-0,00079	0,00255	1,00047	0,99953	0,47156	0,52844

Dado o preço inicial das RCEs apresentado pela Tabela 5.1, há a possibilidade de subida e descida dos preços dentro do modelo binomial. As diferentes trajetórias seguida pelas RCEs no mês de janeiro de 2012 são apresentas na Figura 5.12. As demais variações dos meses posteriores são obtidas analogamente.

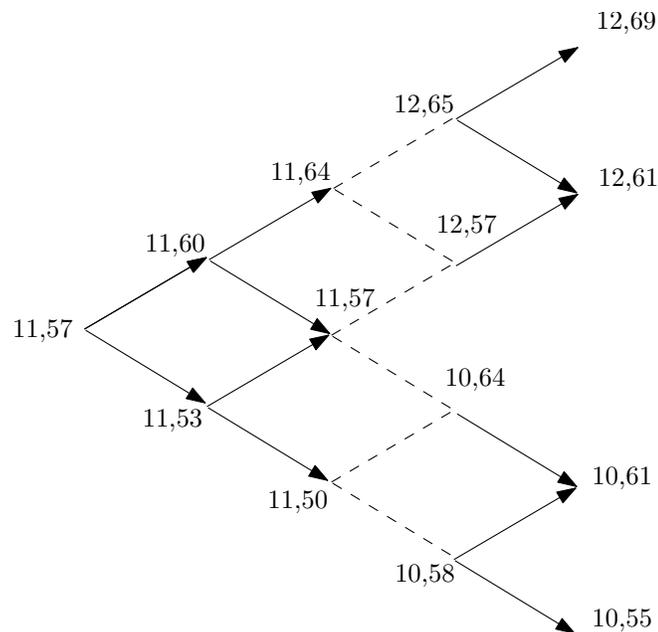


Figura 5.12 - Variações diárias dos preços (€) das RCEs: janeiro de 2012

A receita esperada para um contrato anual pode ser calculada a partir do valor esperado dos preços conforme Equação 5.11, uma vez considerada constante a quantidade de RCE para todos os meses do ano. O valor esperado para janeiro segue na ilustração da latisse a seguir (Fig. 5.13).

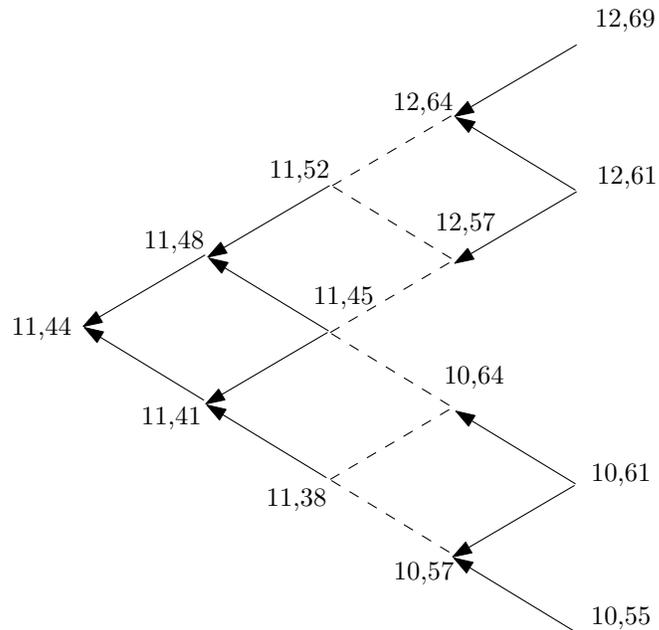


Figura 5.13 - Valor esperado (€) da RCE: Janeiro de 2012

Conforme observado, o valor esperado do preço em janeiro de 2012 equivale à 11,44 €/tCO₂e. Os dos outros meses são encontrados de maneira similar ao demonstrado e estão apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Valor esperado - 2012

Mês	\bar{S}_t (€/tCO ₂ e)
1	11,44
2	14,11
3	14,57
4	15,41
5	13,18
6	14,66
7	10,87
8	11,28
9	14,41
10	12,89
11	10,26
12	9,44

Com os dados apresentados na Tabela anterior, podemos estabelecer o preço de referência para um contrato anual firmado para o ano de 2012, descontado a uma taxa de juros r . Assim:

$$\bar{S} = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{12} \frac{\bar{S}_t}{(1+r)^t} = 12,07 \text{ €/tCO}_2\text{e} \quad (5.30)$$

Se um contrato fosse firmado para o ano de 2012, a referência de preço do contrato deveria corresponder a 12,07 €/tCO₂e. Supondo, por exemplo, que o preço de entrega acordado entre o consumidor e o vendedor tenha sido 11,00 €/tCO₂e, então, o vendedor tem a obrigação de entregar o montante firmado de RCEs a este preço, mesmo que seja menor que o preço de referência (12,07 €/tCO₂e).

5.2.2 Contrato a termo

Um vendedor de RCEs ao assinar um contrato a termo, assume a obrigação de entregar o montante contratado pelo preço acordado (preço de entrega). Por outro lado, o comprador tem a obrigação de comprar o montante pelo mesmo preço. Caso as RCEs não sejam geradas, o vendedor deve cumprir suas obrigações contratuais, adquirindo novos certificados no mercado de curto prazo.

Após a construção da latisse com as trajetórias de preços da RCE como ilustrado na Figura 5.12, é possível construir uma nova latisse para obter os benefícios de um contrato a termo, uma vez definidos os parâmetros do contrato de acordo com o modelo de precificação apresentado na subseção 5.1.3.

Os possíveis benefícios obtidos pelo comprador e pelo vendedor são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 5.4 e 5.5, considerando um preço de entrega $K = 12,00 \text{ €/tCO}_2\text{e}$.

Tabela 5.4 - Benefício esperado do comprador

Mês	$B_c(\text{€/tCO}_2\text{e})$
1	-0,45
2	2,21
3	2,68
4	3,51
5	1,29
6	2,76
7	-1,02
8	-0,62
9	2,50
10	0,99
11	-1,64
12	-2,46

Tabela 5.5 - Benefício esperado do vendedor

Mês	$B_v(\text{€/tCO}_2\text{e})$
1	0,45
2	-2,21
3	-2,68
4	-3,51
5	-1,29
6	-2,76
7	1,02
8	0,62
9	-2,50
10	-0,99
11	1,64
12	2,46

Logo, o benefício esperado pelo comprador e pelo vendedor para um contrato a termo firmado no início de 2012, descontado a uma taxa r , corresponde a:

$$\bar{B}_c = \frac{1}{12} \sum_{n,t=1}^{12} \frac{\bar{B}_t^n}{(1+r)^t} = 0,80 \text{ €/tCO}_2\text{e} \quad (5.31)$$

$$\bar{B}_v = \frac{1}{12} \sum_{n,t=1}^{12} \frac{\bar{B}_t^n}{(1+r)^t} = -0,80 \text{ €/tCO}_2\text{e} \quad (5.32)$$

Assim, para $K = 12,00 \text{ €/tCO}_2\text{e}$, estabelecer um contrato não é conveniente para o vendedor.

5.2.3 Contrato de opção

Nesta seção, apresenta-se a aplicação do método de latisse binomial para precificação de contratos de opção europeia, descritos na subseção 5.1.4, baseado também nos cenários já apresentados dos preços das RCEs transacionados entre janeiro de 2009 e abril de 2011.

O objetivo de nossa análise é calcular o preço da opção no início da latisse. Com este tipo referência, o investidor em RCEs pode lidar com as incertezas do preço e gerenciar os riscos.

O preço de exercício aqui considerado é $K = 12,00 \text{ €/tCO}_2\text{e}$.

Opção de Compra

Consideremos hipoteticamente um comprador que tem o direito de adquirir as RCEs no mês de janeiro de 2012 pelo preço de exercício de $15,00 \text{ €/tCO}_2\text{e}$. Se o preço do certificado subir além de $15,00 \text{ €/tCO}_2\text{e}$ na data de vencimento, o vendedor pode exercer a opção e comprar a RCE pelo preço de exercício. Porém, se o preço do certificado ficar abaixo de $15,00 \text{ €/tCO}_2\text{e}$, ele não exerce a opção. Para este direito de opção, o comprador pagou um prêmio. A questão, portanto, é: quanto vale esta opção?

Primeiramente, a latisse é construída com as trajetórias de preços da RCE conforme a Figura 5.12. A partir daí, é construída outra latisse para encontrar o valor da opção de compra partindo-se dos nós finais desta. O valor esperado da opção por adquirir a RCE é calculado utilizando as equações 5.22, 5.25 e 5.28.

A Tabela 5.6 traz o valor esperado do pagamento a ser realizado pela compra da RCE no início do mês de janeiro de 2012.

Para os outros meses de 2012 o valor esperado é calculado de maneira semelhante. A Tabela 5.7 apresenta esses valores.

Tabela 5.7 - Pagamento esperado da *call*

Mês	$F_t(\text{€/tCO}_2\text{e})$
1	0,57
2	11,90
3	11,90
4	11,90
5	11,90
6	11,90
7	0,00
8	0,00
9	11,90
10	11,90
11	0,00
12	0,00

A partir desta Tabela, podemos calcular o pagamento médio esperado no momento de abertura do contrato. Descontado, no entanto, a taxa r , para contratos firmados no início de 2012.

$$\bar{F} = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{12} \frac{F_t}{(1+r)^t} = 6,68 \text{ €/tCO}_2\text{e} \quad (5.33)$$

Se um vendedor deseja vender uma *call* para o ano de 2012, seu valor deve corresponder ao pagamento médio de referência estabelecido na Equação 5.33. Por exemplo, no caso do contrato com preço de exercício de 12,00 €/tCO₂e, o valor mensal esperado da opção deve ser superior a 6,68 €/tCO₂e para que o vendedor evite perdas.

A Tabela 5.8 mostra os valores dos prêmios mensais pagos por adquirir o direito de opção de compra, calculados utilizando as Equações 5.24 e 5.26.

