

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

*Estudo da captura de gás carbônico diretamente do ar atmosférico com base na
tecnologia desenvolvida pela Carbon Engineering*

Eduardo Massaki Sakata

São Paulo
2014

ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

*Estudo da captura de gás carbônico diretamente do ar atmosférico com base na
tecnologia desenvolvida pela Carbon Engineering*

Trabalho de formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
obtenção do título de Graduação em Engenharia

Eduardo Massaki Sakata

Orientador:
Prof. Dr. Marcos de Mattos Pimenta

Área de Concentração:
Engenharia Mecânica

São Paulo
2014

Sakata, Eduardo Massaki

Estudo da captura de gás carbônico diretamente do ar atmosférico com base na tecnologia desenvolvida pela Carbon Engineering / E.M. Sakata. – São Paulo, 2014.
67 p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Mecânica.

1.Gás carbônico 2.Ar atmosférico I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Mecânica II.t.

RESUMO DO PROJETO

O projeto em questão visa o estudo do método de captura direta de gás carbônico da atmosfera como forma de controle da emissão desse gás. A tecnologia desenvolvida pela empresa *Carbon Engineering* é tomada como referência para as análises a serem realizadas e, portanto, é apresentada no decorrer deste trabalho. São abordados os problemas relacionados à emissão excessiva de CO₂ de modo a contextualizar o assunto a ser tratado e uma estimativa da eficiência do possível uso dessa tecnologia é feita tendo como base de estudo dados referentes ao estado de São Paulo, verificando-se qual seu provável impacto na taxa de gás carbônico emitida.

ABSTRACT

The project in question aims to study the method of direct carbon dioxide capture from the atmosphere as a way to control the emission of this gas. The technology developed by *Carbon Engineering* is used as reference to the analyzes that will be made and, therefore, is presented in this report. Problems related to the excessive emission of CO₂ are addressed so the subject treated will be contextualized and an estimate of the efficiency of the possible use of this technology will be made based on data relative to the state of São Paulo, verifying the probable impact on the carbon dioxide emission rate.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Emissão antropogênica anual dos GEE por grupos de gases (1970-2010) [6]	12
Figura 2 – Aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera ao longo dos anos (curva vermelha) e características sazonais da região de Mauna Loa (curva preta). [7].....	13
Figura 3 – Projetos de MDL registrados até 12/07/2012 [9]	20
Figura 4 – Esquematização do processo de captura de ar - <i>Carbon Engineering</i> [15].....	32
Figura 5 – Equipamento para contato entre o ar atmosférico e a solução química - <i>Carbon Engineering</i> [15]	33
Figura 6 – Ciclo de regeneração - <i>Carbon Engineering</i> [15].....	34
Figura 7 – Esquematização do equipamento de contato entre o ar atmosférico e a solução química [16]	38
Figura 8. Gráfico representativo da operação de longa duração [16].....	41
Figura 9. Gráfico da representação de parâmetros para fluxo de líquido em pulso [16].....	42
Figura 10. Gráfico da eficácia do método de fluxo de líquido em pulso [16]	43
Figura 11. Gráfico da medição de derivados da solução de hidróxido emitidos [16].....	44
Figura 12. Gráfico das curvas de queda de pressão [16]	46
Figura 13. Gráfico das emissões de GEE do Estado de São Paulo em 2005 (%) [17]	48

Figura 14. Gráfico das emissões de CO ₂ por Setor em 2005 no Estado de São Paulo (92.762 Gg) [17]	49
Figura 15. Gráfico das emissões de CO ₂ no Estado de São Paulo (Gg) [17]	50
Figura 16. Gráfico das emissões de CO ₂ no Estado de São Paulo (%) [17].....	50
Figura 17. Gráfico das emissões Totais de GEE no Subsetor de Transporte no Estado de São Paulo (GgCO ₂ eq) [17]	52
Figura 18. Gráfico das emissões Totais de GEE no Setor de Processos industriais no Estado de São Paulo (GgCO ₂ eq) [17].....	54
Figura 19. Gráfico das emissões de GEE na Agropecuária no Estado de São Paulo (%) [17].	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Emissões de CO ₂ de acordo com os setores envolvidos no Estado de São Paulo (Gg) [18]	49
Tabela 2 – Emissões Totais de GEE no Subsetor de Transporte no Estado de São Paulo (Gg) [18]	51
Tabela 3 – Emissões Totais de GEE no Subsetor de Transporte no Estado de São Paulo (Gg _{CO2eq}) [18]	52
Tabela 4 – Emissões de GEE no Setor de Processos Industriais no Estado de São Paulo (Gg) [18]	53
Tabela 5 – Emissões Totais de GEE no Setor de Processos industriais no Estado de São Paulo (Gg _{CO2eq}) [18]	54
Tabela 6 – Emissões Totais de GEE da Agropecuária no Estado de São Paulo (Gg _{CO2eq}) [18]	55
Tabela 7 – Emissões Totais de GEE da Agropecuária no Estado de São Paulo (Gg) [18]	55

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	9
1. EMISSÃO DO GÁS CARBÔNICO NA ATMOSFERA	10
1.1. Efeito Estufa e Aquecimento Global	10
1.2. Consequências do aquecimento global	13
2. CONTROLE DE EMISSÃO DOS GEE	15
2.1. Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC).....	15
2.2. Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC)....	16
2.3. Protocolo de Quioto.....	17
3. O MERCADO DE CARBONO	19
4. VIABILIDADE DA CAPTURA DE CO₂ DIRETAMENTE DO AR ATMOSFÉRICO	22
4.1. Empresas no ramo de captura de ar.....	25
4.2. Resfriamento do planeta: negócio para geração de dinheiro	27
5. A TECNOLOGIA DA CARBON ENGINEERING.....	30
5.1. <i>Carbon Engineering</i>	30
5.2. A tecnologia desenvolvida	31
5.2.1. Equipamento para contato entre o ar atmosférico e a solução química	32
5.2.2. Ciclo de regeneração.....	33
5.3. Análises de funcionamento – estudo de protótipo	35
5.3.1. O protótipo da Carbon Engineering.....	36
5.3.2. Especificações	38
5.3.3. Métodos de análise e resultados	39
6. ESTIMATIVAS DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NO ESTADO DE SÃO PAULO.....	47
6.1. Emissões de Dióxido de Carbono	48
6.1.1. Setor Energético.....	51
6.1.2. Processos Industriais e Uso de Produtos	52
6.1.3. Agropecuária	54
7. ESTIMATIVAS E ANÁLISES	57
8. CONCLUSÕES	62
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

INTRODUÇÃO

Neste trabalho, serão tratados assuntos relacionados ao efeito estufa, às mudanças climáticas que vem sendo verificadas nos últimos anos, às medidas adotadas para combater o problema causado pela excessiva emissão de gás carbônico e ao mercado de carbono. Com isso, pretende-se mostrar a grande importância relacionada à questão da emissão de gás carbônico na atmosfera bem como as suas consequências, de maneira a fazer uma breve contextualização acerca do assunto relacionado ao tema a ser desenvolvido ao longo de toda a disciplina e, portanto, de sua relevância.

Feito um estudo inicial, serão abordadas as questões que tornam viáveis a implantação do método de captura de CO₂ diretamente do ar, citando, também, companhias novas que procuram adotar este método como base de seus negócios, o que revela a real possibilidade de aplicação desta técnica no controle das emissões do gás carbônico.

Na sequência, apresenta-se um estudo relacionado à tecnologia desenvolvida pela empresa *Carbon Engineering*, a qual será utilizada como referência para a continuação do desenvolvimento do tema a ser abordado ao longo deste trabalho.

Ao final deste relatório, serão apresentados dados referentes à emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) no estado de São Paulo, a partir dos quais se procura mostrar a significância da quantidade de CO₂ lançada na atmosfera nessa região e que, por esse motivo, a tecnologia abordada neste trabalho pode ser uma alternativa para controle dessas emissões. Tais dados servirão como base para os estudos a serem feitos posteriormente, onde se pretende fazer uma estimativa e análise dos possíveis resultados a serem alcançados pela utilização da tecnologia estudada, levando-se em conta todo o conteúdo a ser abordado neste projeto.

1. EMISSÃO DO GÁS CARBÔNICO NA ATMOSFERA

1.1. Efeito Estufa e Aquecimento Global

A Terra é naturalmente protegida por uma camada de gases, sendo esta responsável por manter o planeta aquecido, uma vez que funciona como uma espécie de redoma impedindo que boa parte da energia solar absorvida pela superfície terrestre e pelos oceanos seja refletida novamente para o espaço. A retenção desse calor é o que permite que a Terra seja habitável, pois mantém a temperatura média global, próxima à superfície, em torno de 16°C, adequada para a manutenção da vida – sem essa barreira de gases, a superfície da Terra seria coberta de gelo, com uma temperatura média em torno de -17°C. A esse processo, dá-se o nome de *Efeito Estufa*. [1]

Estudos realizados por cientistas ao longo dos anos revelam que a manutenção da temperatura na Terra não segue um padrão rigoroso, de modo que mudanças climáticas fazem parte da história do nosso planeta. Oscilações nos padrões de temperatura ocorrem ao passo que os elementos naturais, como a composição química da atmosfera e fatores como erupções vulcânicas, mudanças na órbita terrestre e na intensidade da radiação solar, interagem e se intensificam. Devido a essa dinâmica associada à mudança do clima, muitas incertezas ainda existem acerca do aquecimento global. Apesar disso, grande parte da comunidade científica internacional reconhece que, desde a Revolução industrial, a crescente liberação de gases causadores do efeito estufa por meio das atividades do homem vem causando grande influência nesse processo.

Segundo o Protocolo de Quioto – que será discutido mais adiante – são seis os gases causadores do efeito estufa: o hexafluoreto de enxofre (SF_6), os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs), o gás metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O) e o gás carbônico (CO_2).

Segundo o relatório de 2013 do Grupo de Trabalho I do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC – *Intergovernmental Panel on Climate Changes*) [4], a concentração atmosférica dos três últimos gases citados tem aumentado a níveis sem precedentes nos últimos 800 mil anos, pelo menos. A concentração de gás carbônico cresceu em 40% desde a época pré-industrial, devido, sobretudo, às emissões provenientes da queima de combustíveis fósseis para a geração de energia. Conforme consta no relatório de 2014 do Grupo de Trabalho III do IPCC [6], a emissão de CO₂ devido a essa queima de combustíveis fósseis e aos processos industriais contribuíram em cerca de 78% do aumento total da emissão dos GEE entre os anos de 1970 e 2010, sendo que para o período entre 2000 e 2010 houve uma contribuição percentual bastante próxima a esse valor, indicando o aumento da influência do gás carbônico no Efeito Estufa.

O gráfico abaixo apresenta a emissão anual dos GEE por grupos de gases no período entre 1970 e 2010 devido às atividades humanas – em GtCO₂. São mostradas as emissões referentes ao CO₂ emitido pela combustão de combustíveis fósseis e processos industriais, ao CO₂ devido às atividades de plantio e outros usos da terra (CO₂ FOLU), ao metano (CH₄), ao óxido nitroso (NO₂) e aos gases fluorados citados no Protocolo de Quioto (F-Gases).

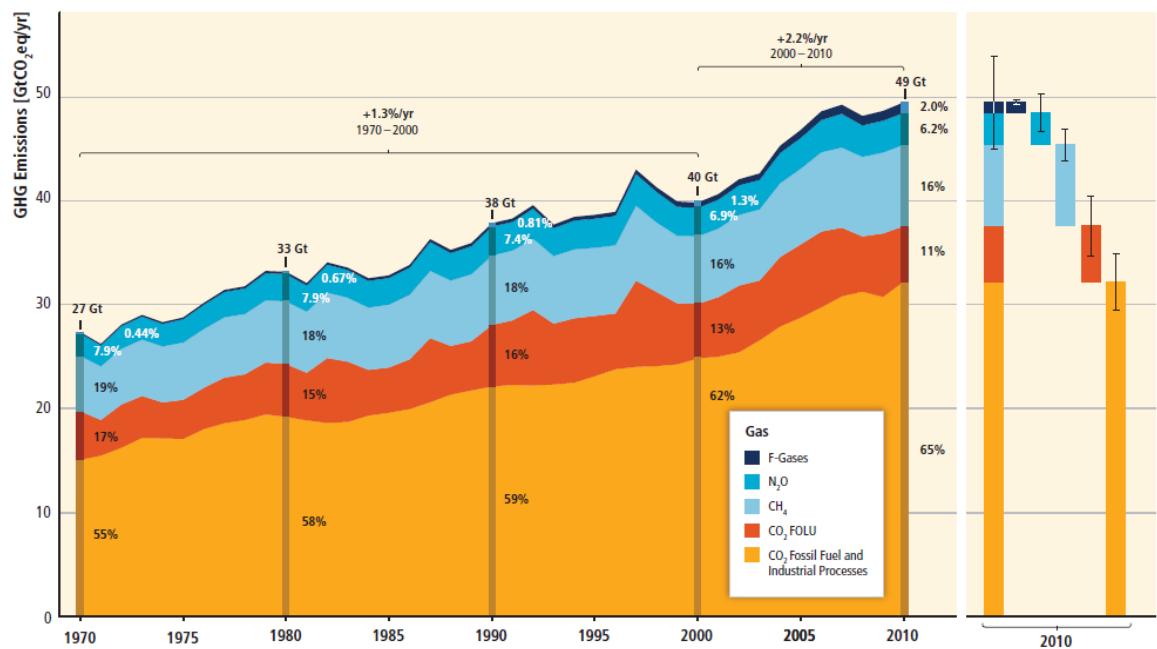


Figura 1 – Emissão antropogênica anual dos GEE por grupos de gases (1970-2010) [6]

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) anunciou que, em novembro de 2012, a presença dos gases do efeito estufa na atmosfera foi a maior já registrada desde a revolução industrial: 390,9 partes por milhão (ppm), um aumento de 30% entre 1990 e 2011. Em maio de 2013, o Scripps Institution of Oceanography, da Universidade de San Diego, que monitora a estação de Mauna Loa, no Havaí, anunciou que a concentração de CO₂ na atmosfera chegou a 400,03 ppm.

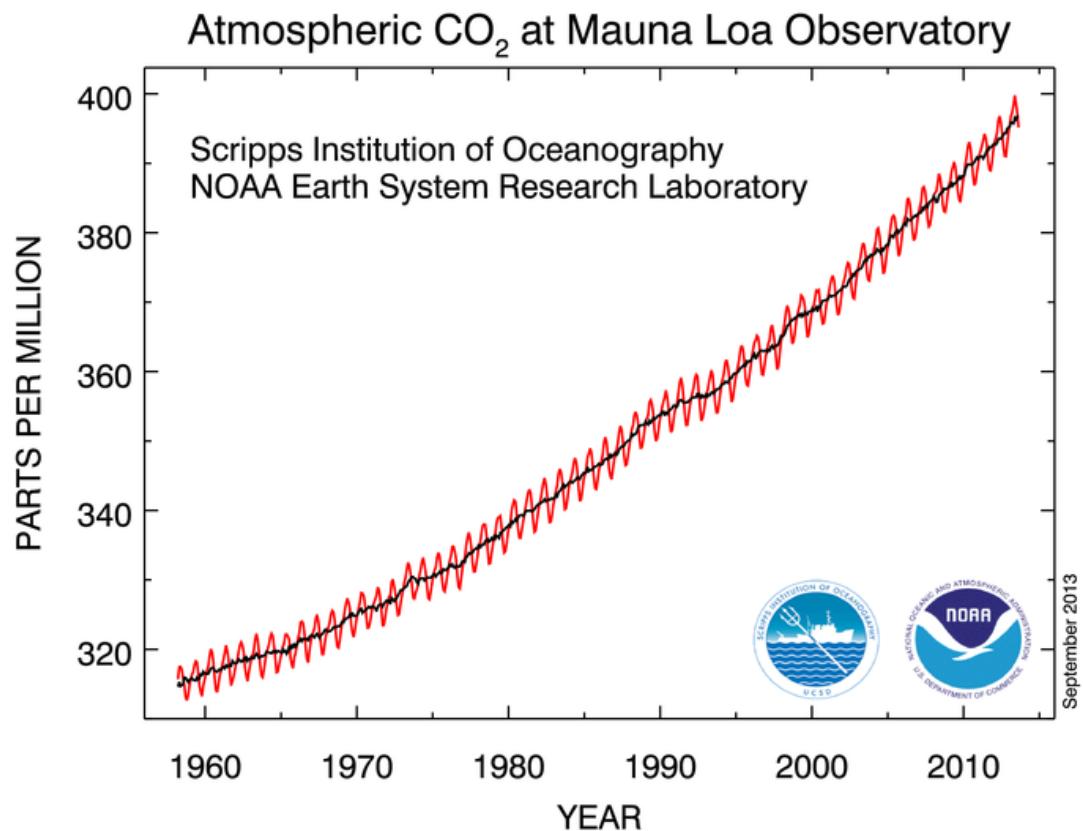


Figura 2 – Aumento da concentração de gás carbônico na atmosfera ao longo dos anos (curva vermelha) e características sazonais da região de Mauna Loa (curva preta). [7]

A “Declaração sobre o Status do Clima Global” da OMM afirma que 2010 alcançou temperaturas recorde, fechando a década mais quente já registrada e, em dezembro deste mesmo ano, o Instituto Goddard para Estudos Espaciais da NASA (GISS) divulgou um estudo com dados de 6300 estações meteorológicas, informações de satélites e de centros de pesquisa na Antártica, chegando à conclusão de que, sem dúvidas, o planeta está aquecendo. [2]

1.2. Consequências do aquecimento global

São inúmeras as consequências associadas ao aquecimento global. Dentre elas, as que vêm sendo mais sentidas na atualidade com certeza estão relacionadas à

intensificação de fenômenos climáticos. Segundo consta no relatório de 2014 do Grupo de Trabalho II do IPCC [5], fatores como, por exemplo, ondas de calor, inundações e ciclones, revelam significativa vulnerabilidade e exposição de alguns ecossistemas e muitos sistemas humanos à variabilidade climática atual. O aumento nas temperaturas faz com que haja uma maior taxa de evaporação das águas dos oceanos, fato que potencializa tais fenômenos e, consequentemente, aumenta as chances de ocorrências de desastres naturais em regiões de todo o mundo.

