

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ADMINISTRAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ADMINISTRAÇÃO

Simone Leticia Raimundini Sanches

MODELO BASEADO EM DINÂMICA DE SISTEMAS PARA  
DEMANDA DE CRÉDITOS DE CARBONO

Porto Alegre  
2013

Simone Leticia Raimundini Sanches

MODELO BASEADO EM DINÂMICA DE SISTEMAS PARA  
DEMANDA DE CRÉDITOS DE CARBONO

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Administração da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutora em Administração.

Orientador: Prof. Denis Borenstein

Porto Alegre  
2013

### CIP - Catalogação na Publicação

Sanches, Simone Leticia Raimundini  
Modelo baseado em dinâmica de sistemas para  
demanda de créditos de carbono / Simone Leticia  
Raimundini Sanches. -- 2013.  
129 f.

Orientador: Denis Borenstein.

Tese (Doutorado) -- Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul, Escola de Administração, Programa de  
Pós-Graduação em Administração, Porto Alegre, BR-RS,  
2013.

1. Dinâmica de sistemas. 2. Mercado de créditos de  
carbono. 3. Projeto de mecanismo de desenvolvimento  
limpo. 4. Demanda. 5. Brasil. I. Borenstein, Denis,  
orient. II. Título.

Simone Leticia Raimundini Sanches

MODELO BASEADO EM DINÂMICA DE SISTEMAS PARA  
DEMANDA DE CRÉDITOS DE CARBONO

Conceito Final:

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA:

---

Prof. Dr. Luís Felipe Machado do Nascimento - UFRGS

---

Prof. Dr. Guilherme Luís Roehé Vaccaro - UNISINOS

---

Prof. Dr. Antônio Artur de Souza - UFMG

---

Orientador: Prof. Dr. Denis Borenstein - UFRGS

*Ao meu esposo Altevir.  
Aos meus pais Nelson e Amélia.  
Aos meus irmãos Rogério e Sandro (in memoriam).  
Aos meus sobrinhos Ana Isadora e Davi.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus.

A toda minha família.

Aos professores do PPGA, em especial ao Professor Denis.

Aos amigos João Marcos, Júnia, Kerla, Marcelo, Luísa, Márcia, Marguit e Niro.

Aos colegas de doutorado.

Aos colegas da UFRGS e da UEM.

## RESUMO

O Protocolo de Quioto institucionalizou políticas de metas de redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) aos países signatários que fazem parte do Anexo I. Para efetivar essas políticas foram estabelecidos três mecanismos de flexibilização: implementação conjunta (IC), mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL) e comércio internacional de emissões (CIE). Os países com economia em desenvolvimento contribuem através do MDL, ao desenvolver projetos que geram créditos de carbono. A União Europeia criou o Esquema de Comércio de Emissões (EU ETS) para comercializar esses créditos, tornando-se o principal ambiente mundial do mercado de créditos de carbono. Desde a criação do EU ETS, o volume de negócios tem crescido anualmente. Entretanto, até final de 2012 havia a incerteza sobre a continuidade do Protocolo de Quioto, quando na Conferência de Doha (COP-18) foi decidido que esse acordo continuará até o ano de 2020 e um novo acordo mundial será negociado a partir de 2013. Sobre esse novo acordo há discussões sobre quais países devem ter metas de emissões de GEE, quais setores e metodologias são elegíveis para os projetos de MDL e como devem funcionar. Ainda, discute se haverá demanda pelos créditos de carbono provenientes de projetos de MDL. Neste contexto, esta tese teve como objetivo analisar as políticas do mercado de créditos de carbono, considerando a demanda desses créditos pela Europa para o período de 2013 a 2020 e a contribuição do Brasil para a compensação das emissões excedentes de GEE, a partir de um modelo baseado em dinâmica de sistemas. A hipótese dinâmica do modelo sugere um comportamento de equilíbrio entre as emissões de GEE na Europa e os créditos de carbono provenientes dos projetos de MDL. A hipótese dinâmica também sugeriu cinco pressupostos, cujos resultados foram: i) o produto interno bruto da Europa não é o único fator causal das emissões de GEE; ii) a Europa tem condições de atingir suas metas de redução de emissões de GEE até o ano de 2020; iii) o aumento do preço dos créditos de carbono não tem relação causal direta com o aumento das emissões de GEE; iv) o preço dos créditos de carbono não tem relação de causa-efeito com a quantidade de projetos de MDL desenvolvidos no Brasil e; v) é ínfima a contribuição do Brasil para a compensação das emissões de GEE na Europa. As análises das políticas vigentes no mercado de créditos de carbono indicam que até 2020: i) a emissão de GEE pela Europa não terá grandes variações, reforçando que as metas de redução destas emissões serão atingidas; ii) o Brasil, como país hospedeiro de projetos de MDL, reduzirá ainda mais a sua participação neste mercado confirmando expectativas da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima e; iii) não é esperado um aumento na taxa de sucesso na captação de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil. As principais conclusões são: o comportamento de equilíbrio do modelo é congruente ao propósito do Protocolo de Quioto; a Europa tem papel dominante no mercado de carbono que, no longo prazo, pode preponderar sobre as políticas a serem traçadas para o novo acordo mundial e; se as políticas brasileiras de apoio aos projetos de MDL forem mantidas, a participação do Brasil no mercado de carbono tende ser cada vez menor e atingir o patamar de economia limpa e sustentável.

**Palavras-chave:** Dinâmica de sistemas. Mercado de créditos de carbono. Projeto de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo. Demanda. Brasil.

## ABSTRACT

The Kyoto Protocol established policies of targets for reducing greenhouse gas (GHG) emissions by countries that are parties to Annex I. In order to put these policies in practice, three flexible mechanisms have been set: Joint Implementation (JI), Clean Development Mechanism (CDM) and Emissions Trading (CIE). Countries with developing economies contribute through CDM, by developing projects that generate carbon credits. The European Union has created the Emissions Trading Scheme (EU ETS) to trade these credits, making it the main platform of the worldwide carbon credit market. Since the creation of the EU ETS, turnover has increased annually. However, until late 2012 there was uncertainty about the continuity of the Kyoto Protocol. It was decided in the Doha Conference (COP-18) that the agreement will continue until 2020. The COP-18 also decided that a new worldwide agreement will be negotiated starting in 2013. There have been discussions about this new agreement over which countries should have GHG emissions targets, which sectors and methodologies are eligible for CDM projects and their scope. Moreover, it is unknown whether there will be demand for carbon credits generated by CDM projects. In this context, this thesis aims to analyze the policies of the carbon credit market, considering demand for these credits in Europe between 2013 and 2020, and Brazil's contribution to offset excess GHG emissions, using a model based on system dynamics. The dynamic hypothesis of the model suggests equilibrium between GHG emissions in Europe and carbon credits originating from CDM projects. It also suggests five assumptions, and the results were: i) the gross domestic product of Europe is not the only causal factor of GHG emissions, ii) Europe is able to meet its targets to reduce GHG emissions by 2020; iii) the higher price of carbon credits has no cause-effect relationship with the increase in GHG emissions; iv) the price of carbon credits has no cause-effect relationship with the number of CDM projects developed in Brazil, and; v) Brazil's contribution towards offsetting GHG emissions in Europe is minimal. Analyses of the prevailing policies in the carbon market indicate that by 2020: i) GHG emissions in Europe will not vary widely, reinforcing that the targets of reducing these emissions will be achieved, ii) Brazil, as a host country of CDM projects, will further reduce its participation in the carbon market, confirming expectations of the United Nations Framework Convention on Climate Change, and; iii) an increase is not expected in the success rate of capturing GHG by CDM projects developed in Brazil. The main conclusions are: goal-seeking behavior of the model is consistent with the purpose of the Kyoto Protocol, Europe plays a dominant role in the carbon market, which may prevail in the long term over the policies of the new worldwide agreement, and, if Brazilian policies for CDM projects are maintained, Brazil's participation in the carbon market tends to steadily decline and reach a plateau of a clean and sustainable economy.

**Keywords:** System Dynamics. Carbon Credit Market. Clean Development Mechanism Projects. Demand. Brazil.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do mercado de créditos de carbono .....	26
Figura 2 - Etapas de um projeto de MDL .....	29
Figura 3 - Valor das RCE <i>versus</i> risco de compra .....	31
Figura 4 - Hipótese dinâmica do Modelo de Demanda de Créditos de carbono.....	58
Figura 5 - Diagrama de laço causal do Modelo de Demanda de Créditos de carbono .....	62
Figura 6 - Diagrama de estoque e fluxo do Modelo de Demanda de Créditos de carbono.....	64
Figura 7 - Relações causais na emissão total de GEE da Europa .....	67
Figura 8 - Relações causais na captação de GEE pelos projetos de MDL do Brasil.....	77
Figura 9 - Relações causais na captação de GEE da Europa pelos projetos de MDL do Brasil	88
Figura 10 - Exemplo de diagrama de laço causal .....	115
Figura 11 - Exemplo de diagrama de estoque e fluxo .....	116
Figura 12 - Versão preliminar do diagrama do laço causal .....	118
Figura 13 - Geração de gráficos .....	128

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Quantidade negociada de créditos de carbono (em Mt de CO <sub>2</sub> ) .....	32
Gráfico 2 – Preço médio dos créditos de carbono negociado (em US\$ por Mt de CO <sub>2</sub> ) .....	32
Gráfico 3 – Projetos de MDL no CEMDL/ONU .....	33
Gráfico 4 – Projetos de MDL do Brasil no CEMDL/ONU.....	34
Gráfico 5 – Comportamento das emissões de GEE na Europa e captura de GEE dos projetos de MDL do Brasil (em Mt, de dezembro/2005 a dezembro/2012) .....	56
Gráfico 6 – Comportamento do total de GEE da Europa (em Mt) – Dezembro/2005 a Dezembro/2020 .....	67
Gráfico 7 – Evolução histórica das emissões de GEE na Europa (em Mt) de 1960 a 2008 ....	68
Gráfico 8 – Comportamento do número de projetos de MDL do Brasil (Dezembro/2005 a Dezembro/2020) .....	70
Gráfico 9 – Captação de GEE dos projetos de MDL no Brasil (dezembro/2005 a dezembro/2020) .....	71
Gráfico 10 – Comportamento das emissões de GEE pela Europa e captura de GEE pelos projetos de MDL no Brasil (em Mt, de dezembro/2005 a dezembro/2020) .....	72
Gráfico 11 – Relação entre PIB e emissão de GEE na Europa (dezembro/2005 a dezembro/2009) .....	74
Gráfico 12 – Comportamento do PIB (Milhões US\$) e emissão de GEE (Mt) na Europa de 1960 a 2008 .....	75
Gráfico 13 – Relação entre PIB e emissão de GEE na Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020) .....	76
Gráfico 14 – Meta de redução de GEE versus emissão de GEE na Europa (dezembro/2005 a dezembro/2009) .....	78
Gráfico 15 – Meta de redução de GEE versus emissão de GEE na Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020) .....	79
Gráfico 16 – Emissão de GEE na Europa versus preço da RCE (dezembro/2005 a dezembro/2009) .....	80
Gráfico 17 – Emissão de GEE na Europa versus preço da RCE (janeiro/2010 a dezembro/2020) .....	82
Gráfico 18 – PIB Europa versus preço da RCE (janeiro/2005 a dezembro/2020) .....	83
Gráfico 19 – Preço dos créditos de carbono versus projetos de MDL brasileiros aprovados no CEMDL/ONU (dezembro/2005 a dezembro/2012) .....	84
Gráfico 20 – Preço dos créditos de carbono versus projetos de MDL brasileiros aprovados no CEMDL/ONU (janeiro/2013 a dezembro/2020) .....	86
Gráfico 21 – Histograma da taxa de sucesso na emissão de RCE dos projetos de MDL do Brasil .....	89

Gráfico 22 – Captação de GEE dos projetos de MDL no Brasil versus emissão de GEE na Europa (dezembro/2005 a dezembro/2009) .....	91
Gráfico 23 – Captação de GEE dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil versus emissão de GEE na Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020) .....	92
Gráfico 24 – Análise da política de produção de GEE pela Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020) .....	95
Gráfico 25 – Análise da política de total de emissões de GEE pela Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020) .....	97
Gráfico 26 – Análise da política de captura de GEE pelos projetos de MDL do Brasil (janeiro/2013 a dezembro/2020) .....	98

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Fatores determinantes do preço das URE .....	35
Quadro 2 - Determinantes do preço das URE .....	37
Quadro 3 - Fatores que influenciam o mercado de créditos de carbono .....	38
Quadro 4 - Limites do Modelo de Demanda de Créditos de carbono .....	59

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre o PIB e a emissão de GE da Europa (dezembro/2005 a dezembro/2009) .....	74
Tabela 2 – Meta de redução de GEE na Europa .....	77
Tabela 3 – Meta de redução de GEE na Europa (em Mt/mês), de dezembro/2005 a dezembro/2009 .....	78
Tabela 4 – Meta de redução de GEE na Europa (em Mt/mês), de janeiro/2010 a dezembro/2020 .....	79
Tabela 5 – Relação entre emissão de GEE na Europa e preço RCE (dezembro/2005 a dezembro/2009) .....	81
Tabela 6 – Projetos de MDL aprovados e preço das RCE (dezembro/2005 a dezembro/2009)	85
Tabela 7 – Distribuição de frequência da taxa de sucesso na emissão de RCE dos projetos de MDL do Brasil .....	90
Tabela 8 – Participação dos projetos de MDL do Brasil na compensação de GEE na Europa (2006 a 2009) .....	91
Tabela 9 – Participação dos projetos de MDL do Brasil na compensação de GEE na Europa (2010 a 2020) .....	93

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AND	Autoridade Nacional Designada
BM&F	Bolsa de Mercadorias e Futuros
CCX	<i>Chicago Climate Exchange</i>
CEMDL/ONU	Conselho Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo da Organização das Nações Unidas
CH <sub>4</sub>	Metano
CIE	Comércio Internacional de Emissões
CIMGC	Comissão Interministerial para Mudança Global do Clima
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
COP 13	13 <sup>a</sup> Conferência das Partes (Bali, Indonésia, 2007)
COP 15	15 <sup>a</sup> Conferência das Partes (Copenhague, Dinamarca, 2009)
COP 16	16 <sup>a</sup> Conferência das Partes (Cancun, México, 2010)
COP 17	17 <sup>a</sup> Conferência das Partes (Durban, África do Sul, 2011)
COP 18	18 <sup>a</sup> Conferência das Partes (Doha, Qatar, 2012)
CQNUMD	Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima
CVM	Comissão de Valores Mobiliários
DCP	Documento de Concepção do Projeto
DEF	Diagrama de Estoque e Fluxo
DLC	Diagrama de Laço Causal
ECX	<i>European Climate Exchange</i>
EOD	Entidade Operacional Designada
EA	<i>European Allowances</i>
EU ETS	<i>European Union Emissions Trading Scheme</i>
EUA	Estados Unidos da América
FHC	Hidrofluorcarbono
FREE	<i>Feedback-Rich Energy-Economy</i>
GEE	Gases de Efeito Estufa
Gt	Giga de toneladas
GWh	Giga Watt hora
IC	Implementação Conjunta
ICE	<i>Italy's Carbon Emissions</i>
MBRE	Mercado Brasileiro de Reduções de Emissões

MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MDCC	Modelo de Demanda de Créditos de carbono
MDIC	Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
Mt	Milhões de toneladas
MW	Mega Watt
N <sub>2</sub> O	Óxido nitroso
NAMA	<i>Nationally Appropriate Mitigation Action</i>
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
ONU	Organizações das Nações Unidas
PNA	Plano Nacional de Alocação
PIB	Produto Interno Bruto
PNMC	Política Nacional sobre Mudanças do Clima
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PwC	PricewaterhouseCoopers
RCE	Redução Certificada de Emissão
t	Tonelada
TGC	<i>Tradable Green Certificates</i>
UE	União Europeia
UNFCCC	<i>United Nations Framework Convention on Climate Change</i>
URE	Unidade de Redução de Emissões

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	JUSTIFICATIVA DA PESQUISA.....	18
1.2	PROBLEMA DE PESQUISA .....	21
1.3	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	22
1.3.1	<b>Objetivo geral .....</b>	<b>22</b>
1.3.2	<b>Objetivos específicos .....</b>	<b>23</b>
1.4	DELIMITAÇÃO DA PESQUISA .....	23
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	24
<b>2</b>	<b>MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO .....</b>	<b>26</b>
2.1	MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO .....	28
2.2	PANORAMA DO MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO E PROJETOS DE MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO .....	31
2.3	ESTUDOS CORRELATOS .....	35
2.3.1	<b>Estudos descritivos .....</b>	<b>35</b>
2.3.2	<b>Estudos econométricos e estocásticos.....</b>	<b>40</b>
2.3.3	<b>Estudos baseados em dinâmica de sistemas .....</b>	<b>42</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA DE MODELAGEM BASEADA EM DINÂMICA DE SISTEMAS .....</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>MODELO DE DEMANDA DE CRÉDITOS DE CARBONO .....</b>	<b>56</b>
4.1	MODO DE REFERÊNCIA E HIPÓTESE DINÂMICA.....	56
4.2	DIAGRAMA DE LAÇO CAUSAL .....	59
4.3	DIAGRAMA DE ESTOQUE E FLUXO .....	63
4.4	VALORES DOS PARÂMETROS .....	65
4.5	EXECUÇÃO DO MODELO .....	66
4.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE .....	73
4.6.1	<b>PIB da Europa está diretamente relacionado à emissão de gases de efeito estufa .</b>	<b>73</b>
4.6.2	<b>Metas de redução de emissões dos gases de efeito estufa definidas pelos países europeus têm sido eficazes .....</b>	<b>77</b>
4.6.3	<b>Aumento das emissões de gases de efeito estufa na Europa tem relação com o aumento no preço dos créditos de carbono .....</b>	<b>80</b>

4.6.4	Aumento no preço dos créditos de carbono tem relação com o aumento na quantidade de projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo no Brasil .....	84
4.6.5	Captação dos gases de efeito estufa dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo realizados no Brasil contribui para a compensação da emissão desses gases na Europa .....	87
4.7	ANÁLISE DE POLÍTICAS DO PROTOCOLO DE QUIOTO .....	94
5	CONCLUSÕES .....	100
5.1	CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA .....	103
5.2	LIMITAÇÕES DA PESQUISA .....	104
5.3	SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS .....	105
	REFERÊNCIAS .....	106
	APÊNDICES .....	114
	APÊNDICE A – MODELAGEM BASEADA EM DINÂMICA DE SISTEMAS .....	114
	APÊNDICE B – VERSÃO PRELIMINAR DO DIAGRAMA DE LAÇO CAUSAL ...	118
	APÊNDICE C – EQUAÇÕES DO MODELO .....	119
	APÊNDICE D – GERAÇÃO DE GRÁFICOS .....	128
	APÊNDICE E – ROTEIRO DE ENTREVISTAS .....	129

## 1 INTRODUÇÃO

As alterações no meio ambiente são consequências da ação antrópica e do desenvolvimento econômico dos países. Por esse motivo e preocupada em minimizar os impactos ambientais negativos, a Organização das Nações Unidas (ONU) patrocinou, em 1972, a primeira conferência mundial sobre as mudanças climáticas. O resultado desta Conferência foi a criação do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Em 1992, quando foi realizada a segunda conferência, criou-se a Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (CQNUMD), que entrou em vigor em 1994.

Em 1997, foi assinado o Protocolo de Quioto. Neste acordo as nações industrializadas (países desenvolvidos) signatárias se comprometeram a atingir metas de redução de suas emissões de gases de efeito estufa (GEE) até o ano de 2012. Para que isso se efetivasse, foram estabelecidos três mecanismos de flexibilização: a Implementação Conjunta (IC), o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) e o Comércio Internacional de Emissões (CIE) (SEIFFERT, 2009). Destes três mecanismos, destaca-se o MDL pelo fato de constituir-se na forma como os países com economia em desenvolvimento, a exemplo do Brasil, pudessem contribuir para o cumprimento das metas de redução de emissões de GEE (ONU, 2010).

Em 2002, os países da União Europeia (UE) criaram o Esquema de Comércio de Emissões da União Europeia (*European Union Emissions Trading Scheme* – EU ETS), com vigência a partir de 2005. Ressalta que o EU ETS já existia antes de 2002, exclusivamente para a Comunidade Europeia, com o mesmo propósito: comercializar as permissões de emissão de GEE, isto é, as permissões europeias (*European Allowances* - EA) (SABBAG, 2009).

Em 2007, na Conferência de Bali (COP-13), foi estabelecido o Plano de Ação de Bali. Este Plano reconheceu que os países em desenvolvimento deveriam promover ações de mitigação das emissões de GEE com práticas de desenvolvimento sustentável. Tal obrigação ficou conhecida como Ações Nacionais de Mitigação Apropriada (*Nationally Appropriate Mitigation Action* – NAMA), cujas tecnologias envolvidas poderiam ser financiadas ou

transferidas pelos países que fazem parte do Anexo I<sup>1</sup> do Protocolo de Quioto (UNFCCC, 2011c).

Na Conferência de Copenhague (COP-15), realizada em 2009, foi estabelecido o Acordo de Copenhague. Neste acordo os países desenvolvidos se comprometeriam reduzir, em média, 20% das emissões dos GEE até 2020, em comparação com o volume de gases emitido no ano de 1990. Ainda, o Acordo de Copenhague previa o aumento da participação dos países em desenvolvimento na redução das emissões de GEE em suas atividades econômicas, reconhecendo a NAMA como meio para isso (BRASIL, 2011c). Ainda, o Acordo de Copenhague definiu que cada país membro da CQNUMD deveria manifestar, em janeiro de 2010, seu compromisso de redução até 2020. A UE manifestou o compromisso de reduzir entre 20% e 30% as emissões de GEE, tendo como base o ano de 1990, desde que os demais países desenvolvidos se comprometessem a promover reduções comparáveis e que os países em desenvolvimento também promovessem ações de mitigação das suas emissões. Os Estados Unidos da América (EUA) e o Canadá estabeleceram a meta de reduzir em 17% as emissões de GEE, comparado ao ano de 2005. O Japão manifestou o compromisso de reduzir em 25% as emissões de GEE, com base no ano de 1990, mas com a condição de que fosse estabelecido um marco internacional com a participação de todas as grandes economias (BRASIL, 2011c; UNFCCC, 2011a).

O Brasil, como agente voluntário e país em desenvolvimento, manifestou o compromisso de reduzir a emissão de GEE com ações de mitigação (NAMA), até 2020, entre 36,1% e 38,9% (ano de referência: 2005), principalmente em decorrência do desmatamento e do uso da terra (BRASIL, 2011b; UNFCCC, 2011b). Outros países em desenvolvimento, conforme o UNFCCC (2011b), também fixaram metas para reduzir a emissão de GEE, a partir de ações de mitigação: China, entre 40% e 45%; Índia, entre 20% e 25%; Coreia do Sul e México, 30%; África do Sul, 34%; e Indonésia, 26% (todos com referência ao ano de 2005). Assim como o Brasil, os demais países em desenvolvimento preveem a continuidade dos projetos de MDL.

Neste contexto, os países em desenvolvimento percebem a NAMA como em mecanismo encorajador para o desenvolvimento de projetos de MDL, com a participação de dois ou mais países (o país hospedeiro do projeto de MDL e o país que irá transferir ou financiar a tecnologia do projeto). Entretanto, o Acordo de Copenhague reconheceu a NAMA

---

<sup>1</sup> Anexo I: compreende os países industrializados e membros da OCDE em 1992 e os países com economia em transição, incluindo a Rússia, os países Bálticos e vários países da Europa Central e Oriental. A relação completa dos países que fazem parte do Anexo I pode ser obtida em: [http://unfccc.int/parties\\_and\\_observers/items/2704.php](http://unfccc.int/parties_and_observers/items/2704.php).

como forma de aumentar a participação dos países em desenvolvimento na redução das emissões de GEE, sem tratar da continuidade dos projetos de MDL após 2012, o que gerou dúvidas sobre o futuro do Protocolo de Quioto (PEREIRA; GUTIERREZ, 2010; SERRA, 2010).

Tal situação foi tratada na Conferência de Cancun (COP-16), realizada em 2010, cujas principais decisões foram: criação do Fundo Verde para o Clima (*Green Climate Fund*); implementação de regras para compensar os países que reduzissem o desmatamento e a degradação de florestas; manutenção das metas de redução de GEE estabelecidas no Acordo de Copenhague; e reconhecimento da importância da continuidade do Protocolo de Quioto após 2012. Porém, as discussões sobre a segunda fase do Protocolo de Quioto foram postergadas para final de 2011, na Conferência de Durban (COP-17) (BRASIL, 2011b; UNFCCC, 2011d).

Na COP-17 o principal resultado foi a Plataforma de Durban para uma Ação Reforçadora. Nesta Plataforma foi acordada a prorrogação da vigência do Protocolo de Quioto, após 2012, com a condição de que, além dos países desenvolvidos, os países em desenvolvimento também devem reduzir as suas emissões de GEE. Ainda, na COP-17 foi delineado um plano de trabalho para implementar o Fundo Verde para o Clima, no final de 2012, tendo o Banco Mundial como administrador nos três primeiros anos (UNFCCC, 2012).

A última conferência foi realizada em 2012, a Conferência de Doha (COP-18). Nela foi decidido o novo período de vigência do Protocolo de Quioto: janeiro de 2013 a dezembro de 2020. Outra decisão foi a negociação de um novo acordo mundial a partir de 2013, para ser aprovado em 2015 (UNFCCC, 2013b).

## 1.1 JUSTIFICATIVA DA PESQUISA

Desde a assinatura do Protocolo de Quioto e, principalmente, a partir da criação do EU ETS, o mercado de créditos de carbono tem crescido: em 1998 foram comercializados 18 milhões de toneladas (Mt) de créditos de carbono, movimentando US\$ 25 milhões (CAPOOR; AMBROSI, 2003); em 2009 foi comercializado 8.699 Mt de créditos de carbono, gerando negócios em torno de US\$ 143,736 milhões (CAPOOR; AMBROSI, 2010). Entre os compradores dos créditos de carbono a UE é o principal *player*, responsável por,

aproximadamente, 82% do volume negociado, em Mt, em 2009 (CAPOOR; AMBROSI, 2010).

No sítio da *European Climate Exchange* (ECX, 2010), um *clipping* indica que o comércio de mercado de créditos de carbono na Europa continuará existindo após 2012, independente da continuidade do Protocolo de Quioto, pelo fato de a UE ter institucionalizado o EU ETS. Ainda, Fankhauser e Hepburn (2010b) comentam que este mercado estará plenamente desenvolvido somente a partir do ano de 2030. E, para Braun (2009) a continuidade do mercado de créditos de carbono é natural porque está atrelado a planos nacionais de política pública dos países signatários do Protocolo de Quioto para a redução de emissão de GEE.

Adiciona-se, a necessidade dos governos dos países em desenvolvimento adotarem políticas e programas que reduzam a emissão de GEE e esses estejam adequados à NAMA (FIGUERES; STRECK, 2009). Sobre isto, Pinto e Oliveira (2008) e Pereira e Gutierrez (2009) ressaltam que se a política nacional está alinhada à política internacional são minimizadas as limitações técnico-burocráticas para aprovar os projetos de MDL. Os autores também mencionam que o Brasil precisa de uma postura mais proativa, além da Política Nacional sobre Mudanças do Clima (PNMC), instituída pela Lei 12.187, de 29 de dezembro de 2009.

Motta *et al.* (2000) e Conajero (2006) reforçam essa necessidade brasileira ao afirmarem que, embora o Brasil tenha diferenciais positivos para desenvolver projetos de MDL, essa vantagem é dependente de um ambiente político que viabiliza financiamento e transferência de tecnologia, conforme propõe a NAMA. Atinente a isto, estudo realizado pela *Carbon Disclosure Project* (2006) sobre Brasil, África do Sul, Índia e China, aponta que a China é o país que mais concede incentivos para investimentos em energia limpa, com a finalidade de promover a redução do uso de energia fóssil e a segurança energética.

Por sua vez, segundo Dechezleprêtre, Glachant e Ménière (2009), o Brasil importa 100% da tecnologia empregada para projetos de MDL que destroem óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) e recuperação de gases fugitivos, 90% em projetos de biogás, 85% projetos de recuperação de gases em aterros sanitários, 75% em projetos de energia eólica, 20% em projetos de substituição de combustíveis fósseis; 11% em projetos de energia hidroelétrica e, apenas 9% em projetos de energia de biomassa, como o bagaço de cana de açúcar. E, conforme dados da UNEP (2012), os projetos de MDL no Brasil são predominantemente da atividade de energia

renovável (54%), compreendida por energias de origem hidroelétrica, eólica e biomassa<sup>2</sup>. Em seguida, aparecem os projetos de atividades que mitigam o metano (23%) e gases em aterros sanitários (10%).

Esses resultados evidenciam que a transferência de tecnologia pode estar associada aos projetos cuja matriz energética não é a predominante no país. Adiciona-se a isto, o fato dos países cuja matriz energética é predominantemente de combustíveis fósseis e emitem hidrofluorcarbono (HFC), como a China e a Índia, serem mais atrativos do que países cuja matriz energética é de fontes renováveis, como o Brasil, porque os projetos tem maior potencialidade de emitir créditos de carbono (ROCHA, 2008).

Além destes fatores, conforme pesquisa realizada no primeiro trimestre de 2008 pelo Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC), em conjunto com a PricewaterhouseCoopers (PwC), em 103 empresas brasileiras de diversos setores econômicos (a maioria com faturamento anual superior a R\$ 200 milhões), com destaque para o de energia, o de suinocultura, o de papel e celulose e o de aterros sanitários, outros fatores foram revelados como inibidores para o desenvolvimento de projetos de MDL no Brasil, destacando: elevados custos de registro do projeto (em média, US\$ 270.000,00); falta de conhecimento técnico (profissionais especializados) para definir a linha de base do projeto, sua metodologia e adicionalidade<sup>3</sup>; transparência e lentidão do processo de tramitação do projeto de MDL; falta de divulgação de informações sobre as oportunidades de desenvolvimento de projetos de MDL e; disponibilidade e acesso à linhas de financiamento específicas para projetos de MDL, principalmente aqueles em fase de elaboração. Por outro lado, a mesma pesquisa aponta que: 96% das empresas pesquisadas consideram que os fatores relacionados à mudança climática são estratégicos ou relevantes para o futuro do negócio da empresa; 79% fazem reaproveitamento de resíduos ou de subprodutos em seu processo produtivo; 77% têm algum conhecimento ou experiência sobre projetos de MDL; apenas 37% conhecem sobre projetos de MDL programático<sup>4</sup> e; 83% não realizam o inventário das emissões de GEE na sua atividade.

---

<sup>2</sup> Dados do Balanço Energético Nacional 2012, elaborado pela Empresa de Pesquisa Energética, apontam que, aproximadamente, 44% da matriz energética do Brasil são de fontes renováveis.

<sup>3</sup> A adicionalidade de projetos de MDL é subdividida em ambiental, financeira e tecnológica. Adicionalidade ambiental é a redução das emissões de GEE e/ou sua remoção. Adicionalidade financeira compreende a ajuda financeira dos países do Anexo I aos países hospedeiros dos projetos de MDL. E, a adicionalidade tecnológica compreende a transferências de tecnologias e conhecimento dos países do Anexo I aos países hospedeiros (LIMIRO, 2009).

<sup>4</sup> Modalidade de projetos de MDL de pequena escala, isto é, se assemelham aos projetos de grande escala, porém com a limitação de tamanho estabelecida em sua metodologia e a subdivisão de uma atividade em várias de

Além dos fatores que as empresas consideram favoráveis para o desenvolvimento de projetos de MDL, há uma discussão sobre a necessidade de ampliação ou reformulação desses projetos (CAPOOR; AMBROSI, 2010; FANKHAUSER; HEPBURN, 2010b). Entre as discussões está a simplificação de procedimentos para comprovar a adicionalidade de projetos de energia renovável, com capacidade de até 5 MW, e para projetos de eficiência energética que visam economia de energia em uma escala não superior a 20 GWh/ano. Outra mudança em discussão é de melhorar o processo de registro dos projetos no Conselho Executivo do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo da ONU (CEMDL/ONU), incluindo maior transparência na análise dos projetos e melhor comunicação com os participantes e partes interessadas (HEIMDAL, 2010). Essas possíveis mudanças interessam ao Brasil.

Ainda para Heimdal (2010), a maior controvérsia sobre a continuidade do Protocolo de Quioto e dos projetos de MDL é a definição de quais países devem ter metas de emissão de GEE, quais setores e metodologias são elegíveis para os projetos de MDL e, como o MDL deve funcionar. Ainda, a autora salienta que o mais importante é saber se haverá demanda suficiente para os créditos de carbono provenientes de projetos de MDL, com ou sem a continuidade do Protocolo de Quioto.

Cabe lembrar que as principais regras da terceira fase (de 2013 a 2020) do EU ETS já estão estabelecidas. Embora haja previsões de redução pela demanda pelos créditos de carbono, devido às metas de redução de emissões de GEE pelos países da UE, ainda haverá necessidade de compra desses créditos. Para isto, a UE incentiva que sejam realizados acordos bilaterais entre investidores e países hospedeiros para desenvolvimento de projetos de MDL.

## 1.2 PROBLEMA DE PESQUISA

O cenário de incerteza sobre o futuro do Protocolo de Quioto torna o mercado de créditos de carbono e os projetos de MDL suscetíveis quanto à sua continuidade. E, como qualquer mercado, o mercado de créditos de carbono baseia-se na noção de escassez e incerteza sobre a oferta e a demanda.

---

pequena escala. Esses projetos, de acordo com Sabbag (2009) e Seiffert (2009), apresentam menores custos de implantação devido à simplificação dos requisitos e da validação do Documento de Concepção do Projeto e das metodologias de linha de base e o seu monitoramento. Ainda, uma vez que o projeto de MDL programático esteja registrado no Conselho Executivo do MDL da ONU o mesmo pode hospedar atividades programáticas relacionadas ao projeto no âmbito do MDL, aumentando a geração dos créditos de carbono.

Até a realização da COP-18 havia uma incerteza sobre a continuidade do Protocolo de Quioto, após 2012. Nesta Conferência foi decidido que esse acordo continuará vigente até o ano de 2020. Outra incerteza era sobre a articulação de um novo acordo mundial. Isto também foi decidido na COP-18: a partir de 2013 iniciam as negociações de um novo acordo, para que seja aprovado em 2015 e entre em vigência em 2021. Suprimidas essas incertezas, surgiram novos questionamentos: Quais serão as novas políticas a serem definidas neste novo acordo mundial? Como cada país signatário deverá aderir a essas políticas? Como os projetos de MDL participarão e contribuirão para essas novas políticas?

Todas essas questões tem efeito no mercado de créditos de carbono. Ainda mais, ao considerar que a Europa é o principal *player* comprador dos créditos de carbono e que as atuais políticas estabelecidas pela EU preveem que a demanda por esses créditos reduza ao longo do tempo. Conforme Heimdal (2010), o problema é saber se haverá demanda pelos créditos de carbono e, se houver, quanto deve ser.

O estudo de Heimdal (2010) indica uma lacuna que deve ser estudada. Assim, o problema de estudo desta pesquisa compreendeu em responder as seguintes questões: Qual a possível demanda por créditos de carbono pela Europa entre os anos de 2013 e 2020 (período de vigência do Protocolo de Quioto), considerando a atual política de redução de emissões de GEE? Como o Brasil contribui para a compensação das emissões excedentes destes gases?

Definido o problema de pesquisa, a seção seguinte apresenta o objetivo.

## 1.3 OBJETIVOS DA PESQUISA

### 1.3.1 Objetivo geral

Esta tese teve como objetivo analisar as políticas do mercado de créditos de carbono, considerando a demanda desses créditos pela Europa para o período de 2013 a 2020 e a contribuição do Brasil para a compensação das emissões excedentes de GEE.

### 1.3.2 Objetivos específicos

Para desenvolver o objetivo geral é necessário segregá-lo em objetivos específicos, a saber:

- a) Descrever o contexto histórico e atual do mercado de créditos de carbono e dos projetos de MDL.
- b) Identificar, definir e analisar as variáveis concernentes à demanda de créditos de carbono pela Europa que intervêm nos projetos de MDL no Brasil.
- c) Testar os pressupostos da hipótese dinâmica através da análise de sensibilidade das variáveis exógenas do mercado de créditos de carbono, com base no modelo de dinâmica de sistemas.
- d) Analisar as políticas do Protocolo de Quioto, com base no modelo de dinâmica de sistemas.

### 1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Esta pesquisa está delimitada a uma técnica de modelagem denominada dinâmica de sistemas. Modelos baseados em dinâmica de sistemas consideram a relação de causalidade entre as variáveis e o seu comportamento ao longo do tempo. Isto possibilita identificar o comportamento das variáveis, logo do sistema modelado, em um ambiente complexo e dinâmico (STERMAN, 2000; FORD, 1999). Por esse motivo foi escolhida esta técnica de modelagem para desenvolver os objetivos da pesquisa.

Ainda, o modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas, conforme exposto no objetivo desta pesquisa, foi delimitado ao contexto brasileiro por diversos motivos, respaldado em Pinto *et al.* (2008):

- a) Cada país hospedeiro de projetos de MDL tem especificidades quanto às políticas públicas sobre mudanças climáticas e de incentivos por investimento e transferência de tecnologias limpas bem como a composição da matriz energética e a sua mudança. Por esse motivo, cada país deve ser tratado unicamente.
- b) As metas de redução das emissões de GEE entre os países hospedeiros de projetos de MDL são diferentes. Adiciona-se, a diferença em como atingir as metas de redução, por

exemplo: o Brasil priorizou diminuir queimadas de florestas, enquanto a China priorizou modificar sua matriz energética, usando fontes limpas.

- c) Embora os países hospedeiros de projetos de MDL são considerados economias em desenvolvimento, países como Brasil, Rússia, Índia e China (denominado de BRIC) são vistos como economias emergentes e devem estar entre as dez principais economias mundiais nos próximos anos. Contudo, não é razoável considerar, de modo agregado, todos os países desenvolvedores de projetos de MDL porque há especificidades entre os países quanto à sua matriz econômica e energética, bem como nos projetos de MDL desenvolvidos em cada país.
- d) As características dos projetos de MDL são distintas entre os países hospedeiros. Comparando, enquanto o Brasil prioriza projetos de MDL com uso de novas tecnologias limpas, cuja linha de base precisa ser aprovada pelo CEMDL/ONU, aumentando o tempo de aprovação do projeto; a China e Índia usam linhas de base já aprovadas e projetos que promovem a troca de emissões de GEE mais poluentes por menos poluentes ou limpas.

Por esses motivos verifica que o objetivo desta pesquisa, por conseguinte, o modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas, foi circunstanciado ao contexto brasileiro.

## 1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Para desenvolver o objetivo proposto nesta pesquisa, este trabalho está organizado em cinco capítulos, incluindo esta introdução.

O Capítulo 2 descreve o contexto histórico do mercado de créditos de carbono e dos projetos de MDL, bem como apresenta os seus principais aspectos. Ainda, neste capítulo é apresentada uma coletânea de estudos correlatos sobre os mecanismos de flexibilização do Protocolo de Quioto que tivessem, em comum, a análise dos fatores que influenciam o mercado de créditos de carbono. Desse modo, o Capítulo 2 compreendeu o desenvolvimento dos objetivos específicos “a” e “b” (subseção 1.3.2), ao contribuir para a compreensão do problema de pesquisa e identificação das variáveis do modelo proposto e suas relações.

O Capítulo 3 descreve a estratégia metodológica que foi utilizada para o desenvolvimento do modelo computacional baseado em dinâmica de sistemas, expondo os

procedimentos metodológicos da pesquisa, em cada etapa do modelo de simulação proposto. Assim, o Capítulo 3 é importante para respaldar o rigor científico desta pesquisa.

Em seguida, o Capítulo 4 apresenta cada etapa do desenvolvimento do modelo computacional baseado em dinâmica de sistemas. Em outras palavras, neste capítulo é apresentado o desenvolvimento do modelo computacional baseado em dinâmica de sistemas proposto nesta pesquisa. O desenvolvimento deste modelo foi necessário para atender os objetivos específicos “c” e “d” (subseção 1.3.2).

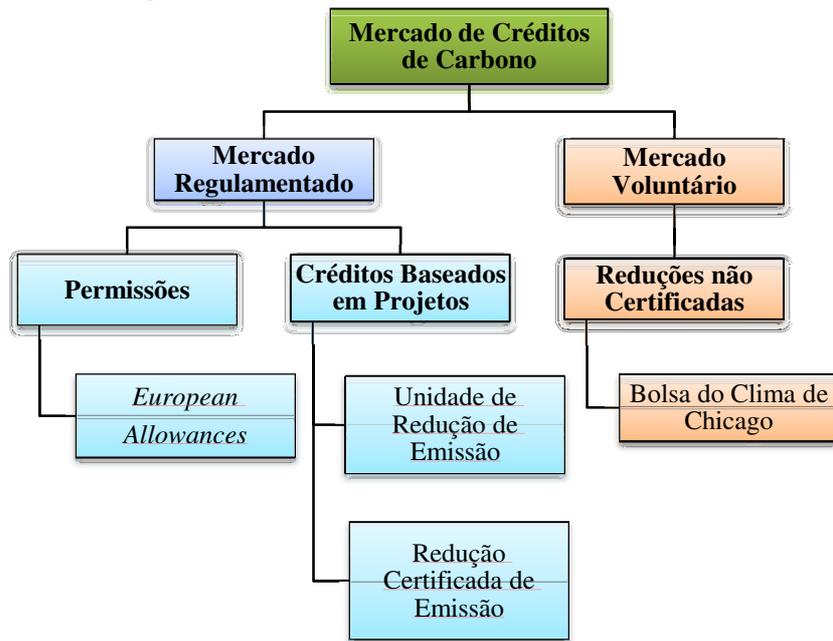
No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões desta pesquisa, suas limitações e contribuições, bem como sugestões para pesquisas futuras.