Tabela 5.8 - Prêmio da opção *call*

Mês	\bar{B}_t (€/tCO ₂ e)
1	0,00
2	2,35
3	2,76
4	3,61
5	1,37
6	2,90
7	0,00
8	0,00
9	2,62
10	1,10
11	0,00
12	0,00

Estabelece-se, portanto, o valor médio do prêmio ser pago no momento de abertura do contrato, descontado a taxa r :

$$\bar{B} = \frac{1}{12} \sum_{n,t=1}^{12} \frac{\bar{B}_t^n}{(1+r)^t} = 1,33 \text{ €/tCO}_2\text{e} \quad (5.34)$$

Este valor é uma referência do prêmio a ser pago pelo direito de exercer ou não a opção de compra no final de cada mês contratual. Para que o comprador evite perdas, o prêmio pago deve ser inferior a 1,33 €/tCO₂e.

O valor total esperado da opção de compra no momento de abertura do contrato corresponde, portanto, a 8,01 €/tCO₂e. Isto significa que o valor total esperado da opção corresponde ao valor pago \bar{F} ao exercer a opção e comprar a RCE pelo preço de exercício K somado com o valor do prêmio \bar{B} . O comprador que deseja estabelecer um contrato para 2012 deve tentar negociar um valor inferior a 8,01 €/tCO₂e para evitar perdas. Do mesmo modo, o vendedor deve cobrar um valor superior ao da opção para evitar perdas.

Observa-se, neste tipo de opção, que quanto menor o preço de exercício maior será o valor do prêmio. Como um contrato de opção funciona como um “seguro”, no qual o valor do prêmio não é recuperado em nenhum caso, aqueles em que o valor do prêmio são menores são mais fáceis de serem comercializados (GUNN, 2008).

Opção de Venda

Agora, consideremos que um comprador adquiriu uma opção de venda com preço de exercício de 15,00 €/tCO₂e mediante o pagamento de um prêmio. Se o preço do certificado estiver abaixo de 15,00 €/tCO₂e na data de vencimento, o comprador pode exercer a opção e vender a RCE pelo preço de exercício. Porém, se o preço do certificado ficar acima de 15,00 €/tCO₂e, ele não exerce a opção e vende o certificado no mercado *spot*.

Similarmente ao método para calcular uma opção de compra, podemos calcular uma opção de venda. Iniciamos construindo latisses com as trajetórias de preços da RCE conforme a Figura 5.12. E após, construímos outra latisse, para encontrar o valor da opção de venda para cada mês do ano de 2012.

A Tabela 5.10 traz o valor esperado do pagamento a ser realizado pela venda da RCE no início do mês de janeiro de 2012.

Para os outros meses do ano, a Tabela 5.9 apresenta os valores esperados da opção.

Tabela 5.9 - Pagamento esperado da *put*

Mês	F_t (€/tCO ₂ e)
1	11,33
2	0,00
3	0,00
4	0,00
5	0,00
6	0,00
7	11,90
8	11,90
9	0,00
10	0,00
11	11,90
12	11,90

Calcula-se, portanto, o pagamento médio esperado no momento de abertura do contrato:

$$\bar{F} = \frac{1}{12} \sum_{t=1}^{12} \frac{F_t}{(1+r)^t} = 4,60 \text{ €/tCO}_2\text{e} \quad (5.35)$$

A seguir, a Tabela 5.11 apresenta o valor do prêmio mensal da *put* para o ano em análise.

Tabela 5.11 - Prêmio da opção *put*

Mês	B_t (€/tCO ₂ e)
1	0,33
2	0,00
3	0,00
4	0,00
5	0,00
6	0,00
7	0,93
8	0,54
9	0,00
10	0,00
11	1,53
12	2,37

O valor do prêmio esperado a ser pago no momento de abertura do contrato, descontado a taxa r , é:

$$\bar{B} = \frac{1}{12} \sum_{n,t=1}^{12} \frac{\bar{B}_t^n}{(1+r)^t} = 0,44 \text{ €/tCO}_2\text{e} \quad (5.36)$$

Este valor é uma referência do prêmio a ser pago pelo direito de exercer ou não a opção de venda no final de cada mês contratual. O prêmio médio mensal em 2012 da uma *put* com K igual a 12,00 €/tCO₂e deve ser superior a 0,44 €/tCO₂e.

O valor total esperado da opção de venda no momento de abertura do contrato corresponde a 5,04 €/tCO₂e. Isto significa que o valor total esperado da opção corresponde ao valor recebido \bar{F} pelo direito de exercer a opção e vender a RCE pelo preço de exercício K somado com o valor do prêmio \bar{B} . O comprador que firmar o contrato para 2012, deve tentar negociar por um valor inferior a 5,04 €/tCO₂e para evitar perdas. Do mesmo modo, o vendedor deve cobrar um valor superior ao da opção para evitar perdas.

Diferentemente de uma opção de compra, quanto maior o preço de exercício de uma opção de venda, maior deve ser o prêmio.

5.3 Análise do risco dos contratos

Os contratos precificados nas subseções 5.2.2 e 5.2.3 possuem determinado nível de risco, uma vez que são calculados a partir de uma série de dados históricos, variando de janeiro de 2009 à abril de 2011. Entretanto, as métricas de risco analisadas na subseção 5.1.2 podem ser aqui utilizadas.

A Tabela 5.12 mostra o procedimento de análise de risco aplicado ao mês de janeiro de 2012, com um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 5.12 - Análise de risco em janeiro de 2012

21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	Probabilidade acumulada
12,31	12,35	12,39	12,42	12,46	12,50	12,54	12,57	12,61	12,65	12,69	1,00
12,24	12,28	12,31	12,35	12,39	12,42	12,46	12,50	12,54	12,57	12,61	1,00
12,17	12,20	12,24	12,28	12,31	12,35	12,39	12,42	12,46	12,50	12,54	1,00
12,10	12,13	12,17	12,20	12,24	12,28	12,31	12,35	12,39	12,42	12,46	1,00
12,02	12,06	12,10	12,13	12,17	12,20	12,24	12,28	12,31	12,35	12,39	1,00
11,95	11,99	12,02	12,06	12,10	12,13	12,17	12,20	12,24	12,28	12,31	1,00
11,88	11,92	11,95	11,99	12,02	12,06	12,10	12,13	12,17	12,20	12,24	1,00
11,81	11,85	11,88	11,92	11,95	11,99	12,02	12,06	12,10	12,13	12,17	1,00
11,74	11,78	11,81	11,85	11,88	11,92	11,95	11,99	12,02	12,06	12,10	1,00
11,67	11,71	11,74	11,78	11,81	11,85	11,88	11,92	11,95	11,99	12,02	1,00
11,60	11,64	11,67	11,71	11,74	11,78	11,81	11,85	11,88	11,92	11,95	0,99
11,53	11,57	11,60	11,64	11,67	11,71	11,74	11,78	11,81	11,85	11,88	0,97
11,46	11,50	11,53	11,57	11,60	11,64	11,67	11,71	11,74	11,78	11,81	0,94
11,40	11,43	11,46	11,50	11,53	11,57	11,60	11,64	11,67	11,71	11,74	0,89
11,33	11,36	11,40	11,43	11,46	11,50	11,53	11,57	11,60	11,64	11,67	0,80
11,26	11,29	11,33	11,36	11,40	11,43	11,46	11,50	11,53	11,57	11,60	0,69
11,19	11,23	11,26	11,29	11,33	11,36	11,40	11,43	11,46	11,50	11,53	0,55
11,13	11,16	11,19	11,23	11,26	11,29	11,33	11,36	11,40	11,43	11,46	0,41
11,06	11,09	11,13	11,16	11,19	11,23	11,26	11,29	11,33	11,36	11,40	0,28
11,00	11,03	11,06	11,09	11,13	11,16	11,19	11,23	11,26	11,29	11,33	0,17
10,93	10,96	11,00	11,03	11,06	11,09	11,13	11,16	11,19	11,23	11,26	0,10
10,87	10,90	10,93	10,96	11,00	11,03	11,06	11,09	11,13	11,16	11,19	0,05
	10,83	10,87	10,90	10,93	10,96	11,00	11,03	11,06	11,09	11,13	0,02
		10,80	10,83	10,87	10,90	10,93	10,96	11,00	11,03	11,06	0,01
			10,77	10,80	10,83	10,87	10,90	10,93	10,96	11,00	0,00
				10,74	10,77	10,80	10,83	10,87	10,90	10,93	0,00
					10,70	10,74	10,77	10,80	10,83	10,87	0,00
						10,67	10,70	10,74	10,77	10,80	0,00
							10,64	10,67	10,70	10,74	0,00
								10,61	10,64	10,67	0,00
									10,58	10,61	0,00
										10,55	0,00

O valor esperado da RCE para este mês é de 11,44 €/tCO₂e, mas há 5% de chance de valer menos do que 11,19 €/tCO₂e (*RaR*). O valor presente do *RaR* descontado é de 11,10 €/tCO₂e. Portanto, o *VaR* indica um prejuízo neste mês de 0,34 €/tCO₂e. Já o *CVaR* de 10,87 €/tCO₂e indica o valor esperado condicionado ao fato dele ser menor do que o *RaR*, 11,19 €/tCO₂e.

O mesmo procedimento pode ser aplicado para os outros meses, considerando também o mesmo o nível de confiança de 95%. Na Tabela 5.13 são apresentados os resultados.

Tabela 5.13 - Risco em 2012

Mês	<i>S</i>	<i>RaR</i>	<i>VaR</i>	<i>CVaR</i>
1	11,44	11,19	0,34	10,87
2	14,11	13,24	1,09	12,66
3	14,57	14,26	0,66	13,79
4	15,41	15,39	0,52	15,28
5	13,18	13,04	0,67	12,76
6	14,66	14,55	0,82	14,36
7	10,87	10,63	0,84	10,34
8	11,28	11,37	0,64	11,36
9	14,41	14,13	1,30	13,85
10	12,89	12,84	1,07	12,70
11	10,26	10,16	0,99	10,04
12	9,44	9,47	0,87	9,43

6 OTIMIZAÇÃO DE PORTFÓLIOS DE CONTRATOS DE RCEs

A flutuação do preço *spot* torna o gerenciamento de risco um alvo importante para os participantes do mercado de créditos de carbono. Os instrumentos financeiros anteriormente analisados podem ser utilizados por investidores em projetos do MDL como meio de mitigação de risco na comercialização de RCEs. Independente do tipo de contrato firmado, em um período específico, a quantidade total de RCEs desejada por um investidor pode ser fixada através da alocação de diferentes quantidades de certificados oriundos de diferentes projetos do MDL, criando assim, diferentes portfólios.