Outro ponto a se considerar é que, futuramente, espera-se um aumento no nível dos oceanos devido ao derretimento das calotas polares, de modo a causar a submersão de grandes cidades litorâneas. Cientistas calculam que em 2050 milhões de pessoas que vivem em deltas de rios serão removidas, caso seja mantido o ritmo atual de aquecimento. A geleira Gangotri, no Himalaia, por exemplo, já perdeu dois mil metros nos últimos 150 anos. Atualmente, possui 25 quilômetros, e o ritmo de derretimento está acelerado. [3]

Enquanto que por um lado espera-se esse aumento no nível dos oceanos, por outro devem também haver o crescimento de regiões desérticas, provocando a morte de várias espécies animais e vegetais, desequilibrando os ecossistemas. A falta de chuva já transforma dois mil quilômetros de terra em deserto todos os anos, e esse problema vem se agravando ainda mais devido à ocorrência do desmatamento em florestas tropicais. [3]

2. CONTROLE DE EMISSÃO DOS GEE

Nesta seção, serão citados simplificadamente algumas das principais medidas adotadas ao longo dos anos para o controle da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera.

2.1. Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)

A Organização Meteorológica Mundial (WMO) e o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (Pnuma) criaram em 1988 o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) com o objetivo de melhorar o entendimento científico relevante para o esclarecimento das mudanças climáticas, potenciais impactos e medidas de adaptação e mitigação.

O IPCC é formado por mais de 2,5 mil cientistas de cerca de 130 países, entre cientistas atmosféricos, oceanógrafos, especialistas em gelo, economistas, sociólogos e outros especialistas que avaliam e resumem os principais estudos sobre mudanças climáticas. Durante a sua história, o IPCC publicou cinco relatórios de avaliação, sendo o último deles em 2013/2014. Tais relatórios geralmente são publicados em três volumes diferentes, um para cada Grupo de Trabalho que compõe o IPCC.

De acordo com o relatório do Grupo de Trabalho I do IPCC [4], o aquecimento do sistema climático é inequívoco, sendo que as mudanças climáticas verificadas desde a década de 50 nunca foram registradas ao longo de muitos outros anos. Afirma-se que a atmosfera e os oceanos aqueceram, a quantidade de neve e gelo diminuiu, o nível do mar aumentou e a concentração de gases de efeito estufa aumentou.

O painel climático estima que, até o final do século, a média da temperatura na Terra deve subir entre 1,5°C e 4°C, o que causaria mudanças irreparáveis a muitos ecossistemas terrestres e consequentemente a muitos modos de vida.

2.2. Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC)

A UNFCCC foi adotada em 9 de maio de 1992, em Nova York entrando em vigor, entretanto, apenas em 21 de março de 1994. A Convenção reconheceu as mudanças climáticas como um problema ambiental real e global, assumindo a relevância da interferência humana e a necessidade de cooperação internacional na solução da emissão de gases que contribuem com o efeito estufa. Estabeleceu-se como objetivo principal a estabilização da concentração desses gases num nível em que a ação humana não afetasse o clima. Para tanto, foram definidos compromissos e obrigações para todos os 192 países signatários da Convenção do Clima – como é conhecida a UNFCCC. A partir de então, esses países passaram a se encontrar regularmente para continuar as discussões na Conferência das Partes (COP). A COP é o órgão supremo da Convenção, cujo objetivo é manter regularmente sob exame e tomar as decisões necessárias para promover a efetiva implementação das determinações da Convenção e de quaisquer instrumentos jurídicos que possa vir a ser adotado.

O Brasil foi o primeiro país a assinar a Convenção, em 4 de junho, durante a Conferência Internacional sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (Eco92), no Rio de Janeiro, retificando-a em 28 de fevereiro.

2.3. Protocolo de Quioto

O Protocolo de Quioto constitui um tratado complementar à UNFCCC. Criado em 1997, é o único tratado internacional que determina metas de redução de emissões de gases do efeito estufa (GEE) e estimula o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis. O Protocolo de Quioto limita emissões dos seis gases que provocam o efeito estufa: o gás metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o hexafluoreto de enxofre (SF_6), os hidrofluorcarbonos (HFCs), os perfluorcarbonos (PFCs) e o gás carbônico (CO_2). [8]

Pelo primeiro acordo estabelecido, que entrou em vigor em 2005, os países industrializados deveriam reduzir as emissões de GEE, durante o período de 2008 a 2012, em uma média de 5,2% em relação aos níveis de 1990 [8]. Apenas 42 países industrializados do Anexo I do Protocolo – que contém os países membros da Organização de Cooperação para o Desenvolvimento Econômico (OCDE) e os países do antigo bloco soviético – estão sujeitos a essas metas, lembrando que os Estados Unidos, um dos maiores emissores de gases de efeito estufa, não fazem parte do Protocolo.

Cada país tem uma meta, sendo ela calculada com base na contribuição de cada um para as emissões totais de GEE lançadas na atmosfera desde a revolução industrial. Por isso, os países pobres e em desenvolvimento não possuem metas, pois passaram por um processo de industrialização tardio e apenas nos últimos anos aumentaram significativamente as emissões. No entanto, como signatários, esses países devem manter a ONU informada sobre seu nível de emissões, bem como devem buscar o desenvolvimento de estratégias para tratar as mudanças climáticas.

Em dezembro de 2012, foi realizada a COP 18, em Doha, no Qatar. Nesta Conferência, cerca de 200 países concordaram em estender a validade do Protocolo de Quioto. O segundo período de compromisso vai de janeiro de 2013 a dezembro de 2020. Vale ressaltar, no entanto, que o alcance do novo acordo é ainda menor do que o do primeiro, já que Japão, Rússia, Canadá e Nova Zelândia se recusaram a assiná-

lo porque queriam que países emergentes como a Índia, a China e o Brasil também tivessem metas a cumprir, o que não é previsto pelo documento. Dessa forma, o grupo comprometido com as metas do protocolo se reduz a 36 países: Austrália, Noruega, Suíça, Ucrânia e todos os integrantes da União Europeia. Juntos, eles respondem por apenas cerca de 15% do total de emissões de gases estufa de todo o mundo.

Recentemente, relatórios e estudos ressaltaram a situação real das mudanças climáticas e o fato de que os esforços realizados estão longe de poder freá-las, já que revertê-las parece difícil.

Desde 1995, a comunidade internacional se reúne todos os anos em complexas e difíceis negociações dirigidas pela ONU para tentar aumentar e distribuir de forma igualitária as reduções de gases de efeito estufa.

3. O MERCADO DE CARBONO

O Mercado de Carbono surgiu com a criação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) pela UNFCCC como uma maneira de ajudar os países a cumprirem as metas do Protocolo de Quioto.

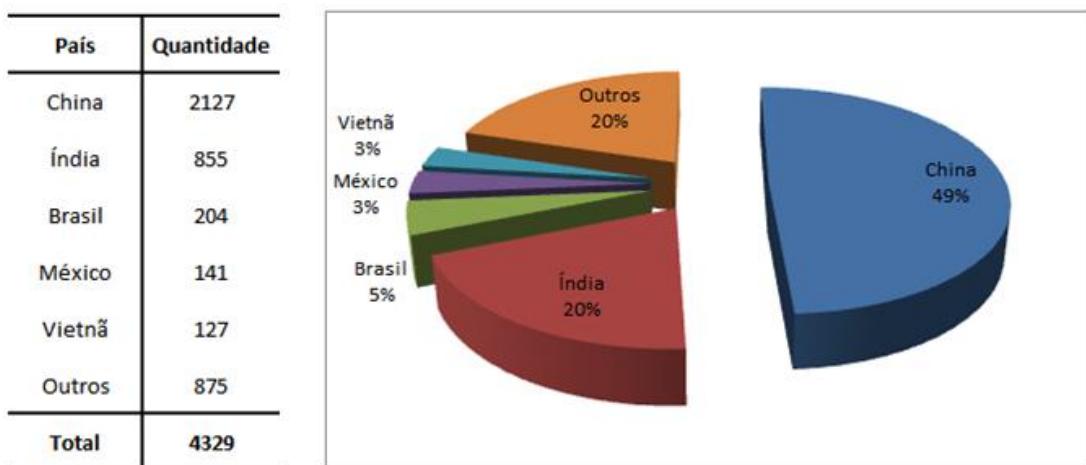
A proposta do MDL consiste na implantação de um projeto em um país em desenvolvimento com o objetivo de reduzir as emissões de gases do efeito estufa (GEE) e contribuir para o desenvolvimento sustentável local. Cada tonelada de CO₂ equivalente deixada de ser emitida ou retirada da atmosfera se transforma em uma unidade de crédito de carbono, chamada Redução Certificada de Emissão (RCE), que poderá ser negociada no mercado mundial, sendo que esses créditos de carbono são considerados commodities (mercadorias negociadas com preços estabelecidos pelo mercado internacional).

Esses créditos são geralmente comprados por empresas no exterior que, em função do Protocolo de Quioto, têm metas obrigatórias de redução de emissões de gases de efeito estufa, mas não conseguem atingir o patamar determinado. A compra dos créditos permite-lhes manter ou aumentar suas emissões. Assim sendo, empresas que poluem acima do limite permitido pelo Protocolo de Quioto acabam pagando pela poluição adicional que geram, remunerando as atividades que reduzem as emissões de gases.

O comércio de emissões é um sistema global de compra e venda de emissões de carbono, baseado no esquema de mercado *cap-and-trade* [9]. A expressão *cap-and-trade*, que na tradução livre seria algo como “limite e negociação”, é usada para denominar um mecanismo de mercado que cria limites para as emissões de gases de um determinado setor ou grupo. Com base nos limites estabelecidos, são lançadas permissões de emissão e cada participante do esquema determina como cumprirá estes limites. As cotas (ou permissões) de emissão podem ser comercializadas, ou seja, aqueles países (ou firmas) que conseguem emitir menos do que foi estabelecido a eles podem vender o excedente àqueles que não conseguiram (ou não quiseram)

limitar suas emissões ao número de cotas que tinham. Nesse ponto é que surge o interesse nos projetos de MDL realizados nos países em desenvolvimento (que não possuem metas obrigatórias), pois esses projetos dão direito aos seus idealizadores de receberem créditos de carbono para comercializar.

Em termos mundiais, o valor total do mercado de carbono cresceu 11% em 2011, alcançando a cifra de US\$ 176 bilhões (o que corresponde à transação de 10,3 bilhões de toneladas de dióxido de carbono equivalente), conforme o relatório “State and Trends of the Carbon Market”, publicado pelo Banco Mundial neste ano. Relativamente aos números do mecanismo de desenvolvimento limpo, até julho de 2012, foram aprovados e registrados na ONU 4.329 projetos de MDL oriundos de todo o mundo. Desses, 49% ocorreram na China. [9]



Fonte: <http://cdm.unfccc.int/Statistics/index.html>

Figura 3 – Projetos de MDL registrados até 12/07/2012 [9]

O Brasil conta com apenas 5% do total. Muitos advogam que essa pequena participação no País é fruto da falta de regulamentação do mercado de carbono no Brasil.

É natural que a China tenha muito mais projetos de MDL que o Brasil, pois, primeiramente, a economia chinesa é mais de três vezes maior que a brasileira. Além disso, a economia da China possui uma matriz energética baseada em combustíveis

fósseis, diferente do Brasil, cuja matriz energética é muito limpa, predominando as hidrelétricas. Isso cria muito mais oportunidades para a China pensar em projetos de MDL.

Uma abordagem mais detalhada acerca do mercado de carbono brasileiro foge do escopo deste trabalho. Estudos mais aprofundados podem ser vistos na referência [10].

4. VIABILIDADE DA CAPTURA DE CO₂ DIRETAMENTE DO AR ATMOSFÉRICO

Como discutido anteriormente ao longo deste trabalho, nota-se que o crescimento na emissão de gases estufa, principalmente o gás carbônico, na atmosfera vem se tornando um grave problema. Nas circunstâncias atuais, mesmo que fosse possível cessar completamente as emissões de gás carbônico devido às atividades humanas, os efeitos causados pela excessiva emissão desse gás na atmosfera podem persistir por milhares de anos caso dependamos apenas dos processos naturais para a dissipação das perturbações do ciclo de carbono e das consequentes mudanças climáticas. Algumas extrações relativas à tendência de emissão de gás carbônico na atmosfera sugerem que mesmo que haja um grande esforço em limitá-la, a concentração de CO₂ na atmosfera crescerá além da marca de 450 ppm, passando o nível comumente determinado como sendo o limite a partir do qual o risco de perigosas mudanças climáticas torna-se altamente inaceitável, conforme descrito em [11]. Uma vez que as possíveis reações climáticas para as concentrações elevadas de gás carbônico na atmosfera são fenômenos incertos, estamos sujeitos a impactos catastróficos mesmo nas condições atuais, sendo que esse risco cresce à medida que as emissões continuam a aumentar as concentrações de gás carbônico na atmosfera.

Tecnologias de descarbonização de sistemas energéticos – a partir do uso da energia solar para a captura de CO₂ dos gases de combustão de usinas a carvão, por exemplo – são alternativas que podem reduzir a taxa de emissão, mas não podem reduzir o risco climático devido ao carbono já adicionado ao ar. Engenharias de resfriamento climático que possam atuar contra o aquecimento global também são alternativas importantes, mas também não são totalmente eficientes por não serem capazes de eliminar os riscos climáticos e geoquímicos a longo prazo devido às altas taxas de CO₂. Dessa forma, torna-se bastante importante que se desenvolva meios para a redução da concentração de gás carbônico na atmosfera para que possamos administrar os possíveis riscos devido às mudanças climáticas. Caso não seja possível retirar CO₂ da atmosfera de uma maneira mais rápida que a realizada pela

natureza, ou a Terra estará sujeita a um futuro mais quente ou estaremos comprometidos a sustentar um sistema de engenharia climática.

A captura de ar é um processo industrial que captura o gás carbônico do ar atmosférico, produzindo um fluxo de CO₂ puro para ser utilizado ou descartado. Esse método faz parte de um conjunto de tecnologias emergentes que utilizam energia de biomassa – a qual, durante a sua produção, também colabora para retirada do gás estufa da atmosfera, juntamente de outros causadores da aceleração do intemperismo geoquímico. O desenvolvimento do processo de captura de ar, juntamente de outros mecanismos de retirada de CO₂ diretamente da atmosfera, requer, no entanto, grandes esforços em pesquisas experimentais a longo prazo.