E, os Apêndices apresentam os conceitos fundamentais sobre a técnica de modelagem com base dinâmica de sistemas (Apêndice A), a versão preliminar do diagrama de laço causal do modelo (Apêndice B), as equações do modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas (Apêndice C), a visão da geração de gráficos do modelo proposto (Apêndice D) e o roteiro de entrevistas semiestruturada (Apêndice E).

## 2 MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO

O mercado de créditos de carbono é formado pelo mercado regulamentado, no qual são negociadas as permissões e reduções registradas na ONU e; pelo mercado voluntário, onde são negociadas as reduções não certificadas pela ONU (Figura 1).

Figura 1 – Estrutura do mercado de créditos de carbono



Fonte: adaptado de Mero (2008).

O mercado regulamentado é o ambiente do CIE para comercializar os créditos de carbono provenientes de projetos de IC e de projetos de MDL. Os projetos de IC são desenvolvidos, exclusivamente, nos países que fazem parte do Anexo I do Protocolo de Quioto e, esses projetos geram os créditos de redução denominados de Unidade de Redução de Emissão (URE). Por sua vez, os projetos de MDL também geram créditos de redução, porém denominados de Redução Certificada de Emissão (RCE).

Para operacionalizar a comercialização dos créditos de carbono (provenientes de projetos de IC e de projetos de MDL) no CIE foi criada em abril de 2005 a *European Climate Exchange* (ECX). O objetivo da ECX é administrar e desenvolver produtos para o mercado de créditos de carbono, padronizando as formas contratuais das negociações desses créditos. Inicialmente, começou operando em mercado das URE. Em março de 2008, iniciou a comercialização da RCE (ECX, 2010).

Ainda, no mercado regulamentado, há o segmento de comercialização das EA, provenientes do *cap-and-trade system*. Esse sistema está em conformidade com o artigo 6º do Protocolo de Quioto e foi institucionalizado pela Diretiva Europeia 87/2003. Esta Diretiva determina que cada país-membro da UE deve desenvolver um plano que determina a quantidade máxima de emissão de GEE para as indústrias e as usinas de energia. O país que atingir a sua meta de redução de GEE pode conceder EA para os países que não atingirem a meta (ONU, 2010), usando da EU ETS. Ou seja, as EA são decorrentes de um sistema compulsório de redução das emissões de GEE entre os países europeus.

Além da EU ETS, há outros mercados regulamentados na Europa que comercializam as EA: *United Kingdom Emission Trading Scheme*, *New South Wales Certificates*, os quais estão interligados ao EU ETS (CAPOOR; AMBROSI, 2003), bem como o *New Zealand Emissions Trading Scheme*.

Por outro lado, o mercado voluntário é representado, principalmente, pela Bolsa do Clima de Chicago (*Chicago Climate Exchange - CCX*), criada em dezembro de 2003. Os créditos de carbono negociados na CCX, diferente da ECX, não precisam ser certificados pela ONU como originários de projeto de MDL ou projetos de IC. Contudo, o preço desses créditos obtém um valor inferior àquele praticado no mercado regulamentado. Tal situação não deixa de ser interessante para os projetos que não obtiveram aprovação pela ONU.

No Brasil, ainda em fase de consolidação, está sendo criado o Mercado Brasileiro de Reduções de Emissões (MBRE). Trata-se de um trabalho conjunto entre a Bolsa de Mercadorias e Futuros (BM&F) e o MDIC. A primeira etapa (iniciada em setembro de 2005) consistiu em criar o Banco de Projetos BM&F-BOVESPA, no qual podem ser registrados projetos de MDL validados pela ONU, intenções de projetos que objetivam a condição futura de projetos de MDL validados (*Project Idea Notes*) e intenções de compra de investidores estrangeiros (*Expression of Interest*) interessados em adquirir RCE (BMF, 2010; LIMIRO, 2009; SABBAG, 2009). A segunda etapa do MBRE, concluída em 2007, criou o ambiente de leilão eletrônico das RCE, operado no mercado a vista. Desde esta data foram realizados alguns leilões de RCE, destacando os leilões propostos pela *Bandeirantes Landfill Gas to Energy Project*, cuja titularidade é da Prefeitura Municipal de São Paulo. O leilão eletrônico é previamente agendado pela instituição, a pedido da parte vendedora. Limiro (2009) sustenta que a experiência da BM&F de comercializar as RCE em leilão eletrônico representa um importante processo de organização e desenvolvimento do mercado de créditos de carbono no Brasil.

Complementando a iniciativa da BM&F, está em fase conclusiva (análise na Comissão de Finanças e Tributação) o Projeto de Lei nº 493/2007, que dispõe sobre a organização e regulação do mercado de créditos de carbono no Brasil. Este Projeto de Lei define que as RCE possuem natureza jurídica de valor mobiliário para fins de regulação, fiscalização e sanção pela Comissão de Valores Mobiliários (CVM). Prevê que, uma vez que a CIMGC aprovar o projeto de MDL, a CVM ficará responsável pelo registro e validação das EOD, pela padronização dos contratos e pelo aumento a liquidez das RCE.

Essas medidas brasileiras permitem que os riscos e as incertezas associadas aos projetos de MDL sejam reduzidos. Isto aumenta a atratividade do país para o desenvolvimento desse tipo de projeto, ao mesmo tempo em que reduz os custos de emissão e comercialização das RCE.

Os distintos ambientes de negociação dos créditos de carbono que surgiram em diferentes países formam um mercado mundial (CARRARO e FAVERO, 2009). Por isto, Lorenzoni Neto (2009) e Chevallier (2010) defendem que os créditos de carbono são uma *commodity* ambiental, por se tratar da comercialização de um bem não tangível padronizado, isto é, uma quantidade definida de GEE expressa em RCE ou URE. Contudo, para os autores, esse mercado ainda carece de regulamentação legal, para disciplinar as regras e aumentar a segurança jurídica dos *players*.

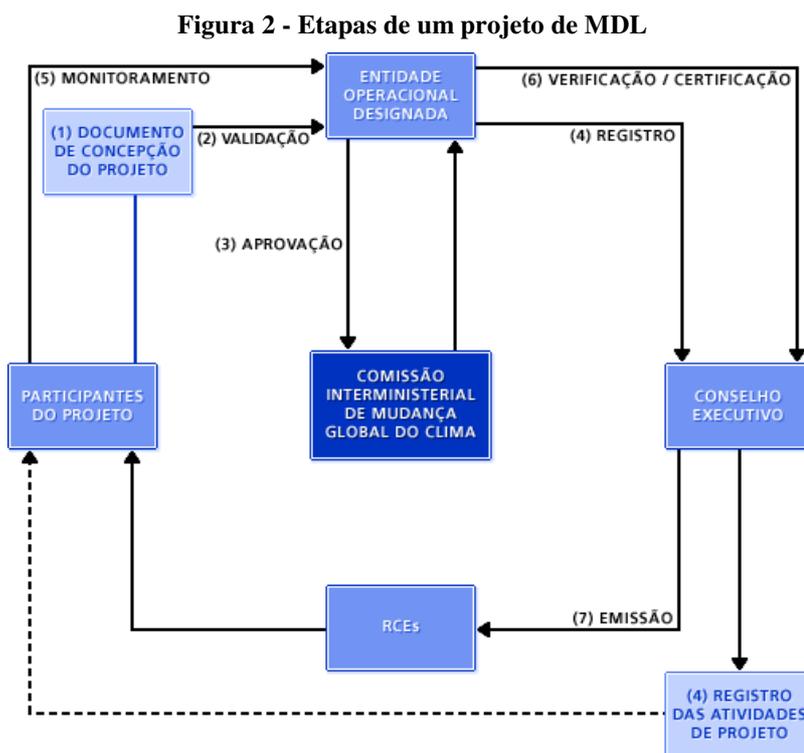
## 2.1 MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO

O denominado “Mecanismo de Desenvolvimento Limpo” (MDL) foi institucionalizado pelo artigo 12 do Protocolo de Quioto. Consiste na implantação de um instrumento jurídico e econômico (projetos) que promova a redução ou captação de emissão de GEE. Para ter validade, todo projeto de MDL deve ser implementado em países de economia em desenvolvimento (denominados de “países hospedeiros”), ser aprovado pela Autoridade Nacional Designada (AND)<sup>5</sup> e, ser encaminhado para avaliação e registro no CEMDL/ONU. Para a obtenção desse registro, o projeto de MDL deve atender alguns critérios de elegibilidade: a) prever a participação voluntária da(s) parte(s) envolvida(s); b)

---

<sup>5</sup> No Brasil é representada pela Comissão Interministerial de Mudança Global do Clima (CIMGC), composto por representante de 11 ministérios, cuja presidência é atribuída ao Ministro da Ciência e Tecnologia e a vice-presidência ao Ministro do Meio Ambiente.

promover reduções de emissões adicionais àquelas que ocorreriam na ausência do projeto; e c) garantir benefícios reais e mensuráveis de longo prazo relacionados à mitigação da mudança climática. Uma vez que obtém o registro do projeto no CEMDL/ONU ocorre o monitoramento da captura ou redução das emissões de GEE, a verificação e certificação dessas emissões e, finalmente, a emissão das RCE para comercialização (Figura 2).



Fonte: BM&F (2010)

A emissão das RCE depende do prazo de validade e certificação dos projetos de MDL. Esse prazo é uma opção do proponente do projeto, podendo ser, segundo Limiro (2009):

- a) para projetos industriais, no máximo de sete anos, renovável no máximo duas vezes por igual período, totalizando vinte e um anos, ou no máximo de dez anos, sem opção de renovação;
- b) para projetos florestais, no máximo de vinte anos, renovável no máximo duas vezes por igual período, totalizando sessenta anos, ou no máximo de trinta anos, sem opção de renovação.

Para cada renovação da certificação, a AND determinará e informará ao CEMDL/ONU que a linha de base original do projeto ainda é válida ou, se for o caso, se foi atualizada de acordo com a existência de novos dados.

Quanto aos participantes, os projetos de MDL podem ser:

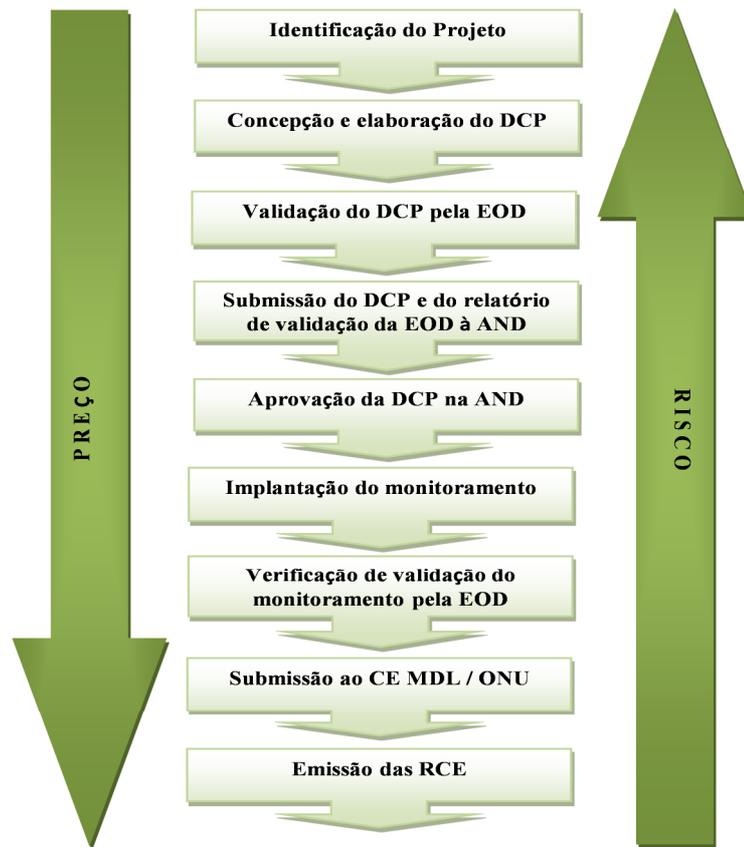
- a) **Unilateral**, quando o agente econômico sediado em um país hospedeiro implementa o projeto de MDL sem qualquer contribuição financeira ou tecnológica de países participantes do Anexo I. Todos os custos e riscos referentes ao projeto recaem ao investidor, sediado no país hospedeiro (JAHN *et al.*, 2004). A negociação com a parte interessada só ocorre quando os créditos de carbono forem ou estiverem na iminência de serem emitidos.
- b) **Bilateral**, quando houver contrato entre um investidor (com sede em algum país do Anexo I) e o agente econômico sediado em algum país hospedeiro. Nesta modalidade, parte dos investimentos e da tecnologia necessários ao desenvolvimento do projeto pode ser transferida ao agente econômico. A propriedade das RCE deverá estar prevista no contrato, podendo ser dividida entre as partes envolvidas. Nesta modalidade os investidores buscam países hospedeiros e projetos de MDL que propiciem menor risco, para aumentar a sua viabilidade financeira (JAHN *et al.*, 2004).
- c) **Multilateral**, quando for viabilizado por algum fundo internacional multinacional. Geralmente nesta modalidade o fundo participa, simultaneamente, em mais de um projeto de MDL. As RCE pertencem ao fundo, que vai distribuí-las entre os seus participantes, cabendo ao país hospedeiro apenas os benefícios da atividade do projeto.

Os riscos envolvidos em um projeto de MDL são, de acordo com Lorenzoni Neto (2009), Carraro e Favero (2009), Blyth *et al.* (2009) e Jahn *et al.* (2004), decorrentes de:

- a) complexidade e burocracia entre as diferentes esferas e os agentes envolvidos na aprovação do projeto e obtenção das RCE, cuja tramitação pode demorar mais de um ano;
- b) custos de registro e de implantação do projeto de MDL, com a possibilidade de não atingir as reduções estimadas de GEE, prejudicando a expectativa de obtenção das RCE;
- c) incerteza dos preços futuros das RCE, devido às mudanças econômicas, políticas e ambientais, à transferência de tecnologias bem como investimentos em pesquisa e desenvolvimento, e ao mercado em si; e
- d) definição do regime jurídico a ser adotado em cada país signatário do Protocolo de Quioto e da harmonização desses regimes.

Quanto ao momento da comercialização, as RCE (ou o seu potencial direito) podem ser vendidas em qualquer etapa do projeto. Contudo, quanto mais antecipada ocorrer a venda do crédito de carbono em relação à última etapa (emissão das RCE), menor é o seu preço (Figura 3). O preço reduz devido aos maiores riscos associados ao projeto de MDL e a volatilidade do mercado (LIMIRO, 2009; SABBAG, 2009).

**Figura 3 – Valor das RCE *versus* risco de compra**



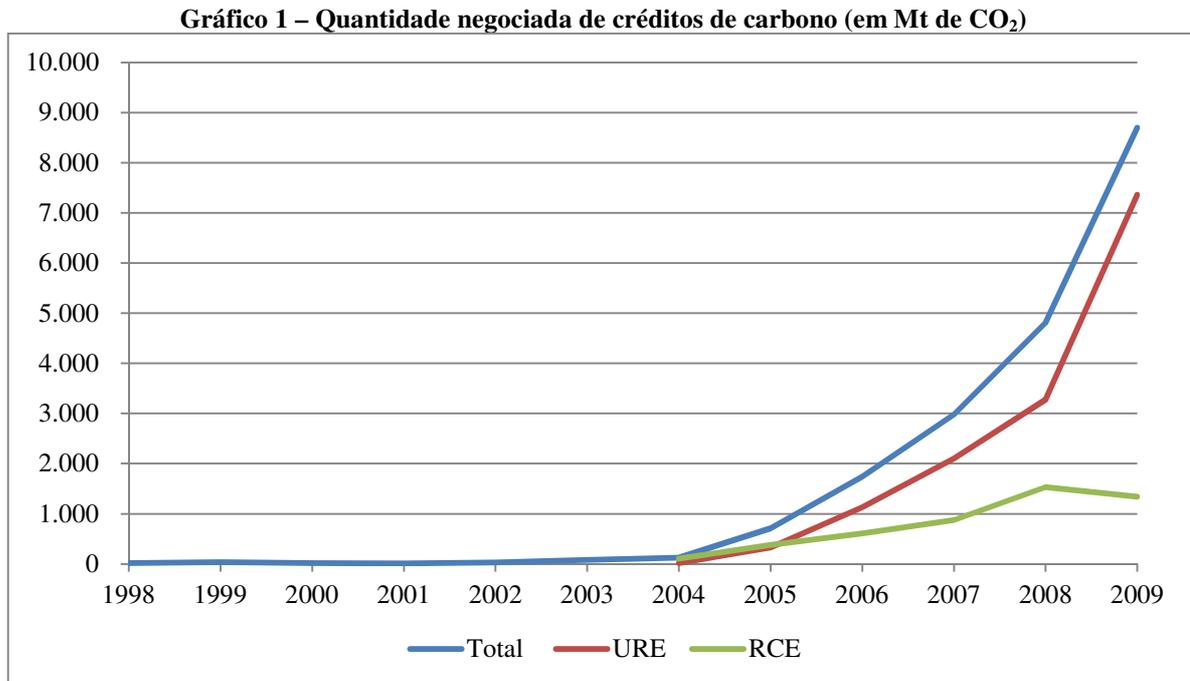
Fonte: Seiffert (2009, p. 157)

Como exemplo dessa relação de preço e risco, a tCO<sub>2</sub> decorrente de RCE de projetos não registrados teve um preço médio em 2008 entre 8,00€ e 13,00€, enquanto que RCE de projetos registrados o preço médio, para o mesmo período, ficou entre 12,00€ e 13,00€ (CARRARO; FAVERO, 2009).

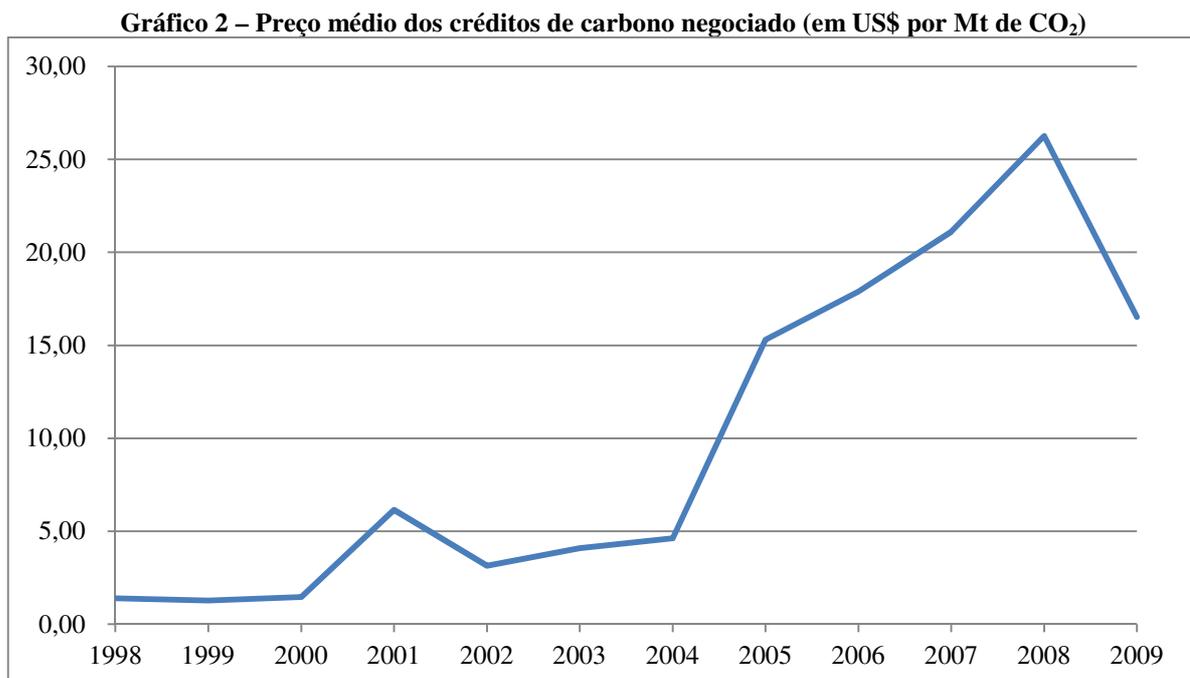
## 2.2 PANORAMA DO MERCADO DE CRÉDITOS DE CARBONO E PROJETOS DE MECANISMO DE DESENVOLVIMENTO LIMPO

Desde o ano de 1998, quando iniciou a comercialização dos créditos de carbono, os valores e quantidade negociados aumentaram a cada ano, principalmente a partir de 2005 com a criação da EU ETS. Contudo, a partir de 2008, esse mercado apresenta desaquecimento por diversos motivos. Entre os principais motivos assinalam-se a crise econômica mundial de 2008-09 e a incerteza sobre a continuidade do Protocolo de Quioto após 2012.

Para ilustrar a evolução do mercado de créditos de carbono ao longo de doze anos (1998 a 2009), o Gráfico 1 mostra o comportamento da quantidade negociada de créditos de carbono (em Mt de CO<sub>2</sub>) e o Gráfico 2 mostra o comportamento do preço médio (em US\$ por Mt de CO<sub>2</sub>).



Fonte: Capoor e Ambrosi (2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010).

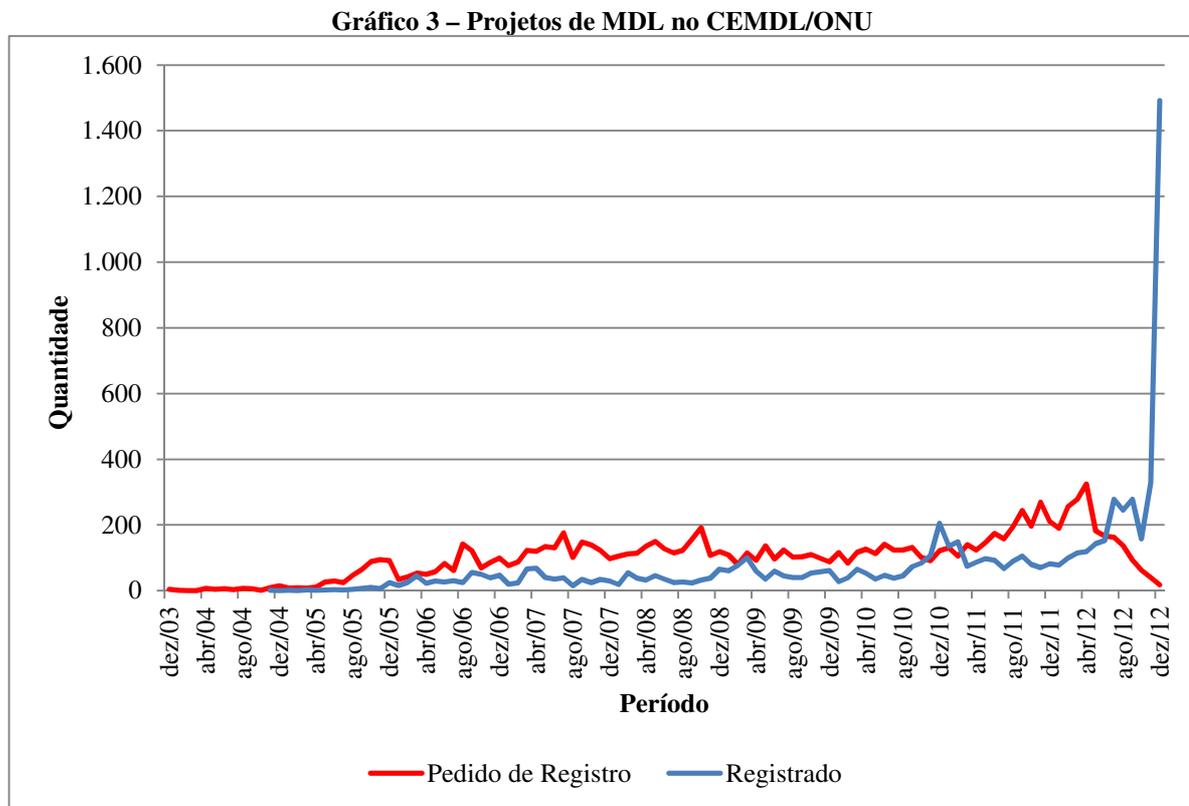


Fonte: Capoor e Ambrosi (2003, 2004, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 e 2010).

Comparando o comportamento da quantidade negociada de créditos de carbono e o preço médio por Mt de CO<sub>2</sub>, verifica-se que o preço apresenta maior oscilação. Ou seja, o preço dos créditos de carbono não depende somente da sua oferta e demanda, há outros fatores que o influenciam, tais como políticas de metas de redução das emissões de GEE nos países signatários do Protocolo de Quioto e a economia mundial.

Sobre isto, Cunha (2009) comenta que, em momentos de recessão, aumenta a incerteza e a necessidade de liquidez porque ocorre redução da produção industrial, logo o preço das energias fósseis cai por haver menor consumo. Por conseguinte, reduz emissão de GEE e, também, a demanda por RCE. A menor demanda pelos créditos de carbono faz com que o preço se ajuste para menos, como pode ser observado no Gráfico 2 para o período de 2008-2009.

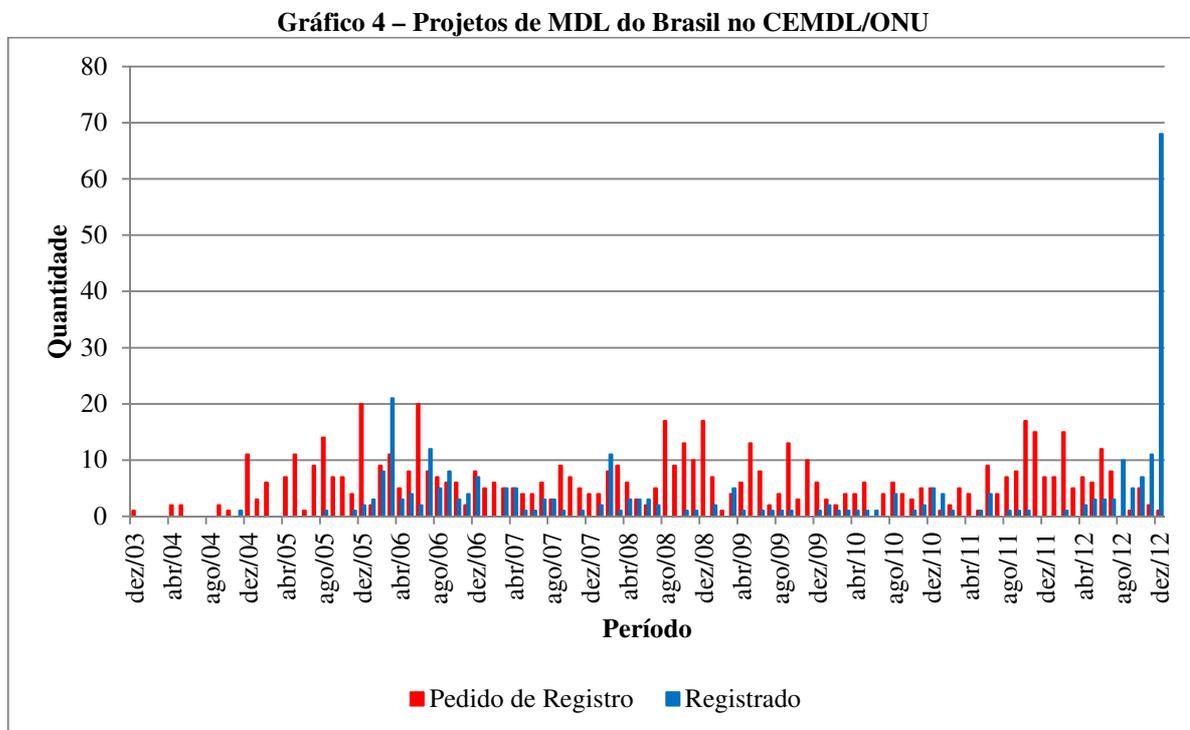
Em outra perspectiva, dados da UNFCCC (2013a), atualizados até dezembro de 2012, indicavam 5.171 projetos de MDL registrados no CEMDL/ONU, emitindo RCE. Historicamente verifica uma tendência de crescimento no número de pedido de registro de projetos de MDL e de projetos registrados no CEMDL/ONU, conforme mostra o Gráfico 3.



Fonte: UNFCCC (2013a), dados atualizados até 31 de dezembro de 2012.

A China é o país com a maior quantidade de projetos registrados, são 2.915 projetos (53%), seguida pela Índia, 1.008 projetos (18%) e pelo Brasil com 233 projetos (4%). Entre esses projetos registrados, a China emitiu 61% das RCE, a Índia 14%, a República da Coreia 9% e o Brasil, em quarto lugar, com 7%. Nota-se que a participação de cada país é diferente quando trata de número de projetos e a quantidade de RCE emitidas. Essa diferença é decorrente da capacidade de cada projeto reduzir ou capturar os GEE, o que implica na quantidade de RCE autorizadas.

Comportamento também de crescimento é o número de projetos de MDL brasileiros com pedido de registro e registrados no CEMDL/ONU (Gráfico 4).



Fonte: UNFCCC (2013a), dados atualizados até 31 de dezembro de 2012.

Observa-se que a quantidade de projetos de MDL com pedido de registro é maior que a quantidade de projetos que são registrados. Ainda, há períodos em que não houve aprovação de nenhum projeto de MDL. Ao contrário disto, após a COP-18 o número de projetos aprovados pelo CEMDL/ONU cresceu acentuadamente, em um único mês (dezembro de 2012). Muito provavelmente esse crescimento acentuado esteja relacionado com as decisões tomadas na COP-18.

Ainda assim, a UNFCCC (2013a) tem a expectativa que o Brasil participe com 3,5% das emissões de RCE para os próximos anos, considerando as características dos projetos de MDL propostos pelo país, que é predominantemente de captura ou redução de dióxido de

carbono (CO<sub>2</sub>) e de metano (CH<sub>4</sub>). Esse *ranking* é menor daquele que se tinha em dezembro de 2012 (quarto lugar, com 7% das emissões de RCE).

## 2.3 ESTUDOS CORRELATOS

Durante a pesquisa sobre estudos que identificam e/ou analisam os fatores que influenciam o mercado de créditos de carbono, foram encontrados alguns estudos descritivos e outros que desenvolveram modelos econométricos ou baseados em dinâmica de sistemas. As subseções seguintes descrevem esses estudos.

### 2.3.1 Estudos descritivos

Entre os estudos descritivos, destacam-se Rickels *et al.* (2007) e Carraro e Favero (2009), que identificaram e analisaram os fatores que determinam o preço das URE.

Os resultados obtidos por Rickels *et al.* (2007) estão sumarizados no Quadro 1.

**Quadro 1 – Fatores determinantes do preço das URE**

<b>Fator</b>	<b>Efeito<sup>a</sup></b>	<b>Expectativa de impacto quando o fator aumenta</b>
Oferta		
Alocações globais	Longo prazo	Negativo
Projetos de MDL e IC	Médio prazo	Negativo
Concentração de URE	Longo prazo	Positivo
Empréstimos de URE	Longo prazo	Negativo
Demanda		
Crescimento econômico	Médio prazo	Positivo
Temperaturas globais	Curto prazo	Positivo
Níveis de chuva e vento	Curto prazo	Negativo
Preço do petróleo, carvão e gás	Curto e longo prazo	Negativo
Preços relativos petróleo/carvão, gás/carvão	Curto e longo prazo	Positivo
Redução de custos	Longo prazo	Positivo
Informações sobre as reduções das emissões	Longo prazo	Negativo
Mercado energético	Médio prazo	Positivo / Negativo
Escassez	Longo prazo	Positivo
Excesso	Longo prazo	Negativo

<sup>a</sup> curto prazo: em poucos dias, médio prazo: poucos meses e, longo prazo: alguns anos.

Fonte: Rickels *et al.* (2007, p. 9).

De acordo com o Quadro 1, os preços das URE são influenciados por três grupos de fatores: oferta, demanda e relacionados à estrutura de mercado, regulação e intervenção. Esses fatores, de acordo com Rickels *et al.* (2007) são inter-relacionados, de modo que a mudança em um desses fatores afetam os demais.

No que concerne aos fatores relacionados à oferta, os autores comentam que o principal é a quantidade de URE que os países participantes do EU ETS emitem. A oferta de créditos de carbono provenientes de projetos de MDL e de IC tem menor impacto nos preços da URE porque possuem maior incerteza de serem emitidos e são emitidos em pequena quantidade, quando comparado com as EA. Ainda, para os autores outros fatores são a morosidade e os custos elevados para certificação e emissão desses créditos.

Sobre os fatores de demanda, Rickels *et al.* (2007) comentam que o preço das URE é determinado, principalmente, pela expectativa de crescimento econômico. Se, por um lado, o crescimento econômico aumenta as emissões de GEE; do outro lado, essas emissões estão limitadas aos Planos Nacionais de Alocação (PNA)<sup>6</sup>.

A expectativa de consumo e a variação de preço de fontes energéticas fósseis, principalmente petróleo, carvão e gás, também afeta a demanda de URE. O consumo e o preço dessas fontes energéticas dependem de fatores climáticos, tais como temperaturas elevadas ou baixas. No curto prazo existe um efeito de substituição de uma fonte energética por outra fonte, mas no longo prazo o efeito será no preço. O aumento do preço dos combustíveis fósseis levará à redução pela demanda dessas fontes energéticas e aumento pela demanda por energia renovável, aumentando o preço das URE.

Outros fatores climáticos, como o volume de chuvas e a velocidade do vento permitem a geração de energia renovável. A geração de energia renovável leva à menor demanda de RCE, de modo que tem efeito negativo no preço das URE. Ao passo que a diminuição dos custos com o controle de emissão de GEE e o aumento das informações sobre a redução dessas emissões apresentam efeitos de, respectivamente, aumentar e diminuir o valor das URE.

Os fatores relacionados à estrutura de mercado, regulação e intervenção, conforme Rickels *et al.* (2007) referem-se a incerteza sobre os preços futuros e as decisões políticas

---

<sup>6</sup> O PNA está previsto na Diretiva 87/2003 da Comunidade Europeia. Cada país membro da Comunidade Europeia deve elaborar um PNA, onde é definida a meta de redução das emissões de GEE do país, a quantidade de EA que deseja distribuir e como será a sua distribuição para determinado período de tempo. Esse plano deve ser publicado e notificado à Comissão e aos outros países-membro da Comunidade Europeia.

sobre as regras de emissão de GEE; aquisição de créditos de projetos de MDL e de IC e; metodologias de linha de base dos projetos de MDL.

Outro estudo é de Carraro e Favero (2009), cujos resultados estão sumarizados no Quadro 2.

**Quadro 2 – Determinantes do preço das URE**

<b>Natureza</b> <b>Efeito<sup>a</sup></b>	<b>Econômica</b>	<b>Financeira</b>
<b>Curto Prazo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Mudanças climáticas</li> <li>✓ Taxa de desconto</li> <li>✓ Políticas domésticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Preço dos combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão)</li> <li>✓ Possibilidade de substituir fontes energéticas</li> </ul>
<b>Longo Prazo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Demanda e oferta de URE</li> <li>✓ Incerteza sobre as regulamentações futuras sobre as metas de redução/emissão de GEE e sobre o mercado de créditos de carbono</li> <li>✓ Crescimento econômico</li> <li>✓ Recursos financeiros para investimentos</li> <li>✓ Alocação global</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>✓ Custo de reduções das emissões de GEE</li> <li>✓ Custo de desenvolvimento de tecnologias limpas</li> </ul>

<sup>a</sup> os autores não especificaram o que compreende horizonte de tempo de curto e longo prazos.

Fonte: Carraro e Favero (2009, p. 402).

De acordo com Carraro e Favero (2009), os principais fatores que determinam os preços das URE podem ser divididos em duas macro-categorias:

- a) política e regulação:** compreende a incerteza sobre a continuidade do Protocolo de Quioto após 2012 e sobre a política interna dos países de possíveis mudanças na regulação das emissões do GEE. Essas incertezas afetam a demanda pelas URE, logo aumentando o preço no longo prazo, e;
- b) fundamentos de mercado:** influencia diretamente na emissão de GEE, logo na oferta e demanda por URE. A economia em período de crescimento aumenta os níveis de produção, aumentando as emissões de GEE e demanda pelas URE, logo o seu preço. O mesmo acontece se as condições climáticas ocasionarem maior consumo de fontes energéticas fósseis.

Uma situação inversa, a recessão econômica, foi verificada por Cunha (2009), usando a teoria de Preferência pela Liquidez, de Keynes, no mercado de créditos de carbono. Para o autor, a crise financeira de 2008, dada a noção de incerteza e necessidade de liquidez, teve impacto indireto no mercado de créditos de carbono através do preço das *commodities* energéticas, principalmente o petróleo. A queda no preço do barril do petróleo no período de 2008-2009 reduziu a demanda por URE, iniciando um movimento de venda para aumentar a sua liquidez, diminuindo ainda mais o preço das URE porque houve maior oferta.

Essa relação de causa e efeito entre o preço das *commodities* energéticas e o preço das URE também foi destacado por Carraro e Favero (2009) como um fator de natureza financeira de curto prazo bem como por Rickels *et al.* (2007), ao mencionar o efeito de substituição no curto prazo e elevação do preço das URE no longo prazo.

Observa-se que os estudos descritivos de Rickels *et al.* (2007) e Carraro e Favero (2009) se limitam a apresentar e categorizar as variáveis que afetam o preço das URE e a cotejar os possíveis efeitos que a mudança nestas variáveis podem causar. Pode-se observar a aplicação da lei da oferta e demanda no preço das URE.

Os principais resultados de outros estudos descritivos sobre os fatores que influenciam o mercado de créditos de carbono estão resumidos no Quadro 3.

**Quadro 3 – Fatores que influenciam o mercado de créditos de carbono**

Autores	Principais resultados
UNEP (2007)	<p>Os fatores que determinam o mercado e o preço dos créditos de carbono são:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) oferta e demanda das URE e RCE;</li> <li>b) a demanda de RCE é estimulada pelo aumento da produção que usam fontes de energia convencionais e emitem GEE;</li> <li>c) os processos políticos e administrativos dos tratados globais sobre as mudanças climáticas são macro determinantes nos preços das RCE;</li> <li>d) risco político dos países hospedeiros de projetos de MDL;</li> <li>e) projetos de MDL que geram RCE provenientes de atividades florestais e hidroelétricas tem limitação no EU ETS;</li> <li>f) o andamento de registro do projeto de MDL influencia no preço das RCE geradas pelo projeto;</li> <li>g) projetos unilaterais apresentam maior risco durante a fase de desenvolvimento;</li> <li>h) o preço do gás, da energia e das URE estão correlacionados, e reflete no preço das RCE. O aumento no preço destas fontes energéticas ocasiona um aumento no preço das URE e RCE.</li> </ul>
Mansanet-Bataller, Pardo e Valor (2007)	<p>O preço das URE no longo prazo é determinado por:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) fatores micro e macroeconômicos (características do setor energético, crescimento do Produto Interno Bruto (PIB), aumento das emissões de GEE e as metas de emissões desses gases);</li> <li>b) fatores energéticos: preço das fontes de energia e;</li> <li>c) fatores climáticos: temperatura e condições climáticas.</li> </ul>
Pinto <i>et al.</i> (2008)	<p>O aumento na oferta de RCE depende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) de melhoria dos instrumentos regulatórios nacionais;</li> <li>b) de incentivos oferecidos pelos órgãos governamentais;</li> <li>c) da continuidade do Protocolo de Quioto;</li> <li>d) do comportamento do mercado europeu de permissões;</li> <li>e) da adesão dos EUA ao Protocolo de Quioto;</li> <li>f) da quantidade e do tipo de projeto que iniciam o processo de certificação;</li> <li>g) da obtenção de certificação para emissão de RCE; e</li> <li>h) da eficácia esperada para cada projeto em demonstrar e cumprir o fluxo de direitos de emissões pleiteado.</li> </ul> <p>O aumento na demanda de RCE depende:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>a) do ritmo de crescimento econômico dos países com metas estabelecidas de redução de emissão de GEE;</li> <li>b) do ritmo do avanço técnico direcionado à modificação da matriz energética e ao aumento da eficiência energética dos maiores setores emissores de GEE; e</li> <li>c) do comprometimento de novos países, principalmente dos EUA, com metas de emissão.</li> </ul>

Continua...

Continuação do Quadro 3

Mero (2008)	Os preços dos créditos de carbono dependem: a) da volatilidade da oferta e demanda; b) da garantia de entrega das RCE, do valor e viabilidade do projeto de MDL; c) das condições de investimento no país hospedeiro e apoio do país hospedeiro; d) do ambiente e dos benefícios sociais; e e) dos custos e riscos envolvidos no projeto.
Fages (2010)	O mercado de créditos de carbono mostra duas possíveis configurações: a) quando o preço da gasolina é inferior a 40€/th. e o preço da URE é superior ao do combustível, o preço da URE depende somente do preço da RCE. b) quando o preço da gasolina está acima de 40€/th., e o preço da URE está entre o preço da RCE e o preço do combustível, o preço da URE é média ponderada (cerca de 70% do preço da RCE e 30% do preço do gás).
Silva Júnior (2011)	O preço das RCE possui relação com o preço do barril de petróleo. Em período de crise econômica, quando os níveis de produção de bens e serviços diminuem, diminui o consumo de petróleo e outros combustíveis fósseis, portanto, diminui a emissão de GEE. Logo a tendência de preço das RCE é de baixar. Apoio governamental (financiamentos e, principalmente, políticas públicas de fomento aos projetos de MDL), é imprescindível para o desenvolvimento desta modalidade de projeto. As políticas públicas de fomento aos projetos de MDL também são importantes para incentivar a geração/transferência de tecnologias limpas nos países hospedeiros de projetos de MDL.
Leão (2011)	Motivos que levam as empresas a adotar medidas que combatem as mudanças climáticas: a) ações governamentais (política e regulações); b) maior eficiência de processos operacionais e a redução de custos e de riscos financeiros; e c) gestão da imagem empresarial.

Fonte: elaborado pela autora com base nos dados da pesquisa (2013).