Otimização de portfólio é um problema de alocação de capitais. O termo portfólio ótimo usualmente refere-se a construção de um portfólio de valores mobiliários. Contudo, o termo é mais utilizado para se referir também à construção de algum portfólio de ativos financeiros, incluindo um portfólio de projetos (LUENBERGER, 1998).

A literatura relacionada a portfólios com ativos de carbono ainda é muito escassa. Kristiansen et al. (2006) listaram os principais fatores na precificação dos créditos de carbono com base em estudos de diversos países, incluindo também os preços de certos combustíveis e da eletricidade, considerados relevantes na gestão de riscos. Posteriormente, Mansanet-Bataller e Pardo (2008) investigaram a questão empírica entre os preços dos créditos de carbono e a gestão de portfólios. Mais tarde, Hasselknippe (apud CHEVALLIER, 2009) desenvolveu pela primeira vez perspectivas de mercados no que diz respeito à gestão dos riscos dos créditos de carbono. Posteriormente,

Os resultados de Chevallier (2009) afastam-se dos anteriores descritos na literatura por, dentre outros fatores, aplicar a metodologia de otimização de média-variância para uma ampla gama de ativos, além dos créditos de carbono negociados na ECX. A escolha por incorporar outros ativos na composição do portfólio é justificada pelos mesmos oferecerem oportunidades de proteção ao risco ligado a mudanças de temperatura e, portanto, aumento/diminuição das emissões de CO₂e.

A seleção de portfólio destaca-se aqui por discutir o problema de alocação de capital disponível de um investidor para um conjunto de possíveis projetos do MDL. Assim, a abordagem proposta busca a eficiência nos contratos, dentro de um contexto de otimização multiobjetivo¹ de portfólios, método utilizado tendo como base a matriz de correlação entre os ativos. Aqui, o comprador de um

¹Descrito no Apêndice A.

contrato tem o propósito de, simultaneamente, maximizar o benefício esperado e minimizar o risco associado à ocorrência do preço mínimo.

Ao executar um projeto do MDL, a fonte geradora das RCEs está interessada em definir qual estratégia de contratação deve adotar, considerando a possibilidade de atuação no mercado bilateral e *spot*, de modo a obter o máximo retorno a um mínimo risco. Neste contexto, estimar e avaliar as relações entre benefício e risco dos vários investimentos disponíveis auxilia na escolha entre diferentes opções de investimentos.

6.1 Modelo tradicional de portfólio

Na teoria clássica de portfólio, o objetivo principal é obter o máximo retorno esperado para um mínimo nível de risco. Deste modo, existem três dimensões a serem consideradas em um problema de seleção de portfólios: o retorno esperado de cada ativo que compõe o portfólio, o risco que cada ativo traz ao portfólio e a quantidade investida em cada ativo. Resumidamente, otimizar um portfólio significa buscar por um vetor de quantidades a serem investidas em um conjunto de ativos candidatos que satisfaz um número de restrições a um mínimo risco.

Graficamente, o espaço geométrico formado pelas variáveis retorno e risco pode ser representado conforme ilustrado na Figura 6.1. Portanto, há a formação de uma fronteira eficiente de ativos de risco, com todas as carteiras eficientes no sentido risco e retorno.

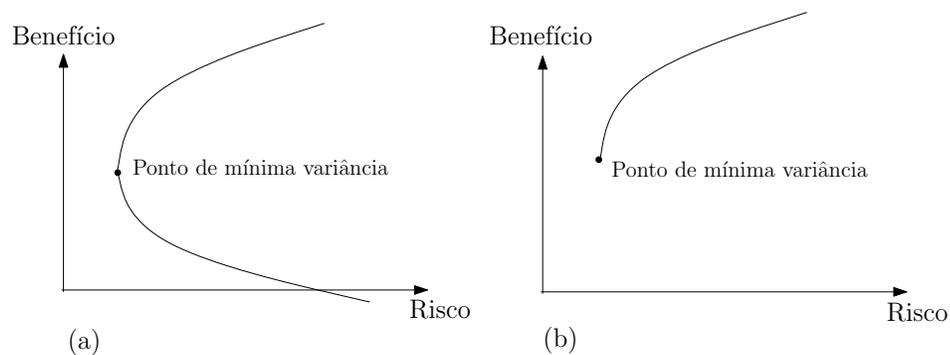


Figura 6.1 - Fronteira de eficiência
Fonte: Adaptado de Luenberger (1998)

Em (a), o ponto de mínima variância refere-se ao ponto viável com menor variação (ou desvio padrão) no eixo das abscissas, para qualquer valor da taxa média de retorno esperada no eixo das ordenadas.

A fronteira eficiente, ilustrada em (b) pode então ser descrita como o melhor conjunto possível de carteiras. Assim, os investidores tendem a se concentrar na seleção de uma melhor carteira na fronteira eficiente e ignorar as demais consideradas inferiores.

Diferentemente de um investimento individual, a taxa esperada de retorno de uma carteira de investimentos é simplesmente a média ponderada dessas taxas almejadas dos investimentos individuais nesta, conforme Equação 6.1 a seguir (REILLY; NORTON, 2008). Os pesos, portanto, correspondem à participação do investimento individual em relação ao valor total.

No modelo clássico proposto por Markowitz (1952), o risco foi medido por meio da variância do retorno da carteira (Eq. 6.2). Em outras palavras, Markowitz definiu o risco na área financeira como sendo a variância ou o desvio padrão dos retornos em relação a uma média.

Assim, o modelo de Markowitz é dado por:

$$E = \sum_{i=1}^n \omega_i b_i \quad (6.1)$$

$$\sigma^2 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i \sigma_{ij} \omega_j \quad (6.2)$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (6.3)$$

$$\omega_i \geq 0 \quad (6.4)$$

sendo:

- E Retorno esperado da ação;
- σ^2 Variância esperada da ação;
- $\omega_{i,j}$ Participação de um ativo i, j , na carteira;
- b_i Benefício esperado para cada ativo i ;
- σ_{ij} Matriz de covariância entre um par de ativos (i,j) .

O método acima apresentado determina a variância de um portfólio como uma medida de risco, estabelecida através da soma das variâncias individuais de cada ativo e covariâncias² entre

²A covariância aponta a correlação das flutuações de retorno de um ativo i com as flutuações de outro ativo j .

pares de ativos da carteira, de acordo com a participação de cada ativo. A adoção da variância como medida de risco é justificada pelo seu menor custo computacional requerido para sua minimização.

Ao selecionar um investimento, o investidor deve considerar tanto o retorno esperado (E) como a variabilidade do retorno sobre o portfólio (σ^2). Por sua vez, as Equações 6.3 e 6.4 são utilizadas como restrições, onde a primeira indica que um investimento deve ser integralmente alocado e a segunda é comumente utilizada para reduzir riscos, ao considerar que um investimento é feito sem tomar qualquer tipo de empréstimo.

Markowitz (2000) propôs então um modelo de média-variância visando aumentar o retorno médio e reduzir sua variância. O modelo permite que o investidor escolha entre n ativos de risco para buscar o “peso” que deve investir em cada ativo, o que resulta em um portfólio eficiente em média-variância. Portanto, para o autor deve haver uma carteira de ativos que minimiza a variância ao mesmo tempo em que maximiza o retorno médio esperado, e esta deve ser a carteira recomendada para um investidor.

Matematicamente, essa expectativa é expressa através do seguinte modelo de otimização multiobjetivo:

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i \sigma_{ij} \omega_j \quad (6.5)$$

$$\text{s.a. } \sum_{i=1}^n b_i \omega_i \geq E$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$$

$$\omega_i \geq 0$$

$$\max \sum_{i=1}^n b_i \omega_i \quad (6.6)$$

$$\text{s.a. } \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i \sigma_{ij} \omega_j \leq \sigma^2$$

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1$$

$$\omega_i \geq 0$$

Graficamente, a Figura 6.2 ilustra o objetivo da função apresentada anteriormente.

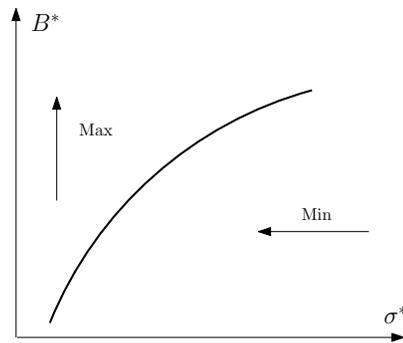


Figura 6.2 - Função para seleção de projetos do MDL

Apesar de sua concepção de programação multiobjetivo (STEUER, 1986), o problema de seleção de portfólio é muitas vezes tratado como uma programação não-linear (MARKOWITZ, 2000), que minimiza a variância parametrizada para um benefício alvo (B^*). Assim, o problema multiobjetivo vem a ser convertido em um problema mono-objetivo, conforme Equação 6.7 apresentada a seguir. Neste caso, uma função objetivo é tratada separadamente, utilizando as demais como restrições.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_i \sigma_{ij} \omega_j & (6.7) \\
 \text{s.a.} \quad & \sum_{i=1}^n b_i \omega_i \geq B^* \\
 & \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \\
 & \omega_i \geq 0
 \end{aligned}$$

Então, o portfólio mais adequado para um investidor irá depender do grau de aversão ao risco, o qual é difícil de avaliar. Porém, é plausível assumir que, para um dado benefício alvo B^* , deseja-se minimizar a variância. E isto é obtido resolvendo o problema de otimização apresentado anteriormente.

6.2 Modelo de portfólio para seleção de projetos

O uso de variáveis inteiras não negativas x_1, \dots, x_n , usualmente binárias (0,1), permitem o tratamento de alguns problemas de otimização de portfólio de uma forma mais realista e introduzem a possibilidade de adicionar alguns recursos naturais para o modelo (CASTRO et al., 2011).

No artigo de Castro et al. (2011), os autores propõe uma abordagem algébrica para maximizar o retorno esperado em um determinado nível admissível de risco medido pela matriz covariância. O objetivo principal é tratar o problema de maximização em sua versão inteira. Para isso, fez-se necessário levar em consideração o preço unitário dos produtos, o retorno esperado de cada ativo e um investimento máximo (orçamento).