Ainda nos dias de hoje, não há nenhuma usina ou estação de produção de energia que capture completamente o CO₂ de seus fluxos de gases de exaustão. Por esse motivo, e sabendo-se ainda que a concentração de CO₂ na atmosfera é de apenas 0,04%, é bastante comum que se chegue à conclusão de que o desenvolvimento e a implantação da técnica de captura de ar seja algo prematuro e até mesmo sem sentido antes que se consiga uma significativa redução da emissão de gás carbônico na atmosfera. Realmente, no curto prazo, os esforços para limitar os riscos devido às mudanças climáticas devem se voltar primeiramente para a redução das emissões. No entanto, devido aos nichos abertos pela diversidade tecnológica e econômica dos nossos sistemas energéticos, a implantação do método de captura de ar ainda sim pode trazer benefícios, mesmo antes de se conseguir uma situação em que o nível de emissão de gás carbônico seja praticamente nulo, podendo auxiliar, inclusive, no processo de redução de emissão em curto prazo.

A remoção de dióxido de carbono (ou CDR, *Carbon Dioxide Removal*) é algumas vezes visto como sendo um ramo da geoengenharia – ações deliberadas de escala global que têm por objetivo o resfriamento do planeta – mas, na realidade, são conceitos bastante diferentes. As estratégias associadas à geoengenharia são arriscadas, imperfeitas, controversas e de difícil controle. A tecnologia mais discutida da geoengenharia, gerenciamento da radiação solar, alivia um sintoma do problema climático (temperaturas mais quentes), mas nada faz a respeito da causa (aumento da

concentração de CO₂ na atmosfera). Além disso, a geoengenharia como metodologia de combate às alterações climáticas está parada pelo fato dos governos terem recusado a investir mais do que aquilo aplicado para pesquisa e por não haver modelos de negócios que possam apoiá-la. Em contraste, a remoção de gás carbônico pela captura de ar atua na base da causa do aquecimento global, não cria qualquer tipo de risco e é financiado pelo mercado privado.

Não há nenhuma dúvida quanto à possibilidade de remover CO₂ da atmosfera por meio da utilização de processos químicos, já que é por este método que pessoas conseguem respirar em submarinos ou em naves espaciais. A grande dúvida que persiste entre a comunidade científica é que a captura de ar pode ser um processo de custo elevado e, portanto, impraticável em escala global. Alguns cientistas acreditam que tais custos possivelmente cheguem a valores excessivamente elevados e que, além disso, investir na captura de ar seria um grande erro por tirar a atenção de áreas mais importantes; em oposição, outros têm argumentado que a captura de ar poderá ser bastante viável comparado a outras opções possíveis para tratar a questão da alta concentração de CO₂ na atmosfera, podendo ocupar um importante papel na administração das emissões desse gás.

Em 2011, um comitê da Sociedade de Físicos Americanos produziu uma avaliação tecnológica, chamada *Direct Air Capture of CO₂ with Chemicals*, segundo a qual se estima que o custo do sistema de captura de ar esteja em torno de \$600 ou mais por tonelada métrica de CO₂. A avaliação feita chega à conclusão de que “a captura direta de ar não é uma abordagem economicamente viável para mitigar as mudanças climáticas”. [12]

Para Howard Herzog, professor do MIT, é mais sensato fazer a captura de gás carbônico em gases de exaustão de usinas, onde sua concentração é maior – cerca de 12% em usinas de carvão e 4% em usinas de gás natural. Herzog diz que qualquer um que afirme poder capturar CO₂ do ar a preços baixos estará se iludindo ou não sendo totalmente honesto. Ele foi coautor de um estudo no *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, que estimou o custo da captura de ar em um valor próximo de \$1000 por tonelada de CO₂. [12]

David Keith, fundador da empresa *Carbon Engineering*, tem opinião contrária à de Herzog e parece ter bastante convicção sobre seu ponto de vista. No FAQ (*Frequently Asked Questions* – em português, Questões Frequentemente Respondidas) no site da empresa [14], a *Carbon Engineering* oferece uma “estimativa conservativa” sobre o custo do processo de captura de ar em “menos de \$250 por tonelada” de CO₂ e diz que tal preço ainda tende a decrescer.

O fato é que todas as dúvidas e discussões acerca dos custos só poderão ser resolvidas por meio do desenvolvimento de algumas tecnologias de captura de gás até o ponto em que possam ser avaliadas com maior precisão. Assim como no caso de outras tecnologias energéticas, pesquisas universitárias de pequena escala não podem servir de base para a determinação desses custos. Ao contrário, esses custos só se tornarão evidentes quando empresas voltadas para este ramo de pesquisa começarem a construir instalações em escala industrial.

4.1. Empresas no ramo de captura de ar

Atualmente, apesar do ceticismo generalizado da comunidade científica, alguns deles vêm procurando desenvolver tecnologias para a aplicação da captura de ar para retirada de gás carbônico da atmosfera. A partir de seus esforços, ricos investidores acabaram sendo atraídos para a causa juntamente com capitais de risco; mais recentemente, até a atenção do *Wall Street* foi conseguida. Para esses cientistas, o investimento governamental, embora possa ser útil, não é um fator necessário para que suas tecnologias possam ser desenvolvidas. O que julgam ser mais essencial é a adoção da mentalidade de que o CO₂ deve ser tratado como uma valiosa *commodity*.

Três companhias vêm apostando na possibilidade de ganhar dinheiro por meio da reciclagem do CO₂ e, consequentemente, resfriando um planeta sobreaquecido. A pioneira, *Kilimanjaro Energy*, foi lançada em 2004 por Klaus Lackner, um físico da Universidade de Columbia e o primeiro a escrever sobre a captura de CO₂ do ar, em

um artigo de 1999. A companhia foi inicialmente financiada com \$8 milhões de Gary Comer, o fundador da companhia de roupas Land's End. Comer, um ávido vendedor e filantropo, começou a se preocupar com as mudanças climáticas após navegar um iate com certa facilidade por meio de uma região conhecida por *Northwest Passage*, normalmente coberta por gelo. Antes de morrer, em 2006, Comer ainda doou \$50 milhões a mais para pesquisas relacionadas a mudanças climáticas. Em 2011, a *Kilimanjaro Energy* levantou outros \$3,5 milhões de uma empresa chamada *Arch Venture Partners*. [12]

Uma segunda companhia, a *Global Thermostat*, também possui suas raízes na Universidade de Columbia, tendo sido fundada por dois de seus professores: Peter Eisenberger, físico fundador do Instituto Terra (*Earth Institute*) da Columbia; e Graciela Chichilnisky, uma economista, matemática e empresária que ajudou a criar o primeiro mercado de troca de carbono no mundo. A companhia tem como principal financiador Edgar Bronfman Jr. – antigo CEO da Warner Music e herdeiro da fortuna da família Seagram –, que investiu \$15 milhões. Na SRI International, um instituto de pesquisa bastante bem visto do Vale do Silício – localizado em Menlo Park, Califórnia –, a *Global Thermostat* construiu uma pequena instalação de demonstração que hoje está absorvendo gás carbônico do ar. [12]

Por fim, há a *Carbon Engineering*, uma empresa dirigida por David Keith, localizada em Calgary, Alberta, o principal centro da indústria de óleo e gás do Canadá. Bill Gates é um investidor, assim como seu amigo Jabe Blumenthal, um antigo executivo da Microsoft bastante interessado por questões climáticas. Outro investidor é N. Murray Edwards, um bilionário do ramo de óleo e gás, cuja companhia, *Canadian Natural Resources*, extrai óleo das areias betuminosas de Alberta. [12]

4.2. Resfriamento do planeta: negócio para geração de dinheiro

Como os gases estufa se dispersam por todo o globo terrestre, a captura de ar pode ser feita em qualquer lugar. Este fato é fundamental para o plano de negócios das três empresas *startups*. Isso significa que a retenção do gás carbônico da atmosfera não precisa ser realizada diretamente nas fontes. Ou seja, o CO₂ lançado pelos escapamentos de veículos em São Paulo ou pelas chaminés de usinas de carvão na China pode ser capturado por máquinas na Islândia ou no Oriente Médio porque a atmosfera funciona como uma transportadora, levando o CO₂ para qualquer coletor. A captura de ar pode vir a ser a única maneira de absorver as emissões dispersas de carros, caminhões, trens, navios ou aviões.

Hoje em dia, há uma substancial demanda não atendida de CO₂, a preços que podem chegar a \$100 por tonelada – conforme relatado em [13]. Apesar de o gás carbônico ter diversos usos comerciais, a maior parte desta demanda vem de companhias de petróleo que querem injetar CO₂ liquefeito em reservatórios para comprimir petróleo estagnado (ou seja, petróleo que não está ligado a um oleoduto), uma tecnologia comprovada chamada de Recuperação Avançada de Petróleo (EOR, *Enhanced Oil Recovery*). O governo dos Estados Unidos estima que a utilização da técnica da EOR por meio do CO₂ pode adicionar 89 bilhões de barris de petróleo aos seus recursos recuperáveis, o que corresponde a mais de quatro vezes as reservas comprovadas atualmente. [13]

As três empresas voltadas para o ramo de captura de CO₂ diretamente do ar – apresentadas anteriormente – pretendem começar seus negócios por meio da venda de CO₂ para a indústria petrolífera. Saindo na frente está a *Global Thermostat*, que teve sérias conversas com uma firma de energia localizada em Seattle, chamada *Summit Power*, acerca da construção de um protótipo para captura de CO₂ e extração de petróleo estagnado, como parte do Projeto de Energia Limpa do Texas, um grande projeto da *Summit*, financiado pelo governo. O CO₂ líquido a ser utilizado na EOR seria retirado no subsolo, compensando as emissões geradas quando o petróleo é queimado mais tarde. Segundo algumas estimativas, o petróleo recuperado dessa

forma teria mais ou menos a metade da quantidade de carbono do petróleo convencional. Este petróleo, diz a teoria, poderia ser transformado em combustíveis de baixo teor de carbono para meios de transporte, visando principalmente clientes que enfrentam a pressão regulatória para reduzir as emissões – como é o caso das companhias aéreas.

Hoje, companhias de petróleo estão operando cerca de 114 projetos de EOR, pagando um valor de \$20 a \$40 por tonelada de CO₂, dependendo do preço do petróleo e do quanto longe o gás carbônico deve ser enviado via oleoduto. Em torno de três quartos do CO₂ vem de depósitos naturais, sendo o restante obtido de usinas a carvão, etanol e química. “O maior empecilho para a expansão da produção por EOR hoje é a falta de grandes volumes de CO₂ confiável e acessível”, diz Tracy Evans, presidente da *Denbury Resources*, uma companhia de petróleo em Plano, Texas, especializada na tecnologia de recuperação avançada de petróleo. [13]

Se, com o passar do tempo, os custos virem a decrescer, a tecnologia da captura de ar poderá atender um mercado mais amplo, não se restringindo apenas às empresas de petróleo. Ao menos duas novas empresas do ramo vêm tentando se envolver na área associada à produção de biocombustível limpo, colaborando com empresas ligadas à criação de algas que pretendem enriquecer o ar com CO₂ para alimentá-las. Ned David, chefe executivo da *Kilimanjaro Energy* que trabalhou anteriormente em uma firma de algas – a *Sapphire Energy* –, diz que “algas são os seres mais eficientes para a produção de combustíveis, e elas não conseguem absorver CO₂ suficiente da atmosfera” [13]. A captura de gás carbônico da atmosfera para alimentar as algas tornaria possível – pelo menos na teoria – um ciclo fechado de produção de combustível, ou seja, um ciclo no qual o CO₂ lançado durante a queima do combustível seria contrabalanceado pelo CO₂ absorvido durante a sua produção.

Na *Global Thermostat*, Eisenberger e Chichilnisky discutem a possibilidade de produzir combustível para transporte por meio da combinação de CO₂ com hidrogênio extraído da água. Eles formaram uma joint venture com uma empresa que diz conseguir produzir hidrogênio a partir da água a um custo menor que os alcançados anteriormente. Caso o processo possa ser alimentado por energia solar,

ele poderia produzir hidrocarbonetos renováveis de baixo teor de carbono, que seriam utilizados como combustíveis para os mais variados meios de transporte. Para Eisenberger, “isso tem um grande potencial de se tornar uma tecnologia transformadora”, pois qualquer país no mundo poderia se tornar um produtor de petróleo. [13]

O modelo de negócio da *Carbon Engineering*, por exemplo, gira em torno daquilo que David Keith chama de “arbitragem física do carbono”. A companhia planeja construir sua primeira instalação de captura de carbono em locais com mão de obra barata, terreno barato, reduzidos custos de construção, gás natural barato para a sua operação e, idealmente, forte demanda por CO₂. Keith acredita que achando um local que atenda a todos esses requisitos, o lucro financeiro será inevitável. Apesar de parecer bastante improvável, existem regiões no Oriente Médio onde o petróleo estagnado é bastante barato, além de que companhias de petróleo chegariam a pagar \$50 ou mais – dependendo do preço do petróleo – por tonelada de CO₂ para fazer uso da técnica de recuperação avançada de petróleo.

Assim como a *Global Thermostat*, Keith visiona instalações de captura de carbono construídas no deserto, sendo elas alimentadas por energia solar. Elas poderiam combinar o CO₂ capturado com hidrogênio produzido para a formação de gasolina ou combustível diesel. O produto, segundo Keith, seria um “combustível que teria todos os benefícios dos hidrocarbonetos – densidade energética e compatibilidade com a infraestrutura existente – mas que não estaria envolvido com o mercado de petróleo” [13]. Em agosto de 2011, a *Carbon Engineering* começou a operar um pequeno protótipo.

5. A TECNOLOGIA DA *CARBON ENGINEERING*

5.1. *Carbon Engineering*

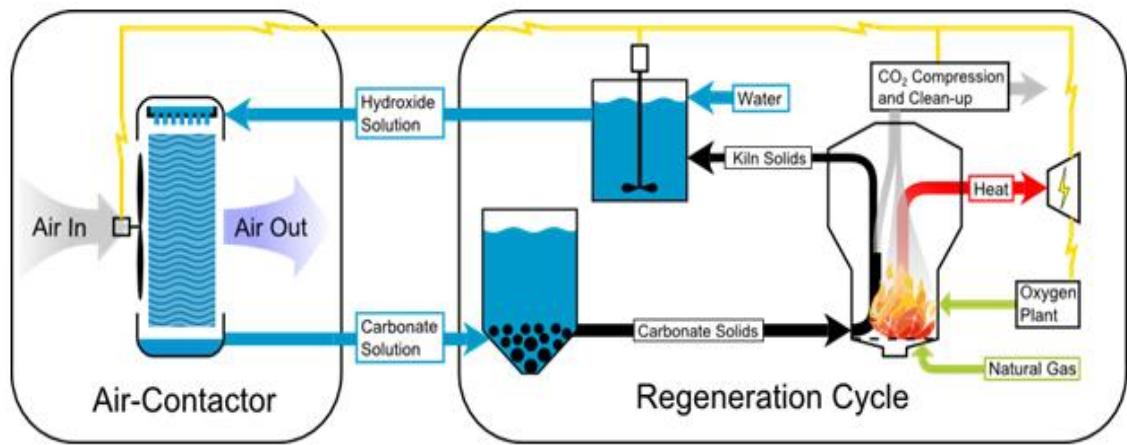
Como já mencionado anteriormente ao longo deste trabalho, a *Carbon Engineering* é uma das principais empresas vinculadas ao ramo da captura de gás carbônico diretamente do ar atmosférico. É uma companhia independente localizada em Calgary, Canadá, cujo objetivo é o desenvolvimento e comercialização de tecnologia para captura direta de ar em escala industrial e rentável. Foi formada em 2009 pelo Dr. David Keith, baseando seu trabalho nas pesquisas sobre a captura de ar que vinham sendo desenvolvidas por seus grupos na Universidade de Calgary e, anteriormente, na Universidade Carnegie Mellon. A *Carbon Engineering* se focou no desenvolvimento da tecnologia de captura de ar por meio da elaboração de processos que usam, sempre que possível, tecnologias de escala industrial já existentes, com o intuito de minimizar possíveis erros técnicos. Essas tecnologias, por sua vez, são integradas àquelas desenvolvidas dentro da própria empresa. Por esses motivos, o modelo de purificador de ar desenvolvido pela *Carbon Engineering* baseia-se nas indústrias de purificadores de gases e torres de resfriamento, somadas a uma variação de tecnologia utilizada no processo de recuperação de papel do tipo Kraft para regeneração da solução química utilizada na retenção do gás carbônico do ar e produção deste gás purificado em gasodutos. O resultado é um sistema que absorve cerca de 10 GJ de gás natural para suprir toda energia térmica e elétrica necessárias, que captura aproximadamente todo o CO₂ produzido na queima do gás natural e que, por fim, produz um fluxo da combinação purificada do gás carbônico capturado do ar e proveniente da combustão em gasoduto, a 150 bar. O sistema também requer uma pequena reposição de água e de composto químico para compensar perdas. [15]

5.2. A tecnologia desenvolvida

A tecnologia patenteada pela empresa é composta por duas etapas: passagem por um equipamento para realização do contato entre o de ar atmosférico e a solução química para retenção do CO₂ e um ciclo de regeneração. Esses dois processos trabalham em conjunto, de modo a permitir uma contínua captura de CO₂ do ar da atmosfera, com energia (e pequenas quantidades do composto químico) como entrada, e gás carbônico puro como saída. O fluxo de CO₂ puro pode ser vendido e utilizado em aplicações industriais e/ou depositados permanentemente em regiões subterrâneas profundas (armazenamento geológico).