Com base no Quadro 3, os fatores mais recorrentes sobre o mercado de créditos de carbono, inclusive preço dos créditos, são:

- a) a demanda das URE tem relação com o aumento ou redução do consumo e preço das energias fósseis do crescimento econômico dos países, das metas de redução de emissão de GEE pelos países do Anexo I e dos fatores climáticos;
- b) a oferta das URE depende dos tratados globais sobre mudanças climáticas e políticas públicas dos países sobre mudanças climáticas;
- c) o preço das URE depende da sua própria oferta e demanda bem como do preço das fontes de energia fósseis e emissoras de GEE;
- d) o aumento na demanda das URE tem efeito no aumento da demanda de RCE;
- e) a oferta de RCE depende dos projetos de MDL e de ações governamentais do país hospedeiro; e
- f) o preço das RCE dependem do preço das URE e do barril de petróleo, bem como da atividade do projeto que dá origem ao crédito de carbono, estágio em que o projeto se encontra para a certificação e, dos riscos e custo do projeto de MDL.

Sumarizando, os resultados dos estudos aqui apresentados demonstram que os principais fatores que influenciam o mercado de créditos de carbono são: o crescimento

econômico; a emissão e metas de redução de GEE; a oferta e demanda de URE e RCE; o consumo e o preço de fontes de energia fósseis, principalmente carvão, gás e petróleo e; políticas públicas globais e locais sobre mudanças climáticas e de fomento aos projetos de MDL.

### **2.3.2 Estudos econométricos e estocásticos**

Os estudos realizados com base em modelos econométricos, em geral, enfatizam o preço e o risco dos créditos gerados por projetos de IC, os quais geram as URE. Entre os modelos econométricos, destaca-se Chevallier (2009, 2010), que, usando o modelo GARCH, mostra como os indicadores macroeconômicos podem influenciar a dinâmica de preços dos créditos de carbono no mercado futuro. Os resultados indicam que a volatilidade dos preços futuros dos créditos de carbono aumenta quando o vencimento de um contrato de futuros se aproxima.

Outros resultados dos estudos deste autor mostram que o preço da energia proveniente de fontes fósseis, a oferta e demanda dos créditos de carbono, o crescimento do PIB, as características da matriz energética, o crescimento e metas das emissões de GEE e os fatores climáticos são fatores determinantes da variação e do direcionamento dos preços dos créditos de carbono no longo prazo. Por outro lado, a taxa de juros não afeta o preço dos créditos de carbono, por ser um mercado criado recentemente.

Durand-Lasserve, Pierru e Smeers (2010) revelam, com base em um modelo estocástico, como a incerteza sobre metas de emissões de GEE para o período de 2020–2050 pode afetar os preços da energia e dos créditos de carbono no EU ETS, bem como investimentos tecnológicos no setor energético. São considerados dois cenários possíveis: metas de reduções mais altas, e metas de reduções moderadas. Em ambos cenários os preços dos créditos tendem a aumentar até 2050, estendendo esse aumento até 2060 para as metas de reduções moderadas. Após esses anos, os preços dos créditos de carbono caem de modo acelerado.

Pao e Tsai (2010) usam a causalidade de Granger para explicar a relação causal entre crescimento econômico, emissão de poluentes e consumo de energia para Brasil, Rússia, Índia e China (países que formam o BRIC), no período de 1971–2005. Os principais resultados indicam que há uma relação de equilíbrio, no longo prazo, entre as emissões de CO<sub>2</sub>, consumo

de energia e crescimento econômico para os países do BRIC. Ainda, mostram que as elasticidades do consumo de energia e do crescimento econômico explicam o crescimento das emissões de CO<sub>2</sub> e que a escassez de investimentos em infraestrutura de produção de energia pode limitar o crescimento econômico. A maior elasticidade de longo prazo, tanto para o consumo de energia quanto para o crescimento econômico, mostra efeito de aumento das emissões de CO<sub>2</sub> também para igual período.

Pinto et al. (2008) projetam, a partir de modelos econômicos, o comportamento da oferta e da demanda de créditos de carbono, no âmbito dos projetos de MDL, para o período de 2008 a 2012. Para a projeção, os autores utilizam dados históricos da oferta e demanda das RCE e estimativas de emissões de GEE por unidade do PIB de países com metas de redução de emissões. Ainda, consideram que: (a) as quantidades ofertadas e demandadas de créditos de carbono não reagem a variações de preços no mercado à vista de créditos de carbono durante o período projetado; e (b) o consumo desses créditos será efetivado, integralmente, pelos países do Anexo I do Protocolo de Quioto.

Esses autores consideram que a oferta de créditos de carbono depende, entre outros fatores: da quantidade e da atividade do projeto que requer o registro na CEMDL/ONU, do tempo de registro do projeto e da eficácia esperada para cada projeto quanto à geração das RCE. Para a demanda por créditos de carbono, consideram: o ritmo de crescimento econômico dos países com metas estabelecidas de redução das emissões de GEE, o ritmo do avanço tecnológico direcionado à modificação da matriz energética, ao aumento da eficiência energética dos maiores setores emissores de GEE e, o comprometimento dos países com metas redução das emissões de GEE. Todos os cenários para o período analisado apresentam demanda maior do que a oferta de créditos de carbono, esta última considerada inelástica no curto prazo.

Analisando esses estudos econométricos observa-se uma semelhança entre os fatores identificados nos estudo descritivos. O preço dos créditos de carbono (URE e RCE) é determinado pelo preço e demanda de fontes de energia fósseis e emissoras de GEE e oferta e demanda dos próprios créditos de carbono, pelo crescimento econômico, pelo crescimento e metas de redução das emissões de GEE e, pelos fatores climáticos. Ainda mostram que o aumento do consumo de energia e o crescimento econômico ocasionam aumento nas emissões de GEE, com efeito de longo prazo. E, a demanda pelos créditos de carbono depende do crescimento econômico dos países com metas de redução de GEE e da mudança na matriz energética. Por outro lado, a oferta dos créditos de carbono depende dos projetos de MDL, sendo menor que a demanda.

Os estudos que versam sobre o mercado de créditos de carbono baseados em modelos econométricos, em que pese a sua contribuição, são limitados a avaliar quantitativamente os efeitos das variáveis micro e macroeconômicas influenciadas por políticas públicas. Esses modelos também dependem de dados históricos de longos períodos para minimizar erros de heteroestaticidade e multicolinearidade, uma vez que utilizam fortemente ferramental estatístico.

O fato desses modelos não captarem a dinâmica do problema tem como consequência a extrapolação dos comportamentos das variáveis, ao fazer prospecções. Ainda, em sua maioria, estão limitados às variáveis econômicas e não mostram como a alteração dessas variáveis pode modificar a análise de políticas, sendo, portanto, estáticos. Finalmente, os modelos econométricos, quando precisam de atualização para projetar novos cenários dependem da existência e obtenção de novas variáveis, porque são modelos factuais.

### **2.3.3 Estudos baseados em dinâmica de sistemas**

Um dos estudos pioneiros baseado em dinâmica de sistemas foi desenvolvido por Fiddaman (1997, 2002), com o propósito de identificar as características estruturais que apresentam maiores implicações nas políticas sobre mudanças climáticas. O modelo denominado de *Feedback-Rich Energy-Economy* (FREE) analisou políticas com ênfase no preço do crédito de carbono, para um horizonte de tempo que abrange o período de 1960 a 2100. Teve como variáveis endógenas acopladas: produção econômica, investimento, oferta e demanda de energia, esgotamento e desenvolvimento de tecnologias relacionadas à energia. Outras variáveis endógenas (ciclo do carbono e do clima) são acopladas aos demais subsistemas do modelo. Ainda, políticas de preço dos créditos de carbono e da energia são variáveis endógenas que servem como regras de controle. E, as variáveis exógenas que direcionam o comportamento do FREE são: população; fator de produtividade; melhoria da eficiência energética; preço do carvão, gás e petróleo no período histórico de 1960-1990; emissões de CO<sub>2</sub> de fontes não energéticas e; outros GEE além do CO<sub>2</sub>.

Os principais resultados do FREE mostram que o esgotamento das fontes de energia como carvão e gás é um problema no curto prazo, inclusive para o mercado de créditos de carbono. Ainda, o autor aduz que é difícil definir políticas que levem os países se

comprometerem com metas de redução das emissões de GEE quando há incerteza sobre a continuidade do Protocolo de Quioto.

Em outro estudo, Fiddaman (2007) discute a dinâmica das políticas quanto às mudanças climáticas. O autor compara as diversas políticas possíveis. Entre essas políticas, defende que usar um mecanismo de mercado, tal como o mercado de créditos de carbono, é a política mais eficiente para reduzir as emissões de GEE. Entretanto, salienta que o mercado de créditos de carbono difere do mercado de *commodities*, porque a oferta de emissões é determinada pelas políticas governamentais de redução das emissões de GEE, com ajuste de longo prazo, enquanto a demanda pela compra dos créditos de carbono tem ajuste no curto prazo. Essa defasagem entre oferta e demanda cria tensões e incertezas que refletem no preço dos créditos de carbono.

Ainda, segundo este autor, para conciliar a demanda flutuante com a oferta constante dos créditos, é necessário que os ofertantes mantenham estoques de créditos de carbono, para servir como um *buffer* no mercado de créditos de carbono. Porém, essa medida pode ampliar a incerteza neste mercado, ao invés de reduzi-la, porque manter estoques de créditos de carbono leva a prorrogar seu prazo de validade, logo dá condições para criar bolhas no mercado. De outro lado, a potencial volatilidade do mercado de créditos de carbono no curto prazo ocasiona aos países compradores dos créditos e avessos ao risco, incentivos para estabelecer metas modestas de redução das emissões de GEE, a fim de evitar a elevação dos preços desses créditos.

Ford, Vogstad e Flynn (2007) simulam o preço da energia renovável, baseada na geração de energia eólica no noroeste dos EUA, para o período de 2006 a 2020. Os autores denominam o modelo de *Tradable Green Certificates* (TGC). As principais variáveis do modelo para simular as tendências de preço dos TGC foram: preço da energia renovável, oferta de energia renovável pela companhia de geração, demanda de energia renovável pela companhia de distribuição, capacidade eólica e capacidade eólica em construção.

Os autores concluem que o governo dos EUA deve considerar o mercado de energia eólica e de créditos de carbono na definição de suas políticas públicas sobre energia e mudanças climáticas. O modelo também mostra que há um aumento na demanda por energia eólica, refletindo positivamente no preço desta energia e no preço do TGC, assim que o mercado é aberto (2006 a 2010) e, posteriormente o preço sofre uma queda (2011-2020).

Di Giulio e Migliavacca (2009) desenvolveram um estudo sobre as reduções das emissões de GEE no setor de energia, na Itália. O modelo, denominado de *Italy's Carbon Emissions* (ICE), faz parte de outro modelo mais amplo: o IRED, o qual simula diferentes

cenários sobre o crescimento econômico, a demanda de energia fóssil e renovável para a Itália no período de 2005 a 2030. O principal resultado do modelo mostra que a Itália terá necessidade significativa de comprar créditos de carbonos originados de projetos de MDL caso suas políticas sobre mudanças climáticas não sejam implementadas plenamente.

Outro estudo foi realizado por Saysel e Hekimoğlu (2010), que desenvolveram simulações sobre políticas públicas ligadas à substituição da matriz energética da Turquia e emissão de GEE. Os autores consideraram a necessidade de a Turquia assumir metas de redução das emissões de GEE a partir da substituição da sua matriz energética.

O modelo contempla seis variáveis que representam diferentes aspectos sobre a produção de energia: investimentos, preço e demanda, alocação da demanda, geração e transmissão, recursos naturais e financeiro. O horizonte de tempo é de 20 anos (2010 a 2030). Os resultados indicam que os elevados custos de produção de energia solar e eólica constituem um limite para a redução das emissões de GEE no país.

Finalizando, o estudo realizado por Cárdenas, Franco e Dyner (2011) avaliou a possível consequência do EU ETS para a estrutura do mercado de energia elétrica e redução de emissões de GEE no Reino Unido. O horizonte de tempo considerado foi de 2008 a 2020. As variáveis endógenas do modelo são: preço das URE, preço da energia, demanda de energia, oferta de energia, margem, capacidade instalada, incentivos para investimento e emissões. E, as variáveis exógenas são custo tecnológico de produção de energia e crescimento econômico. Os principais resultados mostram que os preços baixos das EA não prejudica o atingimento da meta de reduções de GEE no Reino Unido.

Nota-se que os estudos baseados em dinâmica de sistemas tiveram seus objetivos focados na análise de políticas públicas sobre as mudanças climáticas, redução das emissões de GEE e alteração da matriz energética. Destaca-se o estudo de Fiddaman (2007), cuja maior contribuição foi apresentar como a dinâmica do mercado de créditos de carbono implica na volatilidade do preço desses créditos, no contexto do comércio de URE. Por sua vez, a contribuição do modelo computacional baseado em dinâmica de sistemas proposto nesta pesquisa se dá pelo fato de contemplar a análise da política do mercado de créditos de carbono sob a perspectiva da demanda, considerando o contexto brasileiro como agente de oferta. Essa perspectiva não foi alcançada em nenhum dos estudos apresentados nesta seção.

### 3 METODOLOGIA DE MODELAGEM BASEADA EM DINÂMICA DE SISTEMAS

Modelagem, de acordo com Pidd (1998), é uma simplificação de parte da realidade para algum propósito definido, de modo que seja possível entender, planejar, gerenciar e controlar a realidade organizacional modelada. Ford (1999) revela que um modelo é um substituto para um sistema real (o mundo real), usado para captar algo sobre os sistemas que eles representam. Para Sterman (2000), modelo é uma representação de um sistema, um conjunto de elementos interdependentes.

Com base nestes autores compreende que desenvolver um modelo de simulação computacional é um processo iterativo e, geralmente, requer que seja realizado em etapas. Ford (1999) sugere que modelos baseados em dinâmica de sistemas<sup>7</sup> sejam desenvolvidos em oito etapas: a) familiarizar com o problema a ser modelado; b) definir a dinâmica do problema (modo de referência); c) desenvolver o diagrama de laço causal (DLC); d) desenvolver o diagrama de estoque e fluxo (DEF); e) estimar os valores dos parâmetros; f) executar o modelo de simulação computacional; g) analisar a sensibilidade do modelo de simulação computacional e; h) analisar as políticas. Por sua vez, Sterman (2000) sugere cinco etapas: a) definir os limites do modelo (o problema); b) formular a hipótese dinâmica; c) executar o modelo de simulação computacional; d) validar o modelo de simulação computacional e; e) analisar políticas. E, Bossel (2007) sugere quatro etapas: a) desenvolver o modelo conceitual; b) desenvolver o modelo de simulação computacional; c) simular o comportamento do modelo desenvolvido e; d) analisar as políticas.

De modo geral, os métodos sugeridos apresentam a mesma sequência de etapas, com a diferença apenas no aspecto de maior ou menor detalhamento do processo de modelagem. Assim, optou-se pela metodologia de modelagem de simulação computacional baseada em dinâmica de sistemas sugerida por Ford (1999) por ser mais detalhada, mas as contribuições de Sterman (2000) e de Bossel (2007) também foram úteis para desenvolver o modelo proposto nesta pesquisa. Por ser um modelo computacional, foi utilizado o software *Vensim DSS*, versão 5.8c, fornecido pela *The Ventana Simulation Environment*. A escolha desse software foi devido a sua interface amigável, principalmente, para a inserção e edição das equações do modelo bem como pela possibilidade de verificação de variáveis sem função no modelo e de consistência das unidades utilizadas (erros de unidade).

---

<sup>7</sup> Os conceitos fundamentais sobre modelagem baseada em dinâmica de sistemas estão apresentados no Apêndice A.

Os parágrafos seguintes descrevem a metodologia utilizada, caracterizando cada etapa.

▪ *Primeira etapa: Familiarizar com o problema*

Nesta etapa Sterman (2000) sugere que duas perguntas sejam respondidas: Qual é o problema? Por que o objeto de estudo é um problema? Para responder estas questões realizou um levantamento bibliográfico e de dados sobre o mercado de créditos de carbono e projetos de MDL. O levantamento bibliográfico foi desenvolvido no Capítulo 2 desta pesquisa e baseou-se, principalmente, em materiais publicados sob a forma de livros e relatórios de pesquisas (artigos, teses, dissertações). Esse levantamento contribuiu para conhecer e definir que o problema nesta em um contexto dinâmico bem como possibilitou identificar as principais variáveis do modelo e as suas relações.

Por ora, a pesquisa de dados sobre o mercado de créditos de carbono e os projetos de MDL foi realizada por meio de consulta a banco de dados públicos, tais como: *Carbon Finance Unit The World Bank*, *European Energy Exchange*, *European Environment Agency*, Ministério da Ciência e Tecnologia do Brasil, *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), UNEP Riso Centre CDM, EUROSTAT e *The World Bank*. Os dados coletados nestas bases formou o banco de dados desta pesquisa, o qual subsidiou o desenvolvimento do modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas.

Os dados coletados nessas fontes são considerados secundários, pois já foram submetidos a algum tratamento metodológico antes de serem disponibilizados para consulta pública. Isto foi identificado quando se averiguou que diversos dados para o mesmo período poderiam ser obtidos em fontes diferentes. Contudo, cada fonte apresentava um valor distinto para o dado, gerando inconsistência. Mediante isto, optou por usar a fonte considerada mais confiável para aquele dado e que, ao mesmo tempo, tivesse maior abrangência temporal e contemplasse a maior quantidade de variáveis. São exemplos desta situação: dados sobre as variáveis emissões de GEE e Produto Interno Bruto (PIB), os quais foram extraídos do *The World Bank* e; dados pertinentes aos projetos de MDL, inclusive GEE capturados e expectativa de capturar os GEE, que foram extraídos da UNFCCC.

Também cabe mencionar que durante o segundo semestre de 2012 os dados da UNFCCC não estavam atualizados<sup>8</sup>, o que prejudicava o desenvolvimento do modelo computacional. A partir da segunda quinzena do mês de dezembro/2012, após o término da COP-18, esses dados eram atualizados diariamente, de modo que até meados de

---

<sup>8</sup> Os dados disponíveis na UNFCCC são pertinentes aos projetos de MDL, sendo a principal fonte de dados para esse tipo de variável. Alternativamente foi consultado outro banco de dados, indicado pela própria UNFCCC: o UNEP Riso Centre CDM. Contudo, verificou que este banco de dados também tinha a UNFCCC como sua principal fonte, de modo que seus dados também estavam defasados.

fevereiro/2013 ainda ocorria atualização retroativa referente ao ano de 2012. Assim, foi somente a partir de fevereiro/2013 que obteve quantidade suficiente de dados sobre os projetos de MDL para desenvolver o modelo computacional.

Outro aspecto a ser considerado sobre os dados secundários: a necessidade de padronizar as unidades de tempo, ou de medida de quantidade ou de valor monetário. Essa padronização foi necessária porque o *Vensim DSS*, versão 5.8c, requer uniformidade das unidades utilizadas no modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas e os dados obtidos das fontes consultadas não apresentavam essa uniformidade. Assim, as unidades de tempo foram padronizadas em meses; as unidades de medida, especificamente de emissões de GEE, foram padronizadas em Mt e; as unidades de valor monetário utilizou o dólar americano para valorar o preço da Mt de GEE.

▪ *Segunda etapa: Definir o modo de referência e a hipótese dinâmica*

O modo de referência, de acordo com Ford (1999) e Sterman (2000), compreende a caracterização da dinâmica do problema, ou seja, a evolução da principal variável do modelo ao longo do tempo (o horizonte de tempo). Esses autores recomendam que seja apresentado um gráfico que mostre o padrão de comportamento desta variável, cujo eixo com a dimensão temporal seja suficiente para mostrar os efeitos das políticas na dinâmica do problema.

No modelo proposto foram identificadas duas variáveis-chave: emissões de GEE na Europa e captação de GEE pelos projetos de MDL no Brasil. Segundo Ford (1999, p. 172), “Em sistemas mais complexos, o modo de referência pode ser a combinação de duas variáveis-chave”. Ainda, como parte do modo de referência do modelo de simulação baseado em dinâmica de sistemas definiu o horizonte de tempo, considerando os seguintes aspectos:

- a) Os dados de ambas as variáveis devem estar na mesma unidade temporal. Desse modo, os dados da variável “emissões de GEE na Europa” estavam em base anual e os dados da variável “captação de GEE pelos projetos de MDL” em base mensal. Optou-se pela menor base temporal (meses) para que, ao apresentar a curva de comportamento, fosse possível perceber suas alterações de modo mais pontual.
- b) Os dados de ambas as variáveis devem estar na mesma unidade de medida: os dados da variável “emissões de GEE na Europa” estavam em kt e os dados da variável “captação de GEE pelos projetos de MDL” em unidades de RCE, sabendo que uma unidade de RCE é equivalente a uma tonelada de GEE. Assim, os dados destas variáveis foram uniformizadas em Mt.
- c) Os dados de ambas as variáveis devem abranger o mesmo espaço temporal: os dados da variável “emissões de GEE na Europa”, obtidos no *The World Bank* em janeiro/2013,

contemplava os anos de 1968 a 2009 e; os dados da variável “captação de GEE pelos projetos de MDL”, obtidos na UNFCCC, contemplavam o período de dezembro/2005 a dezembro/2012. Com isto, o período inicial do modelo foi definido como dezembro/2005, ou seja, o primeiro mês com dados para ambas as variáveis.

Mediante esses fatos, definiu o horizonte de tempo seguindo um critério de razoabilidade, ou seja, que proporcionasse melhor detalhamento dos resultados de simulação. Por isto, o horizonte de tempo do modelo foi definido em meses (181 meses). O período inicial, com dados históricos, abrange de dezembro/2005 a dezembro/2012, totalizando 85 meses (7 anos e 1 mês). Este período foi definido com base nos dados disponíveis nas fontes consultadas. E, o período final, que corresponde à simulação, é de oito anos, totalizando 96 meses (janeiro/2013 a dezembro/2020). A definição do período final ou de simulação fundamentou-se na decisão da COP-18 em estender a vigência do Protocolo de Quioto até dezembro/2020 e os dados disponibilizados pela UNFCCC e *European Energy Exchange* para variáveis sobre os projetos de MDL e preço dos créditos de carbono, respectivamente, também estarem limitados até esta data. Portanto, o horizonte de tempo para o modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas abrange um total de 181 meses (dezembro/2005 a dezembro/2020).

Observa a importância de que quanto maior o período do horizonte de tempo, melhor é a percepção da interveniência das variáveis no comportamento do sistema. Não obstante, reconhece que o horizonte de tempo limitado em 181 meses pode não ser suficiente para capturar as perturbações no comportamento do modelo. Porém, a carência de dados confiáveis para período posterior ao ano de 2020 dificultou a ampliação do período de simulação de maneira plausível.

Complementarmente, esta etapa também inclui o desenvolvimento da hipótese dinâmica. A hipótese dinâmica compreende o mapa mental que explica a dinâmica do problema (STERMAN, 2000), caracterizado no modo de referência. Em outras palavras, mostra o laço causal entre as principais variáveis do modelo mental bem como o seu comportamento.

Desse modo, a definição das variáveis-chave (modo de referência) e o desenvolvimento da hipótese dinâmica foram concomitantes e provenientes da familiarização com o problema (etapa 1, desenvolvida no Capítulo 2). E, a apresentação do modo de referência e da hipótese dinâmica, do modelo proposto neste estudo, está no Capítulo 4, seção 4.1.

▪ *Terceira etapa: Desenvolver o Diagrama de Laço Causal*

O DLC compreende o modelo conceitual, no qual deve conter a variável-chave que está no modo de referência e na hipótese dinâmica, bem como as demais variáveis do problema, com a finalidade de apresentar os principais laços do modelo de simulação baseado em dinâmica de sistemas. Além disso, o DLC define as variáveis endógenas, exógenas e excluídas do modelo.

As variáveis endógenas, de acordo com Sterman (2000), determinam a dinâmica do modelo de simulação e especificam a sua estrutura e as regras de interação (as regras de decisão). Por sua vez, as variáveis exógenas, também denominadas de constantes ou parâmetros, são aquelas que estão fora dos limites do modelo de simulação, mas interligadas a ele. Essas variáveis geram mudanças no comportamento das variáveis endógenas (FORD, 1999). Por fim, segundo Sterman (2000), também devem ser apresentadas as variáveis que foram excluídas do modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas.

Além de desenvolver o DLC, tanto Ford (1999) quanto Sterman (2000) recomendam que as variáveis endógenas, exógenas e excluídas sejam apresentadas de modo conciso e sob a forma de figura ou quadro, para conhecer o escopo do modelo de simulação. Seguindo esses autores, o DLC e o quadro com as variáveis que definem os limites do modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas aqui proposto está apresentado no Capítulo 4, seção 4.2.

Para desenvolver o DLC do modelo proposto nesta pesquisa, as variáveis endógenas e exógenas foram identificadas e definidas, a priori, a partir da pesquisa bibliográfica apresentada no Capítulo 2. Complementarmente, seguindo a recomendação de Sterman (2000), foram realizadas entrevistas<sup>9</sup> com especialistas que atuam em empresas nacionais de consultoria e assessoria em desenvolvimento de projetos de MDL para verificação das variáveis identificadas e suas relações.

Não obstante, foram desenvolvidas versões preliminares do DLC. O Apêndice B mostra o DLC preliminar do modelo desenvolvido nesta pesquisa. A cada nova versão do DLC iniciava o desenvolvimento do Diagrama de Estoque e Fluxo, na quarta etapa. Então, ao desenvolver as equações do modelo (Apêndice C) verificava-se que algumas variáveis não tinham dados suficientes e confiáveis para serem modeladas como parâmetros ou eram variáveis qualitativas, cujo comportamento o modelo não conseguia capturar ou se adotasse

---

<sup>9</sup> As entrevistas realizadas foram semiestruturadas e os dados obtidos foram considerados primários. O apêndice O roteiro das entrevistas está no Apêndice E.

algum valor seria sem fundamento estatístico ou científico. Destarte, a versão final do DLC do modelo proposto está apresentada no Capítulo 4, seção 4.2.

Entre as aprendizagens obtidas nesta etapa merece destaque o processo de explicitar o modelo mental, sob a forma do DLC. Esse processo foi enriquecedor por ter possibilitado a compreensão da função de cada variável no modelo, por conseguinte, o comportamento do modelo. Esta aprendizagem foi essencial para o desenvolvimento e análise dos resultados obtidos, realizados nas etapas finais.

Outra aprendizagem importante foi da decisão de quais variáveis deveriam ser excluídas do modelo. Essa aprendizagem foi um processo gradual e circunstanciado de criticidade, ao considerar os diversos aspectos que envolvem a variável excluída e suas relações com as demais variáveis do modelo. Assim, a exclusão das variáveis ocorreu mediante razoabilidade e coerência ao propósito do modelo baseado em dinâmica de sistemas desenvolvido nesta pesquisa.

- *Quarta etapa: Desenvolver o Diagrama de Estoque e Fluxo*

O DEF compreende o desenvolvimento matemático do DLC e enfatiza a estrutura física do modelo de simulação computacional ao apresentar os estoques, os fluxos de entrada ou de saídas, os parâmetros, as variáveis auxiliares bem como as fontes e sumidouros (STERMAN, 2000). Nesta pesquisa, o DEF foi desenvolvido em concomitância ao aperfeiçoamento do DLC. À medida que o DLC tinha alguma alteração, essa mudança era ajustada no DEF, principalmente os parâmetros e as variáveis auxiliares. Por isto, cada vez que o DEF era modificado, realizava o teste de verificação das variáveis, para identificar se havia alguma variável sem uso no modelo e, se necessário, realizar a correção.

Da mesma maneira que o DLC possibilitou a aprendizagem sobre o comportamento do modelo, por utilizar o raciocínio analítico, o DEF possibilitou o desenvolvimento da lógica matemática. Conforme Sterman (2000), ao desenvolver o DEF, o modelo deve ser analisado de tal modo que os estoques não se tornem negativos. Em outras palavras, compreendeu a determinação das equações para os estoques, os fluxos de entrada ou de saídas, os parâmetros e, para as variáveis auxiliares, bem como na análise dos laços negativos do modelo desenvolvido.

O DEF está apresentado na seção 4.3 do Capítulo 4.

- *Quinta etapa: Estimar os valores dos parâmetros*

Esta etapa foi realizada em conjunto ao desenvolvimento do DEF. De acordo com Forrester (1980), a identificação e definição dos parâmetros advêm de dados mentais (experiência e observação), dados escritos e dados numéricos.

Os dados numéricos podem ser tratados por meio de técnicas estatísticas (média, desvio padrão e correlação), enquanto os dados mentais e os dados escritos podem ser tratados por meio de técnicas qualitativas, que muitas vezes são consideradas arbitrárias (STERMAN, 2000). Este mesmo autor comenta que as duas técnicas devem ser utilizadas conjuntamente porque, para Ford (1999), omitir a estimativa de valores dos parâmetros que não tenham dados numéricos é equivalente a assumir que esses parâmetros tenham valor zero.

Ford (1999) também comenta que, além de estimar o valor de um parâmetro, deve verificar quão sensível é o comportamento do modelo face às variações do parâmetro estimado. Em outras palavras, os parâmetros compreendem as variáveis exógenas do modelo de simulação baseado em dinâmica de sistemas, as quais causam mudanças no comportamento do modelo, isto é, afeta as variáveis endógenas (os estoques no DEF). Por isto, Ford (1999) sugere que os parâmetros devem ser estimados com acurácia e, em seguida, testá-los em condições extremas para capturar a influência do parâmetro no comportamento do modelo.

Pelo fato que estimar os valores de um parâmetro compreende obter os dados, tratá-los qualitativamente ou estatisticamente, inseri-los no modelo e analisar a sensibilidade do modelo ao parâmetro, esta etapa foi, sem dúvida, uma das mais exaustivas de todo o processo de desenvolvimento do modelo proposto. Assim, para estimar os valores dos parâmetros foi necessário obter os dados; uniformizar as unidades dos dados para todas as variáveis; realizar testes estatísticos, tais como média, desvio padrão e correlação; identificar os dados qualitativos a partir da literatura consultada e confirmá-los com especialistas através de entrevistas semiestruturadas (Apêndice E) e; construir as equações do modelo (Apêndice C), as quais são necessárias para a executá-lo.

Durante a obtenção dos dados verificou-se que havia inconsistência entre as fontes diferentes sobre um mesmo dado. Além disso, quando estes dados foram submetidos ao tratamento estatístico, apresentaram excessiva aleatoriedade e baixa correlação, de modo que não permitiu o uso de funções estatísticas de projeção no modelo de simulação. Esses resultados estatísticos podem ser justificados pelo curto período de tempo histórico e/ou pelo instrumento de coleta de dados e metodologia de tratamento utilizada pela fonte consultada, quando esta obteve os dados brutos.

Diante disto, a solução encontrada foi, primeiramente, retornar à etapa de familiarização com o problema e identificar na literatura consultada informações adicionais que expressassem tendência e interdependência entre duas variáveis. Em seguida, utilizou de

questionamentos com especialistas que prestam serviços de assessoria e consultoria em desenvolvimento de projetos de MDL para confirmar ou não o que foi verificado na literatura.

Assim, com base na literatura consultada e nas entrevistas, decidiu-se que, para diminuir os efeitos da excessiva aleatoriedade e baixa correlação dos dados, a solução mais plausível era usar a geração de números aleatórios uniformemente distribuídos entre os valores mínimo e máximo (distribuição normal) sobre os dados coletados, principalmente nos dados extraídos do *The World Bank*. Para isto utilizou-se a função *RANDOM NORMAL*( $\{min\},\{max\},\{mean\},\{stdev\},\{seed\}$ ) do *Vensim DSS*, versão 5.8c, para gerar números aleatórios. Os parâmetros dessa função são definidos abaixo:

- **{min}** – assume o valor mínimo da simulação randômica. Foi estimado como a média das observações dos períodos anteriores  $\{mean\}$ , menos o desvio-padrão dessas observações. Assim tem-se que:  $\{min\} = \{mean\} - \{stdev\}$ .

- **{max}** – assume o valor máximo da simulação randômica. Foi estimado como a média das observações dos períodos anteriores  $\{mean\}$ , acrescido do desvio-padrão dessas observações. Assim tem-se que:  $\{max\} = \{mean\} + \{stdev\}$ .

- **{mean}** – média das observações dos períodos anteriores.

- **{stdev}** – desvio-padrão em relação à média.

- **{seed}** – no *Vensim DSS*, versão 5.8c, esse parâmetro pode ser utilizado para gerar *delays* na função randômica. Utilizando valores diferentes de “*seed*” em uma mesma variável, é possível, por exemplo, observar diferenças nas curvas de comportamento dessa variável. Como o objetivo era obter congruência nas variações randômicas de todas as variáveis, foi utilizado “*seed=1*” em todas as variáveis, o que significa atraso de um ano nas variáveis.

Desse modo, os dados submetidos à variação randômica foram gerados dentro de uma curva normal. E, ao realizar a simulação os dados gerados apresentam relação com os dados reais. Ou seja, evita gerar perturbações no comportamento do modelo que não correspondem a realidade observada.

A uniformização dos dados das variáveis foi necessária porque definiu que horizonte de tempo do modo de referência seria em meses. Com isto, os dados de algumas variáveis que eram, originalmente, anuais, foram uniformizados para mês, usando a média simples. Outras uniformizações necessárias foram de unidade monetária e de unidade de medida. Todas essas uniformizações foram comentadas na segunda etapa (modo de referência e hipótese dinâmica).

Por fim, sempre que ajustava algum parâmetro era realizado o teste de verificação das unidades das variáveis para confirmar a consistência entre as unidades usadas. Caso fosse identificada alguma inconsistência de unidade, a mesma era corrigida.

Os valores estimados para os parâmetros do modelo aqui proposto estão apresentados na seção 4.4 do Capítulo 4.

- *Sexta etapa: Executar o modelo de simulação computacional*

Segundo Ford (1999), esta etapa tem a finalidade de executar o modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas e comparar como modo de referência (Etapa 2). É a primeira oportunidade de testar o modelo de simulação. Se o resultado da simulação computacional corresponder ao modo de referência significa que o modelo é válido. Caso contrário, é necessário voltar nas etapas precedentes para realizar as correções e os ajustes necessários.

De maneira similar ao que aconteceu com o desenvolvimento do DLC, DEF e estimação dos valores dos parâmetros, a execução do modelo de simulação computacional ocorreu inúmeras vezes ao longo do seu processo de desenvolvimento. De fato, considera-se que da terceira até a sexta etapa é um processo iterativo: à medida que o DLC é aprimorado, o DEF também é. O desenvolvimento do DEF é concomitante à estimação do valor dos parâmetros e à execução do modelo de simulação computacional. Retornar em qualquer uma destas etapas, por consequência, as etapas seguintes eram refeitas.

Assim, a cada alteração do DLC e/ou DEF e cada execução do modelo de simulação computacional fazia algum aprimoramento, até que obteve um resultado simulado que gerou gráficos correspondentes ao modo de referência das variáveis-chave. Ao obter esse resultado, considerou-se que o modelo estava válido e, então, foi submetido aos testes de sensibilidade (sétima etapa).

O resultado da execução do modelo de simulação, após todas as calibrações necessárias está apresentado na seção 4.5, do Capítulo 4.

- *Sétima etapa: Analisar a sensibilidade do modelo de simulação computacional*

Nesta etapa, o modelo foi executado diversas vezes com alterações nos valores dos parâmetros, inclusive em situações extremas. O objetivo é verificar, depois de cada teste, a sensibilidade do comportamento do modelo mediante mudanças nos valores dos parâmetros. Se depois de cada teste obtiver o modo de referência, significa que o modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas é robusto. Caso contrário, conforme orienta Ford (1999), deve retornar para a Etapa 5 e estimar novamente os valores dos parâmetros.

Foram realizados testes de sensibilidade em parâmetros e em variáveis de fluxos. No *Vensim DSS*, versão 5.8c, em cada teste de sensibilidade são realizadas 2.000 simulações, conforme definição dada pelo software. Os testes de sensibilidade foram realizados em parâmetros e em variáveis de fluxos. Por diversas vezes, após cada rodada de testes houve a necessidade de realizar pequenos ajustes no DEF e nas equações de alguns parâmetros, até obter o modo de referência. Assim, observou que esta etapa do modelo integrou as etapas precedentes, evidenciando que o processo de modelagem usando a dinâmica de sistemas é sistêmico e interativo.

Os resultados dos testes de sensibilidade estão apresentados no Capítulo 4, seção 4.6.

▪ *Oitava etapa: Analisar as políticas do Protocolo de Quioto*

Esta etapa consiste em executar o modelo diversas vezes, com variações nos parâmetros atribuídos às variáveis que exprimem a concepção do modelo (STERMAN, 2000). Em outras palavras, são alterados os valores de variáveis que tem controle (variáveis endógenas) para, em seguida, submeter o modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas ao teste de sensibilidade e verificar a sua robustez.

Nesta etapa, a literatura sobre dinâmica de sistemas menciona a realização de análise de políticas e de cenários. Conforme Bossel (2007), análise de cenários, em dinâmicas de sistemas, é desenvolver prospecções a partir da análise de políticas e, essas prospecções devem ter um longo período de tempo para auxiliar a tomada de decisão. Ainda o autor comenta que, de acordo com o propósito do modelo, estabelecido na hipótese dinâmica, esta etapa pode contemplar somente a análise de políticas ou análise de políticas e de cenários. Contudo, segundo Bossel (2007), para incluir a análise de cenários é essencial que, na etapa da familiarização com o problema, sejam identificadas possíveis políticas que venham mudar o ambiente e orientem, mediante prospecções probabilísticas, a definição de estratégias.

Desse modo, definiu-se para esta pesquisa, que análise de políticas compreende a análise dos efeitos das políticas vigentes que atuam sobre as variáveis do modelo, sem modificar o seu ambiente. Por sua vez, a análise de cenário compreende possíveis estados futuros (mudança no ambiente sem poder controlar), onde cada estado tem uma probabilidade de ocorrência, formando uma matriz. Essa matriz combina as possíveis políticas e os possíveis cenários para gerar aprendizagem. A aprendizagem auxilia a tomada de decisão (definição de estratégias) com o propósito de maximizar a utilidade esperada (os resultados da decisão).

Diante disto, o modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas desenvolvido nesta pesquisa se propõe analisar políticas em vigência concernentes as emissões de GEE pela Europa; ao desenvolvimento de projetos de MDL no Brasil e; a

contribuição dos projetos de MDL no Brasil para a compensação das emissões de GEE na Europa. Não foi possível desenvolver a análise de cenários pela ausência, na literatura consultada, de indicações sobre tendências para definição de novas metas de redução das emissões de GEE pela Europa após o ano de 2020, por exemplo. O próprio fato da COP-18 ter decidido que um novo acordo global será negociado a partir de 2013, para aprovação até o ano de 2015, dificulta qualquer suposição do que pode ser as novas políticas sobre as emissões, captura e mitigação de GEE para, então, analisar possíveis cenários.

Cada rodada de análise de políticas eram realizadas 2.000 simulações utilizando análise multivariada, a partir da média e desvio padrão, conforme definido pelo *Vensim DSS*, versão 5.8c. O resultado da simulação geram gráficos com intervalos de confiança de 50%, 75%, 95% e 100%.

Os resultados da análise de políticas estão apresentados no Capítulo 4, seção 4.7.

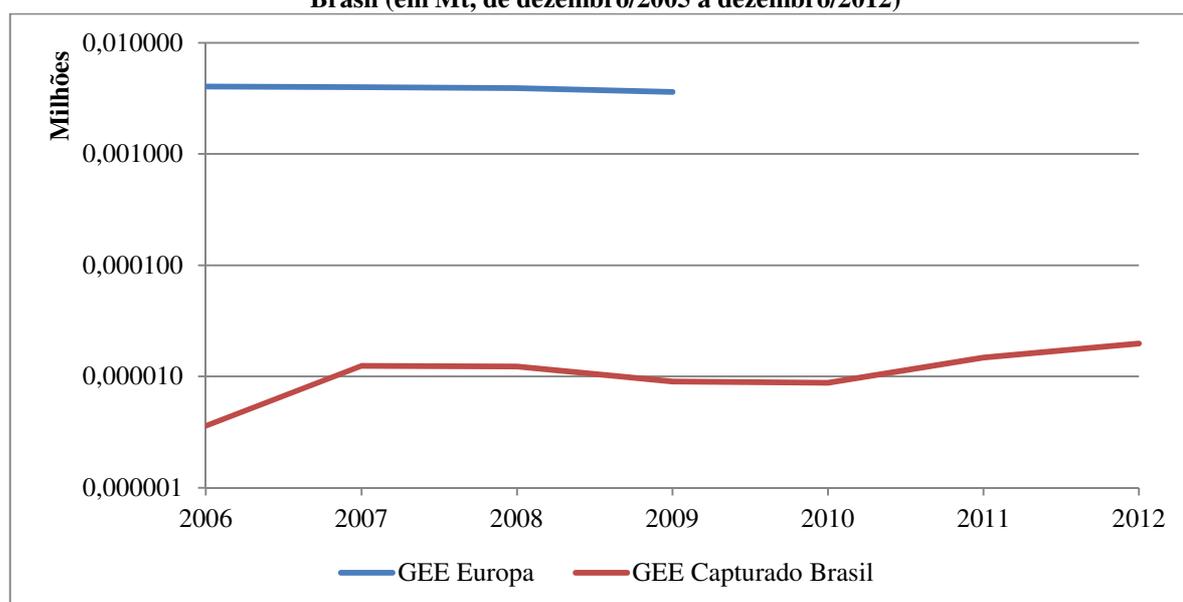
## 4 MODELO DE DEMANDA DE CRÉDITOS DE CARBONO

Este capítulo apresenta o modelo computacional baseado em dinâmica de sistemas proposto para esta pesquisa, doravante denominado de Modelo de Demanda de Créditos de Carbono (MDCC). As seções deste capítulo apresentam e analisam os resultados obtidos cada uma das etapas do processo de modelagem, conforme foi apresentado no Capítulo 3.