Diante do exposto, este trabalho lida com uma variante inteira do modelo de Markowitz no qual os projetos do MDL são selecionados para um investimento. Novamente, o investidor está à procura de uma métrica eficiente entre o retorno médio e a variância. Como restrições adicionais à Equação 6.7, um orçamento é limitado e os projetos devem ser integralmente aceitos ou rejeitados. Assim, o problema de seleção de um portfólio de projetos é tratado resolvendo a programação inteira não-linear parametrizada em um benefício alvo B^* .

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i \sigma_{ij} x_j \\ \text{s.a.} \quad & \sum_{i=1}^n b_i x_i \geq B^* \\ & \sum_{i=1}^n c_i x_i \leq k \\ & x_i \in \{0,1\} \end{aligned} \tag{6.8}$$

onde:

- x_i Variável booleana do projeto i ;
- σ_{ij} Matriz de covariância entre um par de projetos (i,j) ;
- b_i Benefício esperado para cada projeto i ;
- c_i Custo inicial do projeto MDL i ;
- k Orçamento alvo do portfólio de projetos MDL;
- B^* Benefício alvo do portfólio de projetos MDL.

A Figura 6.3 ilustra o objetivo da função apresentada.

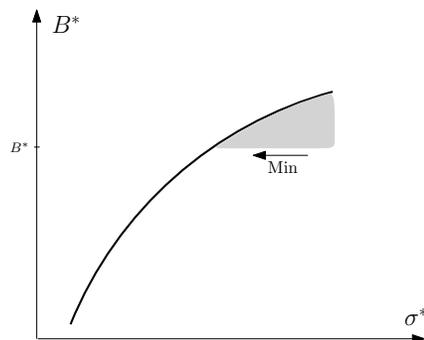


Figura 6.3 - Função para seleção de projetos do MDL

6.3 Estudo de caso

Inicialmente, para que qualquer alternativa seja considerada num processo de decisão há que se estudar a sua viabilidade, ou seja, construir a projeção dos fluxos de caixa e verificar se o projeto propicia um aumento de riqueza (maximização do lucro), visto que a viabilidade de um projeto do MDL varia em função de uma série de variáveis, tais como custo de implementação e desenvolvimento do projeto, custos transacionais de validação, registro, monitoramento, além de ser também influenciada pela perspectiva futura de preço das RCEs.

Além do mais, deve-se considerar que a construção de um portfólio desejável de projetos do MDL não é uma tarefa trivial, pois os contratos que formam o portfólio teriam que ser disputados em um mercado competitivo. Assim, como questão estratégica associada à contratação de projetos do MDL, Sutter (2001) sugere a formação de portfólios alvos, incluindo vários tipos de categorias e tecnologias referentes às atividades de projetos de energia renovável.

A Figura 6.4 ilustra o princípio de portfólios de projetos do MDL sob a responsabilidade de uma organização detentora de tais projetos. Nada impede que um investidor financie diretamente atividades de projetos individuais, porém, a ideia de agrupar projetos sob a responsabilidade de uma organização ajuda a minimizar custos de administração e transação no âmbito do MDL (OLIVEIRA, 2004).

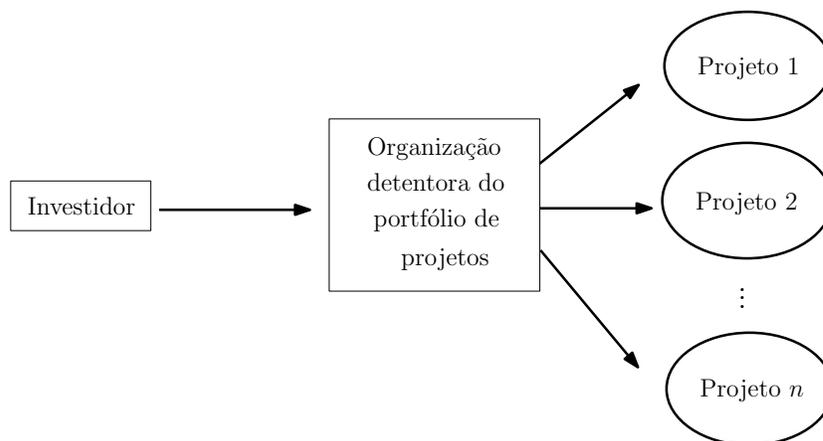


Figura 6.4 - Portfólio de projetos
Fonte: Adaptado de Sutter (2001)

Conforme já descrito no Capítulo 2 desta dissertação, projetos de MDL são referenciados no artigo 12 do Protocolo de Quioto. As atividades relacionadas a esses projetos devem demonstrar os benefícios ambientais, de caráter complementar, mensuráveis, com foco em longo prazo e relacionados sobretudo com a redução ou remoção de emissões de GEE na atmosfera. Cada unidade de RCE corresponde a uma tCO₂e removida ou reduzida, e pode ser transferida e adquirida no âmbito do mercado internacional de carbono.

Uma vez que o DCP é realizado, já é possível estimar a geração futura de energia para cada projeto. Multiplicando a energia gerada a cada mês pelo fator de emissão correspondente ao projeto, temos o benefício ambiental estimado para cada atividade do projeto, as chamadas RCEs. A partir do momento em que estas RCEs são calculadas e confirmadas, elas já podem ser comercializadas como um ativo financeiro, como ilustrado em dados de entrada na Figura 6.5 a seguir. Os dados de otimização permite estabelecer o benefício mensal alcançado por cada atividade de projeto, dada quantidade de RCEs emitidas, usando o critério do VPL.

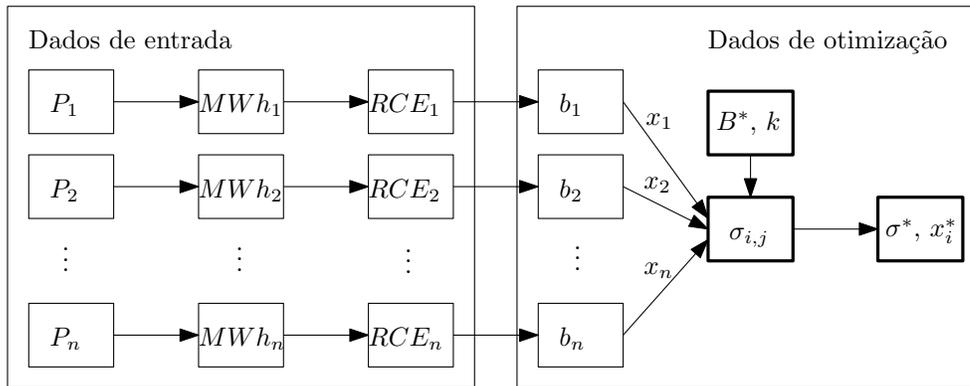


Figura 6.5 - Estrutura do modelo: dados de entrada e otimização

6.3.1 Projetos de MDL

Michaelowa e Jotzo (2005) mencionam que os maiores investimentos em MDL tendem a direcionar-se a setores ligados à geração de eletricidade e uso de combustíveis em atividades industriais, seguido por projetos de melhora da eficiência na extração e distribuição de combustíveis fósseis.

Segundo relatório da *International Energy Agency* (IEA, 2009), os investimentos globais em energia renovável para geração de energia são realizados principalmente em projetos de energia eólica, seguido por energia solar, biomassa, PCHs e geotérmica.

Ainda, de acordo com Sutter (2001), os custos de administração e transação podem ser minimizados com a formação dos pacotes. A empresa suíça de resseguros *Swiss Re*, por exemplo, busca oportunidades, entre outras opções, em investimentos de infraestrutura para energia eólica, biomassa e energia solar em diferentes regiões geográficas. O objetivo da empresa, ao selecionar os empreendimentos com perfil de elevada relação risco-retorno, é formar um portfólio sólido, diversificando em vários tipos mercados (SEIFERT et al., 2008).

Portanto, optou-se por considerar seis projetos de MDL para geração de energia renovável para o presente estudo de caso: Projeto de Geração de Energia Eólica *Água Doce* (EOL-1), Projeto de Geração de Energia Eólica *Horizonte* (EOL-2), *Bioenergia Cogeneradora S.A.* (BIO-1), *Cogeração Irani Celulose* (BIO-2), Projeto de PCH *Santana I* (PCH-1) e Projeto de PCH

Cachoeirão (PCH-2). A Tabela 6.1 apresenta as características de cada um desses projetos.

Tabela 6.1 - Dados principais dos projetos MDL

	EOL-1	EOL-2	BIO-1	BIO-2	PCH-1	PCH-2
Região	Sul	Sul	Sudeste	Sul	Sudeste	Centro-Oeste
Capacidade total instalada (MW)	9	4,8	31	9,43	28,05	14,76
Fator de capacidade	0,309	0,309	0,9	0,9	0,59	0,59
Fator de emissão (tCO ₂ /MWh)	0,5258	0,5258	0,2677	0,5258	0,1635	0,1842

É importante notar que o processo utilizado para quantificar as RCEs para cada atividade do projeto é baseado no esquema apresentado na Figura 6.5. Para formação do cenário do estudo de caso proposto, os dados de cada projeto são obtidos do DCP de cada um deles (MCTI, 2011), (UNFCCC, 2011a).

O fator de capacidade estima a proporção entre as seguintes informações: produção efetiva da uma usina e a capacidade total máxima em um mesmo período de tempo. No caso de parques eólicos, por exemplo, a média mundial do fator de capacidade é de 30%. Em outras palavras, durante 30% do ano há uma produção de energia eólica, enquanto nos outros 70% a produção não é significativa.

Oportunamente, as centrais de cogeração que utilizam bagaço da cana-de-açúcar, operam com maior sazonalidade entre os períodos de safra e entressafra. Assim, o fator de capacidade constante no DCP para o projeto BIO-1, de 90%, refere-se apenas ao período de safra, de abril a novembro (UNICA, 2011). Uma ponderação do fator de capacidade mais realista seria seu valor médio, de 60%, o qual confere com a geração já registrada pelo projeto, no banco de dados da UNFCCC.

Para composição do fator de emissão das atividades de projetos, todos os projetos utilizaram-se dos valores de margem operacional ($EF_{OM,y}$) e margem de construção ($EF_{BM,y}$), conforme Equação 2.1, por tratarem-se de projetos de geração de energia renovável para a rede.

Os participantes do projeto EOL-1, EOL-2 e BIO-2 consideraram como mais razoável e melhor opção os dados de plantas em operação de 2002 a 2004 para estimativa do fator de emissão da margem de operação. Já para estimativa do fator de emissão da margem de construção, os dados foram baseados nas informações do ano de 2004, por ser as “mais recentes sobre as plantas já construídas”.