Em uma visão geral, a tecnologia de captura da *Carbon Engineering* faz com que o ar atmosférico contendo CO₂ entre em contato com uma solução química que naturalmente absorve o gás carbônico dentro de um equipamento. Essa solução, agora contendo o CO₂ capturado, é enviado para um ciclo de regeneração que, simultaneamente, extraí o gás carbônico enquanto regenera a solução química original para reuso no equipamento onde há o contato do ar atmosférico com a solução química. O CO₂ extraído é combinado com todo o CO₂ proveniente dos sistemas de energia e ambos são fornecidos por meio de gasodutos como um produto de qualidade, à alta pressão.

A ilustração a seguir representa os procedimentos descritos anteriormente.



CE's Air Capture Process

Figura 4 – Esquematização do processo de captura de ar - *Carbon Engineering* [15]

5.2.1. Equipamento para contato entre o ar atmosférico e a solução química

A *Carbon Engineering* desenvolveu, patenteou e construiu um protótipo de um equipamento que maximiza a captura de CO₂ por meio da utilização de uma forte solução alcalina de hidróxido. Essa solução tem sido otimizada para a rápida absorção de dióxido de carbono por uma cuidadosa seleção das concentrações químicas e utilização de aditivos. O equipamento desenvolvido e utilizado no protótipo construído permitiu uma captura de CO₂ em escala industrial, utilizando um dispositivo de custo viável, baixa taxa de bombeamento da solução química e energia requerida para os ventiladores e, também, mínimo uso de espaço territorial. Durante o período de operação do protótipo – verão/outono de 2012 –, foram capturadas 2 toneladas de CO₂ do ar, sem nenhum tipo de quebra do equipamento. [15]

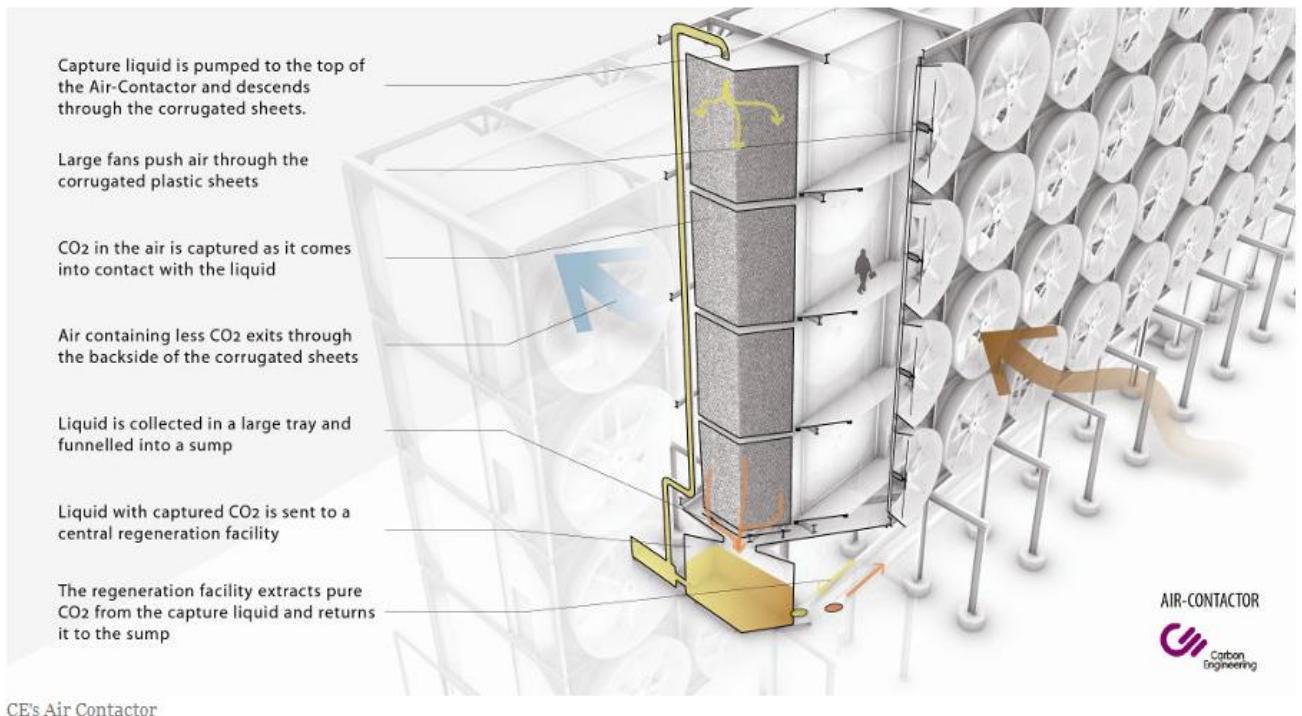


Figura 5 – Equipamento para contato entre o ar atmosférico e a solução química - Carbon Engineering [15]

5.2.2. Ciclo de regeneração

Nesta etapa, a solução química rica em CO₂ que vem do equipamento para sua captura é processada para liberar CO₂ puro e comprimido e, também, para regenerar a solução química original para uso posterior na captura de ar da atmosfera. A figura a seguir mostra uma esquematização do ciclo de regeneração e, em seguida, as etapas são descritas mais detalhadamente. Este ciclo é uma inovação da *Carbon Engineering* baseada em tecnologias industriais existentes e já conhecidas há bastante tempo.

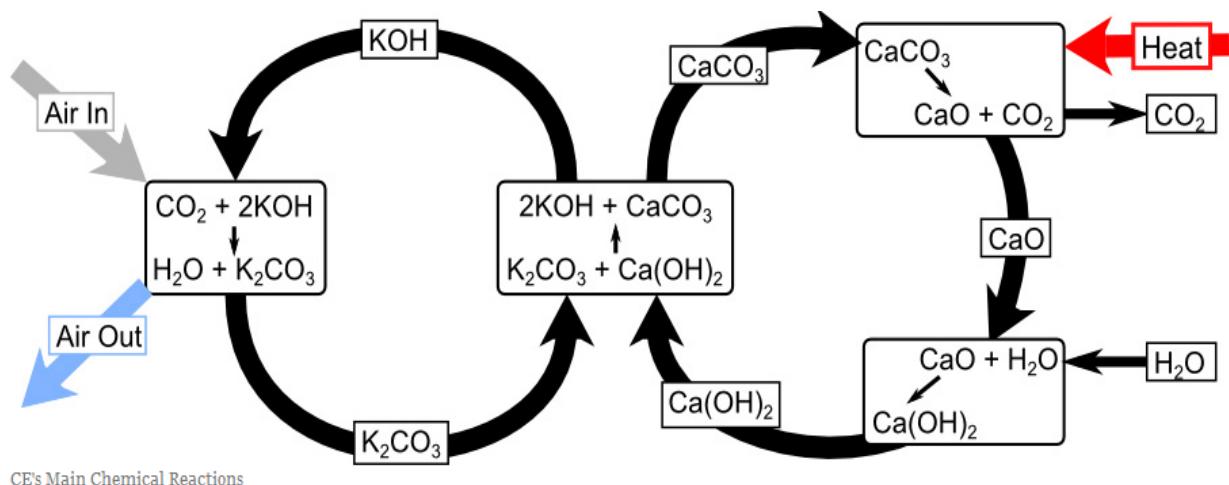


Figura 6 – Ciclo de regeneração - Carbon Engineering [15]

Após o CO₂ ser capturado no equipamento onde há o contato entre o ar atmosférico e a solução química, forma-se uma substância conhecida como carbonato de potássio (K₂CO₃), a qual é levada, dissolvida na solução, para a etapa de regeneração. Essa solução é alimentada em um dispositivo chamado de reator de palheta, o qual, simultaneamente, faz a solução reagir com hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂) de modo a regenerar o hidróxido de potássio (KOH) para reuso no equipamento para contato ar atmosférico – solução química, e precipita o CO₂ para fora da solução na forma de carbonato de cálcio (CaCO₃).

Uma vez separado da solução, o carbonato de cálcio é levado a um dispositivo chamado de calcinador, o qual, operando em uma temperatura em torno de 900°C, faz com que o CaCO₃ se decomponha em óxido de cálcio (CaO); durante esse processo, CO₂ é liberado na forma de gás. O calcinador queima combustível – como gás natural –, em um ambiente oxigenado para suprir a necessidade de energia térmica para a realização dessa reação. Além disso, calor também é gerado para suprir a necessidade de energia elétrica para o restante da planta de captura de ar. O CO₂ produzido na queima de combustível mistura-se ao CO₂ capturado da atmosfera e todo o CO₂ é levado para um estágio final de compressão e purificação, formando-se um produto de qualidade a ser fornecido por meio de gasodutos.

Após os sólidos terem liberado seu CO₂, eles são levados para um tanque de mistura onde reagem com água, formando, novamente, o hidróxido de cálcio (Ca(OH)₂). Este hidróxido de cálcio é reciclado para reuso no reator de palheta. [15]

5.3. Análises de funcionamento – estudo de protótipo

Conforme relatos na referência [16], a *Carbon Engineering* construiu um protótipo para captura de ar com capacidade volumétrica de 10 m³, absorvendo dióxido de carbono do ambiente durante um período de 1000 horas de operação em ambiente externo. O intuito deste protótipo foi possibilitar a análise da eficácia de fatores associados à tecnologia desenvolvida. A saber, quatro foram os principais focos estabelecidos:

- Testar o projeto do capturador de ar, baseado em fluxo cruzado, material de enchimento de PVC e método pulsátil de alimentação de solução química, em operação num ambiente operacional;
- Avaliar a energia requerida pelo projeto para o funcionamento dos ventiladores e para o bombeamento da solução química;
- Analisar os possíveis riscos técnicos e de segurança relacionados à perda de solução química por meio de gotículas na região de saída do capturador de ar;
- Examinar a influência da fixação de partículas contidas na atmosfera em componentes do equipamento ou na própria solução química.

Nesta seção, serão apresentados os métodos e resultados obtidos por meio do estudo realizado a partir do protótipo construído para os objetivos citados. Todos os dados e informações a serem mencionados estão de acordo com registros contidos na referência bibliográfica [16].

5.3.1. O protótipo da Carbon Engineering

O protótipo construído consiste em um equipamento para o contato entre o ar atmosférico e a solução química cuja geometria é constituída por chapas, sendo elas preenchidas por material de enchimento estrutural de PVC no qual se fornece uma forte solução de hidróxido. Essa solução forma um filme neste material de enchimento e sua natural afinidade com o CO₂ remove-o do ar que passa através dos canais do material de enchimento do equipamento. Ventiladores são utilizados para direcionar o fluxo de ar, sendo que o dispositivo opera com fluxo cruzado, onde o ar passa no sentido horizontal enquanto que a solução química é bombeada para o topo e distribuída pelos materiais de enchimento de PVC por meio da ação da gravidade. Como mostrado na seção anterior, no processo completo de captura de ar, a solução química de hidróxido que contém o CO₂ capturado na forma de íons carbonato deve ser posteriormente processada para a liberação de dióxido de carbono puro e para a reconstituição do hidróxido original.

A configuração do protótipo construído deve-se ao fato de que, ao invés da maximização da fração de captura de CO₂ da atmosfera, a *Carbon Engineering* buscou uma alternativa para minimizar o custo total envolvido no processo de captura do dióxido de carbono (em \$/ton-CO₂). A utilização de chapas no equipamento para contato diminui a área de base requerida e também permite a utilização do próprio vento para o direcionamento parcial do fluxo de ar e condução da recirculação. O material de enchimento estrutural de PVC é barato (quando comparado aos aços inoxidáveis utilizados em colunas de purificação de gases, por exemplo) e apresenta baixa resistência, o que minimiza a necessidade de energia gerada pelos ventiladores durante o processo de captura de CO₂ em alto desempenho. Outro fator relevante é a utilização de fluxo de líquido intermitente, que permite a redução da energia de bombeamento requerida para o equipamento. O projeto envolvendo todo esse conjunto de concepções foi patenteado em 2009 pela *Carbon Engineering*. Embora estudos realizados pelos engenheiros da empresa tenham mostrado que este projeto é bastante rentável, a absorção de CO₂ por meio de um

capturador de ar baseado em fluxo cruzado utilizando material de enchimento de PVC e fluxo intermitente de líquido nunca foi testado em escala real em ambiente operacional. Assim sendo, este se tornou o principal objetivo do protótipo construído.

Começando em 2010, a *Carbon Engineering* – tendo a *Flint Energy Services* como fabricante – projetou e construiu um protótipo, correspondente ao menor módulo representativo que permitisse a reprodução das propriedades de fluxo de ar e de líquido de uma configuração em escala real de um capturador de ar. Originalmente, o objetivo do protótipo era apenas o estudo do desempenho do equipamento para contato entre o ar atmosférico e a solução química pela utilização das concepções da *Carbon Engineering*. No entanto, para minimizar os custos referentes ao gasto de solução química e para examinar apropriadamente a acumulação de elementos não relacionados ao processo de captura de ar no equipamento, diversas etapas do processo de regeneração acabaram sendo construídas. O dispositivo do protótipo construído para a retenção do CO₂ do ar atmosférico utiliza uma solução de hidróxido no material de enchimento estrutural para a captura de CO₂ produzindo carbonato. Em seguida, este carbonato reage com óxido de cálcio (CaO) em um “causticizador” para precipitar carbonato de cálcio e regenerar o hidróxido para posterior reuso na captura do ar. Por fim, utiliza-se um filtro para a separação do carbonato de cálcio. No sistema completo de captura de ar, o carbonato de cálcio é aquecido para liberação de CO₂ que deve ser purificado e comprimido. Neste último processo, o óxido de cálcio também é reobtido podendo ser novamente utilizado no causticizador, fechando o ciclo químico. Por questões de restrições de gastos, o calcinador a alta temperatura não foi construído, de modo que o protótipo necessita ser alimentado por CaO para seu funcionamento e produz CaCO₃ para armazenamento. O procedimento de regeneração pode ser visualizado na figura 5 mostrada na seção anterior.

5.3.2. Especificações

O protótipo do capturador de ar foi construído com o propósito de se analisar a camada de solução química formada na parede do material de enchimento, a transferência de massa e a possibilidade da formação de incrustações, fatores que interferem significantemente no desempenho do projeto. Desse modo, torna-se importante que se tenha um conhecimento quantitativo desses fenômenos para que se possa atuar corretamente no projeto do protótipo de maneira a otimizar seu funcionamento. A figura abaixo mostra uma esquematização do equipamento para contato entre o ar atmosférico e a solução química.