### 4.1 MODO DE REFERÊNCIA E HIPÓTESE DINÂMICA

Conforme foi descrito no Capítulo 3, o modo de referência do MDCC tem como horizonte de tempo 181 meses (dezembro de 2005 a dezembro de 2020), sendo o período inicial ou histórico compreendido de 85 meses: período 1 = dezembro/2005 até o período 85 = dezembro/2012. O Gráfico 5 mostra o comportamento das variáveis “emissões de GEE na Europa” e “captura de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil” para o período de Dezembro/2005 (período 1) à Dezembro/2012 (período 85). Os dados utilizados são reais e foram obtidos, respectivamente, no *The World Bank* e na UNFCCC.

**Gráfico 5 – Comportamento das emissões de GEE na Europa e captura de GEE dos projetos de MDL do Brasil (em Mt, de dezembro/2005 a dezembro/2012)**



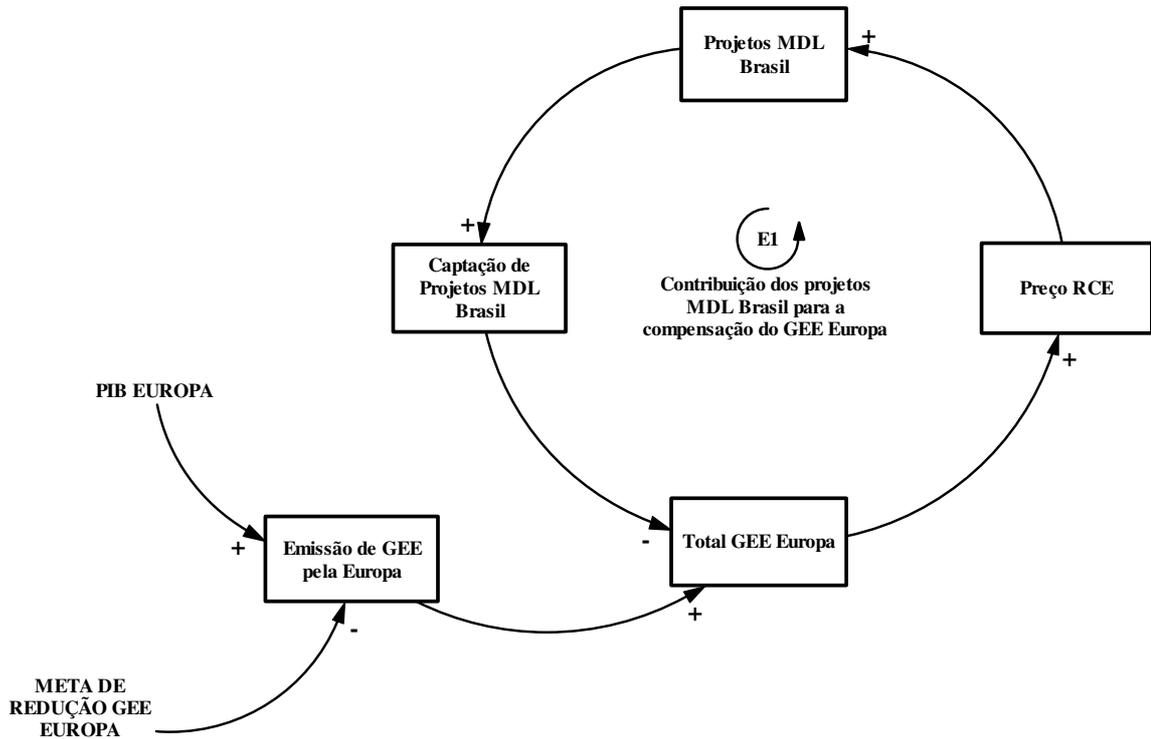
Fonte: dados da pesquisa (2013).

A análise do Gráfico 5 pode sugerir um comportamento quase linear das emissões de GEE. Contudo, deve ser considerado que o curto período de tempo (eixo X) pode não ter sido suficiente para evidenciar a curval real de comportamento (crescimento ou declínio) e, o uso de escala logarítmica no eixo Y contribuiu para esta aparente linearidade das emissões de GEE na Europa. No entanto, ao analisar os dados reais das emissões de GEE pela Europa observou que, para o período de 2006-2009, houve uma redução de, aproximadamente, 10,41% (420 Mt CO<sub>2</sub>), devendo considerar que neste período pode ter o efeito da crise econômica mundial. Por sua vez, a captura de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil aponta para uma curva com tendência de crescimento, neste período histórico. Ainda deve considerar o uso de escala no eixo Y, onde a captura de GEE pelos projetos de MDL é bem inferior às emissões desses gases.

Cabe ressaltar que a variável “emissão de GEE da Europa” teve período inicial menor: 49 meses (período 1 = dezembro/2005 até o período 49 = dezembro/2009). Isto ocorreu porque o banco de dados do *The World Bank* estava atualizado até esta data. Por consequência, o período de simulação desta variável é 132 meses (período 50 = janeiro/2010 até o período 181 = dezembro/2020).

Uma vez definido o modo de referência (Gráfico 5), logo as variáveis-chaves do modelo (emissões de GEE pela Europa e captura de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil), desenvolveu-se a hipótese dinâmica do MDCC, como mostra a Figura 4.

Figura 4 – Hipótese dinâmica do Modelo de Demanda de Créditos de Carbono



Fonte: dados da pesquisa (2013).

A hipótese dinâmica sugere um comportamento de equilíbrio entre o total de emissões de GEE na Europa e a captação desses gases pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil. De acordo com Sterman (2000) e Ford (1999), esse tipo de comportamento tem o propósito de neutralizar as perturbações que modificam o estado do sistema para longe do seu objetivo. Desse modo, pode-se depreender que o comportamento de equilíbrio refere-se ao fato que os projetos de MDL contribuem para compensar o excedente de emissões de GEE pela Europa. Ou seja, se a Europa atinge o limite de emissões de GEE o sistema está no equilíbrio buscado.

Ainda, a hipótese dinâmica supõe que:

- O PIB da Europa está diretamente relacionado à emissão de GEE.
- As metas de redução de emissão de GEE definidas pelos países europeus têm sido eficazes.
- O aumento das emissões de GEE na Europa tem relação com o aumento no preço dos créditos de carbono.
- O aumento no preço dos créditos de carbono tem relação com o aumento na quantidade de projetos de MDL desenvolvidos no Brasil.
- A captação de GEE dos projetos MDL desenvolvidos no Brasil contribui para a compensação da emissão desses gases na Europa, em um ciclo de equilíbrio.

Esses pressupostos são desenvolvidos e analisados na seção 4.6, quando se realiza a análise de sensibilidade do MDCC.

Com base na hipótese dinâmica foi desenvolvido o DLC, apresentado na seção 4.2.

#### 4.2 DIAGRAMA DE LAÇO CAUSAL

Para desenvolver o DLC, isto é, o modelo conceitual foi necessário definir os limites do modelo. Esses limites compreendem as variáveis endógenas, exógenas, auxiliares e excluídas, bem como os fluxos. O Quadro 4 apresenta os limites do MDCC.

**Quadro 4 – Limites do Modelo de Demanda de Créditos de Carbono**

<b>Variáveis Endógenas</b>	<b>Variáveis Exógenas</b>	<b>Fluxos</b>	<b>Variáveis Auxiliares</b>	<b>Variáveis Excluídas</b>
Captação GEE Projetos MDL Brasil	CAPTAÇÃO DE PROJETOS MDL BRASIL RENOVADOS	captando GEE Projetos MDL Brasil	captação por projeto 2005-2012	Crise econômica
Projetos MDL Brasil	CAPTAÇÃO PROJETOS MDL BRASIL 2005-2012	GEE capturado Brasil	captação por projeto 2013-2020	Energia fóssil
Total GEE Europa	CAPTAÇÃO PROJETOS MDL BRASIL 2013-2020 PROJETADO	produção GEE Europa	captação projetos MDL Brasil 2005-2012 ind	Incentivos projetos MDL Brasil
Total Projetos Vencidos	EMIÇÃO GEE EUROPA 2005-2009	projetos MDL aprovados	captação projetos MDL Brasil 2013-2020	Outros países hospedeiros projetos MDL
Transações Europa	META REDUÇÃO GEE EUROPA 2005-2009	projetos MDL vencidos	emissão GEE Europa 2005-2009 ind	Políticas públicas ambientais Europa
	META DE REDUÇÃO GEE EUROPA 2010-2020 PROJETADO	valor da captação GEE Europa	emissão GEE Europa 2010-2020 projetado	Taxa de retorno projetos MDL
	PIB EUROPA 2005-2009		meta de redução GEE Europa 2005-2009 ind	
	PIB EUROPA 2010-2020 PROJETADO		PIB Europa 2005-2009 ind	
	PREÇO RCE 2005-2012		preço RCE futuro 2013-2020 projetado	
	PREÇO RCE FUTURO 2013-2020		preço RCE 2005-2012 ind	

continua...

continuação do Quadro 4

	PROJETOS MDL APROVADOS 2005-2012		projetos aprovados 2005-2012 ind	
	TAXA DE SUCESSO NA EMISSÃO DE RCE		projetos MDL aprovados projeção 2013-2020	
	TAXA DE VENCIMENTO DOS PROJETOS MDL		relação PIB / emissão GEE Europa	

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Como pode observar no Quadro 4, algumas variáveis auxiliares tem o termo “ind”, que significa indexação. Foi necessário criar essas variáveis para que as equações efetivasse o cálculo com o correto mês de referência e porque o *Vensim DSS*, versão 5.8c, não apresenta comportamento gráfico para variáveis *lookup*<sup>10</sup>.

As variáveis excluídas são aquelas que não foram consideradas no processo de simulação do MDCC. A variável “crise econômica” não foi considerada porque entende que parte do seu efeito está nas variáveis relacionadas ao PIB da Europa. Ainda, o conceito de crise econômica não contempla apenas a produção interna de um país ou bloco econômico. Outros fatores econômicos fazem parte deste conceito, tais como: taxa de desemprego, liquidez financeira, índice de inflação e taxa de juros do país.

A variável “Energia fóssil” refere-se às fontes de energia da Europa. Embora reconheça que o preço deste tipo de energia pode ter relação causal com o preço da RCE, o escopo do MDCC não contempla o preço da RCE como principal variável. Ainda, entende-se que os efeitos do consumo de energia fóssil estão imbricados nas emissões de GEE pela Europa e no desenvolvimento de projetos de MDL, principalmente em países hospedeiros cuja matriz energética também é fóssil, diferentemente do Brasil.

E, a variável “Taxa de retorno projetos MDL” também foi excluída do MDCC porque o propósito do modelo não é simular aspectos financeiros de investimentos nestes tipos de projetos. Se considerasse a taxa interna de retorno, outras variáveis atinentes a projetos de investimentos, tais como taxa mínima de atratividade (taxa de desconto do projeto); fluxos de caixa; valor do investimento e; projetos uni, bi ou multilaterais deveriam ser incluídas no modelo. Ainda, entende-se que a taxa de sucesso de emissão dos créditos de carbono e o

<sup>10</sup> Variáveis *lookup*, de acordo com o *Vensim DSS*, versão 5.8c, especificam uma relação não linear entre a entrada e a saída de dados em pares (x, y). Ou seja, a variável de saída (y) é alterada pela variável de entrada (x).

preço desses créditos (variáveis consideradas no modelo) contemplam, parcialmente, essa variável excluída por representar o efetivo retorno dos projetos de MDL.

Também foi excluída a variável “Outros países hospedeiros projetos MDL”. Inicialmente tentou modelar essa variável como exógena, mas verificou que sua inclusão exigia segregá-la em outras variáveis, cujos dados não eram possíveis obter com confiabilidade e consistência. Entre esses dados, cita as especificidades entre os países quanto às linhas de base dos projetos de MDL que são desenvolvidos e reflete na capacidade de capturar os GEE. Em outras palavras, as características dos projetos de MDL são diferentes entre os países, principalmente por motivos relacionados à matriz energética do país hospedeiro e uso de tecnologias limpas. Adicionam-se a isto, as políticas públicas locais de incentivo ao desenvolvimento de projetos de MDL, conforme mencionado na seção 1.4 do Capítulo 1.

A exclusão das variáveis “Políticas públicas ambientais Europa” e “Incentivos projetos MDL Brasil” se deu pelo fato que as políticas em vigência sobre o mercado de créditos de carbono é o objeto de estudo do MDCC. Ainda, entende-se que uma política pública compreende um arranjo de diversos fatores econômicos e institucionais, cujos parâmetros podem não ser factuais e sem evidências sólidas de consistência e confiabilidade.

Diante destas circunstâncias foram definidas as variáveis do MDCC e, então, desenvolveu-se o DLC (Figura 5).



O DLC apresenta três laços de realimentação negativos, ou seja, de equilíbrio. Esses laços são:

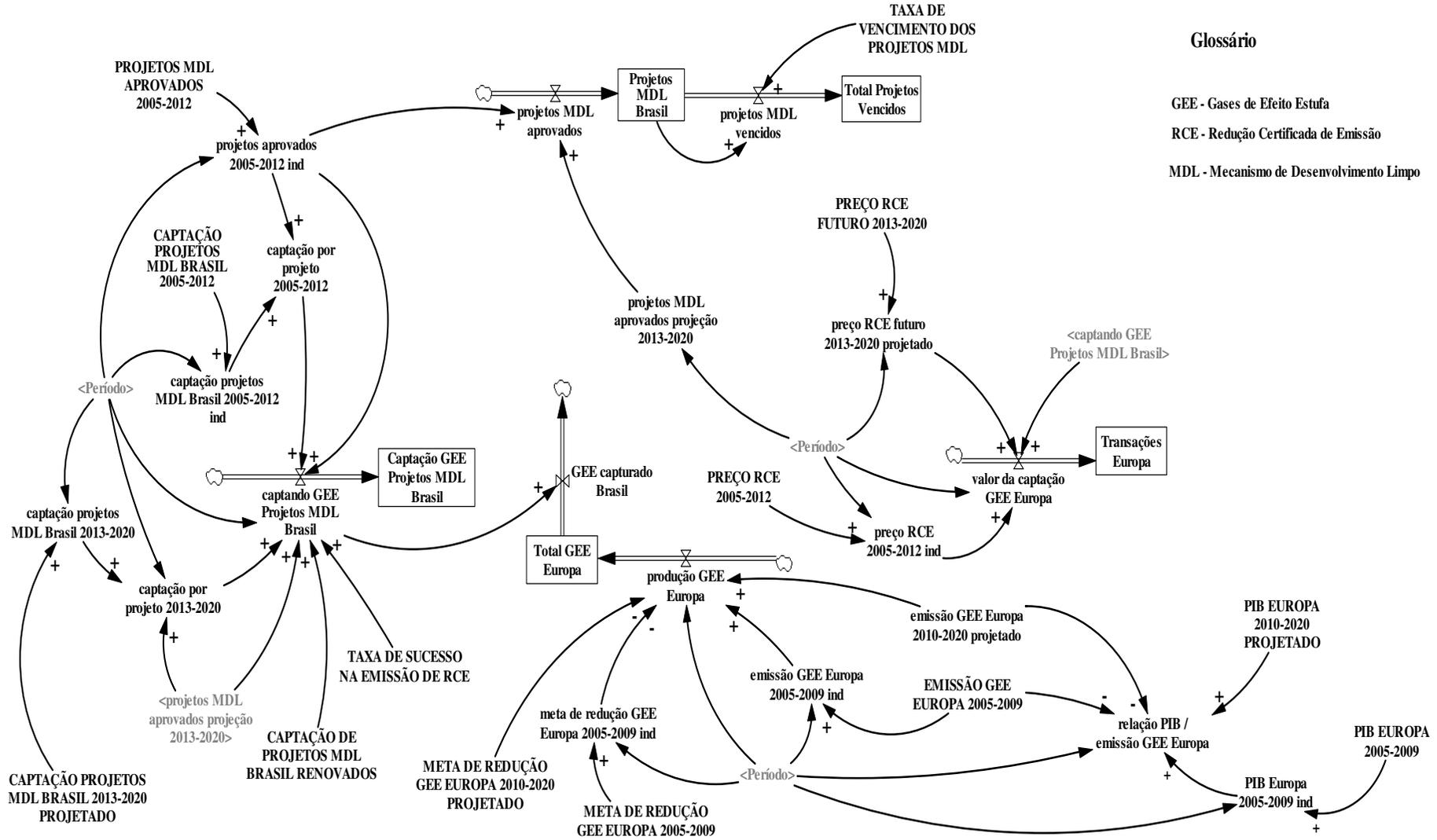
- a) **E1 - Projetos MDL Brasil:** mostra que há uma constância na existência de projetos de MDL, pois à medida que os projetos vencem, alguns são renovados e novos projetos são aprovados.
- b) **E2 - Contribuição dos projetos MDL Brasil para a compensação de GEE na Europa:** reflete a hipótese do modelo conceitual, isto é, os projetos de MDL desenvolvidos no Brasil têm contribuído para a compensação de GEE da Europa em um ciclo de equilíbrio.
- c) **E3 - Produção GEE Europa, Preço RCE e Projetos MDL Brasil:** esse ciclo tem relação com a hipótese do modelo conceitual (laço E2). A relação se dá através do laço que considera que quanto maior a produção de GEE pela Europa, maior a tendência de aumentar os preços das RCE. Esse aumento dos preços das RCE, em termos de relações causais, levaria a um aumento na quantidade de projetos MDL desenvolvidos no Brasil, em busca de equilibrar o comportamento do sistema.

A próxima seção apresenta o DEF, desenvolvido em concomitância ao DLC.

#### 4.3 DIAGRAMA DE ESTOQUE E FLUXO

O DEF é a estrutura física do modelo de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas. Ou seja, compreende o modelo matemático do MDCC, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Diagrama de estoque e fluxo do Modelo de Demanda de Créditos de Carbono



Glossário

- GEE - Gases de Efeito Estufa
- RCE - Redução Certificada de Emissão
- MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

Fonte: dados da pesquisa (2013).

No DEF são demonstrados todos os elementos de um modelo computacional baseado em dinâmica de sistemas (Apêndice A). Os estoques compreendem as principais variáveis do MDCC. Esses estoques são influenciados pelos parâmetros. Entre os parâmetros que constam no modelo, destaca-se o parâmetro “Emissão de GEE Europa 2005-2009”, o qual tem significativa influência de reforço no comportamento do MDCC, isto é, amplifica o comportamento de produção de GEE na Europa, logo reflete nas demais variáveis do modelo.

O DEF do MDCC também mostra os fluxos do modelo, isto é, as entradas e saídas de informações dos estoques. Esses fluxos são controlados pelas variáveis auxiliares, as quais processam os fluxos de informação dos estoques, definindo a regra de entrada e saída de informação. Além disso, tem as fontes e os sumidouros dos fluxos do MDCC.

Ainda, no DEF do MDCC aparece a variável “Período” em escala de cinza (*shadow variables*). Esta variável indica tempo, no caso mês. Optou por não usar a variável “time” do *Vensim DSS*, versão 5.8c, porque esta tem unidade de medida e, trabalhando com curvas de comportamento não é possível usar variáveis que indicam tempo e tenham unidade de medida, simultaneamente. As demais variáveis em escala de cinza é “espelho” de uma mesma variável do modelo. Estão como sombra para que, visualmente, o DEF fique legível sem prejudicar a modelagem.

Cabe comentar que no DEF não há *delays*. O não uso de *delays* justifica pela necessidade de usar a função randômica nas variáveis. O uso dessa função exige uma parametrização de defasagem, conforme exposto na seção seguinte.

#### 4.4 VALORES DOS PARÂMETROS

A primeira tarefa realizada nesta etapa do desenvolvimento do MDCC, após a coleta nas diversas fontes de dados consultadas, foi uniformizar as unidades temporais dos parâmetros, dado que o horizonte de tempo do modelo foi definido em meses. Para isto foi necessário calcular a média mensal para os parâmetros cujos dados só foram possíveis obter em unidade anual. Para isto, usou a seguinte equação:

$$\text{Valor}_{\text{mensal}} = \text{Valor}_{\text{anual}} / 12 \quad (1)$$

Os parâmetros submetidos a essa equação foram: “emissão GEE Europa 2005-2009”; “meta de redução GEE Europa 2005-2009”; “PIB Europa 2005-2009”; “Preço RCE 2005-2012” e; “Preço RCE Futuro 2013-2020”.

Obtida a uniformidade da unidade temporal, seguiu para uniformização das unidades de valor e de medida. Em seguida, esses dados foram submetidos ao tratamento estatístico (média, desvio padrão, regressão linear e correlação). Todas essas tarefas foram realizadas em planilhas do Microsoft Excel.

Os resultados do tratamento estatístico dos dados (baixa correlação e elevada aleatoriedade) apontou que não seria possível utilizar as funções estatísticas disponíveis no *Vensim DSS*, versão 5.8c. Após retornar à etapa de familiarização com o problema e realizar questionamentos com especialistas em assessoria e consultoria em desenvolvimento de projetos de MDL, verificou que o problema residia nos dados obtidos e a solução mais plausível era gerar números aleatórios.

Então, uma vez que os dados foram importados para o software, iniciou o desenvolvimento das equações do modelo. As equações que foram utilizadas para estimar os valores dos parâmetros, estoques, fluxos e variáveis auxiliares estão apresentadas no Apêndice C.

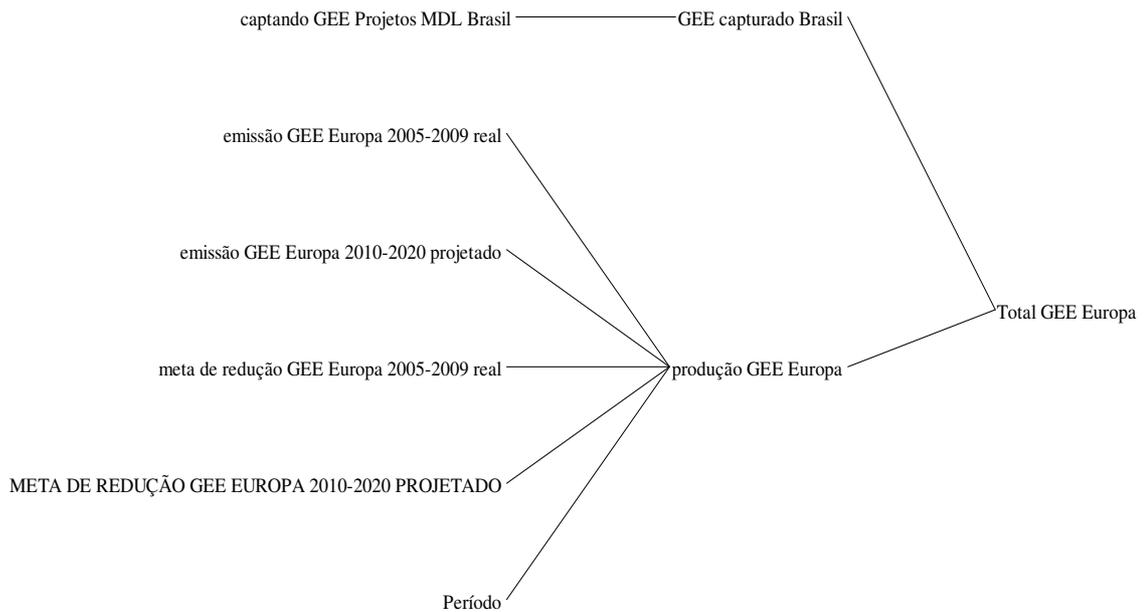
#### 4.5 EXECUÇÃO DO MODELO

Após a parametrizar o MDCC, este foi executado para comparar o resultado da simulação com o modo de referência. Essa subseção apresenta os resultados da execução do modelo, iniciando com a simulação da variável-chave “Total GEE Europa”. O total de GEE que a Europa emite é um estoque, cujo fluxo de entrada é a produção desses gases e o fluxo de saída é a captação dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil.

O comportamento do estoque “Total GEE Europa” apresenta dados reais, partindo de um valor inicial de 39.451,7 Mt, em dezembro/2005 (mês 1), até 47.938,8 Mt, em dezembro/2009 (mês 49). Esses valores correspondem às emissões reais de GEE pela Europa, subtraídas das metas de redução e do GEE capturado por projetos de MDL desenvolvidos no Brasil, no mesmo período. A partir do período 50 (janeiro/2010), as variáveis “emissão de GEE Europa” e “meta de redução Europa” foram simuladas até o período 181 (dezembro/2020). Por sua

vez, a “captação projetos MDL Brasil” foi simulada a partir de janeiro/2013 (período 85), dada a existência de dados reais e confiáveis até o mês de dezembro/2012. O conjunto desses dados permitiu o cálculo do “Total GEE Europa”, como pode ser visto no diagrama de relações causais (Figura 7).

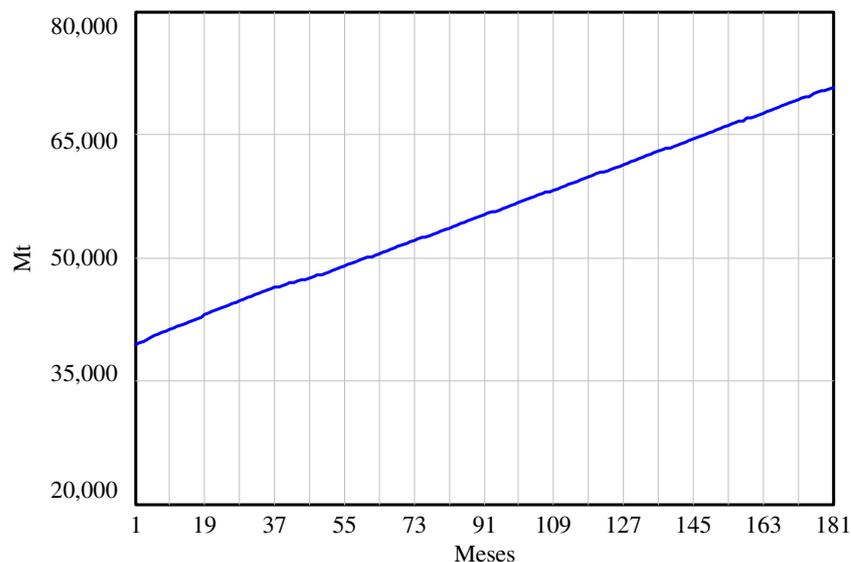
**Figura 7 – Relações causais na emissão total de GEE da Europa**



Fonte: dados da pesquisa (2013).

O Gráfico 6 mostra o resultado da simulação do comportamento deste estoque.

**Gráfico 6 – Comportamento do total de GEE da Europa (em Mt) - Dezembro/2005 a Dezembro/2020**



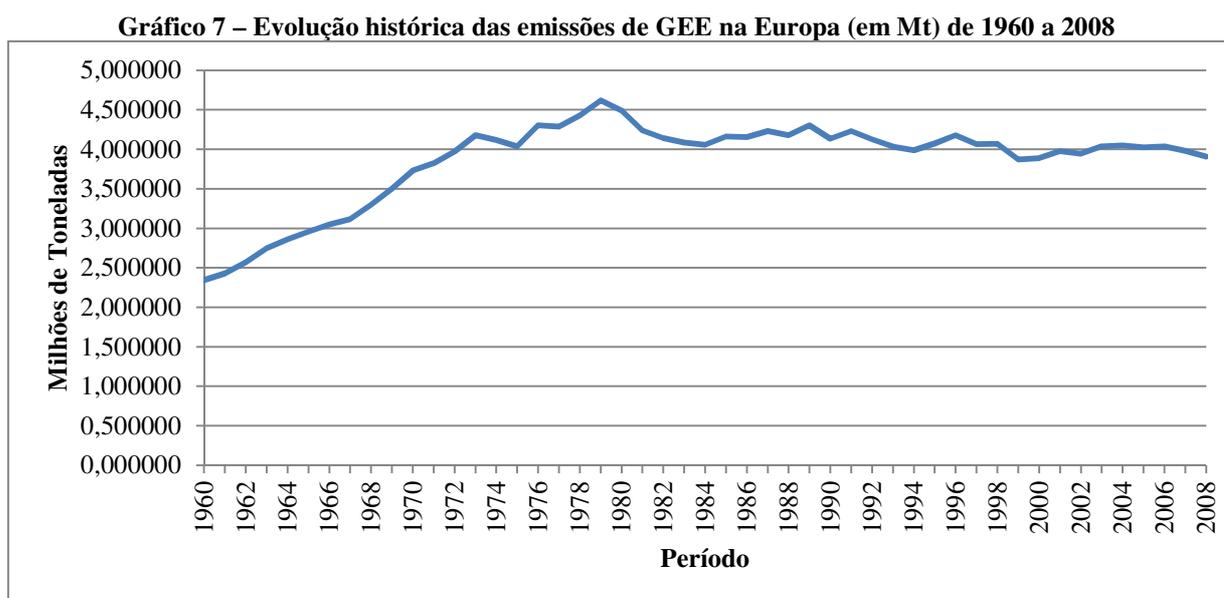
Fonte: dados da pesquisa (2013).

Talvez, a expectativa do comportamento do “Total de GEE da Europa” fosse uma curva exponencial ou uma curva de inflexão, em formato de “S” (*S-Shaped*). A primeira expectativa (curva exponencial) pressupõe que as reduções de GEE na Europa não venham obtendo êxito no total de emissões desses gases; enquanto que a segunda expectativa (curva de inflexão) é o contrário da primeira: as reduções de GEE tem reduzido o total de emissões desses gases na Europa.

Porém, o Gráfico 6 mostra o estoque do total de emissões de GEE pela Europa como uma linearidade crescente. Sobre isto, cabem algumas considerações que podem induzir a esta aparente linearidade:

- os limites de tempo estabelecidos no modelo, ou seja, o período de tempo de simulação é tão curto que a aparente linearidade é um pequeno espaço da curva;
- o fato de ter utilizado a função *Random Normal* nas projeções até dezembro/2020, minimizou os efeitos da excessiva aleatoriedade dos dados; e
- o MDCC não contemplou todas as variáveis que possam influenciar o comportamento das emissões de GEE.

Contudo, parece ser mais plausível e coerente que a aparente linearidade, apresentada no Gráfico 6, seja em função dos limites de tempo estabelecido para o MDCC (tanto para o período histórico quanto para o período de simulação). Para elucidar, foi elaborado o Gráfico 7 que mostra a evolução das emissões de GEE na Europa, de 1960 a 2008.



Fonte: The World Bank Database (2012).

Analisando a evolução histórica de emissões de GEE na Europa, para um período de 48 anos, observa-se que o comportamento da curva não é linear. Nas duas primeiras décadas o comportamento é de crescimento e, a partir do ano de 1980, ocorre uma pequena inflexão nesta curva. Dessa forma, é compreensível que a aparente linearidade que o Gráfico 6 apresentou seja decorrente do curto período do MDCC (apenas 15 anos), onde o período histórico não foi suficiente para capturar o comportamento real das emissões de GEE na Europa e reproduzir no período simulado.

Outro estoque executado foi “Projeto MDL Brasil”. Esse estoque compreende a adição da variável “projetos MDL aprovados” e a subtração da variável “projetos MDL vencidos”. Para simular a quantidade de projetos vencidos foi utilizado o parâmetro “taxa de vencimento dos projetos MDL”. Para obter essa taxa foi realizado o seguinte cálculo:

$$B + (A - B - C) = D \quad (2)$$

$$(D / E) / F = G \quad (3)$$

Onde:

A: Projetos de MDL vencidos até 31/12/2012 (202 projetos de MDL)

B: Projetos de MDL vencidos não renováveis (58 projetos de MDL)

C: Projetos de MDL renovados (74 projetos de MDL)

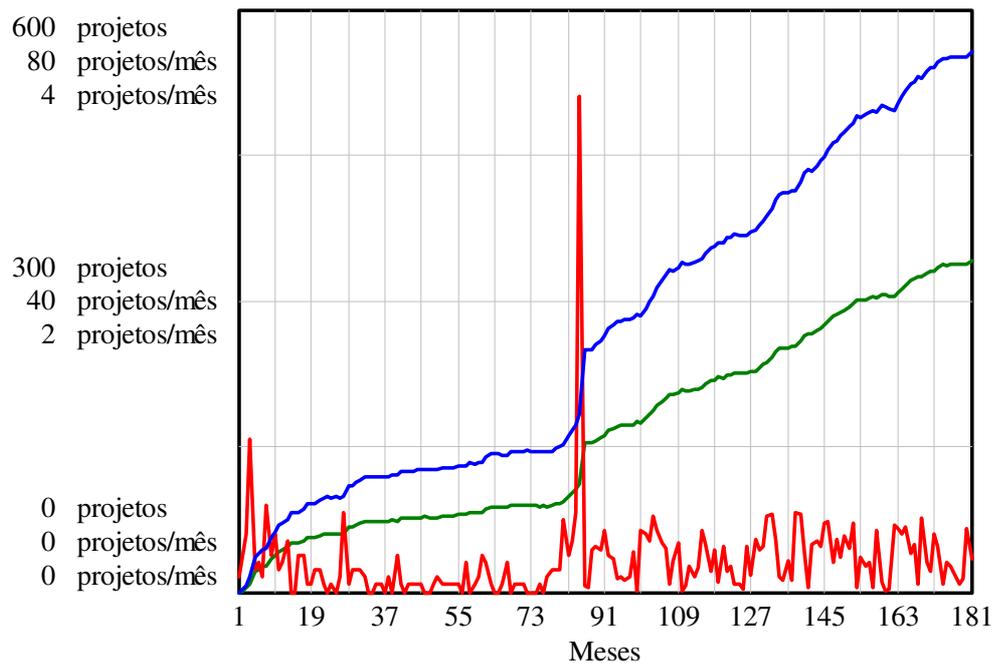
D: Projetos de MDL vencidos e não renovados (128 projetos de MDL)

E: Número de meses entre janeiro/2004 e dezembro/2012 (108)

F: Quantidade de contratos aprovados de janeiro/2004 a dezembro/2012 (290 contratos)

G: Taxa de vencimento dos projetos de MDL (0,4%)

O Gráfico 8 mostra a curva de comportamento dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil.

**Gráfico 8 – Comportamento do número de projetos de MDL no Brasil (dezembro/2005 a dezembro/2020)**

Legenda:

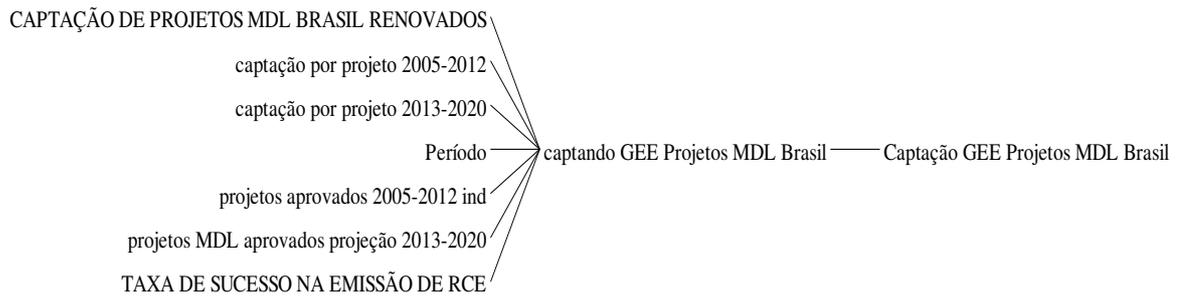
- Projetos MDL Brasil
- Projetos MDL Aprovados
- Projetos MDL Vencidos

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Devido à inconstância mensal na quantidade de projetos MDL brasileiros aprovados no CEMDL/ONU no período de dezembro/2005 a dezembro/2012 a projeção randômica para janeiro/2012 a dezembro/2020 reflete essas oscilações (linha vermelha). Mesmo assim, é possível observar uma curva de crescimento no número de projetos brasileiros que são aprovados (linha azul) e, por conseguinte, no número de projetos vencidos e/ou não renovados (linha verde). Salienta que o forte crescimento em dezembro de 2012 (período 85) se deve à aprovação de 68 projetos neste mês.

Decorrente do número de projetos aprovados no CEMDL/ONU tem-se a emissão das RCE, ou seja, a captação de GEE. A Figura 8 mostra o diagrama de relações causais da captura desses gases pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil.

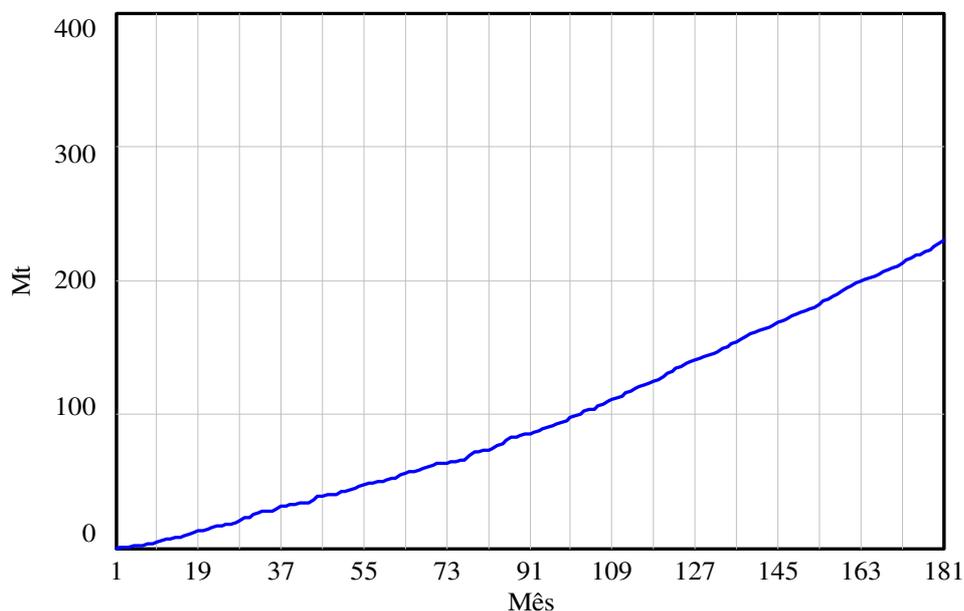
**Figura 8 – Relações causais na captação de GEE pelos projetos de MDL do Brasil**



Fonte: dados da pesquisa (2013).

A Figura 8 mostra que a captação de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil advém dos projetos de MDL aprovados e/ou renovados no CEMDL/ONU e da taxa de sucesso de captação desses gases, logo da emissão dos créditos de carbono. Considerando essas relações causais, o Gráfico 9 mostra a evolução do estoque de GEE capturado pelos projetos brasileiros.

**Gráfico 9 – Captação de GEE dos projetos de MDL no Brasil (dezembro/2005 a dezembro/2020)**

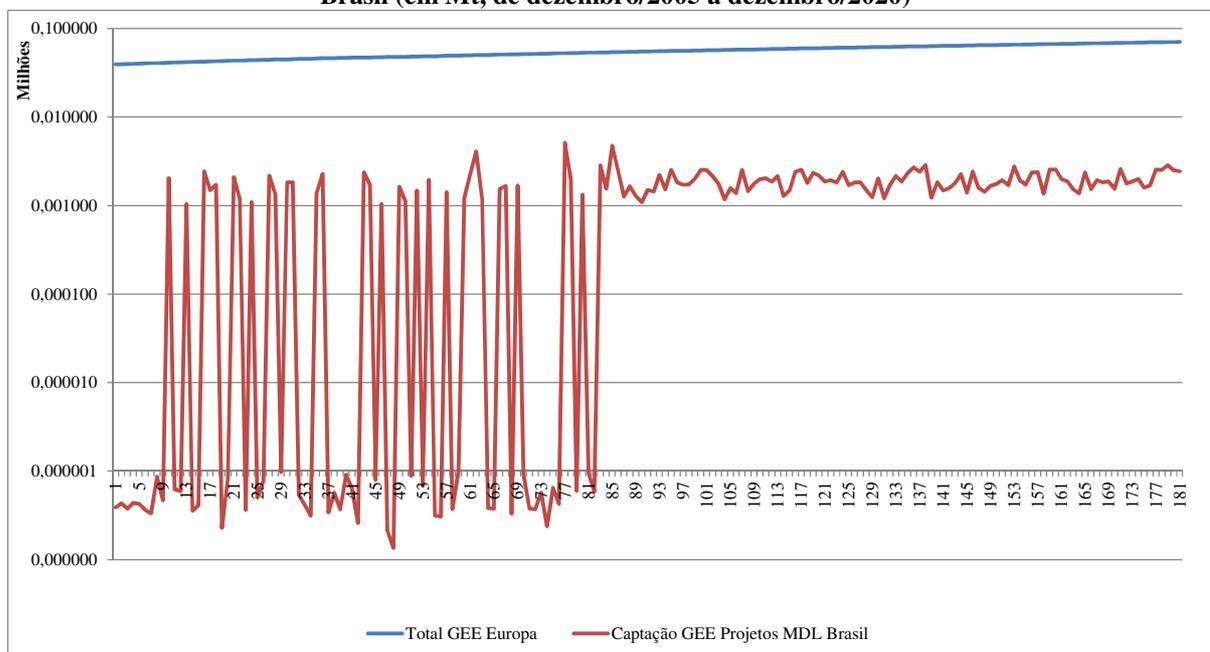


Fonte: dados da pesquisa (2013).

O Gráfico 9 mostra que a quantidade de captação de GEE, em Mt, provenientes dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil tem uma curva de crescimento. Essa curva era esperada quando o número de projetos aprovados no CEMDL/ONU também tem comportamento de crescimento (Gráfico 8), ao longo do período em análise.

Entretanto, deve-se analisar comparativamente as emissões de GEE pela Europa com a captura desses gases pelos projetos de MDL do Brasil, como mostra o Gráfico 10.

**Gráfico 10 – Comportamento das emissões de GEE na Europa e captura de GEE dos projetos de MDL do Brasil (em Mt, de dezembro/2005 a dezembro/2020)**



Fonte: dados da pesquisa (2013).

O Gráfico 10 reproduz o modo de referência do MDCC, apresentado no Gráfico 5. Até o período 85 os dados são reais e, a partir do período 86 os dados são decorrentes da execução da simulação. Nota-se que a linha que representa as emissões de GEE na Europa continua com aparente crescimento linear, para todo o período simulado. E, a linha que representa a captação de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil também indica crescimento a partir do período 86 (janeiro/2013). Esse comportamento sugere que a política do Protocolo de Quioto tem sido eficaz, contudo essa análise será apresentada na seção 4.7.