Para cálculo do fator de emissão do projeto BIO-1, utilizou-se a metodologia específica para projetos de cogeração com base em bagaço conectados à rede. Aqui, o cenário da linha de base considera a eletricidade que teria sido gerada, de outro modo, pela operação das centrais interligadas da rede e pela adição de novas fontes de geração. Para cálculo do fator de emissão, utilizou-se dados do subsistema sul/sudeste/centro-oeste interligado brasileiro, referentes ao ano de 2004.

Já para os projetos PCH-1 e PCH-2, por tratar-se de projetos implantados após 2008³, foram utilizados, respectivamente, os dados disponibilizados pelo MCTI (registros de geração das usinas despachadas centralizadamente pelo ONS) para os anos de 2009 e 2007 (dados mais recentes no momento de elaboração dos projetos).

Tratando-se de emissões indiretas, por consequência da construção do projeto, transporte de materiais, combustíveis, nenhuma fuga líquida significativa foi identificada nos projetos.

A seguir, a Tabela 6.2 apresenta os fatores de emissão referentes à cada atividade de projeto mencionada anteriormente. Para o estudo de caso proposto, optou-se por utilizar na íntegra os fatores de emissão contidos em cada DCP.

Tabela 6.2 - Fatores de emissão dos projetos

	EOL-1	EOL-2	BIO-1	BIO-2	PCH-1	PCH-2
Ano de referência	2004	2004	2004	2004	2009	2007
Margem operacional (tCO ₂ /MWh)	0,9472	0,9472	0,4310	0,9472	0,2476	0,2909
Margem de construção (tCO ₂ /MWh)	0,1045	0,1045	0,1045	0,1045	0,0794	0,0775
Fator de emissão (tCO ₂ /MWh)	0,5258	0,5258	0,2677	0,5258	0,1635	0,1842

Em seguida, elaborou-se uma curva típica para cada tipo e região dos projetos em tela baseada na geração média mensal de projetos já certificados e registrados na UNFCCC, como mostra as Figuras 6.6, 6.7 e 6.8.

A curva típica tem como objetivo considerar a oscilação mensal da geração de energia em cada região de implementação dos projetos, uma vez que a geração de energia pode variar significativamente mês a mês, em razão de variações naturais na disponibilidade de fontes renováveis (por exemplo, variação nas chuvas, período de safra e velocidade dos ventos).

Tal procedimento garante que a geração seja estabelecida de forma conservadora e, consequentemente, que as reduções de emissões calculadas sejam atribuídas à atividade do projeto.

³Conforme descrito na subseção 2.4.2, do Capítulo 2.

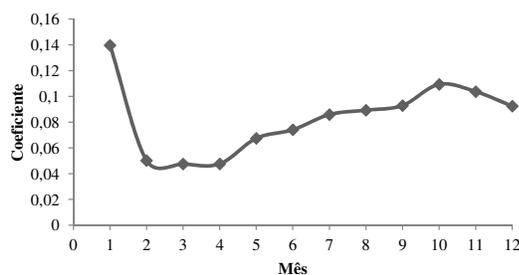
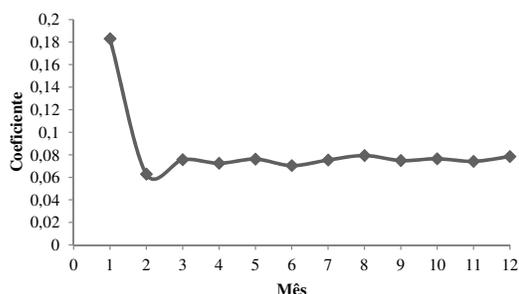
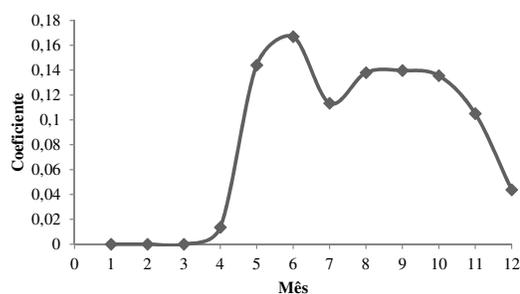


Figura 6.6 - Curva típica mensal Eólica: Região Sul
 Fonte: Geração média mensal de dois projetos já certificados durante sete anos (UNFCCC, 2011a).

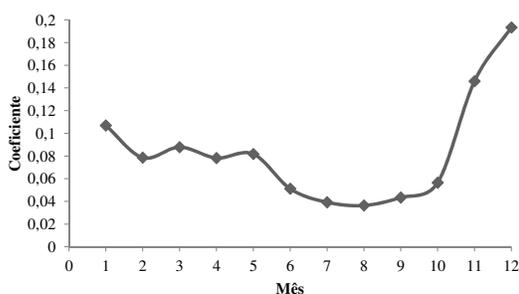


(a) Região Sul

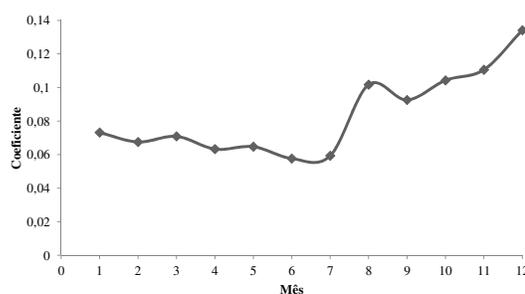


(b) Região Sudeste

Figura 6.7 - Curvas típicas mensais Biomassa: (a) Celulose (b) Bagaço de cana
 Fonte: Geração média mensal de um projeto já certificado durante 7 anos (UNFCCC, 2011a).



(a) Região Sudeste



(b) Região Centro-Oeste

Figura 6.8 - Curvas típicas mensais PCH
 Fonte: Geração média mensal de um projeto já certificado durante 4 anos (UNFCCC, 2011a).

Pode-se notar que as curvas típicas apresentam um comportamento bastante variável ao longo dos meses, indicando que em determinados momentos os projetos podem aumentar ou diminuir sua

geração. Assim, a geração mensal de cada tipo de projeto foi estimada utilizando-se o montante anual disponível no DCP com seu respectivo coeficiente ajustado. O projeto BIO-1, por exemplo, apresenta flutuação devido às condições climáticas, que afetam a safra da cana-de-açúcar.

As Tabelas 6.3 e 6.4 exibem, respectivamente, a estimativa dos valores mensais da energia gerada (MWh) e as RCEs obtidas com cada uma das atividades projetos.

Excepcionalmente, BIO-2 também inclui emissões de metano evitadas, uma vez que os resíduos da produção de biomassa de celulose não são dispostos em aterros.

Tabela 6.3 - Geração dos projetos MDL

Mês	EOL-1 MWh	EOL-2 MWh	BIO-1 MWh	BIO-2 MWh	PCH-1 MWh	PCH-2 MWh
1	3641	1654	0	9527	15347	5593
2	1309	595	0	3276	11275	5161
3	1238	563	0	3940	12602	5416
4	1241	564	1076	3776	11229	4837
5	1757	798	11376	3964	11733	4945
6	1931	877	13187	3667	7346	4406
7	2238	1017	8960	3923	5633	4534
8	2327	1057	10901	4131	5231	7770
9	2422	1100	11033	3900	6227	7073
19	2850	1295	10708	3983	8116	7965
11	2702	1228	8297	3862	20930	8448
12	2409	1094	3457	4087	27733	10245
TOTAL	26064	11842	78995	52035	143400	76392

Tabela 6.4 - RCEs dos projetos MDL

Mês	EOL-1	EOL-2	BIO-1	BIO-2	PCH-1	PCH-2
	tCO ₂					
1	1914	990	0	32109	2508	1030
2	688	308	0	11039	1843	950
3	651	292	0	13279	2060	997
4	652	293	309	12725	1835	890
5	923	414	3262	13358	1918	910
6	1015	455	3781	12360	1200	811
7	1176	528	2227	13221	920	835
8	1223	549	2710	13923	855	1431
9	1273	571	2744	13145	1017	1302
19	1498	672	2663	13422	1326	1466
11	1420	638	2063	13016	3421	1555
12	1266	568	860	13775	4533	1886
TOTAL	13699	6278	20619	175372	23436	14063

6.3.2 Benefício

A Tabela 6.3.2 apresenta os custos de transação incorridos para completar a emissão de RCEs neste estudo de caso, adaptados para projetos do MDL em geração de eletricidade nos países da América do Sul (MICHAELOWA; JOTZO, 2005). As faixas de custos de pré e pós-implementação baseiam-se nos valores encontrados na bibliografia de referência citada na subseção 2.4.3 (Capítulo 2) sobre pequenos e grandes projetos do MDL, que compreende desde o registro do projeto no CE do MDL até os custos de verificação periódica antes da emissão de RCEs.

Tabela 6.5 - Custos de transação por projeto de MDL

	Estimativa ¹		Usado neste estudo ¹	
	Mínimo	Máximo	Pequena escala	Grande escala
Pré-implementação	174435	627965	174435	348870
Pós-implementação (anual)	9303	9303	0,34/tCO ₂ e	0,34/tCO ₂ e
	4,03%	6,03%	4,03%	6,03%

¹Em euro constante. Conversão de acordo com o *Harmonized Index of Consumer Prices* (HIPC), registrado na Rates (2011) e Eurostat (2011).

Caso as RCEs sejam comercializadas exclusivamente no mercado *spot*, o benefício de determinado projeto no instante de tempo t é dada pelo montante de certificados multiplicado pelo seu preço *spot*. Como para emitir as RCEs há custos de transação, o benefício líquido obtido por um projeto no instante t é dado pela Equação 6.9.

$$b_i^t = (S_t - C_t) X_t \quad (6.9)$$

sendo:

- b_i^t Benefício líquido do projeto i , $i = 1, \dots, 6$;
- S_t Preço da RCE no mercado *spot* (€/tCO_{2e});
- C_t Custos de transação (€/tCO_{2e});
- X_t RCEs emitidas.

Verifica-se que sempre que não houver emissão de RCEs ($X_t = 0$), a remuneração líquida é nula e, mesmo quando houver ($X_t > 0$), existe uma incerteza muito grande com relação ao benefício, pela forte dependência do preço estipulado no mercado *spot*.