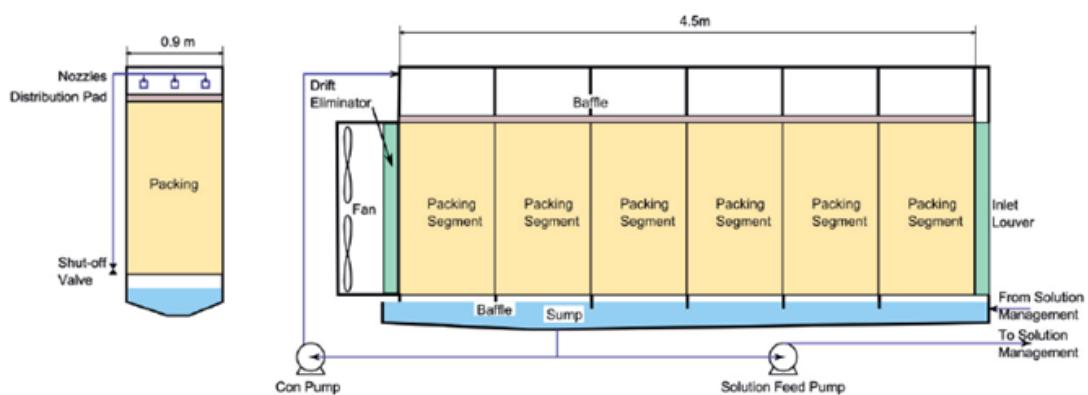


Figura 7 – Esquematização do equipamento de contato entre o ar atmosférico e a solução química
[16]

O protótipo contém 10 m³ de material de enchimento volumétrico XF12560 de PVC, da *Brentwood Industries*. Por meio de estudos realizados anteriormente em aparelhos de bancada, foi possível determinar ser este o modelo mais viável a ser utilizado para a finalidade do protótipo. As dimensões do conjunto de enchimento utilizado são: 1.8 m de altura, 0.9 m de largura e admite uma distância de trajetória do ar de 4.5 a 6m, sendo esta a distância percorrida pelo ar através do material de enchimento revestido pela solução de hidróxido. Tais dimensões foram determinadas de modo que o protótipo pudesse representar os resultados a serem esperados em um modelo em escala maior. Isso é de fundamental importância já que o processo de revestimento

do material de enchimento com a solução para captura de CO₂ está diretamente relacionado ao desempenho do equipamento.

Acima dos materiais de enchimento estrutural há um conjunto de bicos de pulverização, utilizados para distribuir a solução de hidróxido ao longo do material. Cada módulo, cobrindo uma área de 1 m² de material, apresenta 9 bicos para a distribuição do líquido, o qual imediatamente cai em um dispositivo que o distribui lateralmente, de modo a cobrir toda a superfície do material de enchimento. Após escoar pela superfície do material, o líquido é coletado em um reservatório. Uma combinação de bombas e válvulas de regulagem permite que o fornecimento de líquido para os bicos de pulverização seja realizado sob uma vasta gama de vazões.

Dois outros componentes da *Brentwood Industries* são utilizados no protótipo: na parte frontal – entrada de ar – do equipamento, utiliza-se uma “grelha” que atua como proteção a detritos contidos na atmosfera – folhas, por exemplo –, retendo-os e impedindo que um possível entupimento ou aumento da queda de pressão no interior do equipamento possa ocorrer; na região final do equipamento de contato entre o ar atmosférico e a solução química, um “eliminador de gotículas” é instalado com a função de reter gotículas derivadas da solução química utilizada na captação do ar. Este último componente é de grande importância para a operação do protótipo, já que a emissão dessas derivações da solução química pode representar um risco à segurança e ao ambiente.

5.3.3. Métodos de análise e resultados

Para o estudo da eficiência do protótipo construído, um primeiro método adotado foi o de utilizar uma grande quantidade de combinações de parâmetros de operação – concentração da solução, velocidade do ar, com ou sem fluxo de líquido durante o ciclo de trabalho – durante o funcionamento do protótipo em condições estáveis por diversos dias, de modo a permitir que as condições ambientais pudessem variar (por

exemplo, a temperatura e umidade relativa do ar capturado). Durante todo o processo de operação nessas condições, diversos dados relativos a esses parâmetros foram coletados, ou por meio de sensores instalados no equipamento ou por meio de amostragem manual, para todos os subsistemas que compõem o equipamento, de modo a permitir uma análise apropriada do funcionamento global. A partir das medidas obtidas, valores de interesse secundário puderam ser calculados, como, por exemplo, a taxa de captura de CO₂, o coeficiente de transferência de massa efetiva, potência dos ventiladores e bombas, entre outros.

Além da operação em condições estáveis, também foi estudado diversos experimentos de menor duração, voltados para obtenção de curvas de queda de pressão ao longo do equipamento e para estudo da influência da variação da taxa de fluxo de líquido na captura de CO₂. Análises minuciosas também foram realizadas com relação a diferentes concentrações da solução de hidróxido utilizada e da quantidade de partículas derivadas dessa solução na região de saída do fluxo de ar do equipamento.

Desde o outono de 2011 até o verão de 2012, a *Carbon Engineering* acumulou cerca de 1000 horas de absorção de CO₂. Durante as operações realizadas apenas no ano de 2012, cerca de 2200 ciclos de trabalho foram realizados, resultando na obtenção de aproximadamente 2 toneladas de CO₂. Os resultados relativos aos objetivos principais do estudo do funcionamento do protótipo são mostrados a seguir.

a) **Operação de longa duração**

Fazendo com que o protótipo operasse durante um longo período foi possível notar que, para a configuração inovadora do equipamento da *Carbon Engineering*, nenhum parâmetro relativo à operação apresentou valores que pudessem torná-la inviável, de modo que um contínuo desenvolvimento dessa tecnologia pode ser continuado, uma vez que a possibilidade de riscos técnicos operacionais mostrou-se improvável. O gráfico a seguir mostra a velocidade média do fluxo de ar através do equipamento

(vermelho), o coeficiente de transferência de massa efetiva – que indica o desempenho na captura de CO₂ – (azul) e a temperatura ambiente (verde) durante a operação no verão de 2012.

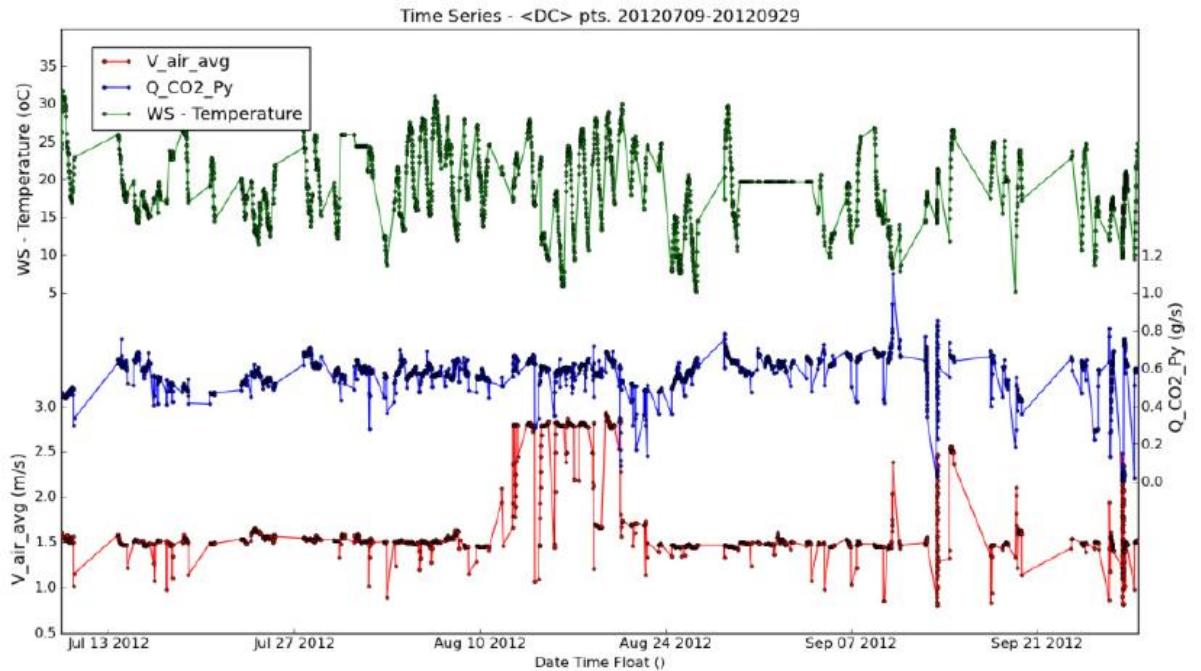


Figura 8. Gráfico representativo da operação de longa duração [16]

b) Fluxo de líquido não contínuo

Com o objetivo de diminuir a quantidade de energia requerida para o bombeamento do líquido no equipamento, a *Carbon Engineering* adotou um procedimento de fluxo de líquido pulsátil, e não contínuo. Isso foi possível pelo fato da solução de hidróxido utilizada na captura de CO₂ ser bastante concentrada, de modo que se pode aproveitar a capacidade de absorção de camadas deste líquido que se formam na superfície do material de enchimento de PVC entre um pulso e outro. Seguindo especificações técnicas relativas ao material de enchimento adotado (XF12560, da *Brentwood Industries*), utiliza-se um fluxo adequado para que se consiga molhar praticamente toda a superfície de contato entre o material e o ar, permitindo, também a formação de um filme de líquido nela. O gráfico abaixo ilustra o comportamento da taxa de fluxo de solução em pulsos (vermelho), da queda total de pressão ao longo do

material de enchimento (azul) e do coeficiente de transferência de massa efetivo (verde).

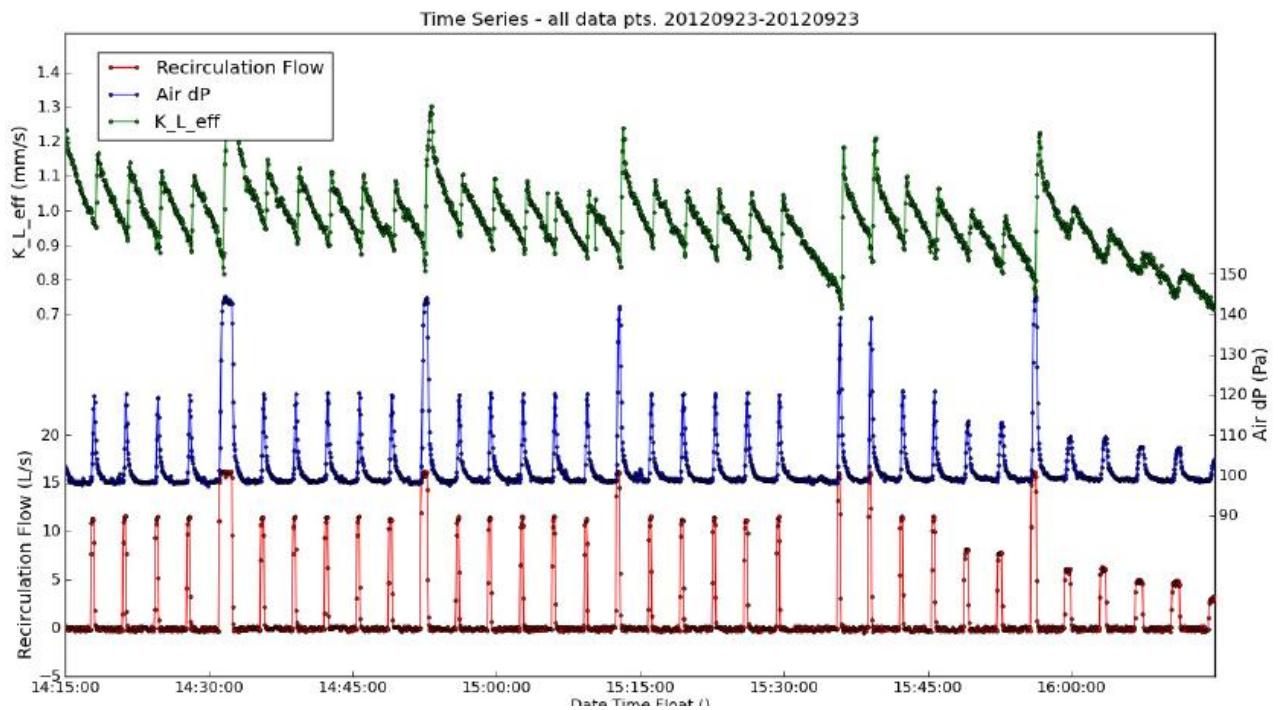


Figura 9. Gráfico da representação de parâmetros para fluxo de líquido em pulso [16]

Com a operação do protótipo utilizando-se este modo pulsátil de fluxo líquido, notou-se que o fluxo médio utilizado corresponde a cerca de apenas 10% de um fluxo contínuo. Mesmo com essa queda brusca na quantidade de fluxo, a taxa de absorção de CO₂ corresponde a, aproximadamente, 85% da absorção que se obteria utilizando fluxo contínuo. Com uma menor requisição de energia para o bombeamento do líquido, tem-se um impacto positivo em relação ao custo da tecnologia da *Carbon Engineering*, comprovando a viabilidade deste método.

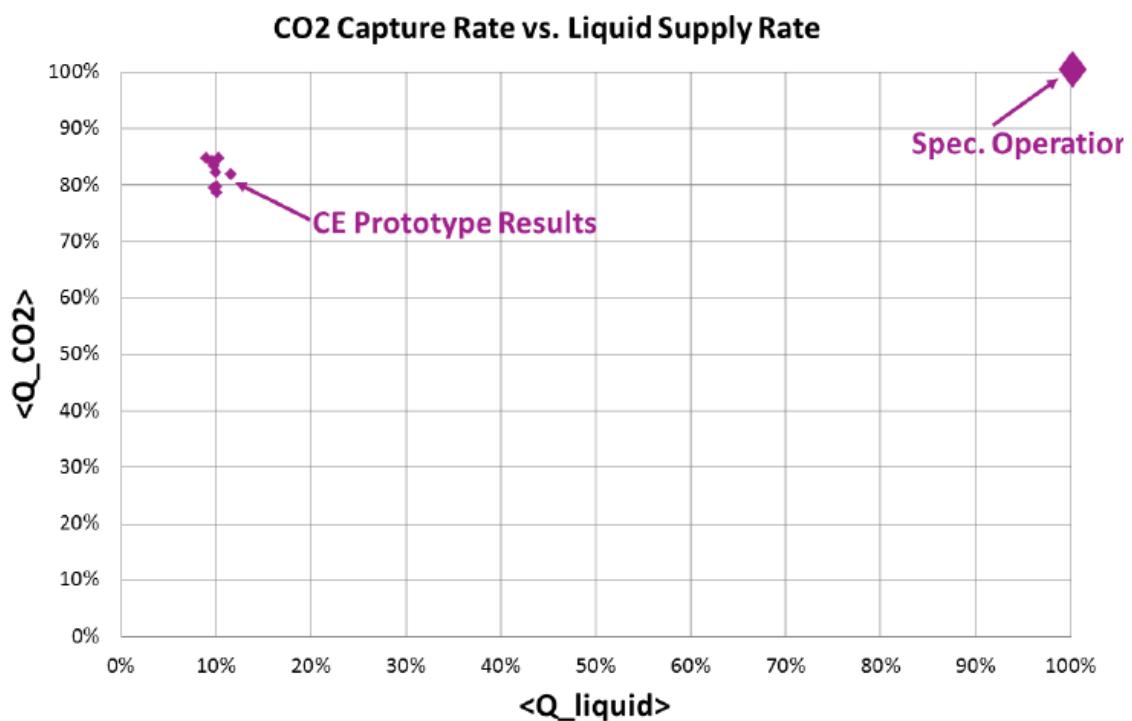


Figura 10. Gráfico da eficácia do método de fluxo de líquido em pulso [16]

c) Emissão de derivados da solução de hidróxido

Como mencionado anteriormente, este é um aspecto de grande relevância para a viabilidade operacional da tecnologia proposta, uma vez que possíveis emissões de derivados da solução química utilizada na absorção de CO₂ correspondem a riscos ambientais e de segurança. De acordo com a OHSA (*Occupational Health and Safety Act*), o limite máximo à exposição permissível a gotículas de hidróxido, durante um período médio de 8 horas, é de 2 mg/m³-ar.

Durante sua operação, o protótipo não apresentou emissão de derivados da solução de hidróxido acima do recomendado, sendo, portanto, viável nesse aspecto. Os valores encontrados foram menores que 5% do recomendado, como se pode observar pelo gráfico a seguir.