Por fim, cabe mencionar que esta análise, em relação ao eixo Y, deve considerar o uso de escala logarítmica porque a quantidade de GEE capturado pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil é ínfima, em relação ao total de GEE que a Europa emite. Por esse motivo, foi necessário usar esta escala para demonstração em gráfico.

Finalizada a etapa de execução do modelo, a próxima seção apresenta a análise dos pressupostos da hipótese dinâmica do MDCC.

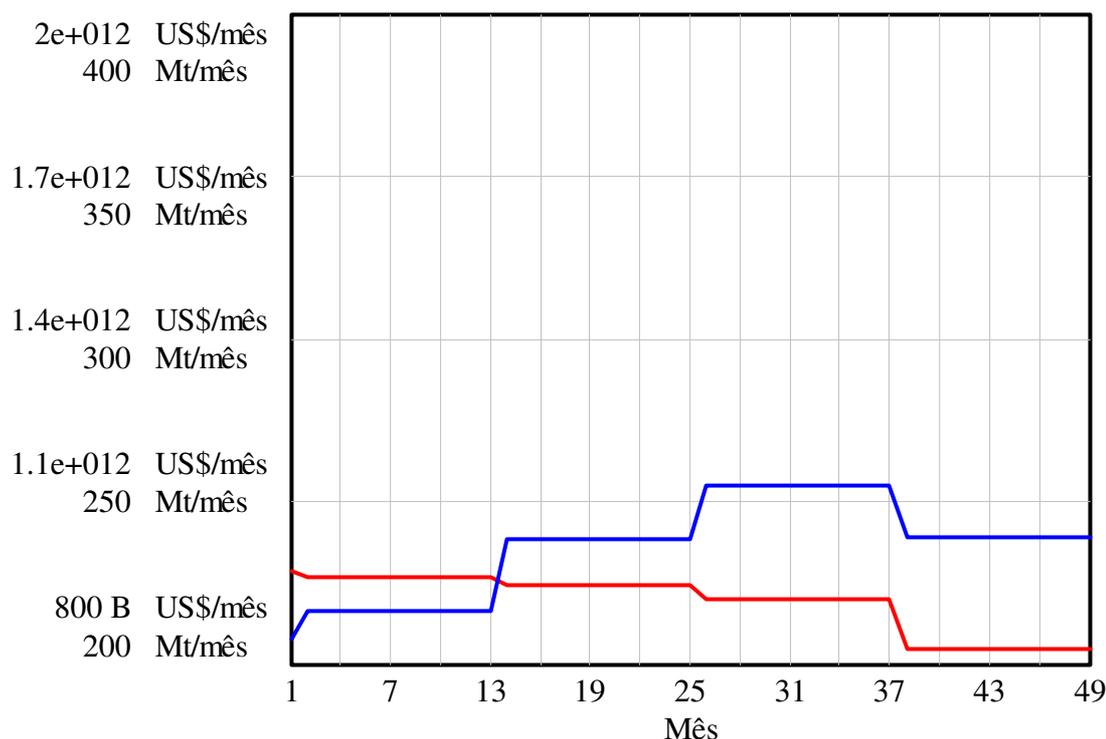
## 4.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

O objetivo da análise de sensibilidade é testar a robustez do MDCC, alterando os valores dos parâmetros, inclusive para situações extremas. Se após cada alteração obtiver o modo de referência, o modelo está válido.

Nesta etapa foram realizadas diversas rodadas de testes até se obter o modo de referência, apresentado na seção anterior. Em cada rodada de teste, o *Vensim DSS*, versão 5.8c, realizava 2.000 simulações, conforme é definido pelo software. Uma vez que o MDCC foi calibrado, ou seja, obteve o modo de referência validando a robustez do modelo, iniciou a análise dos pressupostos da hipótese dinâmica, que foram definidos na segunda etapa de desenvolvimento do modelo de simulação baseado em dinâmica de sistemas (seção 4.1).

### **4.6.1 PIB da Europa está diretamente relacionado à emissão de gases de efeito estufa**

A hipótese dinâmica pressupõe que o PIB da Europa tem relação causal com as emissões de GEE. O Gráfico 11 mostra o resultado da simulação desta relação para o período inicial do MDCC, considerando que há atraso de um ano.

**Gráfico 11 – Relação entre o PIB e a emissão de GEE na Europa (dezembro/2005 a dezembro/2009)**

Legenda:

- PIB Europa 2005-2009 ind
- Emissão GEE Europa 2005-2009 ind

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Os dados reais para o período de dezembro/2005 a dezembro/2009 demonstram não haver uma relação direta entre o PIB e a emissão de GEE nos países europeus. Para melhor elucidar esta análise a Tabela 1 mostra a variação de cada variável nos pontos de inflexão da curva.

**Tabela 1 - Relação entre o PIB e a emissão GEE, da Europa (dezembro/2005 a dezembro/2009)**

Período	Mês	"PIB Europa 2005-2009 ind" (US\$/mês)	"EMIÇÃO GEE EUROPA 2005-2009" (Mt/mês)	Variação PIB (%)	Variação Emissão GEE (%)
1	dez/05	8,4527E+11	228,31		
2	jan/06	8,9647E+11	226,64	6,1%	-0,7%
14	jan/07	1,03078E+12	223,97	15,0%	-1,2%
26	jan/08	1,12855E+12	219,81	9,5%	-1,9%
38	jan/09	1,03279E+12	204,67	-8,5%	-6,9%

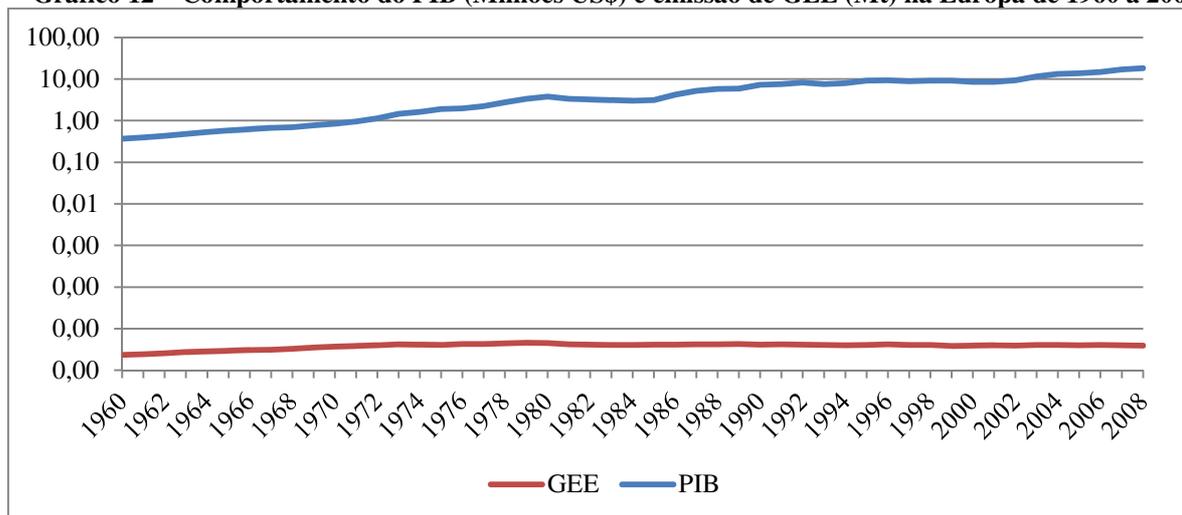
Fonte: dados da pesquisa (2013).

Nas três primeiras inflexões (períodos 2, 14 e 26, respectivamente janeiro/2006, janeiro/2007 e janeiro/2008) a relação PIB versus emissão de GEE é inversamente proporcional e significativa. Apenas na última inflexão, janeiro/2009 (período 38) identificou correlação, quando tanto a variação do PIB quanto as emissões de GEE foi negativa. Contudo,

este período contempla os efeitos da crise econômica de 2008, quando observou uma redução do PIB europeu.

Expandindo a análise da relação do PIB versus GEE para o período de 1960 a 2008 (48 anos), verifica-se que as duas variáveis não têm a mesma tendência (Gráfico 12).

**Gráfico 12 – Comportamento do PIB (Milhões US\$) e emissão de GEE (Mt) na Europa de 1960 a 2008**

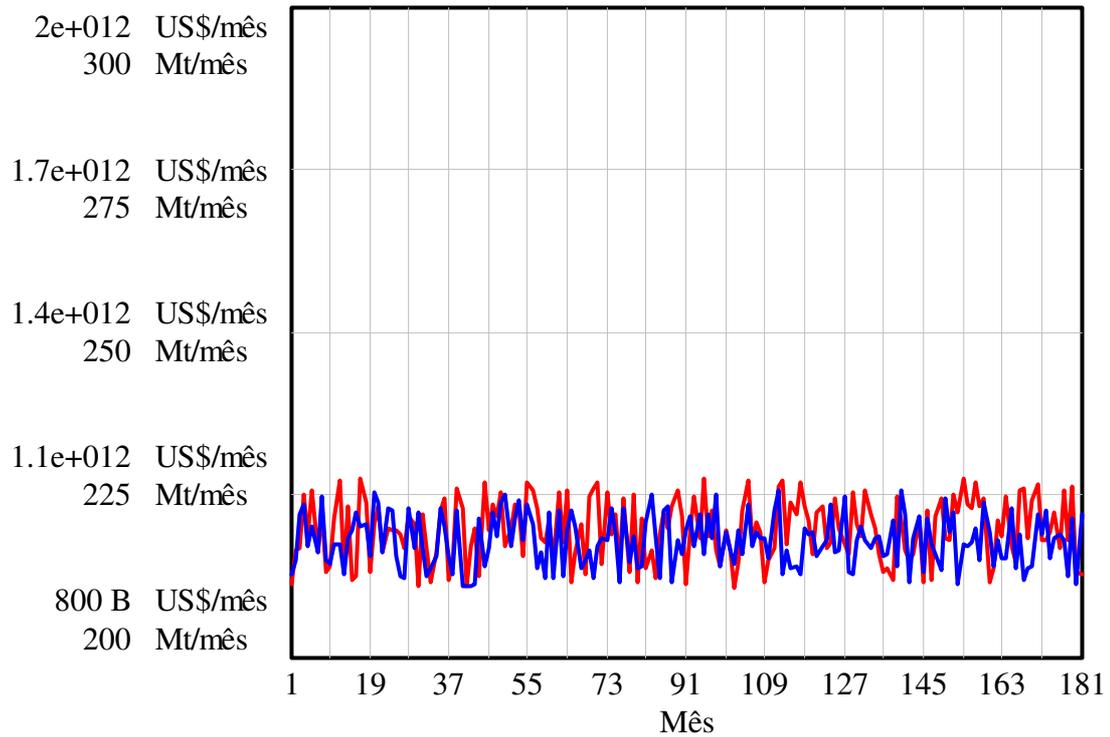


Fonte: dados da pesquisa (2013).

Como pode ser observado no Gráfico 12, enquanto o PIB tem uma tendência crescimento (aumento de 49,95 vezes em 48 anos), as emissões de GEE são, praticamente, estáveis (aumento de 1,66 vezes para igual período). Tal comportamento é verificado pela baixa correlação entre essas duas variáveis: aproximadamente 0,40.

Quando simulado o PIB e as emissões de GEE, de modo randômico, para o período de janeiro/2010 (período 50) até dezembro/2020 (período 181), não é possível afirmar se há ou não relação entre as duas variáveis, como mostra o Gráfico 13.

**Gráfico 13 – Relação entre o PIB e emissão de GEE, na Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020)**



Legenda:

- PIB Europa 2010-2020 Projetado
- Emissão GEE Europa 2010-2020 projetado

Fonte: dados da pesquisa (2013).

O Gráfico 13 mostra que as duas variáveis se mantêm dentro dos limites históricos, mas sem alterações significativas. Desse modo, deve ter cautela em refutar o pressuposto de que há relação entre o PIB e as emissões de GEE na Europa. Os resultados obtidos podem ter o viés do limite temporal do MDCC, que não conseguiu capturar o real comportamento destas variáveis. Ainda, como a correlação entre o PIB e as emissões de GEE foi baixa, infere-se que pode haver outros fatores que estejam relacionados às emissões de GEE na Europa, não somente o PIB. Um dos fatores pode ser as metas de reduções das emissões destes gases, cuja análise é apresentada na subseção seguinte.

#### 4.6.2 Metas de redução de emissão dos gases de efeito estufa definidas pelos países europeus têm sido eficazes

Para analisar se as metas de redução das emissões de GEE definidas pelos países da Europa estão contribuindo para a redução desses gases é importante retomar o que a Europa definiu como compromisso, em janeiro de 2010, com base no Acordo de Copenhague: reduzir entre 20% e 30% as emissões de GEE (ano base 1990) até o ano de 2020.

Contudo, a Europa já tinha metas de redução das emissões de GEE desde 1990, como mostra a Tabela 2.

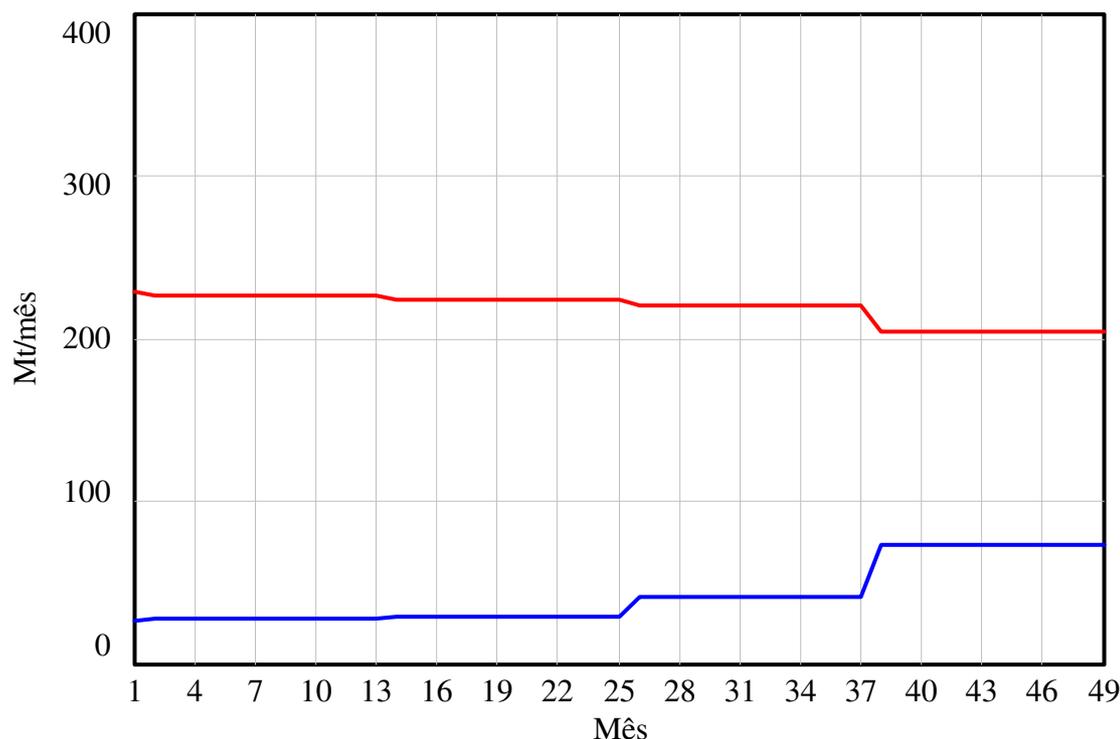
**Tabela 2 – Meta de redução de GEE na Europa**

	Ano Base	Emissões GEE (em Mt)	Índice (1990=100)	Mudança absoluta de emissões de GEE em relação ao ano de 1990 (em Mt)
	Ano Base			
Emissões de GEE	1991	5.398,5455	97,7478	-124,3875
	1992	5.213,4125	94,3957	-309,5205
	1993	5.138,5210	93,0397	-384,4120
	1994	5.100,1290	92,3446	-422,8040
	1995	5.180,6960	93,8033	-342,2370
	1996	5.306,9380	96,0891	-215,9950
	1997	5.223,6145	94,5804	-299,3185
	1998	5.175,8400	93,7154	-347,0930
	1999	5.062,4540	91,6624	-460,4790
	2000	5.106,8230	92,4658	-416,1100
	2001	5.110,0370	92,5240	-412,8960
	2002	5.118,9140	92,6847	-404,0190
	2003	5.236,4580	94,8130	-286,4750
	2004	5.228,8075	94,6745	-294,1255
	2005	5.201,3650	94,1776	-321,5680
	2006	5.190,3645	93,9784	-332,5685
	2007	5.181,7730	93,8228	-341,1600
	2008	5.026,9670	91,0199	-495,9660
2009	4.645,6630	84,1159	-877,2700	
2010	4.812,2770	87,1326	-710,6560	

Fonte: European Environment Agency (2013).

Observando a Tabela 2 verifica-se que, até o início da simulação (2005), foi obtida uma redução absoluta de 321,568 Mt/ano nas emissões de GEE. Essa redução corresponde a 5,82%, comparado ao ano de 1990. Fazendo a simulação da meta de redução de GEE e a emissão desses gases, para o período de dezembro/2005 a dezembro/2009 (49 meses iniciais), os resultados apontam a possibilidade de alcançar a meta estabelecida (Gráfico 14).

**Gráfico 14 – Meta de redução de GEE versus emissão de GEE na Europa (dezembro/2005 a dezembro/2009)**



Legenda:

- Meta de redução GEE Europa 2005-2009 ind
- Emissão GEE Europa 2005-2009 ind

Fonte: dados da pesquisa (2013).

A análise do Gráfico 14 mostra que à medida que as metas de redução são atingidas, ocorre redução nas emissões de GEE. Esse resultado reforça a evidência de que outros fatores podem estar correlacionados com as emissões de GEE na Europa, não somente o PIB. Para melhor detalhamento, a Tabela 3 mostra o comportamento da meta de redução de GEE para o período de 2005 a 2009.

**Tabela 3 – Meta de redução de GEE na Europa (em Mt/mês), de dezembro/2005 a dezembro/2009**

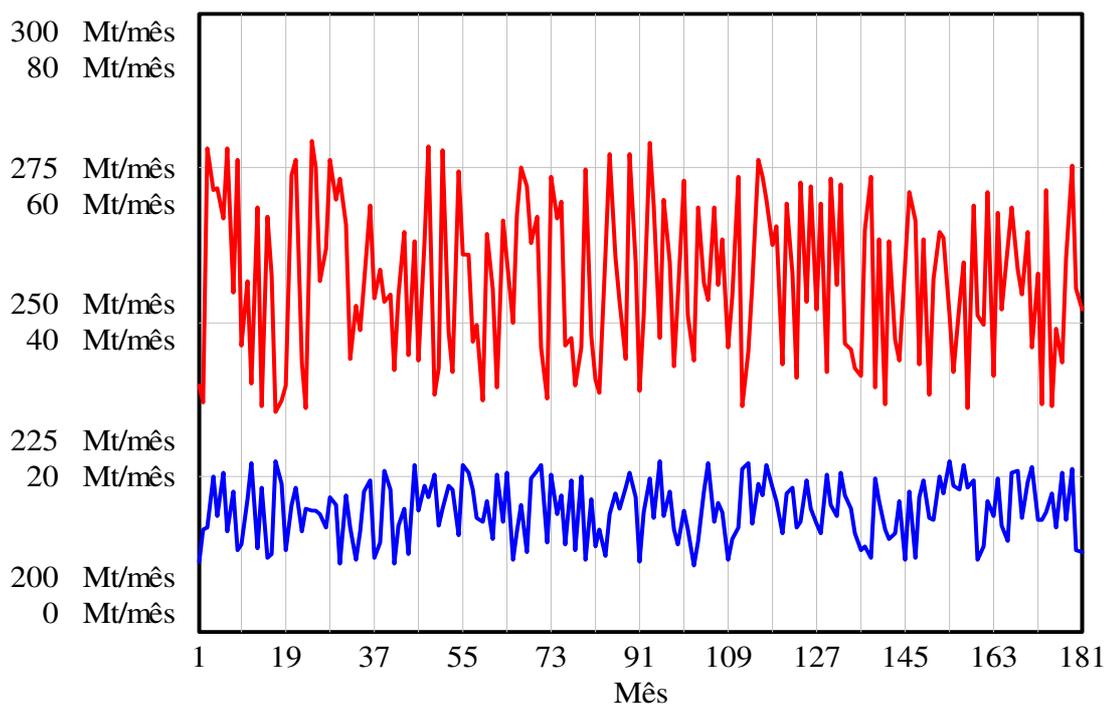
Período	Mês	Emissão GEE Europa 2005-2009 (Mt/mês)	Meta de redução GEE Europa 2005-2009 (Mt/mês)	Variação Absoluta	Variação %
-	dez/91	222,73		-	-
1	dez/05	228,31	-26,80	5,58	2,5%
14	jan/07	223,97	-28,43	-4,34	-1,9%
26	jan/08	219,81	-41,33	-4,15	-1,9%
38	jan/09	204,67	-73,11	-15,14	-6,9%
<b>Acumulado</b>				<b>-18,06</b>	<b>-8,1%</b>

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Observando o valor acumulado, em percentuais, verifica-se que a meta de redução de emissões de GEE tem sido alcançada, com redução acumulada de 8,1% no período de 1991 a

2009. Para o período histórico do MDCC (dezembro/2005 a dezembro/2009) a redução acumulada foi de 10,6%, considerando atraso de um ano. Assim, entende-se que a política do Protocolo de Quioto vem atingindo seu objetivo. Para o período de simulação do MDCC (janeiro/2010 a dezembro/2020) os resultados são apresentados no Gráfico 15.

**Gráfico 15 – Meta de redução de GEE versus emissão de GEE na Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020)**



Legenda:

- Emissão GEE Europa 2010-2020 projetado
- Meta de redução GEE Europa 2010-2020 projetado

Fonte: dados da pesquisa (2013).

O resultado do Gráfico 15 indica que os dados simulados se mantêm dentro dos limites. Por isto, a análise desse gráfico é mais adequada se considerada em conjunto com resultados em termos absolutos (Tabela 4).

**Tabela 4 – Meta de redução de GEE na Europa (em Mt./mês), de janeiro/2010 a dezembro/2020**

Período	Mês	Emissão GEE Europa 2010-2020 projetado	Meta de redução GEE Europa 2010-2020 projetado	Variação Absoluta	Variação %
50	jan/10	219,25093	-58,57	-	-
51	fev/10	217,56488	-53,12	-	-
52	mar/10	220,10457	-48,38	-	-
...	...	...	...	...	...
179	out/20	211,75209	-34,54	-	-
180	nov/20	221,23929	-54,20	-	-
181	dez/20	221,35504	-49,31	-	-
<b>Totais</b>		<b>1311,2668</b>	<b>-298,11</b>	<b>-298,11</b>	<b>-22,7%</b>

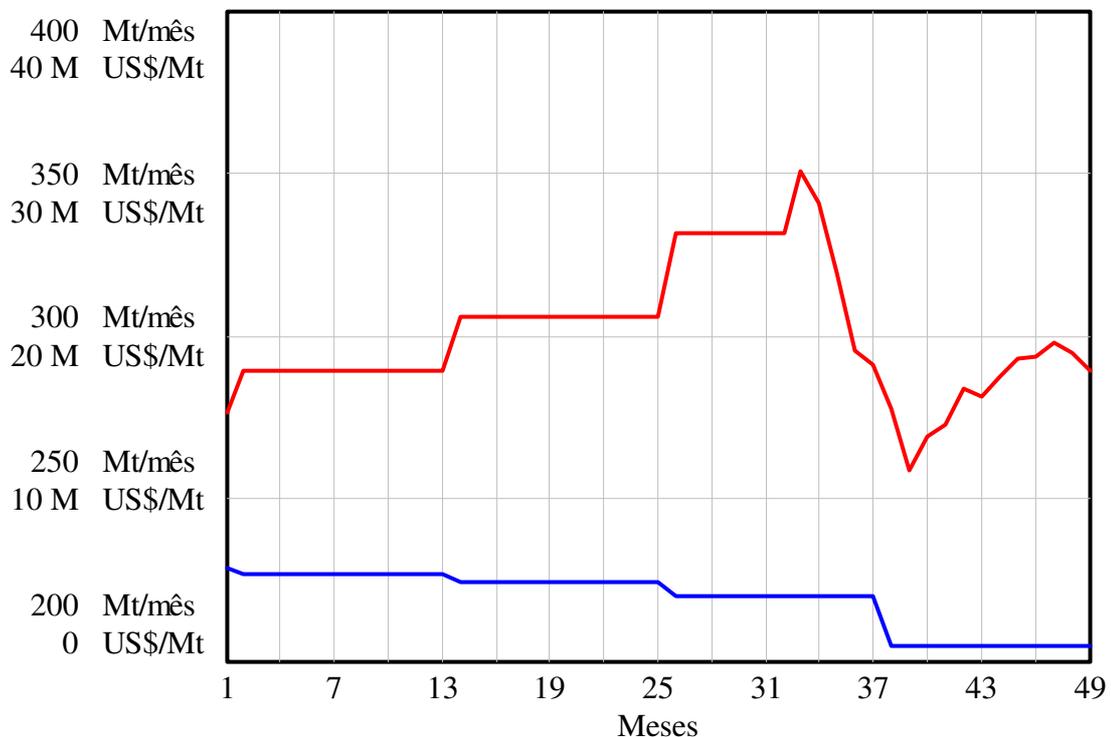
Fonte: dados da pesquisa (2013).

A simulação estimou uma redução de 22,7% no período de janeiro/2010 a dezembro/2020. Adicionando esse valor à meta da Tabela 3 obtém um valor de redução de, aproximadamente, 30,8%. Esse resultado aponta que a Europa tem condições de atingir com êxito as metas definidas em janeiro/2010, conforme previsto no Acordo de Copenhague, se mantidas as atuais políticas.

#### 4.6.3 Aumento das emissões de gases de efeito estufa na Europa tem relação com o aumento no preço dos créditos de carbono

A hipótese dinâmica pressupõe que o aumento das emissões de GEE na Europa ocasiona aumento no preço dos créditos de carbono. O Gráfico 16 mostra essa relação para o período histórico (dezembro/2005 a dezembro/2009).

Gráfico 16 – Emissão de GEE na Europa versus preço da RCE (dezembro/2005 a dezembro/2009)



Legenda:

- Emissão GEE Europa 2005-2009 ind
- Preço RCE 2005-20120 ind

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Antes de analisar os dados históricos, cabe salientar que até o período 32 (julho/2008) os dados disponíveis sobre o preço das RCE eram anuais. Por este motivo, foi necessário dividir por doze para obter valores mensais e, então, inserir no MDCC. A partir do período 33 (agosto/2008), os dados sobre o preço das RCE foram obtidos na ECX e esses valores eram diários. Para ter o valor médio mensal usou a média simples, resultando em preços constantes para intervalos de 12 meses.

Observando o Gráfico 16, verifica-se que houve, inicialmente, um crescimento dos preços das RCE até o período 33 (agosto/2008), mês precedente à crise financeira mundial de 2008. Depois os preços desses créditos oscilam entre recuperação e queda, predominando recuperação, a qual não atinge o patamar obtido em agosto/2008. Para o mesmo período as emissões de GEE apresentam queda. Desse modo, a análise do comportamento dessas duas variáveis para o período histórico indica que não há relação causal entre si.

Complementarmente, calcularam-se as variações de cada variável nos pontos de inflexão. Então, a Tabela 5, juntamente com o Gráfico 16, possibilita a análise da relação entre a emissão de GEE e o preço da RCE.

**Tabela 5 – Relação entre emissão de GEE na Europa e Preço RCE (dezembro/2005 a dezembro/2009)**

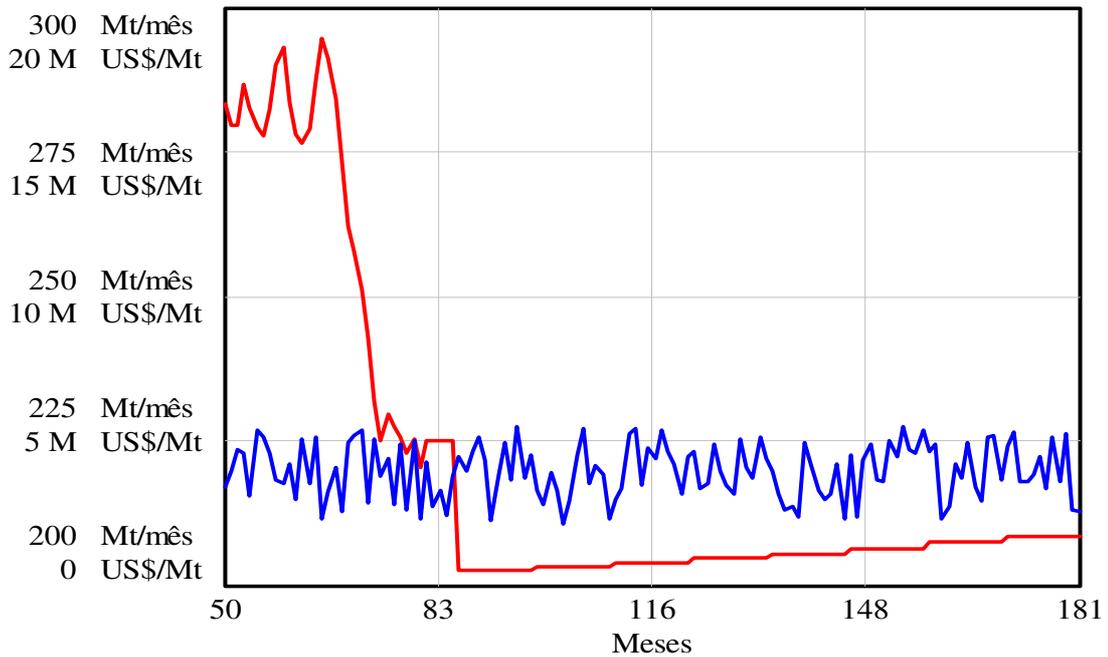
Período	Mês	Emissão GEE 2005-2009 (Mt/mês)	Preço RCE 2005-2009 (US\$/Mt)	Variação Emissão	Variação Preço
1	dez/05	228,31	15.300.000,00	-	-
2	jan/06	226,64	17.900.000,00	-0,7%	17,0%
14	jan/07	223,97	21.110.000,00	-1,2%	17,9%
26	jan/08	219,81	26.260.000,00	-1,9%	24,4%
38	jan/09	204,67	15.490.677,78	-6,9%	-41,0%

Fonte: dados da pesquisa (2013).

A Tabela 5 e o Gráfico 16 mostram que não há relação direta entre as emissões de GEE na Europa com o preço dos créditos de carbono, para o período analisado. A hipótese foi formulada de acordo com a tendência de um mercado livre, ou seja, com base na Lei de Oferta e Demanda.

O Gráfico 17 mostra a simulação das emissões de GEE na Europa em relação ao preço dos créditos e carbono, para o período de janeiro/2010 a dezembro/2020.

**Gráfico 17 – Emissão de GEE na Europa versus preço da RCE (janeiro/2010 a dezembro/2020)**



Legenda:

- Emissão GEE Europa 2010-2020 projetado
- Preço RCE 2010-2020

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Antes de apresentar a análise do Gráfico 17, cabe ressaltar que os valores do preço futuro da RCE (janeiro/2013 a dezembro/2020) foram obtidos na *European Energy Exchange* e estavam expressos em valores médios anuais. Por isto, há uma linearidade para cada período de 12 meses, entre 2013 e 2020 (período 86 a 181).

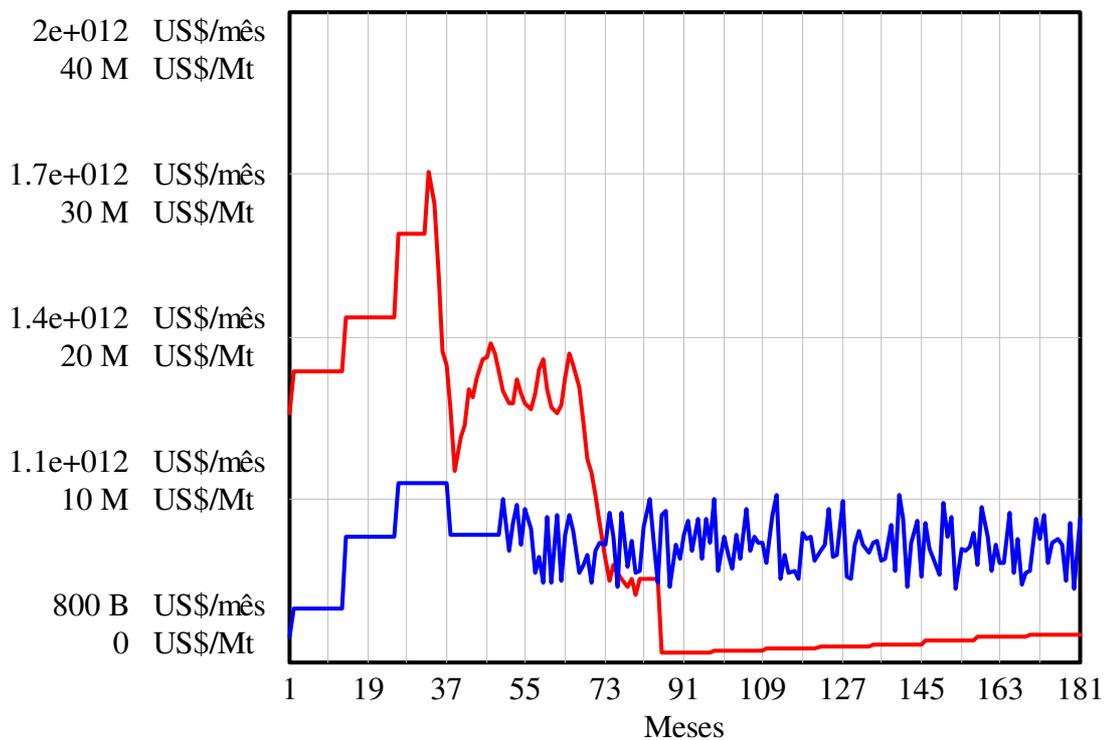
No processo de simulação os resultados comparados de emissão de GEE da Europa e preço das RCE, para o período de janeiro/2010 a dezembro/2020, mostram que, a partir do período 67 (junho/2011), os preços têm uma queda exponencial. Esse período coincide com a realização da COP-17, quando decidiu que o Protocolo de Quioto continuaria após 2012, mas sem a definição até quando esse acordo estaria vigente e se haveria novo acordo. Tal situação manteve um ambiente de incerteza e, também, de expectativa para a COP-18, quando definiu que a vigência do Protocolo de Quioto se estenderia até 2020 e, a partir de 2013, um novo acordo mundial seria negociado. Por sua vez, os dados simulados para as emissões de GEE se mantêm dentro dos limites da função randômica.

Assim, a análise conjunta dos Gráficos 16 e 17 sugere que o valor das RCE não está relacionado, exclusivamente, com as emissões de GEE. Então se pode deduzir que outras variáveis estejam relacionadas. Sugere-se que a crise econômica que afeta a Europa desde o final do ano 2008 seja um fator interveniente. De acordo com Cunha (2009), a incerteza e a

recessão provocadas pela crise de 2008 reduziram a demanda das URE, reduzindo seu preço. Por conseguinte, o preço da RCE também caiu, como mostra a Tabela 5: no ano de 2009 o preço das RCE reduziu em 41%, em relação a 2008.

Se a crise econômica é um fator relacionado com o preço da RCE, entende-se que o PIB pode ser a variável que expressa esse momento econômico. Pois, em períodos de recessão reduz-se a produção de bens. Então, de maneira complementar, realizou-se uma simulação entre o PIB da Europa e preço da RCE de 2005 a 2020 (Gráfico 18).

**Gráfico 18 – PIB Europa versus preço da RCE (janeiro/2005 a dezembro/2020)**



Legenda:

- PIB Europa 2005-2020
- Preço RCE 2005-2020

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Observa-se que o PIB indica uma relação causal mais forte com o preço das RCE. Essa relação foi verificada pela correlação de 0,89 entre essas duas variáveis, durante o período histórico (dezembro/2005 a dezembro/2012). Assim, pode-se dizer que o preço dos créditos de carbono está mais relacionado ao PIB do que a própria emissão de GEE.

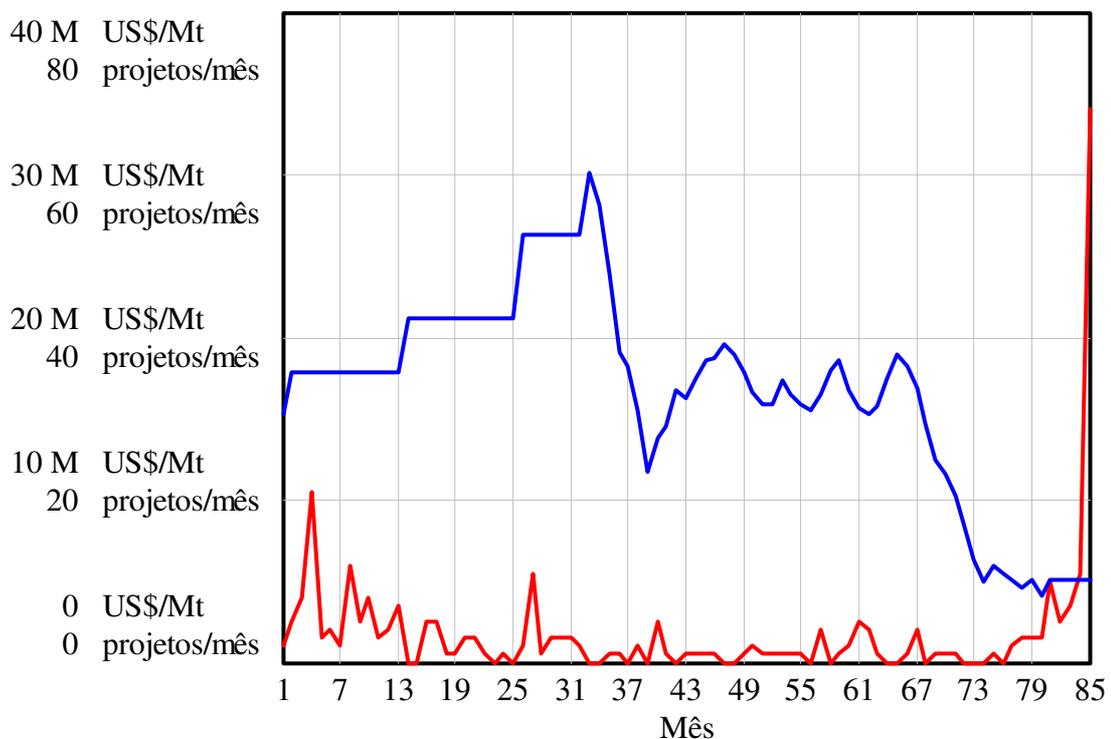
Embora o PIB tenha maior relação causal com o preço dos créditos de carbono é importante mencionar, de acordo com Carraro e Favero (2009), que aspectos de natureza política e de regulação também podem contribuir para a variação do preço das RCE, como a

incerteza sobre a continuidade do Protocolo de Quioto, cuja definição só ocorreu na COP-18, realizada no final de 2012. Com a definição que o Protocolo de Quioto continua até dezembro de 2020, a *European Energy Exchange* projetou uma retomada no valor das RCE a partir de 2013, até o ano de 2020, conforme pode ser observado no Gráfico 18, a partir do período 86 (janeiro/2013).

#### 4.6.4 Aumento no preço dos créditos de carbono tem relação com o aumento na quantidade de projetos de mecanismo desenvolvimento limpo no Brasil

Esta proposição procura verificar se há um efeito de causalidade entre o preço da RCE e o número de projeto de MDL desenvolvidos no Brasil. Os dados da fase inicial são reais, obtidos da UNFCCC, referente ao período de dezembro/2005 a dezembro/2012 (Gráfico 19).

**Gráfico 19 – Preço dos créditos de carbono versus projetos de MDL brasileiros aprovados no CEMDL/ONU (dezembro/2005 a dezembro/2012)**



Legenda:

- Preço RCE 2005-2012 ind
- Projetos MDL aprovados 2005-2012 ind

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Uma observação importante é sobre o crescimento exponencial no número de projetos de MDL aprovado no CEMDL/ONU, principalmente em dezembro de 2012 (período 85). Esse crescimento ocorreu justamente no mês em que a COP-18 definiu a continuidade do Protocolo de Quioto, até o ano de 2020.

Exceto para este período, verifica-se que o número de projetos de MDL aprovados mensalmente é muito pequeno, em relação ao total de projetos de MDL aprovados pelo CEMDL/ONU. Ainda, é possível observar que não há relação entre a aprovação dos projetos de MDL e o preço das RCE no período analisado. Esse fator fica evidente na Tabela 6, que destaca essa ausência de correlação. Para evitar que a tabela se tornasse muito extensa, optou-se pelas descontinuidades de tempo quando houvesse padrões semelhantes.