Porém, a comercialização das RCEs através de contratos bilaterais pode ser uma estratégia para reduzir a incerteza do benefício do gerador. No momento em que o contrato é firmado, deve-se especificar o montante de RCEs a ser negociado, o período no qual as RCEs serão entregues e o preço unitário. Assim, durante toda a vigência de um contrato bilateral, a RCE é comercializada a um preço fixo já estabelecido entre as partes envolvidas, o que garante um fluxo determinístico de receita para a geradora.

Então, o benefício líquido no instante t passa a ser calculado como:

$$b_i^t = (P_t - C_t) Y_t \quad (6.10)$$

sendo:

- b_i^t Benefício líquido do projeto i , $i = 1, \dots, 6$;
- P_t Preço da RCE estabelecido no contrato bilateral (€/tCO_{2e});
- C_t Custos de transação (€/tCO_{2e});
- Y_t Montante de RCE a ser entregue.

Cabe aqui ressaltar que mesmo com a contratação por meio de contratos bilaterais, as RCEs sempre estarão sujeitas a comercialização no mercado *spot*, uma vez que este mercado funciona também como um mercado de diferenças, onde, por exemplo, um vendedor tenha que adquirir

diferenças de montantes contratados para honrar seu compromisso contratual com o comprador.

O modelo desenvolvido nesta dissertação vem com um conjunto de doze cenários (doze meses do ano), que são implementados ao longo de um período de sete anos ($T = 7 \times 12$), referente a um primeiro período de obtenção de créditos. Consideramos ainda que todos os fluxos de caixa ocorrem ao final de um ano.

Sequencialmente, a Equação 6.11 estabelece o benefício mensal líquido atingido por cada atividade utilizando o critério do VPL. A taxa de investimento de retorno r sobre o mercado financeiro foi fixado em 10% ao ano.

$$b_i = \sum_{t=0}^T \frac{b_i^t}{(1+r)^t} - c_i \left[\frac{(1+r)^t r}{(1+r)^t - 1} \right] \quad (6.11)$$

O custo inicial do investimento c_i foi calculado para uma série de pagamentos, periódicos (12 meses durante 7 anos), iguais e antecipados, considerando uma taxa de financiamento de 8% a.a.

O preço da RCE de 7,79 €/tCO₂e foi estipulado de acordo com o preço registrado na ECX em 12 de outubro de 2011, para contratos futuros com vencimento em dezembro de 2012.

Os dados dos benefícios médios mensais (em moeda constante) estão descritos na Tabela abaixo.

Tabela 6.6 - Benefício médio mensal dos projetos MDL

Mês	EOL-1 €	EOL-2 €	BIO-1 €	BIO-2 €	PCH-1 €	PCH-2 €
1	7825,63	2841,28	-5173,44	171265,58	8327,95	3078,13
2	1152,54	-913,26	-5173,44	62548,45	4642,56	2602,16
3	924,82	-1023,95	-5173,44	75139,09	5717,04	2810,42
4	901,44	-1033,04	-3499,77	71275,36	4437,28	2201,06
5	2293,26	-359,19	12389,81	74313,31	5797,35	2267,01
6	2731,47	-149,65	15017,22	67970,89	1600,87	1713,03
7	3517,77	234,31	7137,79	72268,87	-43,48	1801,90
8	3707,94	322,64	9682,57	75596,88	-452,10	4813,14
9	3931,57	420,46	9741,44	70611,06	411,61	4098,67
19	5740,90	941,68	9181,52	71537,22	2073,73	4868,70
11	5244,60	726,46	5858,83	68696,80	13504,25	6026,95
12	-1519,78	-2458,62	-11835,75	-6513,28	6570,50	1776,24

Os valores obtidos na Tabela 6.6 são finalmente incorporados ao problema de otimização de portfólio, considerando o investimento em cada tipo de projeto, $x_i \in \{0,1\}$, como a variável de

decisão e σ_{ij} a matriz de covariância entre projetos.

Na Tabela 6.7 são apresentados os termos da matriz de correlação ρ_{ij} dos projetos como alternativa da covariância σ_{ij} , onde a relação de ambas é dada pela Equação 6.12 . Tal escolha justifica-se somente por aprimorar a estabilidade numérica dos resultados. Assim,

$$\rho_{ij} = \frac{\sigma_{ij}}{\sqrt{\sigma_i \sigma_j}} \quad (6.12)$$

Tabela 6.7 - Correlação anual ρ_{ij} e benefício médio b_i

ρ_{ij}	EOL-1	EOL-2	BIO-1	BIO-2	PCH-1	PCH-2
EOL-1	1,00000	0,98615	0,40814	0,78485	0,09127	0,57638
EOL-2	0,98615	1,00000	0,35144	0,86605	0,07317	0,47529
BIO-1	0,40814	0,35144	1,00000	0,10388	-0,42010	0,28468
BIO-2	0,78485	0,86605	0,10388	1,00000	0,11396	0,16993
PCH-1	0,09127	0,07317	-0,42010	0,11396	1,00000	0,23869
PCH-2	0,57638	0,47529	0,28468	0,16993	0,23869	1,00000
b_i	36452,17	-450,88	38153,34	874710,23	52587,57	38057,41

6.3.3 Soluções eficientes

A programação inteira não-linear é feita no *solver* comercial Lingo 11.0, o qual contempla um pacote integrado de módulos de otimização. Os principais resultados são as soluções eficientes de Pareto, identificadas para diversos valores atribuídos ao benefício B^* , conforme apresentado na Tabela 6.8. A primeira coluna mostra os projetos selecionados pelos componentes do vetor \mathbf{x}^* , e a segunda e terceira coluna mostram, respectivamente, o risco associado σ^* e o benefício alvo atribuído B^* .

Tabela 6.8 - Fronteira eficiente de Pareto

Projetos Seleccionados x^*	Desvio-padrão σ^*	Benefício Alvo B^*
000001	1377	3000
100001	3410	5000
000011	4401	7000
100011	5551	10000
101011	9872	13000
000100	36692	72000
000101	36951	76000
000110	37330	77000
000111	37619	80000
001111	39106	83000
101111	41195	86000

Como esperado, o risco (σ^*) aumenta com o benefício alvo esperado (B^*). O mínimo risco é alcançado quando apenas o projeto PCH-2 é seleccionado, com σ^* igual a 1.377 € e B^* igual a 3.000 €. Por outro lado, o máximo benefício líquido é atingido quando todos os projetos, exceto EOL-2, são seleccionados, que resulta em σ^* igual a 41.195 € e B^* igual a 86.000 €.

Aqui, a métrica de risco avalia a “chance” de não alcançar o benefício alvo em razão à incerteza do retorno no tempo. Um investidor averso ao risco optaria por investir no portfólio correspondente ao ponto de mínima variância, ou seja, apenas no projeto PCH-2. Já um investidor que não é tão averso ao risco, atuaria no ponto de maior B^* .

A Figura 6.9 apresenta o gráfico da fronteira eficiente para esta aplicação.

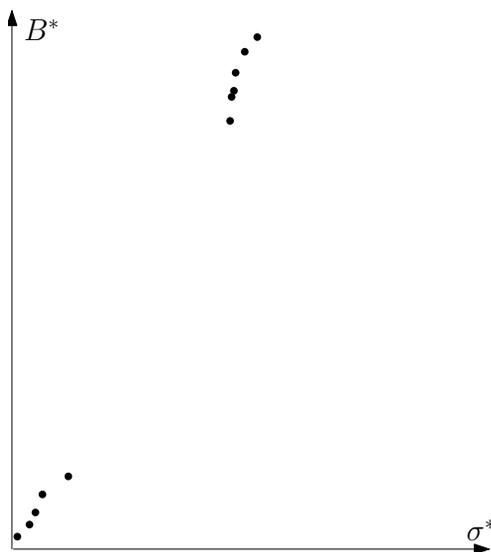


Figura 6.9 - Fronteira eficiente de contratação

A análise de portfólio através da fronteira de eficiência considera o equilíbrio entre risco e retorno. Alguns portfólios são dominantes sobre outros, dado que para um mesmo valor de risco, um portfólio possui maior benefício do que outro. Similarmente, para um mesmo benefício esperado, um portfólio possui menor risco do que outro. Não havendo dominância entre portfólios, há a formação da chamada fronteira de eficiência, ou seja, não existe nenhum portfólio que tenha ao mesmo tempo maior retorno e menor risco do que aqueles portfólios presentes na fronteira de eficiência.

Ao partir da premissa de que os projetos são elaborados em período similar e possuem fatores de emissão iguais para cálculo da linha de base como sendo o disponibilizado mais recentemente, observa-se que os projetos PCH-2, EOL-1 e EOL-2, nesta ordem, são os que mais se beneficiam com fatores de emissão mais altos. Tecnologias eólicas, em geral, tornam-se mais caras proporcionalmente com fatores de emissão mais baixos. Por outro lado, fatores de emissão menores favorecem projetos como PCH-1 e BIO-1. Além disso, considerando um mesmo B^* , a seleção do projeto BIO-2 apresenta menor nível de risco quando o fator de emissão é menor.

De modo geral, quando projetos de geração de energia renovável forem incorporados no sistema deslocando geração de origem térmica, maior será o fator de emissão para cálculo da linha de base e, conseqüentemente, maior será o benefício adquirido com a venda de RCEs.

Assim, o modelo de média-variância permite que investidores em projetos de MDL utilizem conceitos de risco e benefício de forma combinada na avaliação dos investimentos.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1 Conclusões

Ressaltou-se neste trabalho a importância da redução dos níveis de poluição ao mínimo possível para viabilização da vida em sociedade.

É mister que o mundo invista ainda mais em energias renováveis, tecnologias de captura e diminuição de GEE, conservação de florestas, para que as emissões de poluentes não cresçam ainda mais. Para isto, faz-se necessário a criação de fortes incentivos para que o mundo explore, primeiramente, as oportunidades de mitigação mais promissoras, ou seja, maiores investimentos em países com mais alta capacidade de fazer cortes com baixo custo. Não sendo, necessariamente, os maiores emissores de GEE.

E é justamente esse o papel fundamental do MDL; realizar a compensação da emissão de GEE de maneira a se mitigar os efeitos impactantes do modo de produção.