Drift Measurements

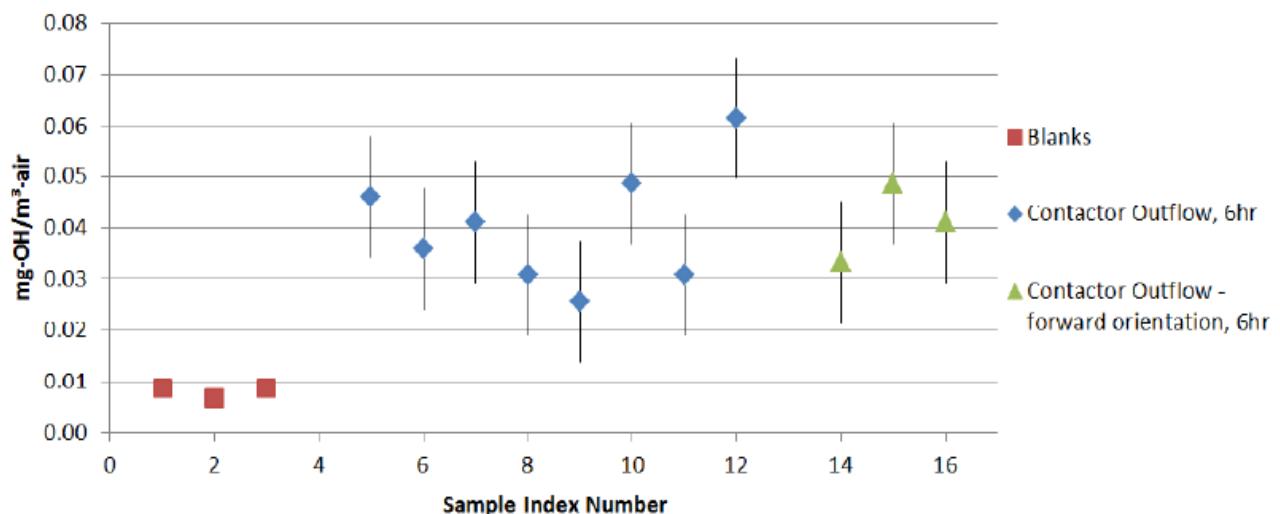


Figura 11. Gráfico da medição de derivados da solução de hidróxido emitidos [16]

d) Taxa de absorção de CO₂

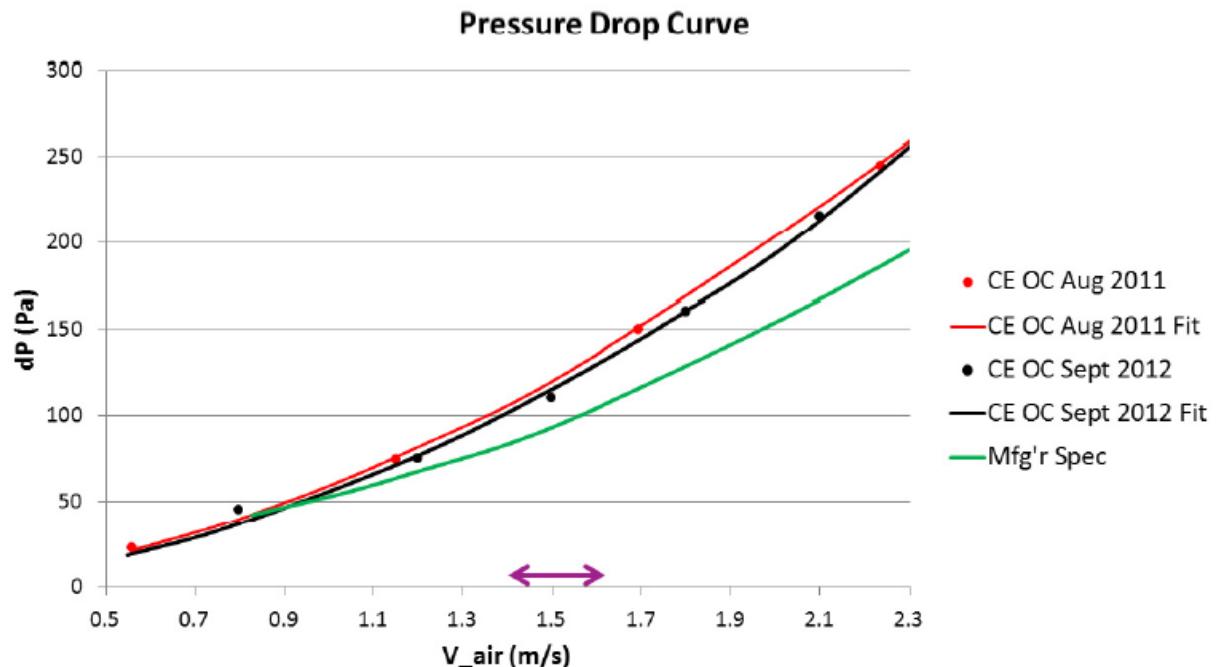
Um dos objetivos da operação do protótipo era a avaliação da taxa de absorção de CO₂ para diversas condições operacionais e ambientais. Tal fato necessita de um período operacional significativamente grande para condições abaixo do ideal em relação à absorção de dióxido de carbono, o que, no entanto, é bastante importante para adquirir dados referentes à sensibilidade do equipamento para diferentes parâmetros.

Durante a operação em condições de “alto desempenho”, observou-se uma taxa de absorção de CO₂ 30-40% menor que o esperado teoricamente, segundo análises anteriores realizadas em experimentos em menor escala. Para a *Carbon Engineering*, esse resultado se deve ao fato do protótipo apresentar uma escala menor que a real, podendo ser corrigido em protótipos de maior escala. Nota-se que pode haver uma possível interferência no custo relativo ao equipamento para contato entre o ar atmosférico e a solução química.

e) **Queda de pressão e energia requerida pelos ventiladores**

Como visto anteriormente, a taxa de absorção de CO₂ obtida durante a operação do protótipo foi menor que a esperada. Para aumentar a taxa de absorção, ventiladores podem ser utilizados para direcionar o ar através dos equipamentos para contato entre o ar atmosférico e a solução química sob uma velocidade maior. Consequentemente, tem-se como resultado uma maior queda de pressão e uma maior requisição de energia.

Durante o processo operacional, curvas do aumento da queda de pressão ao longo do tempo foram construídas. No gráfico abaixo, a curva em vermelho retrata as condições no início da operação, enquanto que a curva preta, no fim. A curva verde representa a queda de pressão esperada para a profundidade de material de enchimento utilizado no protótipo (XF12560 – *Brentwood Industries*). Dois aspectos podem ser verificados: as quedas de pressão observadas durante o funcionamento do protótipo foram maiores que o esperado, tanto no início quanto no final do processo; como as curvas vermelha e preta não apresentam diferenças significativas entre si, pode-se concluir que não se tem nenhuma comprovação de degradação física do protótipo.



*Total pressure drop shown, including inlet louver and drift eliminator.

**Liquid flow at $\sim 1.5 \text{ L/m}^2\text{s}$.

Figura 12. Gráfico das curvas de queda de pressão [16]

6. ESTIMATIVAS DA EMISSÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA (GEE) NO ESTADO DE SÃO PAULO

Devido ao crescente aumento da concentração dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera e as consequentes alterações climáticas em diversas partes do mundo, não só os governos nacionais que fazem parte da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC), mas também os governos de âmbito estadual têm adotado medidas para estimar as emissões antrópicas desses gases. Nesse sentido, o Estado de São Paulo, em 09 de novembro de 2009, instituiu a Política Estadual de Mudanças Climáticas (PEMC), lei que no seu Artigo 2º define o compromisso do Estado frente ao desafio das mudanças climáticas e o objetivo de contribuir para reduzir ou estabilizar a concentração dos GEE na atmosfera.

Nesta seção serão apresentadas estimativas relativas à emissão dos GEE e GEE indiretos no estado de São Paulo, destacando-se entre eles o CO₂. Pretende-se, com isso, fazer uma associação com a possibilidade da implementação da tecnologia da *Carbon Engineering* discutida anteriormente como alternativa para o controle de emissão desses gases na região em questão.

Os dados a serem apresentados a seguir foram retirados do *1º Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo* [17]. Esse Inventário é o resultado de uma cooperação entre a CETESB e o Governo Britânico. Nele estão estimadas as emissões de GEE e GEE Indiretos de acordo com os respectivos setores da economia. A saber, segundo a estrutura apresentada pelo IPCC, o Inventário divide-se nos seguintes Setores:

- Energia;
- Processos Industriais e Uso de Produtos;
- Agropecuária;
- Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas;
- Resíduos Sólidos e Efluentes Líquidos.

A Lei Estadual 13.798/2009 define como referência o ano de 2005, para uma meta a ser cumprida em 2020. Assim sendo, a referência do Inventário é o ano de 2005. Para os dados a serem apresentados mais adiante, estimativas relativas ao período entre 1990 e 2008 são apresentadas visando gerar uma série histórica.

A relevância de cada um dos setores inventariados na emissão de GEE no Estado de São Paulo pode ser visualizada a partir do gráfico que se segue.

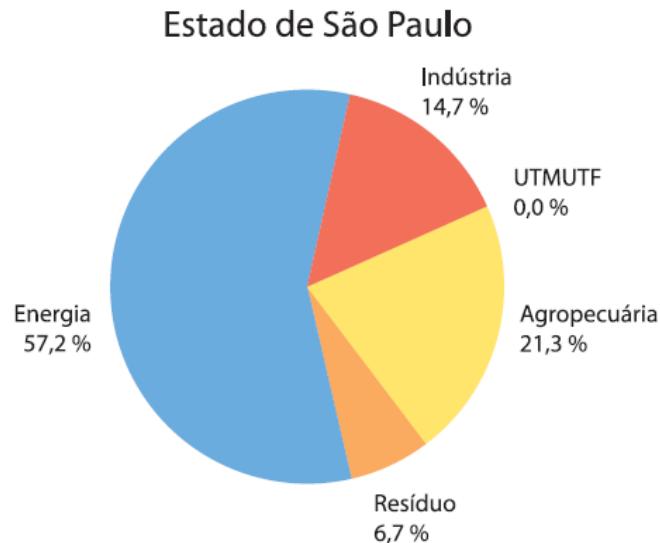


Figura 13. Gráfico das emissões de GEE do Estado de São Paulo em 2005 (%) [17]

6.1. Emissões de Dióxido de Carbono

No Estado de São Paulo, a maior parcela das emissões líquidas estimadas de CO₂ é proveniente do *Setor Energético*, que representou 84,7% das emissões em 2005, seguido pela *Indústria*, com 13,7%. O *Setor Agropecuário* contribuiu com 1,6% das emissões de CO₂.

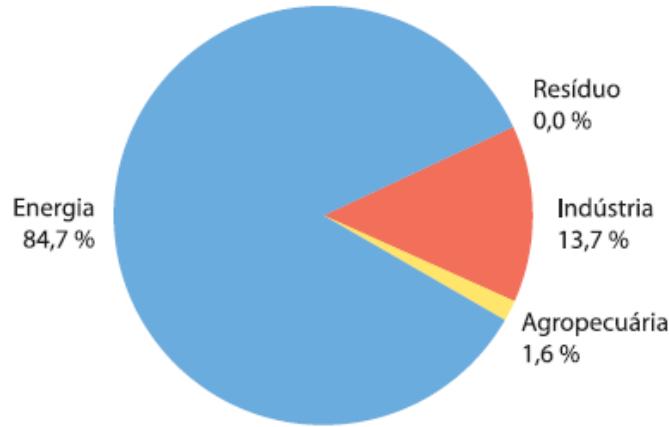


Figura 14. Gráfico das emissões de CO₂ por Setor em 2005 no Estado de São Paulo (92.762 Gg) [17]

Os Setores de *Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas e Resíduos Sólidos e Efluentes Líquidos*, no que se refere à emissão de CO₂, não tiveram participação efetiva no Estado de São Paulo, o que pode ser evidenciado por meio da tabela e gráficos a seguir.

Tabela 1 – Emissões de CO₂ de acordo com os setores envolvidos no Estado de São Paulo (Gg) [17]

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
	[Gg _{CO₂} ano ⁻¹]									
Energia	56.395	58.043	58.629	59.725	64.795	67.095	74.634	79.800	80.748	81.278
Indústria	3.396	3.540	3.046	3.011	3.268	3.724	4.300	4.738	4.744	4.495
Agropecuária	931	968	1.509	1.589	2.009	1.479	1.512	1.639	1.583	1.410
Resíduo	0,01	0,31	20,36	8,21	12,70	12,70	12,70	13,31	13,22	16,58
UTMUTF	NE	NE	NE	NE	NE	0	0	0	0	0
Total	60.722	62.552	63.205	64.333	70.085	72.311	80.460	86.189	87.088	87.200
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
	[Gg _{CO₂} ano ⁻¹]									
Energia	80.161	78.298	75.852	76.636	77.996	78.584	79.375	83.221	85.335	
Indústria	4.577	3.978	3.864	3.394	3.418	12.685	12.281	12.968	12.218	
Agropecuária	1.462	1.380	1.408	1.691	1.327	1.476	1.805	1.865	1.462	
Resíduo	19,04	16,92	16,92	16,92	16,92	16,92	17,98	18,84	19,69	
UTMUTF	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Total	86.219	83.672	81.140	81.738	82.758	92.762	93.478	98.074	99.034	

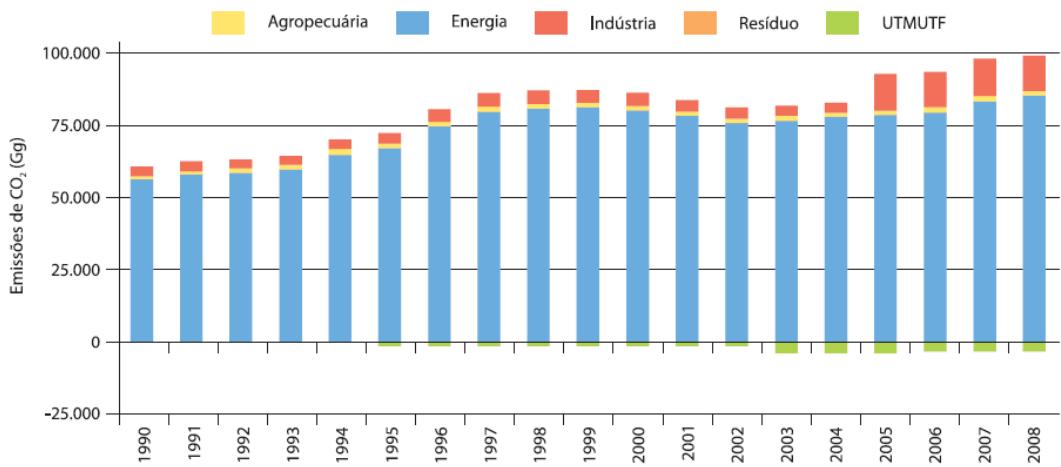


Figura 15. Gráfico das emissões de CO₂ no Estado de São Paulo (Gg) [17]

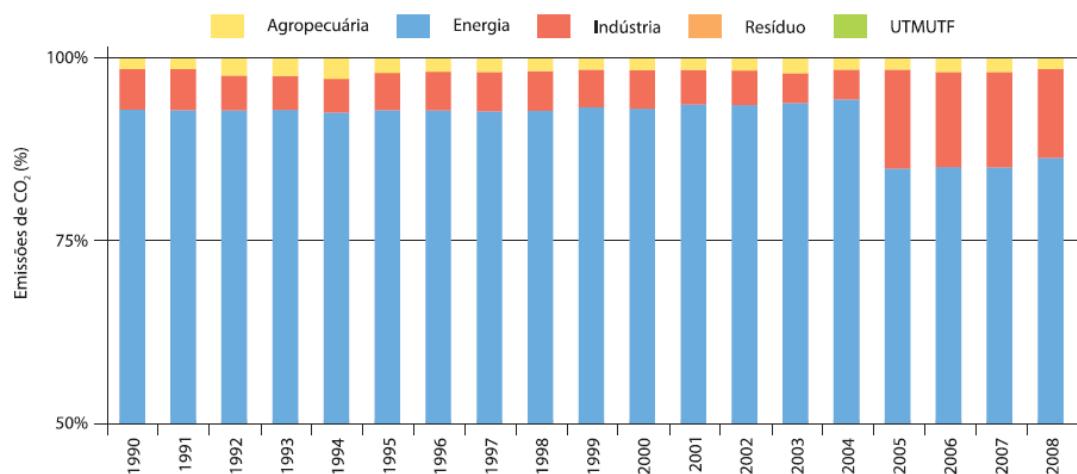


Figura 16. Gráfico das emissões de CO₂ no Estado de São Paulo (%) [17]

Serão mostrados maiores detalhes das estimativas de emissão de GEE com relação a cada um dos três setores de maior relevância para o estado de São Paulo, de acordo com os dados acima mostrados: Energia, Processos Industriais e Uso de Produtos e Agropecuária. Os demais não serão abordados.