**Tabela 6 – Projetos de MDL aprovados e preço das RCE (dezembro/2005 a dezembro/2009)**

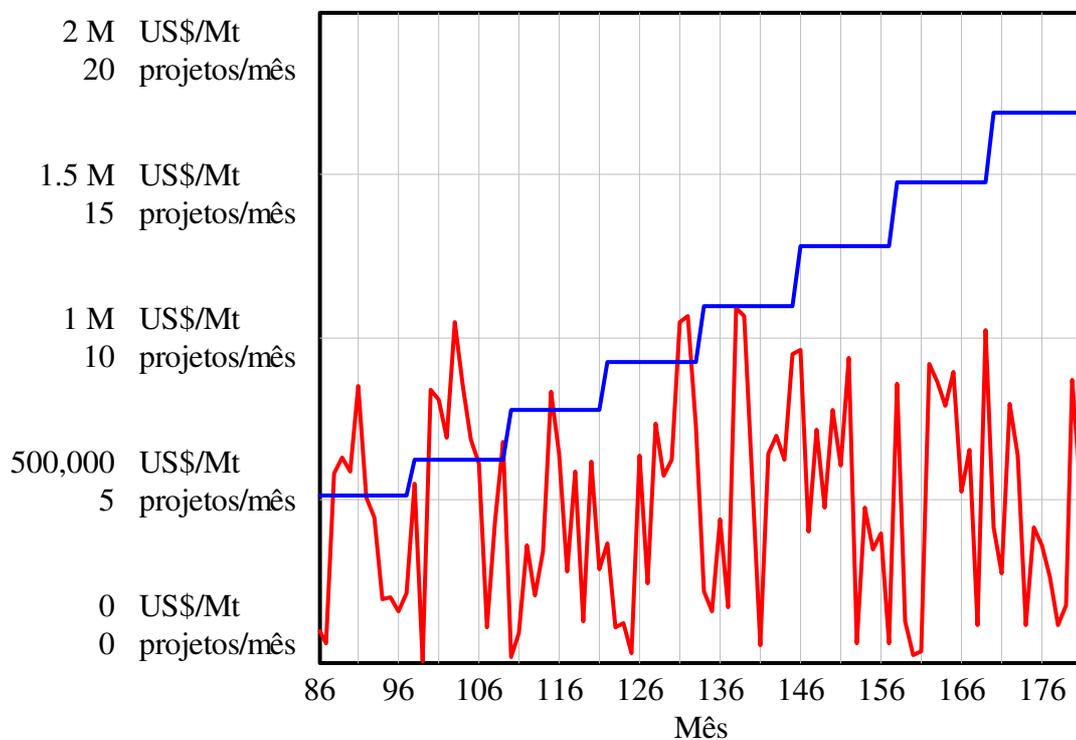
Período	Mês	Projetos MDL Aprovados 2005-2012 (projetos/mês)	Preço RCE 2005-2009 (US\$/Mt)
1	dez/05	2	15.300.000,00
2	jan/06	3	17.900.000,00
14	jan/07	0	21.110.000,00
26	jan/08	2	26.260.000,00
27	fev/08	11	26.260.000,00
33	ago/08	0	30.114.278,09
40	mar/09	5	13.801.053,87
57	ago/10	4	16.464.029,93
61	dez/10	5	15.583.154,39
62	jan/11	4	15.283.878,99
64	mar/11	0	17.534.486,39
65	abr/11	0	18.929.241,39
67	jun/11	4	16.857.652,12
68	jul/11	0	14.624.125,31
81	ago/12	10	5.028.901,26
82	set/12	5	5.028.902,26
83	out/12	7	5.028.903,26
84	nov/12	11	5.028.904,26
85	dez/12	68	5.028.905,26

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Em diferentes meses (janeiro/2007, agosto/2008, março/2011, por exemplo), embora o preço da RCE apresentasse um valor relativamente alto, a aprovação de projetos de MDL foi nula. Inversamente, nos meses de agosto/2012 a dezembro/2012, houve uma maior aprovação desses projetos no CEMDL/ONU. Isso indica uma relação não causal entre as duas variáveis. Talvez, a causalidade esteja relacionada aos fatores políticos e regulamentações dos órgãos que regem esse mercado, corroborando com UNEP (2007), Pinto *et al.* (2008) e Carraro e Favero (2009).

Para o período de simulação de janeiro/2013 a dezembro/2020, o preço da RCE foi obtido na *European Energy Exchange*, em base anual e convertidos em valor médio mensal. Por sua vez, o número de projetos foi estimado utilizando a função *Random Normal*, a partir de uma média de 3,37 projetos/mês (de dezembro/2005 a dezembro/2012) e desvio padrão de 7,86, o que não caracteriza uma distribuição normal. Tomou-se, então, para a função randômica o valor mínimo 0 (zero) e valor máximo de 11,24 para indicar a quantidade de projetos, uma vez que não há possibilidade de aprovação de projetos com valor negativo. O resultado é apresentado no Gráfico 20.

**Gráfico 20 – Preço dos créditos de carbono versus projetos de MDL brasileiros aprovados no CEMDL/ONU (janeiro/2013 a dezembro/2020)**



Legenda:

- Preço RCE futuro 2013-2020 projetado
- Projeção de aprovação de projetos MDL 2013-2020

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Nesta simulação o comportamento projetado para o número de projetos de MDL desenvolvidos no Brasil e aprovados no CEMDL/ONU manteve-se dentro dos limites randômicos definidos. Por sua vez, o preço das RCE voltou a aumentar. Desse modo, a análise do Gráfico 20 continua indicando uma relação não causal entre as duas variáveis, exclusivamente para o Brasil, sem poder generalizar aos demais países hospedeiros de projetos de MDL. Com esses resultados é refutada a proposição de que a quantidade de

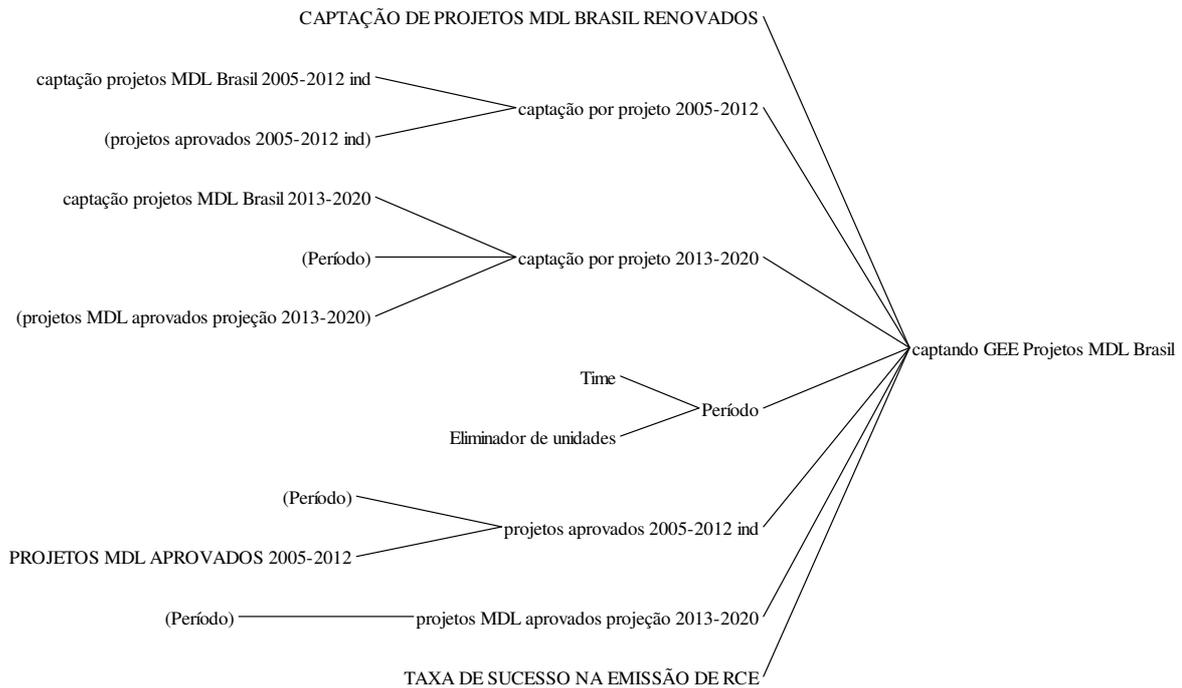
projetos de MDL no Brasil tem relação de causalidade com o preço dos créditos de carbono. Desse modo, sugere-se que outros fatores não contemplados no MDCC podem explicar melhor os motivos de desenvolver ou não projetos de MDL no Brasil.

Retomando a fundamentação teórica desta pesquisa, verificou-se que alguns fatores são mencionados como inibidores para o desenvolvimento de projetos de MDL, no contexto brasileiro. Entre os fatores mencionados, destaca-se: ausência de política pública nacional que viabiliza financiamento e transferência de tecnologia de acordo com a NAMA; os projetos de MDL desenvolvidos no Brasil capturam GEE (CO<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>) cuja potencialidade de gerar RCE é menor comparado com outros gases; os custos para registrar os projetos de MDL na CEMDL/ONU são altos e; falta mão de obra especializada para definir a linha de base e a metodologia dos projetos de MDL (UNEP, 2007; PINTO *et al.*, 2008; MERO, 2008; SILVA JUNIOR, 2011). Destarte, é plausível reconhecer que esses fatores estejam influenciando para a pequena participação brasileira na quantidade de projetos de MDL.

#### **4.6.5 Captação dos gases de efeito estufa dos projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo realizados no Brasil contribui para a compensação da emissão desses gases na Europa**

Para responder essa proposição do MDCC foi necessário considerar uma série de variáveis, como mostra a Figura 9. Salienta-se que se deve desconsiderar as variáveis com o termo “ind” e a “variável eliminador de unidades” por serem variáveis criadas, respectivamente, para indexar corretamente o mês de referência à equação e eliminar unidades em duplicidade na equação.

**Figura 9 – Relações causais na captação de GEE da Europa pelos projetos de MDL do Brasil**



Fonte: dados da pesquisa (2013).

As relações causais apresentadas na Figura 9, isto é, a captação de GEE pelos projetos de MDL realizados no Brasil foi calculada pela multiplicação do número de projetos e a taxa média de captação por projeto, tanto para o período inicial (dezembro/2005 a dezembro de 2012) como para o período de simulação (janeiro/2013 a dezembro/2020). Inclui, também, a captação de GEE realizado por projetos de MDL renovados. Para tanto realizou o seguinte cálculo:

$$A - B = C \quad (4)$$

$$C - D = E \quad (5)$$

Onde:

A: Projetos de MDL vencidos até 31/12/2012 (202 projetos de MDL)

B: Projetos de MDL vencidos não renováveis (58 projetos de MDL)

C: Projetos de MDL vencidos renováveis (144 projetos de MDL)

D: Projetos de MDL vencidos renováveis, não renovados (70 projetos de MDL)

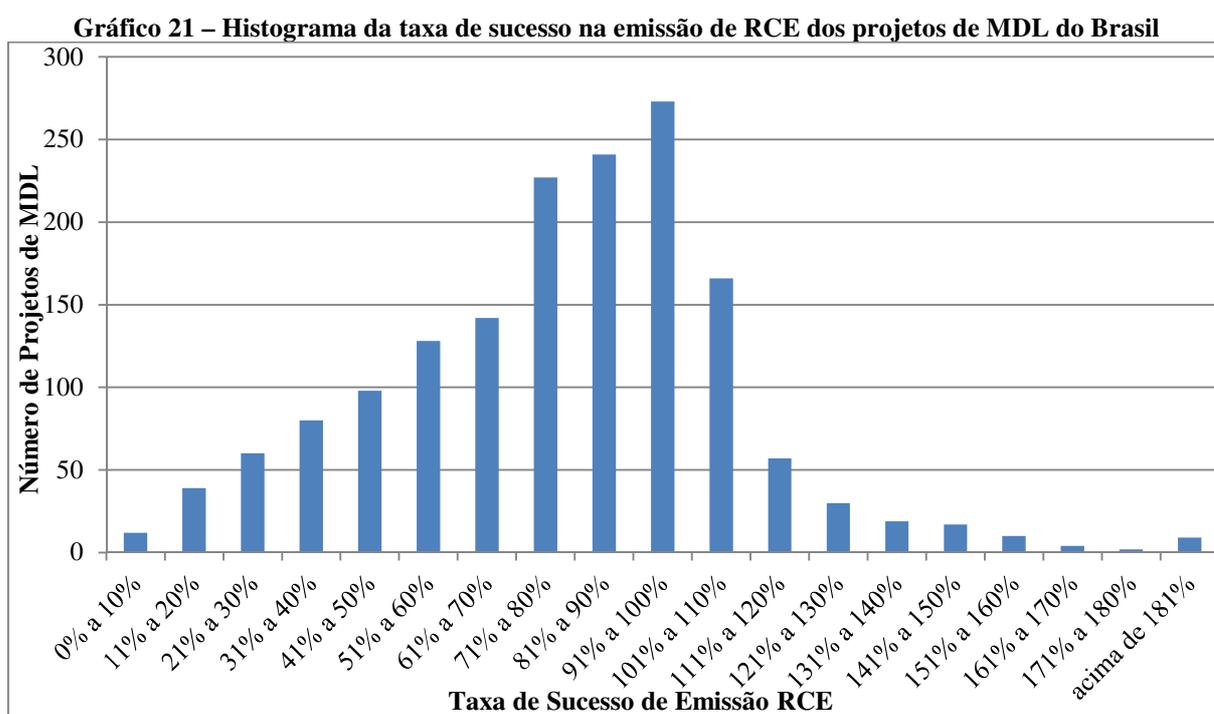
E: Projetos de MDL renovados (74 projetos de MDL)

Os dados sobre a quantidade de projetos de MDL vencidos até 31 de dezembro de 2012, sua tipologia (ser renovável ou não), bem como a quantidade de cada tipo de projeto, de projetos de MDL não renovados e de projetos de MDL renovados, foram obtidos no banco de

dados da UNFCCC. Quanto aos dados acerca da taxa média de captação de GEE por projeto, esses foram obtidos no banco de dados do UNEP Riso Centre CDM.

Ainda, o período de emissão das RCE dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil, de acordo com o banco de dados da UNFCCC, iniciou-se em abril/2000 e há projetos de MDL renovados ou aprovados para emitir RCE até dezembro/2019. Cabe salientar que, com base nos dados da UNFCCC, os projetos de MDL desenvolvidos no Brasil são predominantemente do tipo renovável. Sendo projetos renováveis, a maioria deles tem duração de 7 anos, por período de renovação. Contudo, observa também que, praticamente, metade dos projetos de MDL que poderiam pedir a renovação para o CEMDL/ONU não fez este pedido. Logo, sem a renovação do prazo do projeto não pode emitir créditos de carbono.

Para fazer a simulação do período de projetado (janeiro/2013 a dezembro/2020), o valor da captação de GEE dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil foi estimado por função randômica. E, a variável “Taxa de sucesso na emissão de RCE” foi calculada através de variação randômica, a partir da média de captação de todos os projetos, considerando desvio padrão como delimitador dos níveis mínimos e máximos de captação. A inclusão da função randômica foi necessária porque há uma variação significativa no sucesso de captação de GEE de um projeto para outro. Para elucidar essa variação foi elaborado um histograma (Gráfico 21), enquanto que a Tabela 7 mostra os seus detalhes quantitativos.



Fonte: dados da pesquisa (2013).

**Tabela 7 – Distribuição de frequência da taxa de sucesso na emissão de RCE dos projetos de MDL do Brasil**

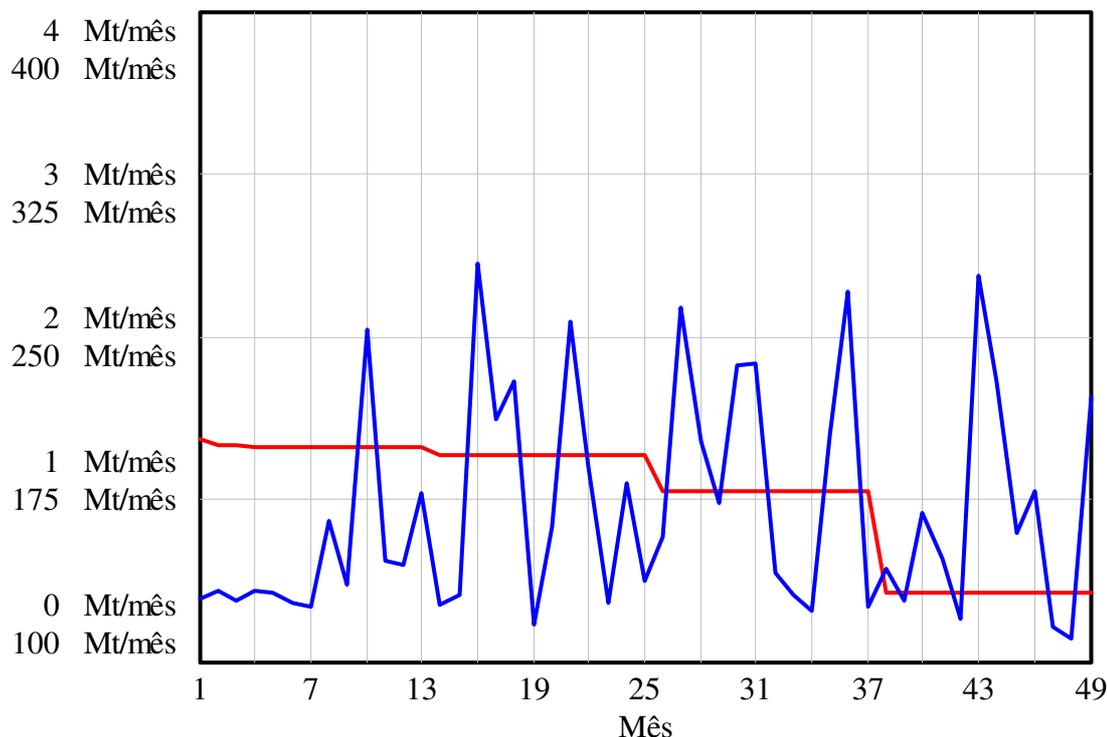
<b>Intervalo</b>	<b>Frequência</b>	<b>%</b>	<b>% Acumulado</b>
0% a 10%	12	0,74%	0,74%
11% a 20%	39	2,42%	3,16%
21% a 30%	60	3,72%	6,88%
31% a 40%	80	4,96%	11,83%
41% a 50%	98	6,07%	17,91%
51% a 60%	128	7,93%	25,84%
61% a 70%	142	8,80%	34,63%
71% a 80%	227	14,06%	48,70%
81% a 90%	241	14,93%	63,63%
91% a 100%	273	16,91%	80,55%
101% a 110%	166	10,29%	90,83%
111% a 120%	57	3,53%	94,36%
121% a 130%	30	1,86%	96,22%
131% a 140%	19	1,18%	97,40%
141% a 150%	17	1,05%	98,45%
151% a 160%	10	0,62%	99,07%
161% a 170%	4	0,25%	99,32%
171% a 180%	2	0,12%	99,44%
acima de 181%	9	0,56%	100,00%
<b>TOTAL</b>	<b>1.614</b>	<b>100,00%</b>	

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Com base no Gráfico 21 e na Tabela 7 verifica-se que as emissões dos créditos de carbono advindo dos projetos de MDL desenvolvidos nos Brasil não apresenta uma curva normal. Desse modo justifica o uso da função randômica para normalizar essa curva e possibilitar a simulação do MDCC, em consonância com as demais variáveis que também utilizou esta função.

Na sequência foi comparado o comportamento da captação de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil com a emissão de GEE pela Europa, para o período inicial (dezembro/2005 a dezembro/2009), usando os dados reais (Gráfico 22). Salienta-se que, apesar de dispor de dados reais de captação dos projetos até dezembro de 2012, o período de comparação limita-se ao período dos dados reais da emissão de GEE, isto é, dezembro/2009.

**Gráfico 22 – Captação de GEE dos projetos de MDL no Brasil versus emissão de GEE na Europa (dezembro/2005 a dezembro/2009)**



Legenda:

- Captação de GEE projetos MDL Brasil 2005-2009
- Produção GEE Europa 2005-2009

Fonte: dados da pesquisa (2013).

O Gráfico 22 deve ser analisado considerando o efeito da escala no eixo Y. Observa-se que a produção de GEE da Europa diminuiu no período de 2005 a 2009. Por sua vez, a captação de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil, para o mesmo período, tem um comportamento de oscilação. Entretanto, para melhor elucidar a participação do Brasil na captação de GEE em relação às emissões de GEE da Europa, foi elaborada a Tabela 8.

**Tabela 8 – Participação dos projetos de MDL do Brasil na compensação de GEE na Europa (2006 a 2009)**

Ano	GEE Capturado por Projetos MDL Brasileiros 2005-2009 (Mt/ano)	Emissão GEE Europa 2005-2009 (Mt/ano)	Participação dos projetos de MDL do Brasil na compensação de emissões de GEE Europa (%)
2006	3,58	2.719,63	0,13%
2007	12,45	2.687,62	0,46%
2008	12,29	2.637,78	0,47%
2009	9,01	2.456,08	0,37%

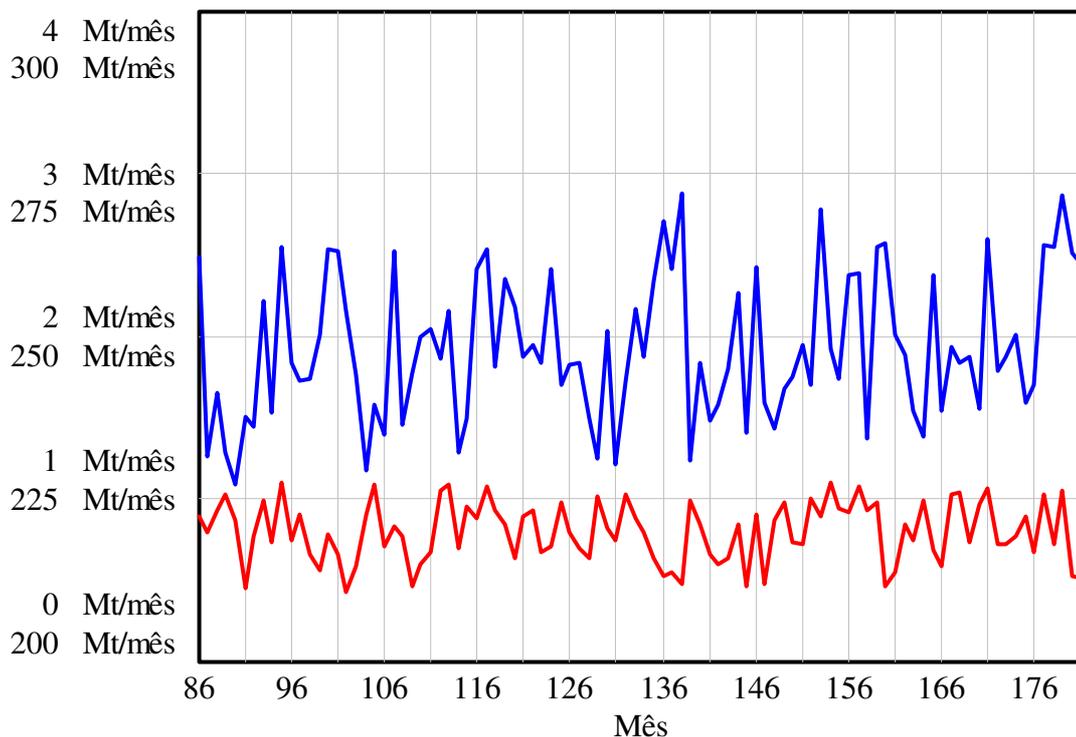
Fonte: dados da pesquisa (2013).

A análise da Tabela 8 indica que participação dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil para a compensação das emissões de GEE na Europa, no período de 2006 a 2009, foi

ínfima, não atingindo 0,5%, o que explica as curvas de comportamento de oscilação do Gráfico 22.

Para o período de simulação (janeiro/2010 a dezembro/2020) das emissões de GEE pela Europa e a captura desses gases pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil, os resultados estão evidenciados no Gráfico 23.

**Gráfico 23 – Captação de GEE dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil versus emissão de GEE na Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020)**



Legenda:

- Captação de GEE projetos MDL Brasil 2010-2020
- Emissão GEE Europa 2010-2020 projetado

Fonte: dados da pesquisa (2013).

O Gráfico 23 também deve ser analisado observando o eixo Y, devido ao uso de escala. Mas, o resultado da simulação segue os mesmos padrões de comportamento apresentados pelos dados reais (Gráfico 22): o Brasil tem uma contribuição pequena na compensação das emissões de GEE pela Europa. Para corroborar e elucidar esse comportamento foi elaborada a Tabela 9.

**Tabela 9 – Participação dos projetos de MDL do Brasil na compensação de GEE na Europa (2010 a 2020)**

Ano	GEE Capturado por Projetos MDL Brasileiros 2010-2020 (Mt/ano)	Emissão GEE Europa 2010-2020 (Mt/ano)	Participação dos Projetos Brasileiros na compensação do GEE Europa (%)
2010	10,96	2.651,40	0,41%
2011	11,41	2.604,38	0,44%
2012	15,94	2.611,96	0,61%
2013	14,27	2.644,23	0,54%
2014	17,82	2.653,82	0,67%
2015	20,01	2.626,74	0,76%
2016	18,69	2.617,89	0,71%
2017	18,92	2.656,66	0,71%
2018	20,31	2.652,16	0,77%
2019	19,37	2.622,79	0,74%
2020	22,06	2.651,93	0,83%
<b>Total</b>	<b>189,77</b>	<b>28.993,95</b>	<b>0,65%</b>

Fonte: dados da pesquisa (2013).

Para analisar a Tabela 9 devem ser considerados os valores totais porque usou a função randômica, embora calculados e apresentados anualmente. Desse modo, os GEE capturados pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil representam, aproximadamente, 0,65% das emissões desses gases na Europa, para o período final da simulação (dezembro/2020). Comparado com o período inicial (2005-2009) houve um crescimento significativo da participação dos projetos brasileiros (de 10,96 Mt/ano em 2010 para 22,06 Mt/ano em 2020, ou seja, aproximadamente 100%), porém ainda ínfimo em relação à contribuição para a compensação dos GEE da Europa.

Ainda, observa-se que, de 2011 para 2012, há uma significativa elevação nos percentuais de participação dos projetos de MDL do Brasil, passando de 0,44% para 0,61%, chegando a atingir 0,83% no final da década de 2020. Esse fator se deve à projeção randômica ter sofrido influência dos projetos aprovados entre agosto e dezembro de 2012 (Tabela 6), em decorrência das decisões na COP-18.

Considerando esses aspectos, sugere-se que a participação do Brasil na captura de GEE aumentará se: i) houver quebras de barreiras que dificultam o desenvolvimento de projetos de MDL no país; ii) diminuir o atraso temporal de aprovação dos projetos no CEMDL/ONU; iii) aumentar a taxa de sucesso dos projetos de MDL em capturar os GEE e; iv) aumentar a quantidade de projetos de MDL renovados. Esses fatores são colocados como preponderantes para o aumento da oferta de RCE, segundo UNEP (2007), Pinto *et al.* (2008), Mero (2008) e Silva Junior (2011).

Após analisar todos os pressupostos que a hipótese dinâmica sugeriu é possível sumarizar os resultados alcançados. Assim, foi refutado o pressuposto que o PIB da Europa está diretamente relacionado à emissão de GEE na Europa. Isto sugere que há outros fatores

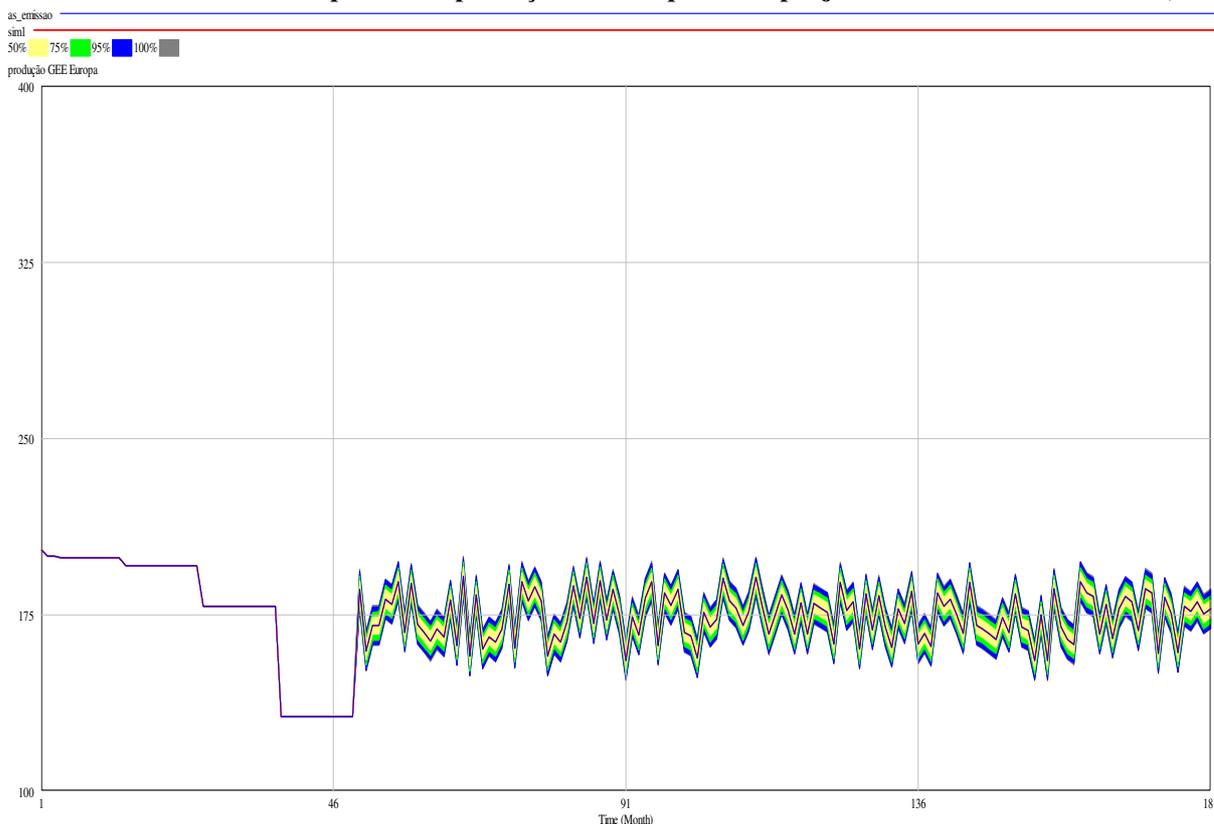
correlacionados com as emissões destes gases, entre eles a política de metas de redução das emissões definidas pelos países europeus (segundo pressuposto da hipótese dinâmica). Sobre esse pressuposto os resultados da análise apontaram que as metas foram atingidas no período histórico e devem ser atingidas para o período de simulação. A análise do terceiro pressuposto da hipótese dinâmica apontou que não há relação entre o aumento das emissões de GEE na Europa e o aumento no preço dos créditos de carbono. Esta refutação contraria a Lei da Oferta e Demanda e indica que há outras variáveis intervenientes, tais como o PIB, crise econômica e expectativa das decisões da COP-18. O quarto pressuposto da hipótese dinâmica do MDCC também foi negado, isto é, não há relação entre o preço dos créditos de carbono e a quantidade de projetos de MDL desenvolvidos no Brasil. Isto reforça que a variável preço dos créditos de carbono não é forte o suficiente para alavancar o aumento de projetos de MDL, tendo fatores locais, políticos e regulatórios que apresentam maior relação. E os resultados da análise do quinto pressuposto, indicam que a contribuição dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil para compensar as emissões de GEE da Europa é pequena.

#### 4.7 ANÁLISE DE POLÍTICAS DO PROTOCOLO DE QUIOTO

Esta etapa consistiu em executar o MDCC a partir de alterações nas variáveis endógenas. Para cada alteração na variável endógena (estoques), o modelo foi executado e observou se os resultados apresentavam robustez. Em cada execução eram geradas 2.000 simulações, conforme definido pelo *Vensim DSS*, versão 5.8c. O resultado das simulações gerou intervalos de confiança de 50%, 75%, 95% e 100%, também previamente definidos pelo *Vensim DSS*, versão 5.8c.

Iniciou-se a análise da política sobre “produção de GEE pela Europa” para o período de 2010-2020, utilizando os dados reais de emissão de GEE pela Europa no período de dezembro/2005 a dezembro/2009 (período inicial). Cabe lembrar que a produção de GEE pela Europa é uma relação causal entre as emissões destes gases e as metas de redução de GEE. Então, a análise desta política objetiva verificar a prospecção do comportamento da produção destes gases, considerando as metas vigentes de redução das emissões de GEE.

O Gráfico 24 mostra o resultado desta política.

**Gráfico 24 – Análise da política de produção de GEE pela Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020)**

Fonte: dados da pesquisa (2013).

A análise do gráfico infere que a variação na produção de GEE pela Europa, até o ano de 2020, é pouco significativa, mesmo para um intervalo de confiança de 95% (cor azul). Isto reforça os resultados apresentados na subseção 4.6.2, os quais indicaram que as atuais metas de redução das emissões de GEE na Europa estabelecidas até o ano de 2020 poderão ser atingidas e contribuem para reduzir a produção de GEE. Ainda, este resultado é coerente aos propósitos do Protocolo de Quioto e indica que este acordo é eficaz no quesito de minimizar os impactos ambientais negativos relacionados sem prejudicar o desenvolvimento econômico dos países.

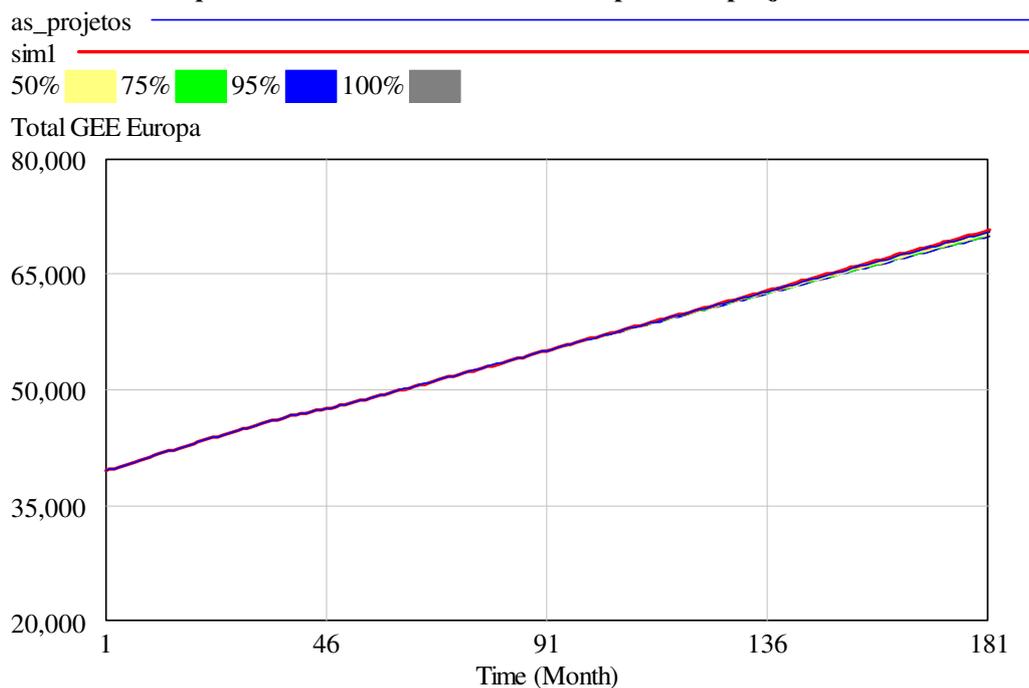
Entretanto, estudo realizado pela OCDE e pela *International Energy Agency*, em 2008, aponta que as emissões de GEE devem manter-se no atual patamar até o ano de 2020, tanto pelo efeito da crise financeira quanto pelas metas de redução que foram definidas até esta data. Após o ano de 2020 as emissões de GEE devem voltar a crescer. Ou seja, será necessário definir novas políticas de redução de emissão de GEE para a Europa, as quais podem ter efeitos sobre os países hospedeiros de projetos de MDL. Essas novas políticas devem ser negociadas a partir de 2013, quando inicia a discussão do acordo que sucederá o Protocolo de Quioto.

Assim, depreende-se a possibilidade de que as novas políticas sobre a produção de GEE a serem negociadas no novo acordo global não sejam limitadas apenas aos países considerados poluidores. Em outras palavras, o que foi definido no Acordo de Copenhague (quanto à voluntariedade dos países hospedeiros em estabelecer metas de redução das emissões de GEE) pode-se tornar um ato compulsório a partir de 2020. Esta possibilidade é levantada por Heimdal (2010) como uma das principais controvérsias sobre o novo acordo global.

Em seguida foi realizada a análise da política de “compensação da produção excedente de GEE pela Europa através da compra de créditos de carbono”. Essa política tem como pressuposto o Princípio Poluidor Pagador, segundo o qual quem polui deve arcar mediante um custo econômico de comprar os créditos de carbono por ter uma atividade poluidora ou um custo econômico de desenvolver e utilizar tecnologias e fontes energéticas limpas. Assim, o Brasil, sendo um país que vende créditos de carbono para a Europa, é um agente que contribui para a compensação das emissões excedentes dos GEE.

Essa política de compensar a produção excedente de GEE comprando créditos de carbono revela outro propósito do Protocolo de Quioto: fazer com que o desenvolvimento econômico dos países hospedeiros de projetos de MDL não prejudique o meio ambiente, de modo que o seu sistema de produção esteja em equilíbrio com o ecossistema. Tal política foi exposta na hipótese dinâmica do MDCC.

Para analisar a política de compensar a produção excedente de GEE pela Europa através da compra de créditos de carbono utilizou-se a variável “Total GEE Europa”, com base nos dados reais de dezembro/2005 a dezembro/2009, tendo como valores de entrada a captação de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil. O resultado desta política abrange o período de janeiro/2010 a dezembro/2020, como mostra o Gráfico 25.

**Gráfico 25 – Análise da política de total de emissões de GEE pela Europa (janeiro/2010 a dezembro/2020)**

Fonte: dados da pesquisa (2013).

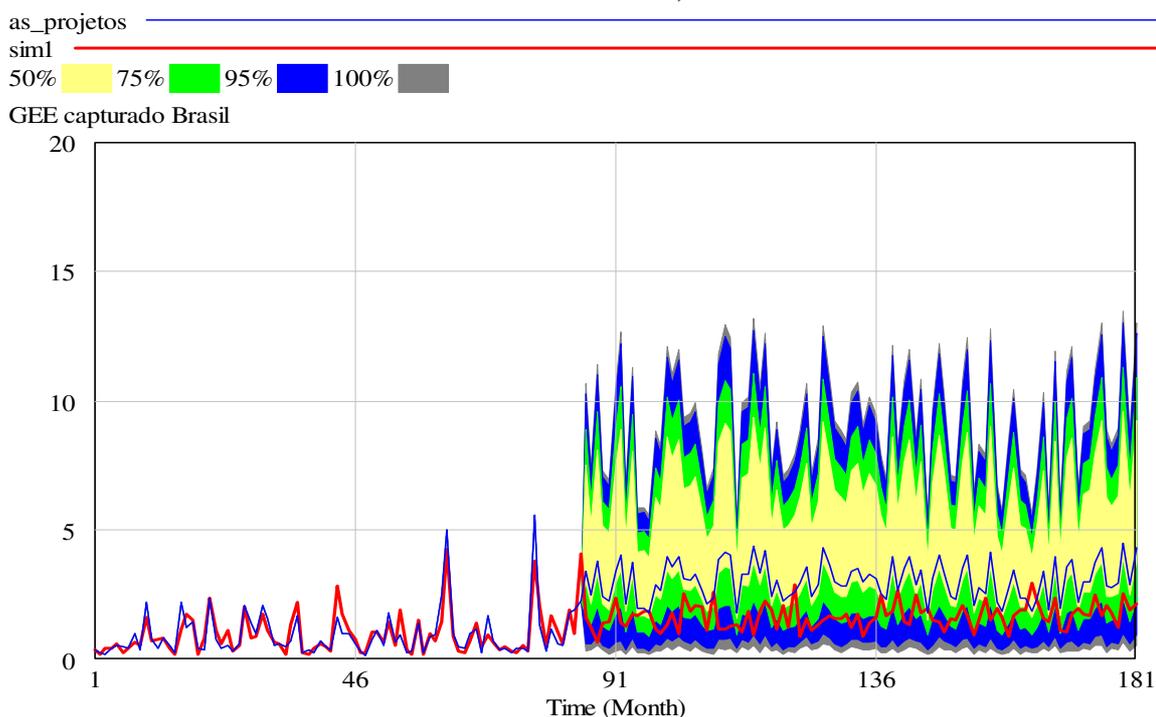
O resultado mostra que a contribuição dos projetos de MDL do Brasil para a compensação das emissões excedentes de GEE na Europa é praticamente nula. Esses resultados corroboram com aqueles apresentados na subseção 4.6.5 (a contribuição dos projetos de MDL do Brasil é pequena para fins de compensar os GEE emitidos pela Europa). Também corrobora com a expectativa da UNFCCC (2013a): a participação do Brasil entre os países que geram os créditos de carbono deve ser de, no máximo, 3,5% para os próximos anos, frente aos atuais 7% em 2012. Além disso, reforça o que foi relatado na familiarização do problema: a vantagem de o Brasil ter uma matriz energética predominantemente limpa torna-se um fator restritivo para aumentar a sua participação no mercado de créditos de carbono. Então, a China e a Índia, por exemplo, diferentemente do Brasil, tem vantagem porque desenvolvem projetos de MDL que contribuem tanto para mudar a sua matriz energética quanto para gerar créditos de carbono em uma proporção maior que os projetos brasileiros, devido aos tipos de gases que são mitigados. Contudo, essa menção sobre a China e Índia não são conclusivas, pois os resultados estão limitados ao Brasil.

Por outro lado, também reforça que a economia brasileira, quanto ao uso das fontes de energia, está mais próxima do conceito de economia sustentável. Sobre isto, foi analisada a política que contempla o contexto brasileiro de captura de GEE pelos projetos de MDL.

Para a análise considerou os dados reais de emissão de RCE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil (dezembro/2005 a dezembro/2012). Cabe comentar que a captura de GEE pelos projetos de MDL do Brasil tem uma relação causal com a quantidade de projetos aprovados e renovados no CEMDL/ONU, com a taxa de sucesso de emissão das RCE e com o período de duração desses projetos (Figura 9, na seção 4.6.5).

O Gráfico 26 mostra o resultado da análise desta política.

**Gráfico 26 – Análise da política de captura de GEE pelos projetos de MDL do Brasil (janeiro/2013 a dezembro/2020)**



Fonte: dados da pesquisa (2013).