Mesmo com a incerteza do futuro do Protocolo de Quioto, comércio de emissões e os mecanismos baseados em projetos do próprio Protocolo continuarão disponíveis para Partes do Anexo I como forma de cumprir seus compromissos quantificados e objetivos de redução (LINACRE et al., 2011). Espera-se que não só o programa pós-Quoto, como também esquemas de comércio interno e outros programas do tipo *cap-and-trade* incluam mais países e setores entre os que deverão contribuir com metas de redução de emissão de GEE, aumentando ainda mais as oportunidades no contexto do comércio de carbono e a compatibilidade da progressão do cenário de emissões com os princípios do desenvolvimento sustentável.

Diante deste contexto, primeiramente foi apresentada uma abordagem bibliográfica e teórica desde conceitos relacionados ao efeito estufa, suas causas e consequências, e ao Protocolo de Quioto e seus mecanismos de mercado, com especial atenção ao MDL.

Seguindo neste panorama, os créditos de carbono foram analisados sob o ponto de vista financeiro, suas modalidades de negociação e procedimento de mercados.

A partir daí, foram propostos dois mecanismos relacionados à análise e seleção de projetos do MDL.

O primeiro deles, o modelo de latisse binomial, foi a metodologia de precificação de contratos adotada neste trabalho. Além dos contratos de opção, bastante utilizado no mercado financeiro, foram precificados também contratos a termo, sugerindo que este último seja difundido igualmente no mercado de créditos de carbono.

A base de dados disponibilizada pela ECX permitiu uma análise dos preços mês a mês, possibilitando precificar contratos com preços diferenciados. Esta técnica, demonstrou-se uma ferramenta de análise apropriada para a precificação de contratos de RCEs, além de caracterizar-se pela facilidade de modelagem computacional e possibilitar a avaliação do risco de contratos com certa simplicidade, através das medidas de *VaR* e *CVaR*. Estas análises puderam ser concretizadas dentro da própria latisse, sem a necessidade de importar dados para uma curva de distribuição de probabilidades.

Uma das principais dificuldades para a adoção de contratos, tanto a termo como de opção, decorre da formulação de modelos cujos preços esperados se aproximam daqueles verificados atualmente. Variações extensas dos preços das RCE, devido principalmente à crises econômicas e registros recentes de tais preços, certamente aumentam os riscos envolvidos em suas negociações, dificultando a estimativa de um preço que retrata a possibilidade do encontro entre ofertantes e demandantes.

Ademais, observou-se que a análise individual dos contratos, como mostrado no modelo de latisse binomial, é necessária para precificá-los, mas não é suficiente para avaliar seus impactos. É requerida então, uma análise de portfólio, na qual o resultado do conjunto em termos da relação risco/benefício não constitui simplesmente da reunião dos resultados tomados isoladamente para cada contrato. Adicionalmente, o custo de operação em alguns casos pode não ser compatível com a capacidade de o projeto agregar valor, fazendo com que determinados projetos sejam pouco atrativos perante investidores. Neste caso, a maximização de escala através da formação de portfólio de projetos é conveniente.

Assim, o segundo problema justifica-se pela sazonalidade do comportamento do mercado de créditos de carbono. Há um grande número de fatores que afetam os preços e aumentam a complexidade do mercado em si. Novamente, aspectos como imaturidade do mercado, com poucas informações relativas ao comportamento dos preços e efeitos climáticos exercem grande influência. No caso de contratos no MDL, esses riscos são também decorrentes até a emissão das RCEs, a capacidade ou não de o projeto realizar-se conforme prescrito anteriormente no contrato e divergência

da quantidade de RCEs geradas.

A abordagem de portfólio, além da análise do VPL, captura o risco financeiro envolvido na seleção de alternativas de investimento, já que este risco pode ser reduzido com a diversificação de ativos.

Todos os resultados apresentados são qualitativamente sólidos para os valores dos parâmetros estabelecidos. Entretanto, os modelos podem ser generalizados para contextos de outras decisões.

7.2 Sugestão para trabalhos futuros

Os problemas apresentados nesta dissertação desafiam futuros trabalhos. Seguem algumas sugestões de possíveis temas.

Por tratar-se de um mercado recente, com histórico de preços curto, calibrar os preços das RCEs para os nós iniciais da lattice é um trabalho delicado. Neste trabalho, optou-se pela técnica de regressão linear e, conforme literatura de referência, foi plausível desconsiderar períodos de alta e de queda acentuada dos preços. Porém, outra interpretação para análise dos dados pode ser realizada pela probabilidade subjetiva, a qual indica o grau de convicção que um indivíduo tem de que um certo fato acontecerá (manifestado através do comportamento do indivíduo em relação ao fato) ou ainda através de um modelo multiplicativo de preços, considerando o logaritmo natural dos preços para análise de regressão.

Sugere-se também que seja feita a precificação de EUAs, por ser um mercado um pouco mais maduro, uma vez que os preços das EUAs também são comumente utilizados para referência dos de RCEs.

As curvas típicas apresentadas no Capítulo 6 são plausíveis, pois foram baseadas em informações reais a fim de verificar a executabilidade do modelo proposto. Todavia, o modelo pode ser aplicado para um estudo de caso particular, levando em consideração a disponibilidade energética local, como por exemplo o histórico de fluência de um rio para cálculo do despacho de geração de uma PCH a ser implantada na região de referência.

Recomenda-se também um estudo de previsão dos fatores de emissão de acordo com a previsão do Custo Marginal de Operação (CMO) obtido por um programa de otimização (NEWAVE),

o qual determina a geração das usinas hidroelétricas e termoelétricas do SIN e, assim, é possível determinar um momento mais favorável para investimento em projeto MDL.

A seleção de projetos tratada nesta dissertação leva em consideração os custos e receitas obtidos em sete anos com a implementação de um projeto MDL em plantas de geração de eletricidade. Sugere-se ampliar este cenário para o tempo de vida útil por fonte geradora, utilizando também custos ocorridos com a implementação/implantação da usina e receitas obtidas pela comercialização de energia elétrica.

Ainda referente à seleção de projetos, é interessante a criação de uma base de dados brasileira com o comportamento sazonal por região e por fonte geradora de energia elétrica. Além de estabelecer curvas típicas mais sólidas, contribui para a atratividade de projetos MDL no Brasil, minimizando riscos para investidores.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, A. C. P. **Como comercializar créditos de carbono**. São Paulo: Trevisan Editora Universitária, 2010. 47 p.

ARRHENIUS, S. On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground. **Philosophical Magazine**, v. 41, p. 237–276, 1896.

BIRD. **Desenvolvimento com menos carbono: Respostas da América Latina ao desafio da mudança climática**. Washington, DC, 2009. La Torre, A., Fajnzylber, P. and John Nash.

_____. **Relatório sobre o Desenvolvimento Mundial de 2010 - Desenvolvimento e Mudança do Climática - Visão geral antecipada: A Mudança do Clima para o Desenvolvimento**. Washington, DC, 2009.

BLACK, F.; SCHOLE, M. The pricing of options and corporate liabilities. **The Journal of Political Economy**, v. 81, p. 637–654, 1973.

BLUENEXT. **Statistics**. 2011. Disponível em: <http://www.bluenext.eu/statistics/downloads.php>. Acesso em julho de 2011.

BM&FBOVESPA. **Mercados Derivativos**. [S.l.], Julho 2007.

_____. **Mercado de Carbono**. 2011. Disponível em: <http://www.bmfbovespa.com.br>. Acesso em abril de 2011.

BRANDIMARTE, P. **Numerical methods in finance: a MATLAB-based introduction**. New York: Wiley-Interscience publication, 2002. 395 p.

CASTRO, F. et al. An algebraic approach to integer portfolio problems. **European Journal of**

Operational Research, v. 210, p. 647–659, 2011.

CHEVALLIER, J. Energy risk management with carbon assets. **International Journal of Global Energy Issues**, v. 32, n. 4, p. 328 – 349, 2009.

CONEJERO, M. A. **Marketing de Créditos de Carbono: Um Estudo Exploratório**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto - Universidade de São Paulo, 2006.

COX, S. A. R. J. C.; RUBINSTEIN, M. Option pricing: A simplified approach. **Journal of Financial Economics**, v. 7, p. 229–263, 1979.

CUNHA, K. B. da. **Mecanismo de desenvolvimento limpo: evolução do instrumento e perspectivas**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

CUNHA, K. B. da. **Papel do Brasil, da Índia e da China para efetividade dor egime climático pós-2012**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

DUFFIE, D. **Dinamic Asset Pricing Theory**. New Jersey: Princeton University Press, 1996. 472 p.

ECX. **European Climate Exchange**. 2011. Disponível em: <http://www.ecx.eu>. Acesso em setembro de 2011.

EUROSTAT. **European Comission eurostat**. 2011. Disponível em: <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/>. Acesso em outubro de 2011.

FRAGA, R. M. **Apreçamento de Créditos de Carbono por Meio de Modelos Estocásticos: European Allowance Units da Segunda Fase do European Union Emission Trade Scheme**.

Dissertação (Mestrado) — Faculdade IBMEC São Paulo, 2007.

GOLDEMBERG, J.; VILLANUEVA, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2003.

GORTON, G.; ROUWENCHORST, K. G. **Facts and Fantasies About Commodity Futures**. National Bureau of Economic Research, 2005. Disponível em <http://www.nber.org/papers/w10595>. Acesso em setembro de 2011.

GUNN, L. K. **Precificação de contratos inflexíveis de energia elétrica: rentabilidade e impacto de encargos e tributos**. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

HARRISON, M.; KREPS, D. Martingale and multiperiod securities markets. **Journal of Economic Theory**, v. 20, p. 382–408, 1979.

HASSELKNIPPE, H. Managing carbon risks: A commodities market perspective. In: COMMUNICATION (Ed.). **Climate Change and Business**. Auckland: [s.n.], 2004.

HUANG, X. Portfolio selection with a new definition of risk. **European Journal of Operational Research**, v. 186, p. 352–357, 2008.

HULL, J. C. **Introdução aos Mercados Futuros e de Opções**. São Paulo: Bolsa de Mercadorias & Futuros, 1991.

_____. **Opções, Futuros e Outros Derivativos**. 3ª. ed. São Paulo: Bolsa de Mercadorias & Futuros, 1997.

IEA. **World Energy Outlook 2009**. Paris, 2009.