6.1.1. Setor Energético

Neste Setor são estimadas todas as emissões antrópicas devidas à produção, transformação e ao consumo de energia. Isso inclui tanto as emissões resultantes da queima de combustíveis quanto às de fugas na cadeia de produção, transformação, distribuição e consumo de energia. Este Setor é subdividido nas seguintes categorias: *Queima de Combustíveis, Refino e Transporte de Óleo e Derivados e Transportes*. Para o intuito deste trabalho, apenas as estimativas de emissões referentes à última das subcategorias citadas serão apresentadas.

No subsetor de Transportes, foram inventariados o transporte Aéreo, Ferroviário, Aquaviário e Rodoviário do estado. As emissões totais de GEE para este setor estão representadas nas tabelas e gráfico a seguir.

Tabela 2 – Emissões Totais de GEE no Subsetor de Transporte no Estado de São Paulo (Gg) [17]

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
	[Gg.ano ⁻¹]									
CO ₂	23.038	24.204	24.494	24.836	27.580	29.252	33.494	36.837	37.367	38.015
CH ₄	29	31	29	29	30	29	31	30	26	28
N ₂ O	23	22	21	22	24	23	26	31	32	34
NOx	279	294	297	297	311	319	344	354	338	336
CO	1.885	1.988	1.885	1.827	1.849	1.725	1.678	1.466	1.183	1.177
VOC	327	338	317	303	301	276	264	229	185	184
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
	[Gg.ano ⁻¹]									
CO ₂	37.541	37.510	37.171	35.239	36.093	36.895	36.771	38.479	38.872	
CH ₄	23	19	17	16	16	15	15	14	14	
N ₂ O	31	26	22	21	21	19	18	17	16	
NOx	321	310	307	280	282	272	258	263	265	
CO	897	750	712	608	616	550	527	506	468	
VOC	141	118	112	96	98	88	86	84	79	

Tabela 3 – Emissões Totais de GEE no Subsetor de Transporte no Estado de São Paulo (Gg_{CO2eq}) [17]

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
	[Gg _{CO2eq} ano ⁻¹]									
CO ₂	23.038	24.204	24.494	24.836	27.580	29.252	33.494	36.837	37.367	38.015
CH ₄	613	644	619	605	623	615	649	624	550	578
N ₂ O	7.136	6.830	6.519	6.939	7.519	6.995	8.050	9.687	10.017	10.694
Total	30.787	31.678	31.632	32.380	35.722	36.863	42.193	47.148	47.934	49.287
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
	[Gg _{CO2eq} ano ⁻¹]									
CO ₂	37.541	37.510	37.171	35.239	36.093	36.895	36.771	38.479	38.872	
CH ₄	474	393	363	331	336	322	321	303	296	
N ₂ O	9.742	7.914	6.697	6.372	6.414	5.847	5.595	5.408	4.868	
Total	47.757	45.817	44.231	41.942	42.844	43.065	42.687	44.190	44.037	

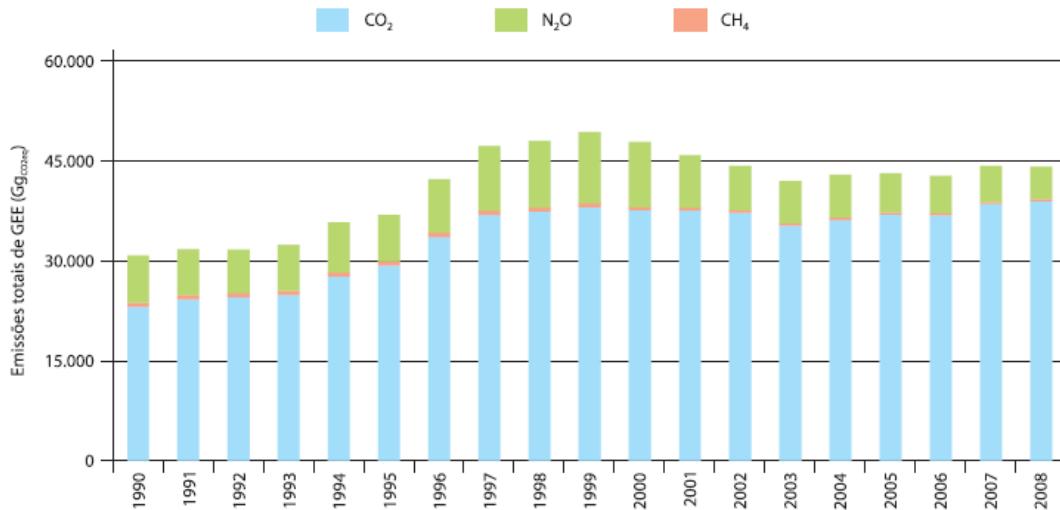


Figura 17. Gráfico das emissões Totais de GEE no Subsetor de Transporte no Estado de São Paulo (GgCO2eq) [17]

6.1.2. Processos Industriais e Uso de Produtos

São considerados os seguintes Subsetores do Setor de Processos Industriais e Uso de Produtos: Produção de Cimento, de Cal, Química, Metalúrgica, de Alimentos e Bebidas, de Vidro, de Papel e Celulose, e Uso de Solventes e Outros Produtos, o que inclui as Emissões Fugitivas do Subsetor de Distribuição de Eletricidade, Fabricação e Uso de Espumas, Uso de Aerossóis, Uso de Solventes e Agentes de Limpeza e Refrigeração e Ar-Condicionado. Nos Processos Industriais e Uso de Produtos, são

estimadas as emissões antrópicas resultantes dos processos produtivos da indústria, que não são resultado da queima de combustíveis, estas últimas relatadas no Setor de Energia.

As estimativas de emissão totais de GEE para este setor estão apresentadas nas tabelas e gráfico a seguir.

Tabela 4 – Emissões de GEE no Setor de Processos Industriais no Estado de São Paulo (Gg) [17]

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
	[Gg.ano ⁻¹]									
CO ₂	3.396	3.540	3.046	3.011	3.268	3.724	4.300	4.738	4.744	4.495
CH ₄	1,12	0,87	0,89	1,02	1,04	1,02	1,18	1,44	1,47	1,54
N ₂ O	11	13	12	16	16	17	13	12	19	19
HFC-134a	NE	NE	NE	NE	NE	NE	0,0	0,1	0,1	0,2
SF ₆	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0013	0,0015	0,0016
CFC-11	0,67	0,61	1,23	1,23	1,24	1,23	1,08	1,10	1,14	1,14
CFC-12	0,11	0,12	0,14	0,16	0,21	0,25	0,24	0,23	0,22	0,24
CFC-113	0,26	0,23	0,17	0,11	0,09	0,07	0,04	0,02	0,02	0,02
HCFC-22	0,7	0,7	0,8	0,8	0,9	1,0	1,0	1,1	1,2	1,6
HCFC-141b	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE	NE
VOC	59	65	70	77	84	90	96	104	101	133
NO _x	1,0	1,2	1,4	1,7	2,4	2,4	2,4	2,7	2,8	2,9
CO	3,5	4,4	5,3	6,2	9,0	9,1	8,8	10,0	10,3	10,9
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
	[Gg.ano ⁻¹]									
CO ₂	4.577	3.978	3.864	3.394	3.418	12.685	12.281	12.968	12.218	
CH ₄	1,52	1,47	1,34	1,50	1,58	1,51	NE	NE	NE	
N ₂ O	20	16	20	18	22	23	NE	NE	NE	
HFC-134a	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	
SF ₆	0,0016	0,0016	0,0017	0,0018	0,0019	0,0020	0,0020	0,0021	0,0022	
CFC-11	1,39	1,39	0,34	0,03	0,03	0,03	0,04	0,04	0,04	
CFC-12	0,24	0,20	0,21	0,19	0,19	0,18	0,20	0,20	0,18	
CFC-113	0,02	NE								
HCFC-22	1,8	1,6	1,9	1,9	2,0	2,1	2,4	2,4	3,0	
HCFC-141b	NE	NE	0,6	0,7	0,8	0,8	0,8	1,1	1,1	
VOC	146	112	139	162	171	185	190	217	214	
NO _x	3,0	3,0	3,1	3,8	4,4	4,6	5,1	5,3	5,4	
CO	11,4	11,2	11,6	14,2	16,5	17,1	18,9	19,9	20,2	

Nota: NE - Não Estimado

Tabela 5 – Emissões Totais de GEE no Setor de Processos industriais no Estado de São Paulo (GgCO₂eq) [17]

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
	[GgCO ₂ eq.ano ⁻¹]									
CO ₂	3.396	3.540	3.046	3.011	3.268	3.724	4.300	4.738	4.744	4.495
CH ₄	23	18	19	21	22	21	25	30	31	32
N ₂ O	3.261	4.103	3.833	4.933	5.015	5.361	4.182	3.713	5.893	5.848
HFC-134a	NE	NE	NE	NE	NE	NE	54	125	180	245
SF ₆	31	31	31	31	31	31	31	31	36	38
Total	6.711	7.693	6.929	7.996	8.335	9.137	8.592	8.637	10.884	10.659
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
	[GgCO ₂ eq.ano ⁻¹]									
CO ₂	4.577	3.978	3.864	3.394	3.418	12.685	12.281	12.968	12.218	
CH ₄	32	31	28	31	33	32	NE	NE	NE	
N ₂ O	6.137	5.015	6.252	5.720	6.701	7.057	NE	NE	NE	
HFC-134a	334	435	517	599	689	789	911	1.064	1.231	
SF ₆	38	38	41	43	45	48	48	50	53	
Total	11.118	9.497	10.702	9.787	10.887	20.610	13.240	14.082	13.502	

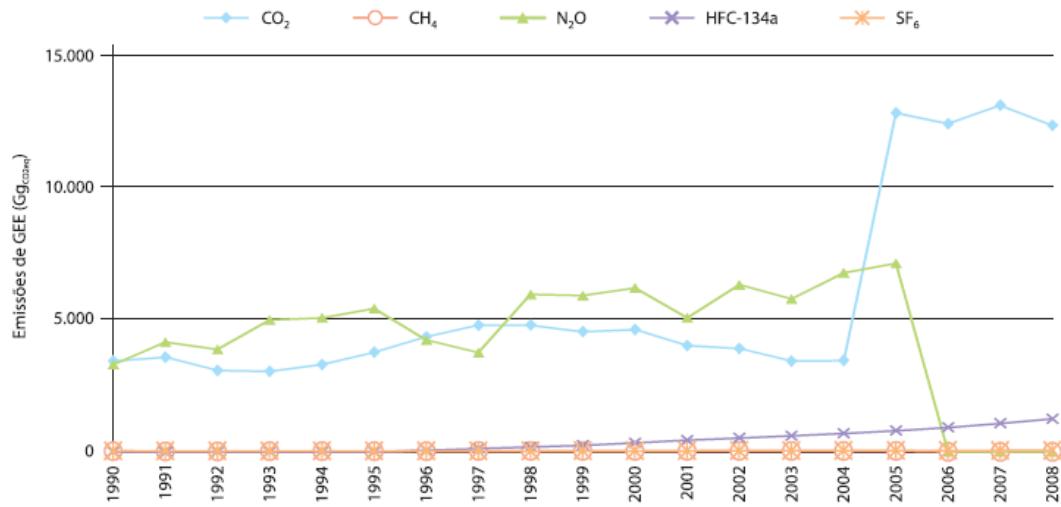


Figura 18. Gráfico das emissões Totais de GEE no Setor de Processos industriais no Estado de São Paulo (GgCO₂eq) [17]

6.1.3. Agropecuária

Devido à extensão de terras agricultáveis e disponíveis para pastagem, a agricultura e a pecuária são atividades econômicas importantes para o Estado de São Paulo. Varias

práticas resultam em emissões de GEE. As estimativas das emissões de GEE devido a este setor estão representadas nas tabelas e gráfico a seguir.

Tabela 6 – Emissões Totais de GEE da Agropecuária no Estado de São Paulo (Gg_{CO₂eq}) [17]

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
	[Gg _{CO2eq} .ano ⁻¹]									
CO ₂	931	968	1.509	1.589	2.009	1.479	1.512	1.639	1.583	1.410
CH ₄	15.405	15.386	15.607	15.932	16.179	16.399	16.061	16.035	16.016	16.357
N ₂ O	9.535	9.754	9.973	10.192	10.412	10.467	10.523	10.579	10.634	10.690
Total	25.872	26.108	27.089	27.713	28.600	28.345	28.097	28.253	28.232	28.457

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	
	[Gg _{CO2eq} .ano ⁻¹]									
CO ₂	1.462	1.380	1.408	1.691	1.327	1.476	1.805	1.865	1.462	
CH ₄	16.425	16.605	16.802	17.331	17.001	16.627	16.032	14.910	14.242	
N ₂ O	10.746	10.940	11.134	11.328	11.522	11.716	11.717	11.719	11.720	
Total	28.633	28.924	29.343	30.349	29.850	29.818	29.554	28.493	27.423	

Tabela 7 – Emissões Totais de GEE da Agropecuária no Estado de São Paulo (Gg) [17]

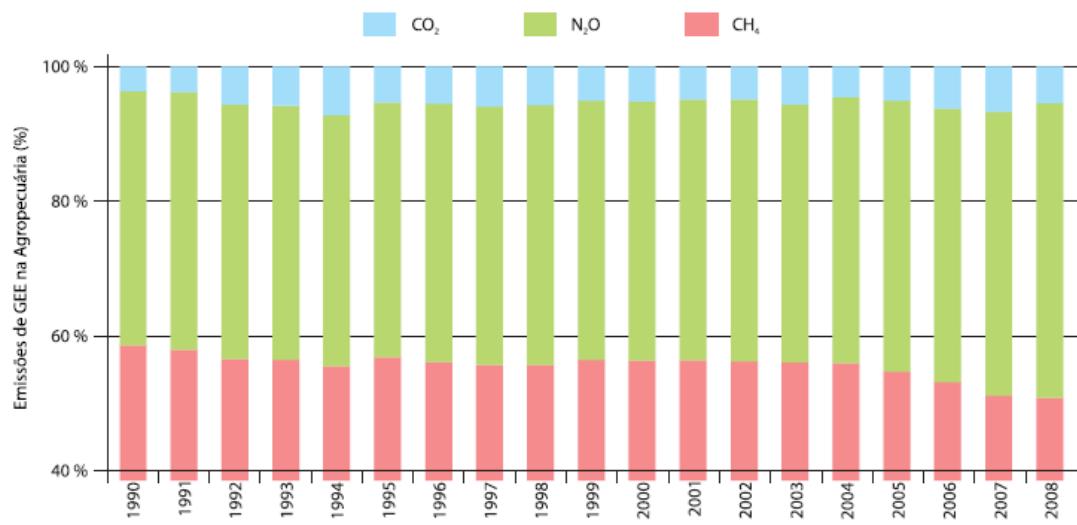


Figura 19. Gráfico das emissões de GEE na Agropecuária no Estado de São Paulo (%) [17]

7. ESTIMATIVAS E ANÁLISES

Nesta seção será feita uma análise quanto aos possíveis resultados a serem alcançados por meio da utilização da tecnologia desenvolvida pela *Carbon Engineering* dentro do cenário nacional. Para isso, serão tomados como base de estudo os dados obtidos durante a operação do protótipo construído pela empresa e também as informações levantadas anteriormente referentes à emissão de CO₂ para o estado de São Paulo. A seguir são apresentadas as hipóteses e os dados selecionados – e já mencionados ao longo deste relatório – para a avaliação a ser feita.

a) Emissão de gás carbônico em São Paulo

O 1º *Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa Diretos e Indiretos do Estado de São Paulo* admite como referência o ano de 2005 – conforme Lei Estadual 13.798/2009. Assim sendo, o estudo a ser realizado nessa seção levará em conta os dados relativos a esse ano para a análise da aplicação da tecnologia da *Carbon Engineering*. Dessa forma, considera-se um total de 92.762 Gg de CO₂ emitidos durante o ano de 2005 – de acordo com a tab. 1 na seção anterior.