O resultado da análise desta política indica, com 95% de confiança (cor azul), que se os projetos de MDL desenvolvidos no Brasil obtiverem aumento na captura dos GEE, aumentará o sucesso de emissão dos créditos de carbono. Contudo, para alcançar esse resultado é imprescindível que alguns fatores condicionantes sejam superados, tais como: políticas nacionais proativas para o desenvolvimento de projetos de MDL cujas linhas de base e metodologia capturem gases que geram maior quantidade de RCE, para isto é essencial a transferência de tecnologias e; obter a aprovação de novas linhas de base e de metodologias que o CEMDL/ONU ainda não reconhece como válidas para comprovar a adicionalidade do projeto de MDL, principalmente em energias renováveis provenientes de biomassa.

Complementarmente, de acordo com o plano da matriz energética do Brasil para 2030, está previsto um aumento na participação das fontes renováveis, ou seja, do atual 44% para 46%. Esse aumento mostra que o uso de tecnologias limpas é força motriz na geração de energia para atender a demanda brasileira, de modo que a estimativa de emissões de GEE é de aumentar em 3,5% ao ano (em relação ao ano de 2005) enquanto que o aumento pela demanda de energia (3,8% ao ano) para igual período. E, o aumento da demanda de energia é também menor que a taxa de crescimento anual do PIB para o mesmo período.

Essas expectativas corroboram com os resultados da pesquisa de Pao e Tsai (2010), que indicam que, no longo prazo, as emissões de GEE, a demanda de energia e o crescimento econômico entre os países do BRIC sejam de equilíbrio. Com base nesses fatos, entende-se que é quase inexequível uma mudança significativa na captação de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil, por conseguinte, aumentar a participação no mercado de créditos de carbono em um curto período de tempo. Esse resultado reforça que o Brasil deve continuar com uma participação pequena no mercado de créditos de carbono para a compensação das emissões excedentes de GEE pela Europa (subseção 4.6.5 do Capítulo 4) porque sugere um estado de equilíbrio entre a produção de GEE no Brasil e captura desses gases pelos projetos de MDL brasileiros. Este estado que o Brasil pode alcançar é o mesmo que foi vislumbrado pelo Protocolo de Quioto em nível mundial.

Sumarizando as políticas analisadas do Protocolo de Quioto, tem-se: i) a política sobre “produção de GEE pela Europa” indica que as metas de redução estabelecidas pelos países europeus poderão ser atingidas até o ano de 2020 e essas metas reduzem a produção das emissões de GEE, atendendo aos objetivos do Protocolo de Quioto; ii) a da política de “compensação da produção excedente de GEE pela Europa através da compra de créditos de carbono” apontou que o Brasil tem participação pequena neste quesito, mas esse resultado indica que a economia brasileira pode ser considerada sustentável, o que não deixa de ser um dos objetivos do Protocolo de Quioto e; iii) a política sobre a “captura de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil” mostra que o aumento desses projetos está relacionado à fatores políticos locais e à fatores de regulamentação dos projetos de MDL no CEMDL/ONU, ou seja, os aspectos regulatórios e institucionais são intervenientes na geração de créditos de carbono.

## 5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa teve como objetivo desenvolver um modelo de simulação que captasse a dinâmica do mercado de créditos de carbono e contemplasse os projetos de MDL. A motivação de realizar este estudo tem relação com o interesse do pesquisador pelo tema e pelo fato de ter identificada uma lacuna entre os estudos correlatos e, ao mesmo tempo, é uma problemática no âmbito mundial.

Conforme exposto na introdução, desde a década de 1990 a Ecologia e a Engenharia têm realizado diversos estudos sobre mudanças climáticas e, uso de energias fósseis e alternativas de substituição. A Economia, usando modelos econométricos, enfatiza as relações entre as variáveis micro e macroeconômicas, sem considerar os efeitos das políticas inerentes ao tema. Contudo, estas pesquisas enfatizam o mercado de créditos de carbono e os projetos de IC. Recentemente a Administração tem realizado pesquisas que versam, principalmente, sobre a estratégia de uso e desenvolvimento de tecnologias limpas pelas empresas e como essas tecnologias são capazes de mitigar ou capturar as emissões de GEE, identificando os fatores intervenientes no mercado de carbono e desenvolvimento de projetos de IC e MDL. E, na área de Sistema de Informação, especificamente modelagem de sistemas usando a dinâmica de sistemas, verificou que os estudos contemplam, principalmente, o contexto europeu sobre a demanda de energias e projetos de IC.

Ao concluir esta pesquisa, depreende-se que o seu objetivo foi alcançado ao adicionar às pesquisas já realizadas conhecimento que ainda não havia sido gerado até o momento sobre o mercado de créditos de carbono e projetos de MDL, principalmente sobre o contexto brasileiro. Sem dúvida, a técnica de modelagem computacional baseada em dinâmica de sistemas utilizada nesta pesquisa foi importante para isto. Através da hipótese dinâmica do MDCC foi possível capturar e compreender a essência das políticas que constituem o Protocolo de Quioto, como acordo político entre as nações para minimizar os efeitos negativos das ações antrópicas no meio ambiente decorrente da busca pelo desenvolvimento econômico, ou seja, um comportamento de equilíbrio.

Acerca do comportamento de equilíbrio do MDCC, conclui-se que o mercado de créditos de carbono e as metas de redução das emissões de GEE foi uma estratégia eficaz, encontrada pela ONU, para manter o desenvolvimento econômico mundial, minimizar os efeitos adversos das emissões de GEE e precaver-se da falta de recursos energéticos. Em

outras palavras, se não fossem estabilizados os problemas ambientais provenientes de ações antrópicas para o desenvolvimento econômico, esses problemas passariam a prejudicar a própria política de desenvolvimento.

Por isto, o comportamento de equilíbrio que a hipótese dinâmica do MDCC evidencia que a finalidade do Protocolo de Quioto foi de anular os eventos que o afetam e prejudicam o alcance do desenvolvimento econômico mundial. Destarte que os países hospedeiros são incentivados a desenvolver e usar tecnologias limpas (não poluir), através dos projetos de MDL, enquanto que os países desenvolvidos e industrializados são incentivados à reduzir suas emissões de GEE (poluir menos), por meio de projetos de IC, e contribuir com a transferência de tecnologias aos países hospedeiros dos projetos de MDL.

Ainda sobre esse comportamento de equilíbrio do MDCC, conclui-se que a Europa pode ter um papel dominante no mercado de créditos de carbono, no longo prazo, preponderando sobre as políticas a serem traçadas no novo acordo mundial, que sucederá o Protocolo de Quioto. Pois, conforme os resultados obtidos na análise de políticas (seção 4.7), a Europa tem condições de atingir as metas de redução de emissão de GEE até o ano de 2020. Atingindo essa meta já não é mais necessário comprar créditos de carbono, logo extingue a necessidade de ter projetos de MDL. Contudo, se isto ocorrer pode haver um efeito negativo de desenvolvimento econômico nos países hospedeiros. Isto é, sem dúvida, uma preocupação da ONU e do Banco Mundial.

Adicionalmente, conclui-se que a UNFCCC também tem uma função importante no mercado de créditos de carbono, agindo como mediadora nas negociações para o novo acordo mundial. Ou seja, a UNFCCC pode intervir para que os projetos de MDL continuem tendo uma participação nas políticas climáticas mundiais. Essa interveniência pode ser, por exemplo, em mudar o escopo bem como aprovar novas metodologias e linhas de bases do MDL; estabelecer que os países hospedeiros com economias emergentes definam, não mais de modo voluntário, metas de redução das emissões de GEE e/ou que estabeleçam políticas nacionais que favoreçam a criação de projetos de MDL. Por isto, sugere que o novo acordo mundial deve manter o mercado de créditos de carbono em um comportamento de equilíbrio, tal como foi identificado na hipótese dinâmica do MDCC.

Ainda, sobre a conclusão de a UNFCCC ter a função de mediadora no mercado de créditos de carbono, estende para este órgão também a função de agente econômico. Foi depreendido durante o período de coleta de dados que a UNFCCC estava na expectativa da COP-18, pelo fato que durante todo o ano de 2012 a base de dados sobre os projetos de MDL

não tinha atualização periódica, poucos projetos de MDL foram aprovados nos meses precedentes e as notícias veiculadas em seu sítio eram em torno desta conferência. Ao término da COP-18 e com a decisão da continuidade do Protocolo de Quioto, essa base de dados passou a ser atualizada diariamente por um período que se estendeu até meados do mês de fevereiro/2013, aproximadamente, bem como uma quantidade enorme de projetos de MDL foram aprovados em dezembro/2012 (Tabela 6). E, alguns projetos de MDL aprovados tinham data retroativa àquela que o resultado foi divulgado. Acrescenta a isto, que somente após o término da COP-18, a *European Energy Exchange* divulgou a expectativa dos preços futuros de 2013 a 2020 para os créditos de carbono.

Essas evidências corroboram com Carraro e Favero (2009) e UNEP (2007) ao relatarem que os processos políticos e administrativos sobre o Protocolo de Quioto são aspectos que influenciam no mercado de créditos de carbono, via as instituições participantes e/ou interessadas na UNFCCC (governos dos países e organismos mundiais, por exemplo). Portanto, esta afirmação explica, parcialmente, a negação do pressuposto de que o aumento do preço dos créditos de carbono não tem relação causal direta com o aumento das emissões de GEE.

Portanto, especificamente sobre os dois pressupostos do MDCC que foram refutados (a demanda de créditos de carbono não tem relação de causa-efeito com a aprovação de novos projetos de MDL e, a quantidade de projetos de MDL não tem relação com o preço das RCE) deve considerar que há fatores de natureza institucional e regulatória que podem contribuir para a variação do preço das RCE. Isto pode ser evidenciado com o fato de que à medida que aumentava a incerteza sobre a continuidade do Protocolo de Quioto, os preços dos créditos de carbono caíam. Com a aprovação da continuidade deste acordo até 2020, foi projetada uma retomada de crescimento no valor desses créditos (Gráfico 18). Portanto, há fatores que não estão contemplados na Lei da Oferta e Procura que regem e intervêm na dinâmica do mercado de créditos de carbono. Embora se conclua que os resultados discutidos sobre esses pressupostos e sobre essa política não podem ser generalizados aos demais países hospedeiros, pois se limita ao contexto brasileiro e está fundamentada na análise da política de contribuição dos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil para a compensação das emissões de GEE pela Europa, se a força institucional da UNFCCC, como agente econômico neste mercado, for verdadeira, caso o modelo desenvolvido nesta pesquisa seja reaplicado aos demais países hospedeiros, os resultados aqui obtidos podem os mesmos.

Ainda, conclui-se, com base na política de captura de GEE pelos projetos de MDL desenvolvidos no Brasil, que as economias emergentes com matriz energética limpa, tal como o Brasil, deve ter taxa de crescimento de emissões de GEE em consonância com a sua captura e mitigação desses gases. Em outras palavras, atinge a condição de economia limpa e sustentável, em um comportamento de equilíbrio em dinâmica de sistemas. Esta condição pode ser uma das possíveis estratégias para o novo acordo mundial: haverá países que devem desenvolver projetos de MDL ou de IC, no caso dos países europeus, combinada com metas de redução das emissões de GEE cuja prioridade é obter o comportamento de equilíbrio. Caso haja excedente de créditos de carbono podem comercializar com os países que estão acima das suas emissões limites, mas não é a sua prioridade vender créditos de carbono. Por outro lado, o novo acordo mundial pode reconhecer que haverá países que continuarão tendo excedente de emissões de GEE, os quais precisarão comprar os créditos de carbono, provenientes de projetos de MDL dos países hospedeiros.

## 5.1 CONTRIBUIÇÃO DA PESQUISA

A principal contribuição desta pesquisa consiste na análise de políticas deste mercado considerando a demanda dos créditos de carbono pela Europa e a participação dos projetos de MDL, aplicadas ao contexto brasileiro. Os resultados alcançados nesta pesquisa mostram que a demanda de créditos de carbono depende dos países signatários do Protocolo de Quioto e que fazem parte do Anexo I. E, por outro lado, a oferta desses créditos de carbono depende dos fatores políticos e institucionais dos países hospedeiros em desenvolver projetos de MDL. Esses resultados indicam que a decisão de desenvolver projetos de MDL deve ser orientada pela demanda dos créditos de carbono e, no caso brasileiro, atentar-se às novas regras que podem ser definidas no novo acordo mundial cujas negociações estão iniciadas. Essas regras podem influenciar e definir como deve ser a contribuição do Brasil no mercado de créditos de carbono.

Outra contribuição deste estudo foi o desenvolvimento do modelo de simulação baseado em dinâmica de sistema que contemple. Os estudos correlatos que utilizaram esta técnica de modelagem não contemplam a análise da demanda dos créditos de carbono,

conforme exposto na seção 2.3 desta pesquisa. Assim, esta pesquisa contribui para área de modelagem de sistemas ao propor um modelo que deve ser aprimorado, como novos estudos.

Em relação à área de administração, esta pesquisa contribui pelo fato de abordar um tema incipiente e sob perspectiva de análise de políticas. Os primeiros artigos publicados datam do final da década de 1990, provenientes das áreas de Ecologia, Economia e Engenharias (Agronômica, Ambiental, Florestal e Sanitária), conforme pesquisa realizada nos bancos de dados da EBSCO e Web of Science, em setembro de 2010. Com isto, observa-se que Administração ainda não encapsulou a temática como potencial linha de pesquisa. Sobre isto, há no Brasil apenas dois grupos de pesquisas em Administração<sup>11</sup>, área de Gestão Ambiental e Desenvolvimento Sustentável, registrados no Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) cuja linha de pesquisa seja Projetos de MDL, conforme pesquisa realizada na base de dados do Diretório dos Grupos de Pesquisas do Brasil, do CNPq, em maio de 2011. Isto reforça a importância desta pesquisa para a área de Administração.

## 5.2 LIMITAÇÕES DA PESQUISA

Ao desenvolver um modelo de simulação não é possível de capturar todas as variáveis e relações que acontecem no sistema real. Outras limitações são provenientes da carência de dados confiáveis tanto para o período histórico como para o período de simulação. Por isto, o MDCC apresenta algumas limitações.

Os dados do período histórico são os principais motivos que limitam o modelo. Conforme foi exposto ao longo deste relatório, os dados eram divergentes entre as fontes consultadas, por vezes, incompletos, de modo que inviabilizou a ampliação do horizonte de tempo de simulação de maneira plausível. O fato do mercado de carbono ser recente, cuja temporalidade de existência é de alguns anos, tornou-se uma limitação natural do modelo. Essa limitação refletiu, inclusive, no período de simulação que ficou limitado entre 2013 e 2020, pela ausência de informações que pudesse fazer a análise de cenários. Também houve a

---

<sup>11</sup> Esses grupos de pesquisa são: CLEAN - Centro de Estudos em Planejamento do Agronegócio Sustentável (USP), registrado em 2007, e Governança Ambiental Global e Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (interinstitucional - UFBA e UFRGS), registrado em 2008.

limitação dos dados obtidos serem secundários, de modo que não foi possível eliminar os vieses das metodologias de tratamento destes dados.

Outra limitação da pesquisa foi o fato do MDCC ser aplicado ao contexto brasileiro, cujos resultados não podem ser generalizados. Tal limitação se deve às características dos países hospedeiros e, por conseguinte, dos projetos de MDL desenvolvidos em cada país; as políticas nacionais para esses projetos e; do acesso aos dados e a confiabilidade nestes dados. Por isto, e conforme exposto na seção 1.4, não é recomendável o desenvolvimento de um modelo de simulação macro, sem antes estudar com profundidade as especificidades de cada país (ou grupo de países similares) e seus tipos de projetos bem como os dados obtidos, para que sejam definidas com maior segurança quais variáveis ou dados podem ser agregados ou segregados, ou ainda, excluídos do modelo.

### 5.3 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Para pesquisas futuras sugere aprimorar o MDCC e as limitações apontadas neste modelo. Outras sugestões mais abrangentes são:

- Desenvolver um modelo de simulação para outros países hospedeiros, principalmente para a China e Índia.
- Desenvolver um modelo de simulação considerando o mercado voluntário de créditos de carbono.
- Fazer um estudo sobre as condições de continuidade dos projetos de MDL caso não haja mais demanda por esses créditos.
- Desenvolver um estudo sobre as políticas vigentes a luz da teoria dos jogos e equilíbrio de Nash.

Nota-se que as sugestões propostas abrangente diversas perspectivas de estudos, não limitando a modelagem de sistemas. Isto mostra que este tema é um campo de pesquisa com muitas oportunidades de estudo.

## REFERÊNCIAS

AKPINAR, Y. A.; SAYSEL, A. K. A dynamic simulation model of carbon circulation and methane feedbacks in anthropogenic climate change. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SYSTEM DYNAMICS, 28<sup>th</sup>, 2010, Seoul, Korea. **Proceedings...** Disponível em: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2010/proceed/index.html>. Acesso em: 22 abr. 2011.

AMERICANO, B. **O estágio atual das negociações sobre NAMAs:** implicações para o Brasil e para o futuro das negociações sobre mudanças climáticas. Boletim Regional, Urbano e Ambiental. Brasília, IPEA, n. 4, p. 69-74, jul. 2010.

BLYTH, W.; BUNN, D.; KETTUNEN, J.; WILSON, T. Policy interactions, risk and price formation in carbon markets. **Energy Policy**, v. 37, p. 5192–5207, 2009.

BOLSA DE MERCADORIA E FUTUROS (BM&F). Disponível em: <http://www.bmfbovespa.com.br/pt-br/mercados/mercadorias-e-futuros.aspx?idioma=pt-br>. Acesso em: 20 jul. 2010.

BOSSEL, Hartmut. **Systems and Models:** complexity, dynamics, evolution, sustainability. Norderstedt (Germany): Books on Demand GmbH, 2007.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Relatório do Processo 48500.004247/2009-37.** Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/120/documento/relatorio\\_e\\_voto\\_48500.004247.2009-37\\_.pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2010/120/documento/relatorio_e_voto_48500.004247.2009-37_.pdf). Acesso em: 02 jul. 2012.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei nº 493/07.** Dispõe sobre a organização e regulação do mercado de Carbono na Bolsa de Valores do Rio de Janeiro através da geração de Redução Certificada de Emissão - RCE em projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo - MDL. Disponível em: <http://www.camara.gov.br/sileg/MontarIntegra.asp?CodTeor=486621>. Acesso em: 23 jul. 2010.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior; Pricewaterhouse&Coopers. **Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo no Brasil:** novas perspectivas do setor produtivo. Disponível em: <http://www.desenvolvimento.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=1805>. Acesso em: 24 set. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Programa Nacional de Mudanças Climáticas.** Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/4016.html>. Acesso em: 23 jul. 2010.

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Status atual das atividades de projeto no âmbito do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) no Brasil e no mundo (última compilação do site da CQNUMC: 31 de março de 2011).** Disponível em: <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/42954.html>. Acesso em: 21 abr. 2011(a).

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. Coordenação-Geral de Mudanças Globais de Clima. **Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima**. Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2010. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0215/215070.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0215/215070.pdf)>. Acesso em: 02 mai. 2011(b).

BRASIL. Ministério da Ciência e Tecnologia. **Acordo de Copenhague de 18 de dezembro de 2009**. Disponível em: <[http://www.mct.gov.br/upd\\_blob/0211/211699.pdf](http://www.mct.gov.br/upd_blob/0211/211699.pdf)>. Acesso em: 02 mai. 2011(c).

BRASIL. **Portal Brasil**. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/linhadotempo/epocas/2010/cop-16-2013-cancun-mexico>>. Acesso em: 02 mai. 2011(d).

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Matriz Energética Nacional 2030**. Brasília: MME: EPE, 2007.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Balanco Energético Nacional 2012: resultados preliminares ano base 2011**. Brasília: MME: EPE, 2012.

BRAUN, M. The evolution of emissions trading in the European Union – the role of policy networks, knowledge and policy entrepreneurs. **Accounting, Organizations and Society**, v. 34, p. 469–487, 2009.

CAPOOR, K.; AMBROSI, P. **State and trends of the carbon market 2003**. Banco Mundial e IETA (International Emissions Trading Association), Washington DC, Dec. 2003.

CAPOOR, K.; AMBROSI, P. **State and trends of the carbon market 2004**. Banco Mundial e IETA (International Emissions Trading Association), Washington DC, June 2004.

CAPOOR, K.; AMBROSI, P. **State and trends of the carbon market 2005**. Banco Mundial e IETA (International Emissions Trading Association), Washington DC, May 2005.

CAPOOR, K.; AMBROSI, P. **State and trends of the carbon market 2006**. Banco Mundial e IETA (International Emissions Trading Association), Washington DC, May 2006.

CAPOOR, K.; AMBROSI, P. **State and trends of the carbon market 2007**. Banco Mundial e IETA (International Emissions Trading Association), Washington DC, May 2007.

CAPOOR, K.; AMBROSI, P. **State and trends of the carbon market 2008**. Banco Mundial e IETA (International Emissions Trading Association), Washington DC, May 2008.

CAPOOR, K.; AMBROSI, P. **State and trends of the carbon market 2009**. Banco Mundial e IETA (International Emissions Trading Association), Washington DC, May 2009.

CAPOOR, K.; AMBROSI, P. **State and trends of the carbon market 2010**. Banco Mundial e IETA (International Emissions Trading Association), Washington DC, May 2010.

CARBON DISCLOSURE PROJECT. **Carbon Disclosure Project Relatório 2006 – Brasil**. Disponível em: <[https://www.cdproject.net/CDPResults/CDP4\\_Brazil\\_Report.pdf](https://www.cdproject.net/CDPResults/CDP4_Brazil_Report.pdf)>. Acesso em: 26 set. 2010.

CÁRDENAS, L. M.; FRANCO, C. J.; DYNER, I. A system dynamics model for assessing the UK carbon market. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SYSTEM DYNAMICS, 29<sup>th</sup>, 2011, Washington, United States of America. **Proceedings...**, Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2011/proceed/index.html>>. Acesso em: 02 fev. 2012.

CARRARO, C.; FAVERO, A. The Economic and Financial Determinants of Carbon Prices. **Journal of Economics and Finance**, v. 59, n. 5, p. 396-409, 2009.

CASARA, A. C. **Direito Ambiental do Clima e Créditos de Carbono**. Curitiba: Juruá, 2009.

CHEVALLIER, J. Carbon futures and macroeconomic risk factors: a view from the EU ETS. **Energy Economics**, v. 31, p. 614-625, 2009.

CHEVALLIER, J. Modelling risk premia in CO<sub>2</sub> allowances spot and futures prices. **Economic Modelling**, v. 27, p. 717-729, 2010.

CONEJERO, Marco Antônio. **Marketing de Créditos de Carbono: um estudo exploratório**. 209 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo. Ribeirão Preto, 2006.

CUNHA, R. V. **A crise financeira internacional no Mercado de Carbono: um estudo sobre os canais de transmissão**. 81 f. Dissertação (Mestrado em Economia Política) – Pontifícia Universidade Católica de São Paulo. São Paulo, 2009.

DECHEZLEPRÊTRE, Antoine; GLACHANT, Matthieu, MÉNIÈRE, Yann. Technology transfer by CDM projects: a comparison of Brasil, China, India and Mexico. **Energy Policy**, 37, 2009, p. 703-711.

DI GIULIO, E.; MIGLIAVACCA, S. Italy facing the EU Emissions Trading Scheme: some scenarios by the ICE model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SYSTEM DYNAMICS, 27<sup>th</sup>, 2009, Albuquerque, New Mexico, USA. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2009/proceed/index.html>>. Acesso em: 22 abr. 2011.

DIXIT, A. K.; PINDYCK, R. S. **Investment under uncertainty**. Princeton, New Jersey: Princeton, University Press, 1994.

DURAND-LASSERVE, O.; PIERRU, A.; SMEERS, Y. Uncertain long-run emissions targets, CO<sub>2</sub> price and global energy transition: a general equilibrium approach. **Energy Policy**, v. 38, p. 5108-5122, 2010.

EUROPEAN CLIMATE EXCHANGE. Disponível em: <<http://www.ecx.eu/>>. Acesso em: 26 jul. 2010.

FAGES, E. **Carbon pricing and technology deployment**. In: Greenhouse Gas Market Report 2010 - Post Copenhagen and Climate Policy: where global emissions trading goes from here. Gevene, Switzerland, International Emissions Trading Association (IETA): 2010, p. 127-130.

FANKHAUSER, S.; HEPBURN, C. Designing carbon markets, Part I: Carbon markets in time. **Energy Policy**, v. 38, p. 4363–4370, 2010a.

FANKHAUSER, S.; HEPBURN, C. Designing carbon markets, Part II: Carbon markets in space. **Energy Policy**, v. 38, p. 4381–4387, 2010b.

FERNANDES, A. C. **Scorecard Dinâmico**: em direção à integração da Dinâmica de Sistemas com o Balanced Scorecard. 2003. 311 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

FIGUERES, C.; STRECK, C. The Evolution of the CDM in a Post-2012 Climate Agreement. **The Journal of Environment & Development**, v. 18, n. 3, p. 227-247, Sept. 2009.

FIDDAMAN, T. **Feedback Complexity in Integrated Climate-Economy Model**. 1997. 360 f. Thesis (Doctor of Philosophy in Management) – Massachusetts Institute of Technology (MIT) Sloan School of Management, Cambridge, MA, 1997. Disponível em: <<http://www.metasd.com/papers/Fiddaman%20Dissertation%20Climate%20FREE.PDF>>. Acesso em: 13 mai. 2011.

FIDDAMAN, T. Exploring policy options with a behavioral climate-economy model. **System Dynamics Review**, v. 18, n. 2, p. 243-267, Summer 2002.

FIDDAMAN, T. Dynamics of climate policy. **System Dynamics Review**, v. 23, n. 1, p. 21-34, Spring 2007.

FORD, A. **Modeling the environment**: an introduction to System Dynamics models of environmental systems. Washington: Island Press, 1999.

FORD, A. Global warming and system dynamics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SYSTEM DYNAMICS, 25<sup>th</sup>, 2007, Boston, United States of America. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2007/proceed/index.htm>>. Acesso em: 02 fev. 2012.

FORD, A., VOGSTAD, K., FLYNN, H. Simulating price patterns for tradable green certificates to promote electricity generation from wind. **Energy Policy**, v. 35, p. 91-111, 2007.

FORD, A. Simulation scenarios for rapid reduction in carbon dioxide emissions in the western electricity system. **Energy Policy**, v. 36, p. 443-455, 2008.

FORD, A. Greening the economy with new markets: system dynamics simulations of energy and environmental markets. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SYSTEM DYNAMICS, 28<sup>th</sup>, 2010, Seoul, Korea. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.systemdynamics.org/conferences/2010/proceed/index.html>>. Acesso em: 02 fev. 2012.

FORRESTER, J. W. Information sources for modeling the national economy. *Journal of the American Statistical Association*, v. 75, n. 371, p. 555-566, Sep. 1980.

FORRESTER, J. W. Nonlinearity in high-order models of social systems. **European Journal of Operational Research**, v. 30, n. 2, p. 104-109, June 1987.

FORRESTER, J. W. **The beginning of Systems Dynamics**. Banquet Talk at the International Meeting of the Systems Dynamics Society. Stuttgart, Germany, July 13, 1989.

HEARNE, J. W. An approach to resolving the parameter sensitivity problem in system dynamics methodology. **Applied Mathematical Modelling**, v. 11, n. 4, p. 315-318, Aug. 1987.

HEIMDAL, Carina. Copenhagen's verdict on CDM and JI. In: **Greenhouse Gas Market Report 2010**. Post Copenhagen and Climate Policy: where global emissions trading goes from here. International Emissions Trading Association, Genève, Switzerland, 2010, p. 112-114.

JAHN, M.; MICHAELOWA, A.; RAUBENHEIMER, S.; LIPTOW, H. **Measuring the Potential of Unilateral CDM: a Pilot Study**. Hamburgisches Welt-Wirtschafts-Archiv (HWWA) Discussion Paper 263. Hamburg Institute of International Economics, 2004.

LEÃO, E. B. S. **As respostas das empresas localizadas no Rio Grande do Sul frente às mudanças do clima**. 154 f. Dissertação (Mestrado em Administração) – Escola de Administração, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2011.

LIMIRO, D. **Créditos de Carbono: Protocolo de Quioto e Projetos de MDL**. Curitiba: Juruá, 2009.

LORENZONI NETO, A. **Contrato de Créditos de Carbono: análise crítica das mudanças climáticas**. Curitiba: Juruá, 2009.

MANSANET-BATALLER, M.; PARDO, A.; VALOR, E. CO<sub>2</sub> prices, energy and weather. **The Energy Journal**, v. 28, n. 3, p. 73-92, July 2007.

MERO, R. **Market and CER pricing**. In: Special CDM Capacity Building Workshop. DICC-DAR ES SALLAM, Tanzânia, 21-22 Jan. 2008. Disponível em: <[http://cd4cdm.org/sub-Saharan%20Africa/Tanzania/Workshop%20&%20Briefing/Market&CERpricing\\_Mero.pdf](http://cd4cdm.org/sub-Saharan%20Africa/Tanzania/Workshop%20&%20Briefing/Market&CERpricing_Mero.pdf)>. Acesso em: 10 jan. 2012.

MOTTA, Ronaldo Seroa; FERRAZ, Claudio Ferraz; YOUNG, Carlos E. F.; AUSTIN, Duncan Austin; FAETH, Paul. **O mecanismo de desenvolvimento limpo e o financiamento do desenvolvimento sustentável no Brasil**. IPEA, Rio de Janeiro, Texto para discussão nº 761, set. 2000.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION DEVELOPMENT (OECD). **OECD Environmental Outlook**. OECD, 2001.

ORGANISATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION DEVELOPMENT; INTERNACIONAL ENERGY AGENCY. **Energy technology perspectives**. OECD/IEA, 2008.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). **Protocolo de Quioto**. Disponível em: <[http://www.onu-brasil.org.br/doc\\_quioto1.php](http://www.onu-brasil.org.br/doc_quioto1.php)>. Acesso em: 20 de jul. 2010.

OSSIMITZ, G.; MROTZEK, M. The basics of System Dynamics: discrete vs. continuous modelling of time. In: INTERNATIONAL CONFERENCE SYSTEM DYNAMICS, 26<sup>th</sup>,

2008, Athens, Greece. **Proceedings...** Disponível em: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2008/proceed/index.html>. Acesso em: 25 abr. 2011.

PEREIRA, M. B. G.; GUTIERREZ, S. **O mecanismo de desenvolvimento limpo setorial: perspectivas para o desenvolvimento sustentável brasileiro**. IPEA, Brasília, Texto para discussão nº 1443, dez. 2009.

PEREIRA, M. B. G.; GUTIERREZ, S. **Do MDL às NAMAS: perspectivas para o financiamento do desenvolvimento**. Boletim Regional, Urbano e Ambiental. Brasília, IPEA, n. 4, p. 47-56, jul. 2010.

PIDD, M. **Modelagem empresarial: ferramentas para tomada de decisão**. Porto Alegre: Bookman, 1998.

PINTO, R. F.; OLIVEIRA, J. A. P. Implementation challenges in protecting the global environmental commons: the case of climate change policies in Brazil. **Public Administration and Development**, v. 28, p. 340-350, 2008.

PAO, H. T.; TSAI, C. M. CO<sub>2</sub> emissions, energy consumption and economic growth in BRIC countries. **Energy Policy**, v. 38, p. 7850-7860, 2010.

PINTO, M. A. C.; COSTA, M. M.; MARTINS, G. G.; COSTA, L. F. P.; FERREIRA, R. O. Modelagem econômica para análise das perspectivas no Mercado de Créditos de Carbono. **Revista do BNDES**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 29, p. 115-156, Jun. 2008.

RICKELS, W.; DUSCHA, V.; KELLER, A.; PETERSON, S. **The determinants of allowance prices in the European Emissions Trading Scheme: can we expect an efficient allowance market 2008?** Kiel Institute for the World Economy, Working Papers, n. 1387, 2007.

ROCHA, M. T. **Manual de capacitação sobre mudança do clima e projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL)**. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Brasília, DF: 2008.

SABBAG, B. K. **Protocolo de Quioto e seus Créditos de Carbono: manual jurídico brasileiro de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo**. 2 ed. São Paulo: LTr, 2009.

SAYSEL, A. K.; HEKIMOĞLU, M. Dynamics of CO<sub>2</sub> mitigation in electric power industry through replacements and early retirements. INTERNATIONAL CONFERENCE SYSTEM DYNAMICS, 28<sup>th</sup>, 2010, Seoul, Korea. **Proceedings....** Disponível em: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2010/proceed/index.html>. Acesso em: 22 abr. 2011.

SEIFFERT, M. E. B. **Mercado de Carbono e Protocolo de Quioto: oportunidades de negócio na busca da sustentabilidade**. São Paulo: Atlas, 2009.

SENGE, Peter. **A quinta disciplina: arte e prática da organização que aprende**. 26ª ed. Rio de Janeiro: BestSeller, 2010.

SERES, S.; HAITES, E. MURPHY, K. Analysis of technology transfer in CDM projects. An update. **Energy Policy**, 37, p. 4919-4926, 2009.

SERRA, S. B. **De Copenhague a Cancún: dúvidas e expectativas.** Boletim Regional, Urbano e Ambiental. Brasília, IPEA, n. 4, p. 57-62, jul. 2010.

SILVA JÚNIOR, A. C. **Projetos de Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL):** promotores de tecnologias mais limpas no Brasil? 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Industrial) - Faculdade Politécnica, Universidade Federal da Bahia. Salvador, 2011.

STERMAN, J. D. Learning in and about complex systems. **System Dynamics Review**, v. 10, n. 2-3, p. 291-330, Summer-Fall 1994.

STERMAN, J. D. **Business Dynamics: system thinking and modeling for a complex world.** Boston: McGraw-Hill, 2000.

STERMAN, J. D.; SWEENEY, L. B. Cloudy skies: assessing public understanding of global warming. **System Dynamics Review**. v. 18, n. 2, p. 207-240, Summer 2002.

UNEP. **Equal exchange: determining a fair price for carbon.** Perspective Series 2007. Disponível em: <http://www.cd4cdm.org/Publications/Perspectives/FairPriceCarbon.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2012.

UNEP. **CDM project distribution within host countries by region and type.** Disponível em: < <http://cdmpipeline.org/index.htm>>. Acesso em: 02 jul. 2012.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Appendix I – Quantified economy-wide emission targets for 2020.** Disponível em: <[http://unfccc.int/meetings/cop\\_15/copenhagen\\_accord/items/5264.php](http://unfccc.int/meetings/cop_15/copenhagen_accord/items/5264.php)>. Acesso em: 02 mai. 2011a.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Appendix II – Nationally appropriate mitigation actions of developing country parties.** Disponível em: <[http://unfccc.int/meetings/cop\\_15/copenhagen\\_accord/items/5265.php](http://unfccc.int/meetings/cop_15/copenhagen_accord/items/5265.php)>. Acesso em: 02 mai. 2011b.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Report of the Conference of the Parties on its thirteenth session, held in Bali from 3 to 15 December 2007.** (UNFCCC). Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/2007/cop13/eng/06a01.pdf#page=3>>. Acesso em: 02 mai. 2011c.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Report of the Conference of the Parties on its sixteenth session, held in Cancun from 29 November to 10 December 2010.** Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/2010/cop16/eng/07a01.pdf#page=2>>. Acesso em: 02 mai. 2011d.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (UNFCCC). **Durban Climate Change Conference - November/December 2011.** Disponível em: <[http://unfccc.int/meetings/durban\\_nov\\_2011/meeting/6245/php/view/decisions.php](http://unfccc.int/meetings/durban_nov_2011/meeting/6245/php/view/decisions.php)>. Acesso em: 10 jan. 2012.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE  
(UNFCCC). **CDM in Numbers**. Disponível em: <  
<http://cdm.unfccc.int/Statistics/index.html>>. Acesso em: 22 jan. 2013a.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE  
(UNFCCC). **Negotiations**. Disponível em: <  
[http://unfccc.int/meetings/doha\\_nov\\_2012/meeting/6815.php](http://unfccc.int/meetings/doha_nov_2012/meeting/6815.php)>. Acesso em 22 jan. 2013b.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - MODELAGEM BASEADA EM DINÂMICA DE SISTEMAS

Modelos que usam a dinâmica de sistemas têm como princípio que a estrutura dá origem ao seu comportamento (FORRESTER, 1994). Por isto, as obras de Jay W. Forrester<sup>12</sup> apresentam e discutem a modelagem dinâmica como uma explicitação da estrutura de relações de causa e efeito entre as variáveis de um sistema e o comportamento dessas estruturas ao longo do tempo (FORRESTER, 1989), cujos padrões de comportamento das variáveis são: o crescimento, a decadência, a oscilação e a busca por uma meta (STERMAN, 2000; FORD, 1999).

Devido a sua aplicação em situações de complexidade dinâmica, ganhou espaço em diversas áreas do conhecimento, entre elas na gestão de negócios. Sterman (2000) explica que a dinâmica de sistemas melhora a aprendizagem em sistemas complexos, porque está relacionada com o desenvolvimento do pensamento sistêmico. Pensamento sistêmico consiste em perceber a realidade em círculos de causalidade, cujos elementos básicos são: os laços de realimentação de reforço, os laços de realimentação de equilíbrio e as defasagens ou atrasos de tempo (*delays*) (SENGE, 2010). Esta percepção da realidade é proveniente do modelo mental.

Em dinâmica de sistemas, o termo *modelo mental* refere-se aos mapas causais de causas e efeitos, descreve como o sistema opera com seus laços de realimentação bem como os seus limites (variáveis que estão incluídas e excluídas) de um determinado problema (STERMAN, 1994). Em síntese, o modelo mental é o modelo conceitual que cada indivíduo tem em sua mente para explicar a interação, a causalidade (FORRESTER, 1994).

Considerando essas características, para desenvolver um modelo computacional baseados em dinâmicas de sistemas, segundo Sterman (2000), é necessário usar o diagrama de laço causal (DLC) e o diagrama de estoque e fluxo (DEF).

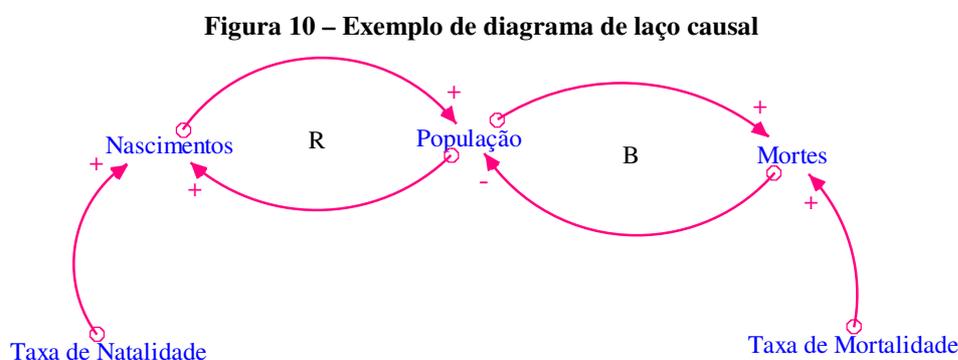
---

<sup>12</sup> *Industrial Dynamics*, de 1961; *Principles of Systems*, de 1968; *Urban Dynamics*, de 1969; e *World Dynamics*, de 1971, compreendem o marco histórico sobre modelos baseados em dinâmica de sistemas.

## DIAGRAMA DE LAÇO CAUSAL

O DLC é uma importante ferramenta que deve ser utilizado no estágio inicial da modelagem por simulação computacional, porque comunica o modelo mental. De acordo com Sterman (2000), o DLC captura as hipóteses sobre as causas da dinâmica, identifica e captura os modelos mentais e comunica as realimentações importantes e responsáveis por um problema. Neste tipo de diagrama, o termo *causal* refere-se às relações de causa e efeito e o termo *laço* refere-se a uma cadeia fechada de causa e efeito (FORD, 1999).

A Figura 10 apresenta um exemplo de DLC.



Fonte: adaptado de Ford (1999, p. 70).

Os elementos que compõem o DLC são:

- *Variáveis-chave* – são “as entidades ou os fatores relevantes do sistema” (FERNANDES, 2003, p. 77) e estão relacionadas entre si por meio dos laços causais ou de realimentação (as setas) (STERMAN, 2000). Na Figura 10 essas variáveis são nascimentos, população e mortes.

- *Realimentação* – são as setas, marcadas com sinais de polaridade: ou um sinal positivo (reforçador) ou um sinal negativo (balanceador), indicando como a variável dependente mudará quando a variável independente mudar (STERMAN, 2000). As polaridades da realimentação mostra a estrutura do modelo de simulação, determinando o seu comportamento, sem descrevê-lo.

Segundo Ford (1999) e Sterman (2000), a realimentação positiva é também denominada “reforço”, porque amplifica ou reforça o que está acontecendo no sistema, gerando estruturas de crescimento ou de declínio exponenciais, dado o seu comportamento de círculo vicioso. Ainda, a relação de causa e efeito entre duas variáveis é para a mesma

direção. Conforme a Figura 10, o fluxo de realimentação a esquerda é positivo porque à medida que ocorre mais nascimentos, a população aumenta; e o aumento da população faz aumentar o número de nascimentos.

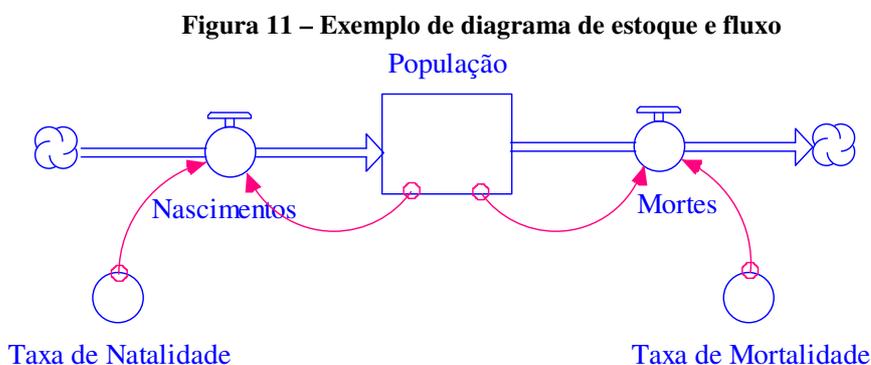
Por sua vez, a realimentação negativa é também denominada “balanceadora”. Busca o equilíbrio, a estabilização, a limitação e a resistência, com orientação para uma meta, de modo que a relação de causa e efeito entre duas variáveis é em direções opostas (FORD, 1999; STERMAN, 2000). De acordo com a Figura 10, o fluxo de realimentação a direita é balanceador, ou seja, à medida que a população aumenta, aumenta o número de mortes, o qual reduz o tamanho da população.