_____. **CO2 Emissions From Fuel Combustion - Highlights**. Paris, 2010. Disponível em:

<http://www.iea.org/co2highlights/co2highlights.pdf>. Acesso em abril de 2011.

_____. **Review Existing and Proposed Emissions Trading Systems**. Paris, November 2010.

Disponível em: http://www.iea.org/papers/2010/ets_paper2010.pdf. Acesso em dezembro de 2010.

IPCC. **Climate Change 2007: The Physical Science Basis**. Cambridge University Press, 2007.

Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007. Disponível em: http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_wg1_report_the_physical_science_basis.htm.

Acesso em março de 2010.

JORION, P. **Value at Risk: The new benchmark for controlling market risk**. Chicago: Irwin Professional Publishing, 1997. 332 p.

KOSSOY, A.; AMBROSI, P. **State and Trends on the Carbon Market 2010**. Washington, DC, May 2010.

KRISTIANSEN, T. et al. Carbon risk management. In: **Proceedings 9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems**. KTH Stockholm, Sweden: [s.n.], 2006.

LINACRE, N.; KOSSOY, A.; AMBROSI, P. **State and Trends of the Carbon Market 2011**. World Bank. Washington DC, June 2011.

LOMBA, J. T. **Economía del Cambio Climático**. Madrid: Santillana Ediciones Generales, 2009. 136 p.

LUENBERGER, D. G. **Investment Science**. New York: Oxford University Press, 1998. 494 p.

MANSANET-BATALLER, M.; PARDO, A. Co₂ prices and portfolio management. **SSRN Working Paper**, 2008.

MARKOWITZ, H. M. Portfolio selection. **Journal of Finance**, v. 7, p. 77–91, 1952.

_____. **Mean-Variance Analysis in Portfolio Choice and Capital Markets**. New York: Wiley, 2000.

MCTI. **MDL Ilustrado**. Julho 2009. Disponível em:

<http://enviroscope.iges.or.jp/modules/envirolib/upload/2386/attach/mdl%20ilustrado.pdf>. Acesso em dezembro de 2010.

_____. **O mecanismo de desenvolvimento limpo: guia de orientação 2009**. Rio de Janeiro: Imperial Novo Milênio, 2009. 131 p.

_____. **Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. 2011. Disponível em:

<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/4007.html>. Acesso em 25 de agosto de 2011.

MERTON, R. C. Theory of racional option pricing. **Bell Journal of Economics and Management Science**, v. 4, p. 141–183, 1973.

MICHAELOWA, A.; JOTZO, F. Transaction costs, institutional rigidities and the size of the clean development mechanism. **Energy Policy**, v. 33, p. 511–523, 2005.

MUNHOZ, F. C. **Modelo de suporte à decisão para contratação eficiente de energia elétrica**. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

NETO, A. L. **Contrato de créditos de carbono**. Curitiba: Juruá, 2009. 152 p.

NICHOLAS, J. C. Elementos econômicos da gerência de crescimento. In: **Conflitos jurídicos, econômicos e ambientais - estratégias para o desenvolvimento de políticas ambientais e de uso do solo**. Maringá: Eduem, 1995.

OLIVEIRA, A. S. Modalidades e procedimentos simplificados no mecanismo de desenvolvimento limpo. In: CENERGIA (Ed.). **Alternativas Energéticas Sustentáveis no Brasil**. Rio de Janeiro: Relume Dumará, COPPE: CENERGIA, 2004. p. 369–464. Mauricio Tiomno Tolmasquim, coordenador.

OLIVEIRA, F. A. de. **Estratégia de comercialização de energia elétrica através da otimização de portfólios de contratos utilizando projetos de experimentos de mistura**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, MG, 2009.

RATES, G. **global-rates .com**. 2011. Disponível em: <http://www.global-rates.com>. Acesso em outubro de 2011.

REILLY, F. K.; NORTON, E. A. **Investimentos**. Tradução da 7ª edição norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2008. 564 p.

SAMUELSON, P. A. Proof that properly anticipated prices fluctuate randomly. **Industrial Management Review**, v. 6, p. 41–49, 1965.

SANTOS, J. E. dos. **Dicionário de derivativos: inglês-português**. São Paulo: Atlas, 1998. 224 p.

SEIFERT, J.; UHRIG-HOMBURG, M.; WAGNER, M. Dynamic behavior of CO_2 spot prices. **Journal of Environmental Economics and Management**, v. 56, p. 180–194, 2008.

SEIFFERT, M. E. B. **Mercado de carbono e protocolo de Quioto: oportunidades de negócio na busca da sustentabilidade**. São Paulo: Atlas, 2009. 205 p.

SISTER, G. **Mercado de Carbono e Protocolo de Quioto**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2008. 200 p.

STANLEY, M. P. et al. **State of the Voluntary Carbon Markets 2011**. Washington, DC, June 2011.

STERN, N. The economics of climate change. In: CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS.

Climate ethics: essential readings. New York: Oxford University Press, 2010. cap. 2, p. 39–76.

STEUER, R. E. **Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application.** New York: Wiley, 1986.

SUTTER, C. **Small-Scale CDM Projects: Opportunities and Obstacles - Can small-scale projects attract funding from private CDM investors.** Zurich, December 2001.

TAKAHASHI, L. **Precificação de contratos flexíveis de energia elétrica: contrato-a-termo e opção.** Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2008.

UNFCCC. **Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change.**

Disponível em: <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf>. Acesso em agosto de 2011.

_____. **Kyoto Protocol Reference Manual: on accounting of emissions and assigned amount.**

Bonn, Germany, 2008. Disponível em:

http://unfccc.int/resource/docs/publications/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf. Acesso em dezembro de 2010.

_____. **CDM.** 2011. Disponível em: <http://cdm.unfccc.int>. Acesso em 22 de agosto de 2011.

_____. **Kyoto Protocol.** 2011. Disponível em:

http://unfccc.int/kyoto_protocol/status_of_ratification/items/2613.php. Acesso em 17 de agosto de 2011.

UNICA. **União da Indústria de Cana-de-Açúcar.** 2011. Disponível em:

<http://www.unica.com.br>.

VARIAN, H. R. **Microeconomics analysis.** New York: Norton & Company, 1992. 563 p.

WRI; CAIT. **Climate Analysis Indicators Tool**. Washington, DC, 2005. Disponível em:
<http://cait.wri.org>. Acesso em dezembro de 2010.

ZELENY, M. **Multiple criteria decision making**. New York: McGraw-Hill series in quantitative methods for management, 1982. 563 p.

APÊNDICE A - OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO

Otimização, em geral, refere-se a encontrar uma melhor solução para um determinado problema a ser resolvido dentro de um conjunto de possíveis soluções. Ela pode ser do tipo mono-objetivo, quando o problema de otimização possui uma única função objetivo ou do tipo multiobjetivo (ou multicritério), que consiste em maximizar ou minimizar, simultaneamente, um número de funções objetivo que satisfaça todas as restrições de um problema. Tal ferramenta tornou-se de amplo alcance devido ao aumento da capacidade computacional disponível e está presente em várias áreas de ciência e tecnologia.

Sejam duas soluções quaisquer de um problema de otimização multiobjetivo x e y , e as funções objetivo f_j para j variando de 1 a m . Supondo ainda que todas as funções objetivo são de minimização e que x e y são variáveis de dimensão n . Deste modo, as soluções se relacionam entre si por uma das três formas:

- x é dominada por y : existe pelo menos um objetivo j para o qual $f(y_j) < f(x_j)$ e para os demais, $f_j(y_j) \leq f_j(x_j)$.
- y é dominada por x : existe pelo menos um objetivo j para o qual $f(x_j) < f(y_j)$ e para os demais, $f_j(x_j) \leq f_j(y_j)$.
- Não existe relação de dominância entre x e y : existe pelo menos um objetivo j no qual $f(x_j) < f(y_j)$ e existe pelo menos um objetivo k no qual $f(y_k) < f(x_k)$.

Hipoteticamente, tem-se dois objetivos f_1 e f_2 a serem maximizados. A Figura A.1 ilustra a relação de dominância entre 4 soluções.

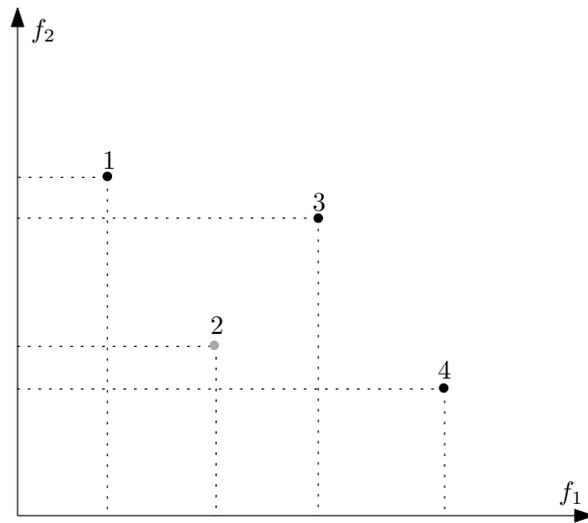


Figura A.1 - Relação de dominância entre soluções

As soluções 1, 3 e 4 não são dominadas por nenhuma outra e não há dominância entre elas. A solução 1 comparada à solução 3, por exemplo, possui melhor valor da função objetivo f_2 e pior valor da f_1 . Comparando agora as soluções 2 e 3, verifica-se que a 2 é dominada pela 3. No entanto, a 2 não é dominada pela 1 nem pela 4.

O conjunto de soluções que não são dominadas por nenhuma outra são chamadas soluções não dominadas ou ótimas de Pareto. A região do espaço de soluções sobre a qual se situa a solução ótima do problema multiobjetivo determinada a fronteira de Pareto.

Dependendo das técnicas utilizadas, um problema multiobjetivo pode vir a ser convertido em um problema mono-objetivo. Uma função objetivo é tratada separadamente, utilizando as demais como restrições (ZELENY, 1982).

Além do mais, os métodos tradicionais de otimização multiobjetivo estão baseados em uma função que pondera cada objetivo. O Método da Ponderação dos Objetivos, por exemplo, é um dos métodos mais usados para solução de problemas multiobjetivo, que consiste em transformar um problema multiobjetivo em um problema mono-objetivo, alocando pesos a cada um dos objetivos. Estes coeficientes de peso são fornecidos como um parâmetro, gerando um conjunto de soluções ótimas de Pareto.