Também segundo consta no Inventário, o setor do *Uso da Terra, Mudança do Uso da Terra e Florestas* foi responsável pela remoção de 3.918 Gg de CO₂ nesse mesmo ano.

Portanto, em São Paulo, tem-se um saldo de 88.844 Gg de gás carbônico lançados na atmosfera em 2005.

b) Captura de CO₂ pelo protótipo da *Carbon Engineering*

Com relação ao protótipo da *Carbon Engineering*, sabe-se que durante o período de operação – de outono de 2011 até o verão de 2012 – foram acumulados cerca de

1000 horas de absorção de CO₂, sendo que com as operações realizadas apenas no ano de 2012 cerca de 2200 ciclos de trabalho foram realizados, obtendo-se aproximadamente 2 toneladas de gás carbônico capturado. Assim sendo, considerando-se que o protótipo tenha coletado essa quantidade de CO₂ durante o período de 3 meses (o que corresponderia, mais ou menos, ao tempo de operação durante o verão de 2012), para o estudo a ser realizado, estima-se que, por ano, tem-se uma coleta de aproximadamente 8 toneladas.

c) Dimensões do protótipo

Conforme discutido anteriormente, as dimensões dos equipamentos para contato entre o ar atmosférico e a solução química de cada dispositivo para a captura do gás carbônico podem ser estimadas por 6,0 x 0,9 x 1,8 m, de modo que a área territorial necessária para sua utilização é de, aproximadamente, 5,4 m².

Feitas as considerações necessárias, pode-se fazer um estudo de caso.

Nota-se que a capacidade de absorção de CO₂ para um único protótipo (8 toneladas/ano) é bastante inferior à quantidade total desse gás emitida na atmosfera no estado de São Paulo (88.844 Gg/ano). Considerando-se um cenário ideal onde todo o gás carbônico emitido pudesse ser coletado pelo conjunto de equipamentos instalados, haveria a necessidade de cerca de 11,11 bilhões de dispositivos atuando na retenção de gás carbônico, conforme o protótipo construído! É evidente que o resultado obtido é extremamente elevado quando se considera apenas o território do estado de São Paulo como possibilidade de implementação da tecnologia – no caso, seria necessária a utilização de cerca de 24% do território estadual para instalação de todos os equipamentos requeridos.

Apesar do resultado obtido ser bastante impactante à primeira vista, algumas ressalvas podem ser levadas em conta de modo a se observar relevância na estimativa realizada.

Visto que a tecnologia desenvolvida pela *Carbon Engineering* pode ser instalada em regiões distantes das fontes de emissão (sendo essa uma de suas principais vantagens), pode-se considerar o território nacional como sendo o espaço apto a ser utilizado para a implementação dos dispositivos de captura de gás carbônico. Mesmo que o espaço considerado para estudo tenha sido ampliado, continuar a utilizar os dados referentes à emissão de CO₂ apenas no estado de São Paulo para a estimativa da eficácia da utilização da tecnologia em estudo ainda é bastante relevante. Isso decorre do fato de os maiores polos referentes aos setores energéticos e industriais do Brasil estarem concentrados nesse estado, o que torna os dados referentes à emissão de gás carbônico provenientes desses setores em São Paulo serem bastante representativos ainda no cenário nacional.

Então, pode-se fazer a seguinte análise:

- Cada protótipo requer uma área territorial de aproximadamente 5,4 m²;
- Para 11,1 bilhões de dispositivos, a área requerida é de 59.994 km²;
- O território brasileiro apresenta 8.515.767 km²;
- Portanto, seria necessária a utilização de apenas 0,7% do território do Brasil para a instalação de todos os equipamentos necessários para uma situação ideal, onde praticamente todo o CO₂ emitido pelo estado de São Paulo pudesse ser capturado.

Assim sendo, nota-se que a partir das considerações feitas, as estimativas feitas aparentam ser mais razoáveis.

É importante ressaltar que o estudo realizado foi baseado na eficácia apresentada pelo protótipo construído pela *Carbon Engineering*. Dessa forma, à medida que melhorias e estudos mais aprofundados forem sendo realizados, espera-se que para equipamentos em escala industrial se tenha uma melhora na capacidade de absorção do CO₂ do ar atmosférico. Como foi mencionado durante o estudo da operação do protótipo, notou-se uma taxa de absorção do gás carbônico em torno de 30-40% menor que o esperado teoricamente para o protótipo avaliado.

Outro ponto a se considerar é que o caso adotado para o estudo inicial feito nessa seção leva em consideração uma situação ideal, onde todo o gás carbônico lançado na atmosfera pelas atividades realizadas no estado de São Paulo pudesse ser totalmente absorvido pelos equipamentos instalados. É mais adequado, no entanto, considerar que haverá uma queda da quantidade de CO₂ emitida, já que seria bastante improvável obter um saldo nulo ou negativo de taxa de emissão logo no início da utilização da tecnologia.

Pelas observações feitas anteriormente, é de se esperar que a quantidade de equipamentos a serem instalados seja muito menor que os 11,11 bilhões estimados inicialmente. Além disso, a captura de CO₂ da atmosfera foi feita com base na implementação da tecnologia desenvolvida pela *Carbon Engineering* isoladamente, sendo que outras metodologias e técnicas também podem vir a ser adotadas – lembrando que além da empresa citada, a *Global Thermostat* e a *Kilimanjaro Energy* são outras empresas que vem desenvolvendo tecnologias relacionadas à captura direta do ar.

Outro fator de extrema importância – e que até o momento ainda apresenta incertezas – refere-se aos custos vinculados aos equipamentos desenvolvidos pela *Carbon Engineering*. Este fator com certeza poderá representar um importante limitador para a quantidade de dispositivos a serem instalados para a captura de gás carbônico do ar atmosférico. Como já mencionado anteriormente em outra seção deste relatório, David Keith estimou que o custo vinculado ao processo de captura de ar estaria em torno de \$250 por tonelada de CO₂ e diz que esse preço tende a decrescer. A partir desse valor, para a análise feita (captura de 88.844 Gg de gás carbônico), nota-se que se teria um gasto em torno de \$22,211 trilhões.

Apesar de os valores obtidos anteriormente serem apenas uma estimativa feita de acordo com os diversos dados apresentados ao longo do desenvolvimento deste trabalho, nota-se que a quantidade de gás carbônico a ser retido pode vir a apresentar valores expressivos. Isso porque, segundo foi estimado, cada equipamento poderia conseguir capturar cerca de 8 toneladas de CO₂ ao longo de 1 ano de operação. Para uma quantidade razoável de dispositivos instalados já seria bastante viável no ponto

de vista relacionado à obtenção de créditos de carbono, já que para cada tonelada de CO₂ retido se tem 1 crédito de carbono para ser negociado. Uma vez que o Brasil figura entre os países emergentes que não possuem metas de redução de emissão de GEE's pelo Protocolo de Quioto, então todos esses créditos de carbono poderiam ser vendidos a países com um maior índice de emissão desses gases, fato que renderia uma maior participação do Brasil dentro do Mercado de Carbono além de lucros significativos para o país.

8. CONCLUSÕES

Pode-se notar que a crescente emissão de gás carbônico na atmosfera está fortemente vinculada ao aquecimento global, o qual, por sua vez, traz diversas consequências negativas para o planeta. Apesar das medidas de combate à emissão dos gases de efeito estufa apresentadas, sabe-se que as concentrações de CO₂ na atmosfera aumentaram em cerca de 40% desde a Revolução Industrial. As emissões desse gás são hoje 12 vezes maiores do que em 1900, uma vez que a queima de combustíveis fósseis continua sendo uma das principais fontes de geração de energia.

É evidente que essa contínua emissão de dióxido de carbono na atmosfera contribui para o aquecimento global nos últimos anos em uma escala maior que a normal. Um estudo de 1999 por Mann el ali mostra um aumento drástico na temperatura do hemisfério norte nos últimos 50 anos. Além disso, gráficos compilados pelo Instituto Meteorológico do Reino Unido e da Unidade de Pesquisa Climática da Universidade de East Anglia para a Organização Mundial de Meteorologia, mostram que os 10 anos mais quentes do mundo desde 1856 estão localizados entre 1990 e 2000.

A perspectiva mais otimista para o aumento nas emissões de dióxido de carbono é que as concentrações na atmosfera atingirão em 2100 o dobro dos níveis anteriores à Revolução Industrial. O cenário mais pessimista afirma que esse nível seria atingido já em 2045.

De acordo com relatório do Grupo de Trabalho III do IPCC [6], o sequestro do gás carbônico – que consiste em levar o gás para outro lugar que não a atmosfera – poderia responder por pouco mais da metade do esforço necessário para impedir que ele alcance, futuramente, concentrações perigosas na atmosfera. Essa afirmação mostra que o desenvolvimento deste trabalho – cujo intuito é o de levantar um estudo acerca da tecnologia da empresa *Carbon Engineering*, a qual pode vir a contribuir nesse processo de captura de CO₂ na atmosfera – torna-se bastante aplicável para o momento que vivenciamos.

Por meio do estudo da viabilidade da utilização da técnica de captura de ar, nota-se que, pelo menos na teoria, essa é uma técnica bastante próspera. É importante ressaltar, no entanto, que para que a atuação da captura de ar consiga reduzir as emissões de gás carbônico a uma escala realmente relevante para as questões climáticas, as pequenas empresas do ramo irão precisar gerar uma enorme indústria global, empregando milhares de engenheiros e requisitando bilhões de dólares para investimento. “Se a captura de ar for bem sucedida, terá que tomar proporções do poderio industrial”, diz David Keith. Para reduzir as concentrações de CO₂ de uma parte por milhão – tomados como sendo cerca de 390 ppm, valor considerado bastante alto para alguns cientistas – será necessária a remoção de cerca de 8 bilhões de toneladas de gás carbônico.

Dados os grandes obstáculos futuros, muitos daqueles envolvidos com a tecnologia de captura de ar alertam que a utilização desta tecnologia não representa, de maneira alguma, uma licença para que se possa continuar com a queima de combustíveis fósseis, de modo que diminuí-la é essencial para que se consigam melhores resultados em um menor intervalo de tempo.

A tecnologia que vem sendo desenvolvida pela empresa *Carbon Engineering* vem se mostrando como uma possível alternativa bastante eficaz de se combater a excessiva emissão de gás carbônico na atmosfera. A validação de diversos aspectos relacionados a essa tecnologia, conseguida por meio da operação do protótipo representativo, foi de fundamental importância para que se possam ter boas expectativas quanto à viabilidade da construção de equipamentos em escala real de projeto, o que significaria um grande avanço na questão do controle da concentração de gás carbônico na atmosfera e, consequentemente, das modificações climáticas que vem se acentuando cada vez mais em todo o planeta.

A apresentação dos dados referentes às estimativas de emissão de GEE na atmosfera do estado de São Paulo, mesmo que citando apenas o período entre os anos de 1990 e 2008, dá uma ideia de qual será o cenário no decorrer dos anos. Nota-se que a taxa de emissão de CO₂ tende a crescer com o passar dos anos (tabela 1), sendo que mais de

75% da emissão desses GEE estão vinculados ao setor de energia do estado (gráfico 9), no qual se enquadram todas as modalidades de transportes – e, portanto, as fontes móveis desses gases. Dessa forma, é bastante provável que a implementação da tecnologia desenvolvida pela empresa *Carbon Engineering* seja uma alternativa bastante eficaz para o controle da emissão de CO₂ na atmosfera do estado de São Paulo.

Essa eficácia pode ser verificada a partir das análises e estimativas realizadas por meio dos dados e informações apresentados ao longo de todo o trabalho desenvolvido. Apesar dos resultados obtidos ainda estarem cercados de algumas incertezas, já que a base de estudo utilizada foi obtida por meio da operação de um protótipo representativo, diversos pontos foram considerados e nota-se que a aplicação da tecnologia estudada apresenta benefícios não só em relação ao controle de emissões de gás carbônico em São Paulo, mas também em outros quesitos que envolvem o cenário nacional como um todo. Ressalta-se, no entanto, que é de grande importância que se acompanhe o desenvolvimento da tecnologia da *Carbon Engineering* estudada até que se atinja uma escala no nível industrial, de modo que seja possível um estudo contínuo da eficiência e viabilidade de aplicação dessa tecnologia, obtendo-se resultados cada vez mais confiáveis por meio de estimativas e análises cada vez mais precisas, inclusive no que se refere ao custo vinculado à implantação dessa tecnologia.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Instituto Carbono Brasil. Disponível em:
<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/mudancas_climaticas/efeito_estufa>.
Acesso em setembro de 2013.
- [2] Instituto Carbono Brasil. Disponível em:
<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/aquecimento_global/p=1>.
Acesso em setembro de 2013.
- [3] Instituto Carbono Brasil. Disponível em:
<http://www.institutocarbonobrasil.org.br/aquecimento_global/p=2>.
Acesso em setembro de 2013.
- [4] IPCC, 2013: **Summary for Policymakers.** In: **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [5] IPCC, 2014: **Summary for policymakers.** In: **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-32.
- [6] IPCC, 2014: **Summary for Policymakers,** In: **Climate Change 2014, Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlamser, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

[7] **Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.** Earth System Research Laboratory. Disponível em:
< http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/mlo.html#mlo_full >. Acesso em setembro de 2013.

[8] SILVA, D. H. **Protocolos de Montreal e Kyoto:** pontos em comum e diferenças fundamentais. Revista Brasileira de Política Internacional. Disponível em:
< http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-73292009000200009 >. Acesso em setembro de 2013.

[9] MENEGUIN, Fernando. **O que é o mercado de carbono e como ele opera no Brasil?** Disponível em:
< <http://www.brasil-economia-governo.org.br/2012/08/13/o-que-e-o-mercado-de-carbono-e-como-ele opera-no-brasil/> >. Acesso em setembro de 2013.

[10] **Projeto de fortalecimento das Instituições e Infraestrutura do Mercado de Carbono no Brasil.** BM&FBovespa. Disponível em:
< <http://www.bmfbovespa.com.br/pt-br/mercados/mercado-de-carbono/estudos-sobre-o-mercado-de-carbono-brasileiro.aspx?idioma=pt-br> >. Acesso em setembro de 2013.

[11] KEITH, D.W. Why Capture CO₂ from the Atmosphere. **Science**, n° 325, p. 1654-1655. Setembro de 2009.

[12] GUNTHER, M. Rethinking Carbon Dioxide: From a Pollutant to an Asset. **Environment 360**. Fevereiro de 2012.

[13] GUNTHER, M. The business of cooling the planet. **CNNMoney**. Disponível em:
< <http://tech.fortune.cnn.com/2011/10/07/the-business-of-cooling-the-planet/> >. Acesso em novembro de 2013.

[14] *Carbon Engineering* – Frequently Asked Questions. Disponível em:
< <http://static.squarespace.com/static/51957744e4b088893b86e2f3/t/51b228f9e4b0d25a229e7ca4/1370630392913/CE-Air-Capture-FAQ.pdf> >. Acesso em novembro de 2013.

- [15] *Carbon Engineering* technology. Disponível em: <<http://carbonengineering.com/our-technology/>>. Acesso em fevereiro de 2014.
- [16] KEITH, D. W. et. al. Outdoor prototype results for direct atmospheric capture of carbon dioxide. **Elsevier Ltd.** 2013.
- [17] **Inventario de emissões antropicas de gases de efeito estufa diretos e indiretos do Estado de São Paulo**, 1. : comunicacao estadual / CETESB; coordenacao Joao Wagner Silva Alves, Josilene Ticianelli Vannuzini Ferrer; Equipe Mariana Pedrosa Gonzalez ... [et al.]. - 2.ed. - São Paulo : CETESB, 2011.