Embora existam apenas dois tipos de realimentação, os modelos de simulação computacional baseado em dinâmica de sistemas podem conter muitos laços, de ambos os tipos, acoplados um ao outro, com atrasos de tempo, não linearidades e com acumulações (STERMAN, 2000). Daí a importância da simulação computacional para apresentar o comportamento do modelo.

## DIAGRAMA DE ESTOQUE E FLUXO

O DEF é uma representação da dinâmica de funcionamento do modelo de simulação computacional porque enfatiza a sua estrutura física (STERMAN, 2000) e deve conter a principal variável que está no modo de referência (FORD, 1999). Por isto, caracterizam o estado do sistema e geram as informações para análise e decisão.

A Figura 11 mostra o DEF correspondente ao DLC apresentado na Figura 10.



Fonte: adaptado de Ford (1999, p. 70).

Os elementos que o compõem o DEF são:

- *Estoques ou Níveis* – caracterizam o estado do modelo de simulação computacional, sendo as variáveis-chave do DLC (FORD, 1999), ou seja, um fluxo físico, estocável. Na Figura 11 é “população”, notado pelo retângulo.

- *Fluxos de Entrada e Fluxos de Saída* – causam, respectivamente, aumento e diminuições nos estoques. Por serem fluxos de informação, não é acumulativo. Sua função é alterar o estoque para mudar o estado do modelo (FORD, 1999). Notado por um cano, indica adição ou saída do estoque.

- *Controle dos Fluxos ou Fluxo Regulador* – ajusta o volume do fluxo do estoque, isto é, a taxa, a regra da decisão (equações). Com notação de uma válvula, na Figura 11 é “nascimentos” e “mortes”.

- *Fontes e Sumidouros* – estoque cujo fluxo de origem e fluxo de saída, respectivamente, está fora limites do modelo e tem capacidade infinita. Sua notação é a nuvem.

- *Variáveis Auxiliares ou Conversores* – processam as informações dos estoques e fluxos ou servem como fonte de informações externas ao sistema. Na Figura 11 é “taxa de natalidade” e “taxa de mortalidade”, com a notação de circunferência.

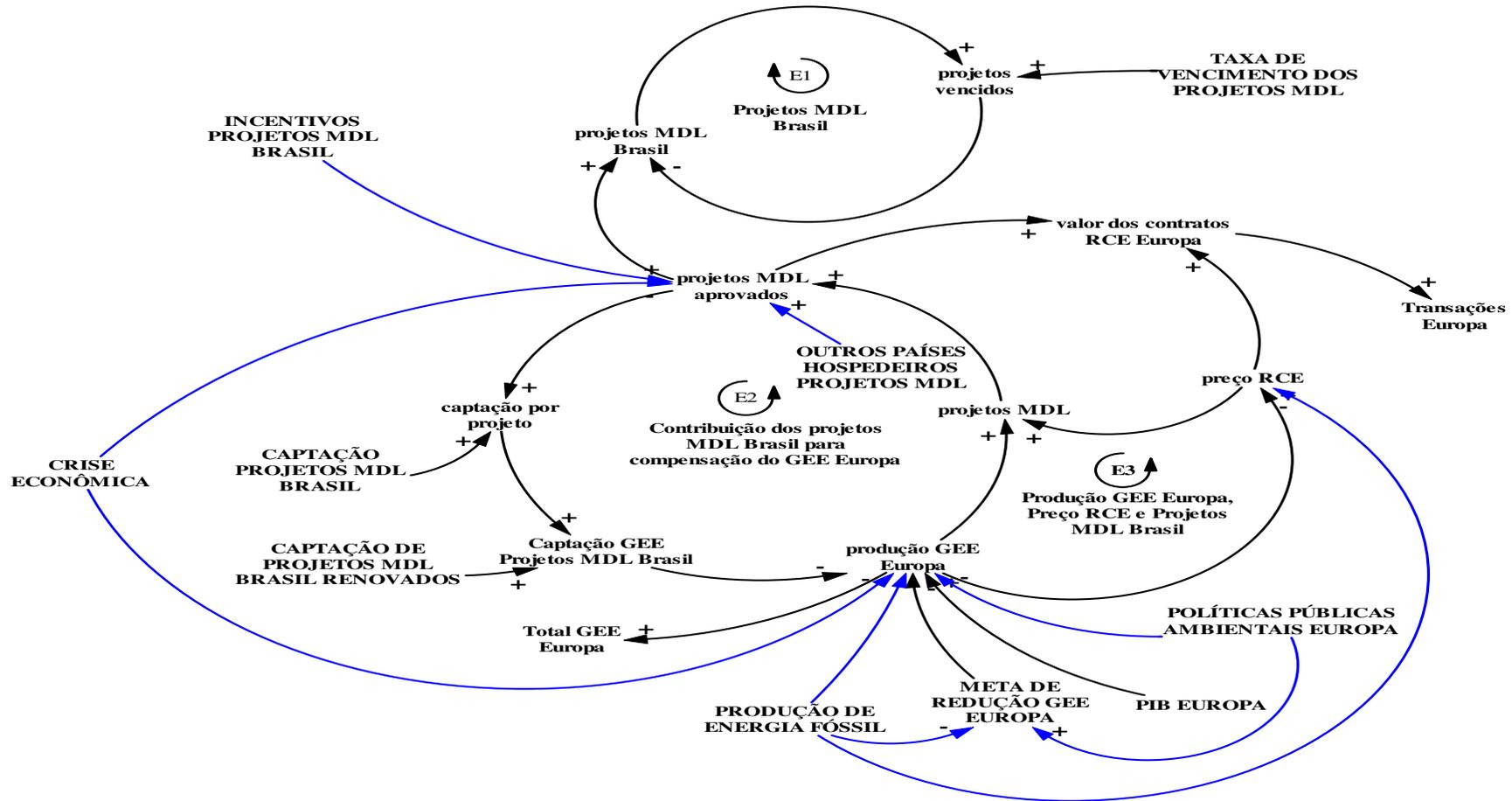
- *Setas* – fecham os laços de realimentação, fazendo a ligação dos estoques e das variáveis auxiliares controle dos fluxos.

Adicionalmente, os estoques também são fontes de atrasos temporais (ou defasagens), o que também contribui para caracterizar a dinâmica do modelo de simulação (STERMAN, 2000). Os atrasos temporais podem ser compreendidos como o tempo transcorrido entre as ações e as consequências, o tempo entre o efeito de uma variável sobre outra (FORD, 1999). Ainda, os atrasos temporais causam oscilações e instabilidade no modelo de simulação computacional.

Para Sterman (2000), os atrasos temporais podem ser físicos ou de informação. Os atrasos físicos captam a defasagem das variáveis de estoques e geram acumulações que podem ser quantificadas. Por sua vez, os atrasos de informação é não físico, portanto não pode ser acumulado porque o atraso ocorre nos laços de realimentação da informação (os fluxos). O autor explica que a estrutura e o comportamento do atraso físico são diferentes da estrutura e do comportamento do atraso de informação.

APÊNDICE B - VERSÃO PRELIMINAR DO DIAGRAMA DE LAÇO CAUSAL

Figura 12 – Versão preliminar do diagrama de laço causal



Fonte: dados da pesquisa (2013).

## APÊNDICE C - EQUAÇÕES DO MODELO

As equações abaixo foram desenvolvidas para a modelagem matemática do MDCC, na etapa da estimação dos valores dos parâmetros, usando o software *Vensim DSS*, versão 5.8c. Ainda, as equações foram geradas a partir dos dados coletados nas diversas fontes consultadas.

- (01) CAPTAÇÃO DE PROJETOS MDL BRASIL RENOVADOS=RANDOM NORMAL(0.279603, 0.621723, 0.450663, 0.17106, 1)  
Units: Mt/mês  
Captação de projetos renovados, estimada de forma randômica a partir da média (0.450663), tendo como valor mínimo a "a média - desvio padrão (0.17106)" e valor máximo a "média + desvio padrão" com início em janeiro/2013 e término em dezembro/2020.
- (02) "captação de projetos MDL Brasil Renovados 2005-2009"=IF THEN ELSE( Período <=49, CAPTAÇÃO DE PROJETOS MDL BRASIL RENOVADOS, 0)  
Units: Mt/mês
- (03) "captação de projetos MDL Brasil Renovados 2010-2020"=IF THEN ELSE( Período >=50, CAPTAÇÃO DE PROJETOS MDL BRASIL RENOVADOS, 0)  
Units: Mt/mês
- (04) "captação de projetos MDL brasileiros 2005-2009"=("captação por projeto 2005-2009"\*"projetos aprovados 2005-2009")+("captação de projetos MDL Brasil Renovados 2005-2009")\*"taxa de sucesso na emissão de RCE 2005-2009"  
Units: Mt/mês
- (05) "captação de projetos MDL brasileiros 2005-2020"=IF THEN ELSE( Período <=49, "captação de projetos MDL brasileiros 2005-2009", "captação de projetos MDL brasileiros 2010-2020" )  
Units: Mt/mês
- (06) "captação de projetos MDL brasileiros 2010-2020"=("captação por projeto 2010-2020"\*"projetos aprovados 2010-2020")+("captação de projetos MDL Brasil Renovados 2010-2020")\*"taxa de sucesso na emissão de RCE 2010-2020"  
Units: Mt/mês
- (07) "captação GEE mundo 2005-2012 ind"=IF THEN ELSE( Período <=85, "CAPTAÇÃO GEE MUNDO 2005-2012"(Período), 0)  
Units: Mt/mês
- (08) "CAPTAÇÃO GEE MUNDO 2005-2012"([(1,0)-(85,100)],(1,0.04599),(2,1.28035),(3,2.23269),(4,0.84829),(5,0.1699),(6,4.49927),(7,0.28647),(8,1.35438),(9,0.33244),(10,4.47262),(11,1.30798),(12,5.53286),(13,3.37717),

(14,2.71157),(15,6.2874),(16,5.50287),(17,4.45661),(18,7.84226),(19,9.8429),(20,2.27797),(21,12.5567),(22,5.59636),(23,3.01842),(24,8.03669),(25,8.59465),(26,11.6141),(27,12.5319),(28,6.15423),(29,6.63903),(30,9.63914),(31,10.176),(32,14.3567),(33,9.74578),(34,11.5276),(35,9.64746),(36,21.0603),(37,14.983),(38,10.1908),(39,11.2102),(40,10.4453),(41,13.3603),(42,2.31499),(43,20.3862),(44,8.62235),(45,8.90526),(46,7.36697),(47,7.55403),(48,14.3419),(49,8.9365),(50,8.56948),(51,13.311),(52,11.5305),(53,9.93769),(54,10.544),(55,3.39587),(56,2.63374),(57,6.77778),(58,9.30283),(59,10.2074),(60,25.5417),(61,21.6008),(62,50.1755),(63,10.9206),(64,22.8312),(65,29.3539),(66,19.6873),(67,22.6317),(68,23.487),(69,37.6731),(70,38.5374),(71,14.7568),(72,23.6962),(73,32.2701),(74,36.1665),(75,25.0842),(76,18.7602),(77,24.4548),(78,23.1762),(79,16.4177),(80,14.9876),(81,20.997),(82,14.7289),(83,26.7509),(84,78.0599),(85,9.6016))

Units: Mt/mês

(09) "captação GEE mundo 2005-2020"=IF THEN ELSE( Período<=85, "captação GEE mundo 2005-2012 ind", "CAPTAÇÃO GEE MUNDO 2013-2020 PROJETADO")  
Units: Mt/mês

(10) "CAPTAÇÃO GEE MUNDO 2013-2020 PROJETADO"=IF THEN ELSE( Período>85, RANDOM NORMAL( 14.3429, 29.472, 14.3429, 15.1291, 1), 0)  
Units: Mt/mês

(11) Captação GEE Projetos MDL Brasil= INTEG (captando GEE Projetos MDL Brasil,0)  
Units: Mt  
Total de captação de GEE por projetos brasileiros (real + projetado) no período de janeiro/2005 a dezembro/2020.

(12) "captação por projeto 2005-2009"=IF THEN ELSE( Período <=49, "captação por projeto 2005-2012", 0)  
Units: Mt/projeto

(13) "captação por projeto 2005-2012"=IF THEN ELSE( "projetos aprovados 2005-2012 ind"=0, 0, "captação projetos MDL Brasil 2005-2012 ind"/"projetos aprovados 2005-2012 ind")  
Units: Mt/projeto  
Cálculo médio de captação de GEE por projeto 2005-2012.

(14) "captação por projeto 2010-2020"=IF THEN ELSE( Período>=50 :AND: Período <=85,"captação por projeto 2005-2012", "captação por projeto 2013-2020")  
Units: Mt/projeto

(15) "captação por projeto 2013-2020"=IF THEN ELSE( Período>85, "captação projetos MDL Brasil 2013-2020"/"projetos MDL aprovados projeção 2013-2020", 0)  
Units: Mt/projeto  
Captação por projetos reais indexados pelo período, com início em janeiro/2012 e término em dezembro/2020.

(16) "captação projetos MDL Brasil 2005-2012 ind"=IF THEN ELSE( Período <= 85, "CAPTAÇÃO PROJETOS MDL BRASIL 2005-2012"(Período), 0)  
Units: Mt/mês

Captação por projetos reais indexados pelo período, com início em dezembro/2005 e término em dezembro/2012.

- (17) "CAPTAÇÃO PROJETOS MDL BRASIL 2005-2012"([ (0,0)-(10,10)],(1,0.045988),(2,0),(3,0),(4,0),(5,0.001897),(6,0),(7,0.063221),(8,0.455721),(9,0.192278),(10,1.58935),(11,0.363028),(12,0.338467),(13,0.578191),(14,0.883781),(15,0),(16,2.12022),(17,1.15014),(18,1.48283),(19,0),(20,0.195576),(21,1.90766),(22,0.889327),(23,1.54703),(24,0.687856),(25,1.58755),(26,0.22116),(27,1.76656),(28,0.766543),(29,0.625425),(30,1.34564),(31,1.47596),(32,0.260538),(33,1.81344),(34,0.245071),(35,1.02362),(36,1.90165),(37,0.8475),(38,0.175039),(39,0.783884),(40,0.657892),(41,0.026678),(42,0.17029),(43,1.98849),(44,1.32592),(45,0.469345),(46,0.654683),(47,1.2333),(48,0.292932),(49,1.23065),(50,0.739161),(51,0.596816),(52,1.12828),(53,0.330731),(54,1.2926),(55,0),(56,0),(57,1.056),(58,0.058574),(59,0.722555),(60,0.791351),(61,2.07991),(62,3.82632),(63,0.731329),(64,0.997351),(65,0.169866),(66,1.05867),(67,1.25996),(68,1.88993),(69,1.38071),(70,0.702523),(71,0.144063),(72,0.568869),(73,2.03395),(74,0.92507),(75,0.34756),(76,1.3201),(77,4.8354),(78,1.5606),(79,0.313805),(80,1.20068),(81,0.673593),(82,0.272881),(83,2.57386),(84,1.33416),(85,4.44383))
- Units: Mt/mês
- CAPTAÇÃO PROJETOS MDL BRASIL 2005-2012 - De Dezembro/2005 a Dezembro/2012. O período escolhido foi em função da base de dados só apresentar a captação de projetos a partir de dezembro de 2005.
- (18) "CAPTAÇÃO PROJETOS MDL BRASIL 2013-2020 PROJETADO"=RANDOM NORMAL( 0.845116, 2.39903, 1.62207, 0.776957, 1)
- Units: Mt/mês
- Captação de projetos estimada de forma randômica a partir da média (1.62207), tendo como valor mínimo a "a média - desvio padrão (0.776957)" e valor máximo a "média + desvio padrão", com início em janeiro/2013 e término em dezembro/2020.
- (19) "captação projetos MDL Brasil 2013-2020"=IF THEN ELSE( Período>85, "CAPTAÇÃO PROJETOS MDL BRASIL 2013-2020 PROJETADO", 0)
- Units: Mt/mês
- Captação de projetos estimada e indexada pelo período, com início em janeiro/2013 e término em dezembro/2020.
- (20) captando GEE Projetos MDL Brasil=IF THEN ELSE( Período<=85, ("captação por projeto 2005-2012"\*"projetos aprovados 2005-2012 ind" )+CAPTAÇÃO DE PROJETOS MDL BRASIL RENOVADOS)\*TAXA DE SUCESSO NA EMISSÃO DE RCE, ("captação por projeto 2013-2020"\*"projetos MDL aprovados projeção 2013-2020"+CAPTAÇÃO DE PROJETOS MDL BRASIL RENOVADOS)\*TAXA DE SUCESSO NA EMISSÃO DE RCE)
- Units: Mt/mês
- Captação de GEE Projetos MDL Brasil, mês a mês, de janeiro/2005 a dezembro/2020.
- (21) Eliminador de unidades=1
- Units: 1/mês
- (22) "emissão GEE Europa 2005-2009 ind"=IF THEN ELSE( Período <=49, "EMISSÃO GEE EUROPA 2005-2009"(Período), 0)

Units: Mt/mês

Emissões de GEE da Europa, indexados mês a mês, de janeiro/2005 a dezembro/2009.

- (23) "EMISSÃO GEE EUROPA 2005-2009"([(0,0)-(10,300)],(1,228.31),(2,226.64),(3,226.64),(4,226.64),(5,226.64),(6,226.64),(7,226.64),(8,226.64),(9,226.64),(10,226.64),(11,226.64),(12,226.64),(13,226.64),(14,223.97),(15,223.97),(16,223.97),(17,223.97),(18,223.97),(19,223.97),(20,223.97),(21,223.97),(22,223.97),(23,223.97),(24,223.97),(25,223.97),(26,219.81),(27,219.81),(28,219.81),(29,219.81),(30,219.81),(31,219.81),(32,219.81),(33,219.81),(34,219.81),(35,219.81),(36,219.81),(37,219.81),(38,204.67),(39,204.67),(40,204.67),(41,204.67),(42,204.67),(43,204.67),(44,204.67),(45,204.67),(46,204.67),(47,204.67),(48,204.67),(49,204.67))  
Units: Mt/mês  
Curva de comportamento de emissões de GEE da Europa, de janeiro/2005 a dezembro/2009.
- (24) "emissão GEE Europa 2010-2020 projetado"=RANDOM NORMAL( 210.363, 227.572, 218.968, 8.60438, 1)  
Units: Mt/mês  
Emissões de GEE da Europa, projetado mês a mês, tendo como média o valor de 218.968, valor mínimo de "média - desvio-padrão (8.60438)" e valor máximo de "média - desvio-padrão", de janeiro/2005 a dezembro/2009.
- (25) FINAL TIME = 181  
Units: Month  
The final time for the simulation.
- (26) GEE capturado Brasil=captando GEE Projetos MDL Brasil  
Units: Mt/mês  
Captação de GEE Projetos MDL Brasil, mês a mês, como fluxo de "drenagem" do total de GEE produzido pela Europa.
- (27) INITIAL TIME = 1  
Units: Month  
The initial time for the simulation.
- (28) "meta de redução GEE Europa 2005-2009 ind"=IF THEN ELSE( Período <=49, "META DE REDUÇÃO GEE EUROPA 2005-2009"(Período), 0)  
Units: Mt/mês  
Meta de redução de GEE da Europa, indexado mês a mês, de janeiro/2005 a dezembro/2009.
- (29) "META DE REDUÇÃO GEE EUROPA 2005-2009"([(1,0)-(49,80)],(1,26),(2,27),(3,27),(4,27.714),(5,27.714),(6,27.714),(7,27.714),(8,27.714),(9,27.714),(10,27.714),(11,27.714),(12,27.714),(13,27.714),(14,28.43),(15,28.43),(16,28.43),(17,28.43),(18,28.43),(19,28.43),(20,28.43),(21,28.43),(22,28.43),(23,28.43),(24,28.43),(25,28.43),(26,41.3305),(27,41.3305),(28,41.3305),(29,41.3305),(30,41.3305),(31,41.3305),(32,41.3305),(33,41.3305),(34,41.3305),(35,41.3305),(36,41.3305),(37,41.3305),(38,73.1058),(39,73.1058),(40,73.1058),(41,73.1058),(42,73.1058),(43,73.1058),(44,73.1058),(45,73.1058),(46,73.1058),(47,73.1058),(48,73.1058),(49,73.1058))  
Units: Mt/mês

Curva de comportamento da meta de redução de GEE da Europa, mês a mês, de janeiro/2005 a dezembro/2009.

- (30) "META DE REDUÇÃO GEE EUROPA 2010-2020 PROJETADO"=RANDOM NORMAL( 27.7325, 63.5599, 45.6462, 17.9137, 1)  
Units: Mt/mês  
Meta de redução do GEE Europa, projetado mês a mês, a partir do valor médio de 45.6462, tendo como valor mínimo "média - desvio-padrão (17.9137) e valor máximo "média + desvio-padrão", de janeiro/ 2010 a dezembro/2020.
- (31) Período=Time\*Eliminador de unidades  
Units: Dmnl
- (32) "PIB Europa 2005-2009 ind"=IF THEN ELSE( Período<=49, "PIB EUROPA 2005-2009"(Período), 0)  
Units: US\$/mês
- (33) "PIB EUROPA 2005-2009"( [(1,8e+011)-(73,2e+012)],(1,8.4527e+011),(2,8.9647e+011),(3,8.9647e+011),(4,8.9647e+011),(5,8.9647e+011),(6,8.9647e+011),(7,8.9647e+011),(8,8.9647e+011),(9,8.9647e+011),(10,8.9647e+011),(11,8.9647e+011),(12,8.9647e+011),(13,8.9647e+011),(14,1.03078e+012),(15,1.03078e+012),(16,1.03078e+012),(17,1.03078e+012),(18,1.03078e+012),(19,1.03078e+012),(20,1.03078e+012),(21,1.03078e+012),(22,1.03078e+012),(23,1.03078e+012),(24,1.03078e+012),(25,1.03078e+012),(26,1.12855e+012),(27,1.12855e+012),(28,1.12855e+012),(29,1.12855e+012),(30,1.12855e+012),(31,1.12855e+012),(32,1.12855e+012),(33,1.12855e+012),(34,1.12855e+012),(35,1.12855e+012),(36,1.12855e+012),(37,1.12855e+012),(38,1.03279e+012),(39,1.03279e+012),(40,1.03279e+012),(41,1.03279e+012),(42,1.03279e+012),(43,1.03279e+012),(44,1.03279e+012),(45,1.03279e+012),(46,1.03279e+012),(47,1.03279e+012),(48,1.03279e+012),(49,1.03279e+012),(50,1.00616e+012),(51,1.00616e+012),(52,1.00616e+012),(53,1.00616e+012),(54,1.00616e+012),(55,1.00616e+012),(56,1.00616e+012),(57,1.00616e+012),(58,1.00616e+012),(59,1.00616e+012),(60,1.00616e+012),(61,1.00616e+012),(62,1.08999e+012),(63,1.08999e+012),(64,1.08999e+012),(65,1.08999e+012),(66,1.08999e+012),(67,1.08999e+012),(68,1.08999e+012),(69,1.08999e+012),(70,1.08999e+012),(71,1.08999e+012),(72,1.08999e+012),(73,1.08999e+012))  
Units: US\$/mês  
Curva de Comportamento do PIB da Europa. mês a mês, de janeiro/2005 a dezembro/2009.
- (34) "PIB Europa 2005-2020"=IF THEN ELSE( Período<=49, "PIB Europa 2005-2009 ind", "PIB EUROPA 2010-2020 PROJETADO" )  
Units: US\$/mês
- (35) "PIB EUROPA 2010-2020 PROJETADO"=RANDOM NORMAL( 9.28337e+011, 1.11133e+012, 1.01983e+012, 9.14951e+010, 1)  
Units: US\$/mês  
PIB da Europa Projetado, mês a mês, por variação randômica, tendo como média o valor de 1.01983e+012, valor mínimo igual a "média - desvio padrão (14951e+01)" e valor máximo igual a "média + desvio padrão", de janeiro/2010 a dezembro/2020.

- (36) "preço RCE 2005-2012 ind"=IF THEN ELSE( Período<=85, "PREÇO RCE 2005-2012"(Período), 0)  
Units: US\$/Mt  
Preço do RCE real indexado, mês a mês, de janeiro/2005 a dezembro/2012.
- (37) "PREÇO RCE 2005-2012"([(1,0)-(85,4e+007)],(1,1.53e+007),(2,1.79e+007),(3,1.79e+007),(4,1.79e+007),(5,1.79e+007),(6,1.79e+007),(7,1.79e+007),(8,1.79e+007),(9,1.79e+007),(10,1.79e+007),(11,1.79e+007),(12,1.79e+007),(13,1.79e+007),(14,2.111e+007),(15,2.111e+007),(16,2.111e+007),(17,2.111e+007),(18,2.111e+007),(19,2.111e+007),(20,2.111e+007),(21,2.111e+007),(22,2.111e+007),(23,2.111e+007),(24,2.111e+007),(25,2.111e+007),(26,2.626e+007),(27,2.626e+007),(28,2.626e+007),(29,2.626e+007),(30,2.626e+007),(31,2.626e+007),(32,2.626e+007),(33,3.01143e+007),(34,2.82157e+007),(35,2.38396e+007),(36,1.90808e+007),(37,1.82036e+007),(38,1.54907e+007),(39,1.16629e+007),(40,1.38011e+007),(41,1.45412e+007),(42,1.67207e+007),(43,1.62791e+007),(44,1.75163e+007),(45,1.85349e+007),(46,1.86819e+007),(47,1.95536e+007),(48,1.8954e+007),(49,1.78329e+007),(50,1.66622e+007),(51,1.59233e+007),(52,1.59421e+007),(53,1.73451e+007),(54,1.65215e+007),(55,1.58487e+007),(56,1.55666e+007),(57,1.6464e+007),(58,1.79787e+007),(59,1.86082e+007),(60,1.67384e+007),(61,1.55832e+007),(62,1.52839e+007),(63,1.58098e+007),(64,1.75345e+007),(65,1.89292e+007),(66,1.82744e+007),(67,1.68577e+007),(68,1.46241e+007),(69,1.24135e+007),(70,1.15346e+007),(71,1.0204e+007),(72,8.53513e+006),(73,6.37674e+006),(74,4.98903e+006),(75,5.91944e+006),(76,5.47773e+006),(77,5.10289e+006),(78,4.56923e+006),(79,5.04213e+006),(80,4.10186e+006),(81,5.0289e+006),(82,5.0289e+006),(83,5.0289e+006),(84,5.0289e+006),(85,5.02891e+006))  
Units: US\$/Mt  
Curva de comportamento real do Preço da RCE, mês a mês, de janeiro/2005 a dezembro/2012.
- (38) "preço RCE 2005-2020"=IF THEN ELSE( Período<=85, "preço RCE 2005-2012 ind", "preço RCE futuro 2013-2020 projetado" )  
Units: US\$/Mt
- (39) "preço RCE 2010-2020"=IF THEN ELSE( Período<=85, "preço RCE 2005-2012 ind", "preço RCE futuro 2013-2020 projetado" )  
Units: US\$/Mt
- (40) "preço RCE futuro 2013-2020 projetado"=IF THEN ELSE( Período>85, "PREÇO RCE FUTURO 2013-2020"(Período), 0)  
Units: US\$/Mt  
Preço da RCE idexado, mês a mês, de janeiro/2013 a dezembro/2012.
- (41) "PREÇO RCE FUTURO 2013-2020"([(86,0)-(181,2e+006)],(86,514566),(87,514566),(88,514566),(89,514566),(90,514566),(91,514566),(92,514566),(93,514566),(94,514566),(95,514566),(96,514566),(97,514566),(98,620118),(99,620118),(100,620118),(101,620118),(102,620118),(103,620118),(104,620118),(105,620118),(106,620118),(107,620118),(108,620118),(109,620118),(110,778446),(111,778446),(112,778446),(113,778446),(114,778446),(115,778446),(116,778446),(117,778446),(118,778446),(119,778446),(120,778446),(121,778446),(122,923580),(123,923580),(124,923580),(125,923580),(126,923580),(127,923580),(128,923580)

0),(129,923580),(130,923580),(131,923580),(132,923580),(133,923580),(134,1.0951e+006),(135,1.0951e+006),(136,1.0951e+006),(137,1.0951e+006),(138,1.0951e+006),(139,1.0951e+006),(140,1.0951e+006),(141,1.0951e+006),(142,1.0951e+006),(143,1.0951e+006),(144,1.0951e+006),(145,1.0951e+006),(146,1.27982e+006),(147,1.27982e+006),(148,1.27982e+006),(149,1.27982e+006),(150,1.27982e+006),(151,1.27982e+006),(152,1.27982e+006),(153,1.27982e+006),(154,1.27982e+006),(155,1.27982e+006),(156,1.27982e+006),(157,1.27982e+006),(158,1.47773e+006),(159,1.47773e+006),(160,1.47773e+006),(161,1.47773e+006),(162,1.47773e+006),(163,1.47773e+006),(164,1.47773e+006),(165,1.47773e+006),(166,1.47773e+006),(167,1.47773e+006),(168,1.47773e+006),(169,1.47773e+006),(170,1.68883e+006),(171,1.68883e+006),(172,1.68883e+006),(173,1.68883e+006),(174,1.68883e+006),(175,1.68883e+006),(176,1.68883e+006),(177,1.68883e+006),(178,1.68883e+006),(179,1.68883e+006),(180,1.68883e+006),(181,1.68883e+006))

Units: US\$/Mt

Curva de comportamento do Preço projetado da RCE, mês a mês, de janeiro/2013 a dezembro/2020.

- (42) produção GEE Europa=IF THEN ELSE( Período<=49, ("emissão GEE Europa 2005-2009 ind"- "meta de redução GEE Europa 2005-2009 ind"), "emissão GEE Europa 2010-2020 projetado" - "META DE REDUÇÃO GEE EUROPA 2010-2020 PROJETADO")  
Units: Mt/mês  
Produção de GEE pela Europa, mês a mês, como fluxo de entrada do total de GEE produzido pela Europa.
- (43) "produção GEE Europa 2005-2009"=IF THEN ELSE( Período <=49, produção GEE Europa, 0)  
Units: Mt/mês
- (44) "projetos aprovados 2005-2009"=IF THEN ELSE( Período <=49, "projetos aprovados 2005-2012 ind", 0)  
Units: projetos/mês
- (45) "projetos aprovados 2005-2012 ind"=IF THEN ELSE(Período <= 85, "PROJETOS MDL APROVADOS 2005-2012"(Período),0)  
Units: projetos/mês  
Número de projetos reais indexados pelo período, com início em dezembro/2005 e término em dezembro/2012.
- (46) "projetos aprovados 2010-2020"= IF THEN ELSE( Período>=50 :AND: Período <=85,"projetos aprovados 2005-2012 ind", "projetos MDL aprovados projeção 2013-2020")  
Units: projetos/mês
- (47) projetos MDL aprovados="projetos aprovados 2005-2012 ind" + "projetos MDL aprovados projeção 2013-2020"  
Units: projetos/mês  
Projetos brasileiros aprovados (real + projeção) por mês do período de janeiro/2005 a dezembro/2020.

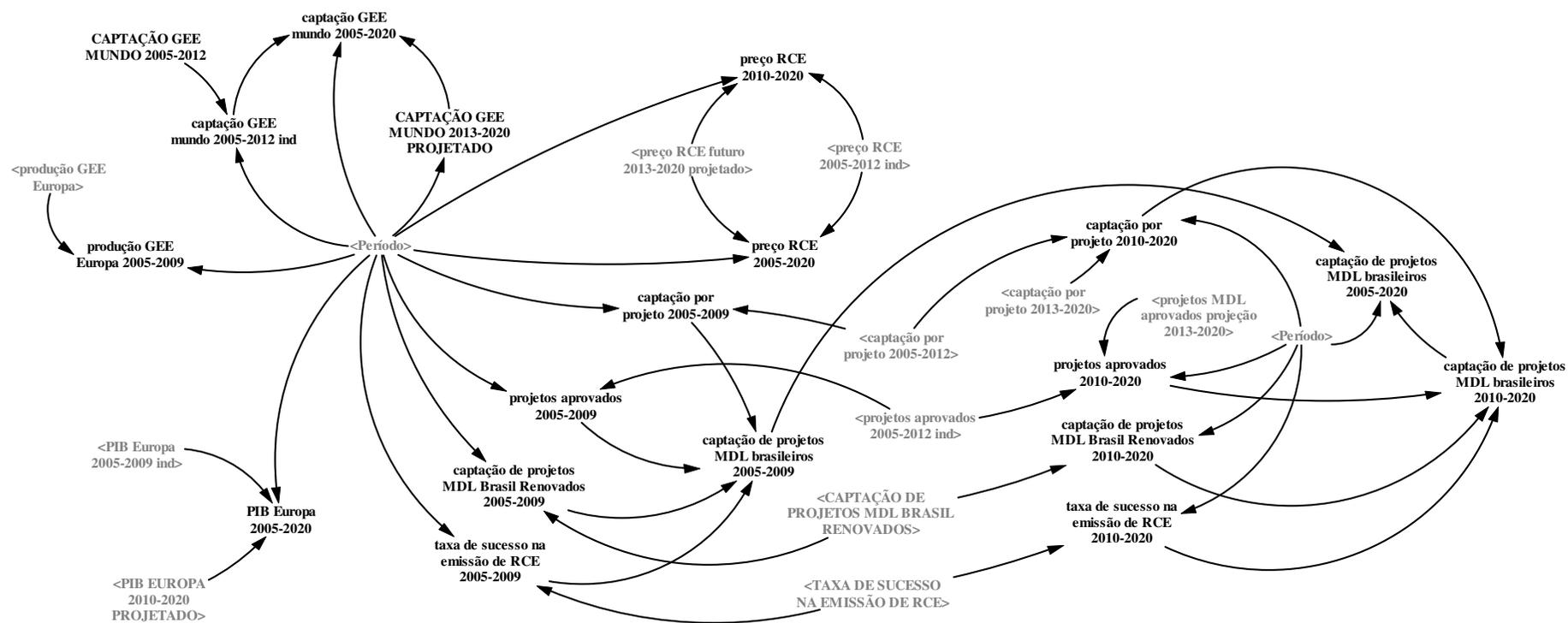
- (48) "PROJETOS MDL APROVADOS 2005-2012"([(1,0)-(85,70),(1,0),(2,0),(3,0),(4,0),(5,0),(6,0),(7,0),(8,0),(9,0),(10,0),(11,1),(12,0),(13,0),(14,0),(15,0),(16,16)],(1,2),(2,5),(3,8),(4,21),(5,3),(6,4),(7,2),(8,12),(9,5),(10,8),(11,3),(12,4),(13,7),(14,0),(15,0),(16,5),(17,5),(18,1),(19,1),(20,3),(21,3),(22,1),(23,0),(24,1),(25,0),(26,2),(27,11),(28,1),(29,3),(30,3),(31,3),(32,2),(33,0),(34,0),(35,1),(36,1),(37,0),(38,2),(39,0),(40,5),(41,1),(42,0),(43,1),(44,1),(45,1),(46,1),(47,0),(48,0),(49,1),(50,2),(51,1),(52,1),(53,1),(54,1),(55,1),(56,0),(57,4),(58,0),(59,1),(60,2),(61,5),(62,4),(63,1),(64,0),(65,0),(66,1),(67,4),(68,0),(69,1),(70,1),(71,1),(72,0),(73,0),(74,0),(75,1),(76,0),(77,2),(78,3),(79,3),(80,3),(81,10),(82,5),(83,7),(84,11),(85,68))  
Units: projetos/mês  
PROJETOS MDL APROVADOS 2005-2012 - De Dezembro/2005 a Dezembro/2012. O período escolhido foi em função da base de dados só apresentar o número de projetos a partir de dezembro de 2005.
- (49) "projetos MDL aprovados projeção 2013-2020"=IF THEN ELSE( Período>85, RANDOM NORMAL( 0, 11.2399, 3.37647, 7.86338, 1 ), 0)  
Units: projetos/mês  
Estimativa de projetos aprovados, com variação randômica tendo como média o valor de 3.37647, o valor mínimo igual a "média - desvio padrão (7.86338)" e valor máximo igual a "média + desvio padrão".
- (50) Projetos MDL Brasil= INTEG (projetos MDL aprovados-projetos MDL vencidos,0)  
Units: projetos  
Total de projetos brasileiros aprovados no período de janeiro/2005 a dezembro/2020.
- (51) projetos MDL vencidos=Projetos MDL Brasil\*TAXA DE VENCIMENTO DOS PROJETOS MDL  
Units: projetos/mês  
Estimativa de projetos MDL brasileiros vencidos por mês no período de janeiro/2005 a dezembro/2020.
- (52) "relação PIB / emissão GEE Europa"=IF THEN ELSE( Período<=49, "PIB Europa 2005-2009 ind"/"EMISSÃO GEE EUROPA 2005-2009"(Período), "PIB EUROPA 2010-2020 PROJETADO"/"emissão GEE Europa 2010-2020 projetado")  
Units: US\$/Mt  
Relação mês a mês entre o PIB da Europa e a emissão de GEE da Europa.
- (53) SAVEPER = TIME STEP  
Units: Month [0,?]  
The frequency with which output is stored.
- (54) TAXA DE SUCESSO NA EMISSÃO DE RCE=RANDOM NORMAL( 0.438841, 1.14566, 0.79225, 0.353409, 1)  
Units: Dmnl  
Variação randômica da TAXA DE SUCESSO NA EMISSÃO DE RCE, a partir da média de 0.79225, tendo como valor mínimo: a "média - desvio padrão (0.353409)" e máximo a "média + desvio padrão (0.438841)". O Seed=1 foi escolhido para reduzir as flutuações de valores e aplicado em todas as estimativas de variáveis utilizando a função Random Normal.

- (55) "taxa de sucesso na emissão de RCE 2005-2009"=IF THEN ELSE( Período <=49, TAXA DE SUCESSO NA EMISSÃO DE RCE, 0)  
Units: Dmnl
- (56) "taxa de sucesso na emissão de RCE 2010-2020"= IF THEN ELSE( Período>=50, TAXA DE SUCESSO NA EMISSÃO DE RCE,0)  
Units: Dmnl
- (57) TAXA DE VENCIMENTO DOS PROJETOS MDL=128/290/108  
Units: fraction/mês  
1) Projetos vencidos até 31/12/2012 = 202 projetos  
2) Do total de projetos vencidos 58 projetos são não renováveis  
3) Do total de projetos vencidos 144 projetos são renováveis, sendo 70 projetos não renovados  
4) Assim, projetos vencidos e não renovados (58 + 70) = 128  
5) Número de meses de Janeiro/2004 a Dezembro/2012 = 108  
6) Total de contratos aprovados de Janeiro/2004 a Dezembro/2012 = 290  
7) Logo, TAXA DE VENCIMENTO DOS PROJETOS MDL = 128/290/108
- (58) TIME STEP = 1  
Units: Month [0,?]  
The time step for the simulation.
- (59) Total GEE Europa= INTEG (produção GEE Europa-GEE capturado Brasil,39451.7)  
Units: Mt  
Total de produção de GEE da Europa (real + projetado) no período de janeiro/2005 a dezembro/2020. Valor inicial do estoque acumulado de janeiro/1991 a dezembro/2005 de 39451.7.
- (60) Total Projetos Vencidos= INTEG (projetos MDL vencidos,0)  
Units: projetos  
Total da estimativa de projetos MDL brasileiros vencidos no período de janeiro/2005 a dezembro/2020.
- (61) Transações Europa= INTEG (valor da captação GEE Europa,0)  
Units: US\$  
Total dos Contratos MDL Brasil, acumulado de janeiro/2005 a dezembro/2020.
- (62) valor da captação GEE Europa=IF THEN ELSE( Período<=85, "preço RCE 2005-2012 ind"\*captando GEE Projetos MDL Brasil, "preço RCE futuro 2013-2020 projetado"\*captando GEE Projetos MDL Brasil)  
Units: US\$/mês  
Valor da captação GEE Europa, mês a mês, de janeiro/2005 a dezembro/2020.

## APÊNDICE D – GERAÇÃO DE GRÁFICOS

Foi criada uma visão auxiliar do MDCC, denominada de Geração de Gráficos (*view* no Vensim), como mostra a Figura 13, com a finalidade de auxiliar a criação de gráficos que eram impossíveis de serem criados a partir do modelo principal, em decorrência de algumas variáveis contemplarem dados reais com diferentes datas (de 2005 a 2009 e de 2005 a 2012). Essa complementação não implicou em quaisquer interferências na simulação e não foi incorporada ao modelo para evitar que sua compreensão visual se tornasse complexa. Ainda, as relações existentes não possuem polaridades por não implicarem em relações causais.

Figura 13 – Geração de gráficos



Fonte: dados da pesquisa (2013).

## APÊNDICE E – ROTEIRO DE ENTREVISTAS

As perguntas abaixo compreende o roteiro de entrevistas semiestruturadas aplicadas a especialistas que atuam como consultores e assessores em desenvolvimento e certificação de Projetos de MDL no Brasil.

1. Quais variáveis influenciam no mercado de créditos de carbono?
2. Como essas variáveis se relacionam?
3. Que variáveis tem influência no preço das RCE?
4. Como o preço das energias fósseis se relaciona com o preço das RCE?
5. A COP-18 teve influência na quantidade de projetos de MDL aprovados no segundo semestre de 2012?
6. Quais as fontes recomendadas para obter dados sobre:
  - 6.1. Projetos de MDL?
  - 6.2. Preço das RCEs?
7. Em sua opinião, o modelo representa a dinâmica do mercado de créditos de carbono? Por quê? Quais as modificações que poderiam ser realizadas para adequar o modelo à realidade?